



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Uso de patrones espaciales para la
validación de un modelo hidrológico
de inundaciones. Caso de estudio:
Subcuenca del río Suchiapa**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geomático

P R E S E N T A

Raymundo Mendoza Escobedo

DIRECTOR DE TESIS

Dra. Judith Guadalupe Ramos
Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016

A mis padres...

Agradecimientos:

A mis padres por permitirme estar aquí; a mi mamá por darme el regalo de la vida, por inculcarme el valor del trabajo, el sacrificio y enseñarme que con ellos es posible alcanzar cualquier meta en la vida; a mi padre por estar ahí siempre para nosotros, enseñarme el valor de la salud física, a disfrutar la vida y hacer lo que nos gusta. Les agradezco por enseñarme a aspirar a grandes cosas y motivarme a descubrir el mundo sin ponerme ninguna barrera o limitante solo con responsabilidad y disciplina. Gracias a ustedes soy quien soy y estoy donde estoy, la eternidad no me alcanzaría para agradecerles y retribuirles todo lo que me han dado, los amo.

A mi hermano por ser mi constante compañero de vida, por ser mi mejor contrincante, aquel que me impulsa a mejorar para poder seguir estando a la altura, sé que por el solo hecho de estar a su nivel o pisarle los talones estoy arriba del promedio porque él siempre lo ha estado.

A Eli, por llegar a darle un giro a mi vida, por mostrarme un lado más dulce de esta y buscar siempre mi mejor presentación como persona. Gracias por tu paciencia, tiempo y consejos, lo que soy y donde estoy, en buena medida es por ti, te amo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Ingeniería por acogerme, ser una segunda casa y brindarme una generosa formación como profesionista.

A la Dra. Judith por permitirme ser parte del Instituto de Ingeniería de la UNAM, por su paciencia, enseñanzas, consejo, tiempo, esfuerzo y dedicación invertidos este trabajo de investigación.

A todos los profesores que a lo largo de mi estancia en la facultad compartieron sus abundantes conocimientos con la única visión de formar a los mejores profesionistas.

Contenido

Contenido.....	iv
Índice de Figuras.....	vi
Índice de Tablas.....	viii
Introducción General.....	ix
1 Zona de estudio: Subcuenca del río Suchiapa.....	1
1.1 Aspectos generales.....	1
1.1.1 Cuenca hidrográfica.....	2
1.1.2 Fisiografía	4
1.1.3 Clima.....	6
1.1.4 Geología.....	8
1.1.5 Hidrología.....	10
1.1.6 Suelos.....	11
1.1.7 Vegetación.....	13
1.2 Problemática.....	15
1.2.1 Deforestación.....	15
1.2.2 Población.....	18
1.2.3 Sector Hídrico.....	20
2 Marco teórico.....	22
2.1 Cambio climático: Ciclo Hidrológico.....	22
2.1.1 Precipitación.....	24
2.1.2 Evapotranspiración.....	25
2.1.3 Escurrimiento.....	26
2.1.4 Infiltración.....	28
2.2 Inundaciones y su impacto.....	29
2.2.1 Inundaciones.....	29
2.2.2 Riesgo.....	31
2.2.2.1 Vulnerabilidad.....	33
2.2.2.2 Peligro.....	33
2.3 Patrones espaciales de inundaciones.....	35
2.3.1 Percepción remota.....	36
2.3.2 Sistemas de Información Geográfica.....	41
2.3.3 Métodos para comparar patrones espaciales de inundaciones.....	45
2.3.3.1 Modelo Flubidi.....	46
3 Datos Disponibles.....	49
3.1 Datos vectoriales.....	49
3.2 Datos ráster.....	50
3.3 Datos meteorológicos.....	53
3.3.1 Precipitación.....	54

3.3.2	Temperatura.....	57
3.4	Datos del modelo hidrológico FLUBIDI.....	60
4	Metodología.....	63
4.1	Métodos aplicados.....	63
4.1.1	Análisis espacio-temporal de las imágenes satelitales.....	63
4.1.2	Análisis del cauce y su planicie.....	69
4.1.3	Establecimiento de patrones espaciales	71
4.1.4	Comparación de patrones espaciales con el modelo hidrológico.....	72
4.2	Resultados.....	75
4.2.1	Dinámica de la cubierta forestal en la SCRS.....	75
4.2.2	Cauce y planicie de inundación.....	86
4.2.3	Patrones espaciales de humedad.....	91
4.2.4	Validación del modelo hidrológico.....	95
4.2.5	Zonas en riesgo en la SCRS.....	101
5	Conclusiones y recomendaciones.....	106
	Referencias.....	108

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación en el estado de Chiapas, México y la Subcuenca del río Suchiapa.....	1
Figura 2. Cuenca RH30 y subcuencas del río Grijalva y su regionalización.....	2
Figura 3. Subcuenca del río Suchiapa.....	3
Figura 4. Subprovincias fisiográficas de Chiapas.....	5
Figura 5. Climas del estado de Chiapas.....	7
Figura 6. Formas del relieve del sudeste de México.....	9
Figura 7. Hidrología de la región hidrológica 30 sistema Grijalva-Usumacinta.....	10
Figura 8. Hidrografía de la subcuenca del Río Suchiapa.....	11
Figura 9. Unidades de suelo en el estado de Chiapas.....	12
Figura 10. Tipos de vegetación y su distribución en Chiapas.....	13
Figura 11. Tipos de cobertura y su área ocupada en la subcuenca del río Suchiapa.....	14
Figura 12. Incendios forestales en la subcuenca del río Suchiapa captados por el satélite Landsat 5.....	16
Figura 13. Deforestación en el municipio de Villaflores.....	18
Figura 14. Interacción entre las esferas y el ciclo del agua, adaptado de "Realms of Water".....	22
Figura 15. Esquema de una onda electromagnética.....	37
Figura 16. Espectro electromagnético.....	38
Figura 17. Componentes de un sistema de percepción remota.....	39
Figura 18. Subsistemas de un SIG.....	44
Figura 19. Componentes de un SIG.....	44
Figura 20. Zona de cálculo dentro de la cual se encuentra el área de inundación.....	48
Figura 21. Estaciones climatológicas de la subcuenca del Río Suchiapa.....	54
Figura 22. Precipitación promedio mensual para la estación El Boqueron, 1975-2005.....	55
Figura 23. Precipitación promedio mensual para la estación Finca Ocotlan, 1975-2012.....	56
Figura 24. Precipitación promedio mensual para la estación de Ursulo Galvan, 1981-2012.....	57
Figura 25. Temperatura promedio mensual para la estación de El Boqueron.....	58
Figura 26. Temperatura promedio mensual para la estación de Finca Ocotlan.....	59
Figura 27. Temperatura promedio mensual para la estación de Ursulo Galvan.....	60
Figura 28.- a) Hietogramas de la Chiapilla y b) escurrimientos en la E.H. Puente Colgante I+II (1948-1979), para diferentes periodos de retorno.....	61
Figura 29.- Simultaneidad de eventos de precipitación y escurrimiento históricos en 1973, para las estaciones climática e hidrométrica de Puente Colgante I y II.....	62
Figura 30. Formato de los datos de profundidad máxima, resultado del Modelo Hidrológico.....	63
Figura 31. Metodología utilizada.....	64
Figura 32. Modelo utilizado para el cálculo de reflectancias para el sensor TM de Landsat 4.....	67
Figura 33. Modelos Utilizados para calcular índices de NDVI, TCT y BCI.....	70
Figura 34. Gradiente de un río.....	71
Figura 35. Resultados del modelo hidrológico de profundidades máximas para un Tr de 5 años en la subcuenca del río Suchiapa.....	73
Figura 36. Resultados del modelo hidrológico de velocidades máximas para un Tr de 100 años en la subcuenca del río Suchiapa.....	74
Figura 37. Resultados de severidad para un Tr de 100 años.....	75
Figura 38. Comparación entre NDVI de 1975 y 1980.....	77

Figura 39. Comparación entre NDVI de 1980 y 1992.....	78
Figura 40. Comparación entre NDVI de 1975 y 2001.....	79
Figura 41. Comparación entre NDVI de 1992 y 2001.....	80
Figura 42. Comparación entre NDVI de 2001 y 2014.....	81
Figura 43. Clasificación para el año 1975.....	82
Figura 44. Clasificación para el año 2001.....	83
Figura 45. Clasificación para el año 2014.....	84
Figura 46. Grafica que muestra la dinámica de las coberturas a través del tiempo.....	85
Figura 47. Comportamiento de la cubierta de asentamientos urbanos.....	85
Figura 48. Situación de la cubierta forestal a través del tiempo.....	86
Figura 49. Zonas donde el cauce sufrió cambios importantes.....	87
Figura 50. Cambios en la geomorfología del cauce en la zona 1 de la subcuenca.....	88
Figura 51. Cambios en la geomorfología del cauce en la zona 2 de la subcuenca.....	89
Figura 52. Cambios en la geomorfología del cauce en la zona 3 de la subcuenca.....	90
Figura 53. Cambios en la geomorfología del cauce en la zona 4 de la subcuenca.....	91
Figura 54. Unión de patrones espaciales de humedad y planicie de inundación.....	94
Figura 55. Unión de patrones espaciales de humedad y planicie de inundación.....	95
Figura 56. Comparación entre patrones espaciales de humedad y resultados de modelo hidrológico de profundidades máximas para un Tr de 5 años	97
Figura 57. Comparación entre patrones espaciales de humedad y resultados de profundidades máximas para un Tr de 50 años.....	98
Figura 58. Comparación entre patrones espaciales de humedad y resultados de profundidades máximas para un Tr de 50 años.....	99
Figura 59. Coincidencia entre áreas del modelo para un Tr de 50 años de profundidades máximas y PEH.....	100
Figura 60. Comparación de inundación del valle de la subcuenca con patrones espaciales y resultados de profundidades máximas para un Tr de 50 años.....	101
Figura 61. Viviendas tipo 1 y 3.....	103
Figura 62. Zonificación del riesgo de inundación en la subcuenca se acuerdo a la proximidad a la planicie.....	104
Figura 63. Zonificación del riesgo de inundación en la subcuenca se acuerdo a la proximidad a la planicie.....	105

Índice de Tablas

Tabla 1. Datos vectoriales descargados de la página del INEGI.....	50
Tabla 2. Información ráster descargada de la USGS y el INEGI.....	52
Tabla 3. Características espectrales y resolución para los sensores de los satélites Landsat.....	53
Tabla 4. Combinaciones posibles mediante la composición multitemporal.....	76
Tabla 5. Resultados del análisis espacio- temporal.....	82
Tabla 6. Porcentajes de similitud y error entre áreas coincidentes de los PEH y los resultados de profundidades máximas del modelo hidrológico.....	97
Tabla 7. Situación de riesgo de las localidades rurales dentro de la subcuenca del río Suchiapa.....	104

i. Introducción General

i.i Introducción

Las inundaciones son los fenómenos naturales más comunes y frecuentes, pues se presentan cada año en numerosas partes del mundo. Su origen es diverso asociándose a factores: naturales como ciclones tropicales, oleaje y marea de tormenta en las costas, y antropogénicos como la falla parcial o total de infraestructuras hidráulicas construidas por el hombre (ej. drenajes, tuberías, canales, presas), deforestación, etc. (CENAPRED, 2004).

De acuerdo con Tarbuck et al. (2013), las inundaciones cumplen un papel importante en la dinámica geomorfológica del paisaje pero cuando estos fenómenos ocupan áreas donde existen asentamientos humanos o espacios aprovechados para distintas actividades como la agricultura y la ganadería, son causa de daños o pérdidas de bienes, de infraestructura, de salud, etc. trayendo consigo pérdidas económicas y humanas lo que afecta a la sociedad y su desarrollo, al convertirse en desastres naturales.

En general, las pérdidas económicas se magnifican en aquellos asentamientos ubicados en zonas de riesgo como los valles de un río, sobre todo cuando se trata de ambientes urbanos con alta concentración de población, infraestructura y bienes de diferente índole. A diferencia de las inundaciones en zonas rurales donde el impacto es menor, ya que son centros con una actividad económica baja donde los bienes son menos al igual que los servicios, por tanto, las pérdidas son pequeñas aunque no por ello menos importantes.

Pese a que los asentamientos urbanos representan un sitio con una mejor calidad de servicios y bienes, lo que genera una actividad económica más activa, en algunos casos representan un desarrollo negativo. Esto es porque han traído consigo el cambio de uso de suelo, lo que ha generado una alteración del entorno al pasar de zonas vegetativas como humedales, selvas o bosques a zonas deforestadas. Esta alteración, modifica el clima global y, por tanto, desestabiliza los patrones del ciclo hidrológico, provocando fenómenos hidrometeorológicos donde se tienen lapsos prolongados de sequía en diversas regiones y, en otras, lluvias intensas o de mayor frecuencia (Black, 1990).

Por lo anterior, es vital conocer las características que las inundaciones puedan llegar a tener en un determinado lapso de tiempo y lugar específico, ya que permitirá un análisis de cuáles zonas son más propensas o vulnerables a sufrir daños. Además de poder hacer una proyección de la población afectada y una evaluación de las pérdidas económicas, y así plantear acciones que ayuden a mitigar las pérdidas humanas y económicas (Abhas et al., 2012).

Hoy día existen herramientas que han sido de utilidad para determinar la extensión y profundidad de las inundaciones de distinta magnitud o intervalo de recurrencia. Estas herramientas son los modelos hidrológicos, los cuales requieren información meteorológica histórica de la zona de interés, así como parámetros del río y valores hidráulicos como coeficientes de fricción de la superficie libre y del fondo del río, para simular una inundación. Sin embargo, una limitante de los modelos hidrológicos es la propia información que requieren, ya que por lo general no se cuenta con información suficiente o de buena calidad o que sea adecuada para los modelos. Asimismo, se debe considerar que existe cierto rango de incertidumbre al momento de usar modelos hidrológicos, por lo que no se puede esperar que un modelo hidrológico simule al 100% un evento; creerlo tendría errores implícitos ya que debido a la variabilidad de la información disponible y la precisión del modelo mismo, se puede esperar una sobre o sub estimación del evento, la cual se busca sea mínima (Abhas et al., 2012).

La información de eventos pasados es una forma de validar la información proveniente de la simulación de una inundación (Benito et al., 2010). En este caso, es útil comparar simulaciones para distintos periodos de recurrencia o retorno y, con base en la información disponible (meteorológica, topográfica, de características de uso de suelo, etc.) determinar la precisión del modelo empleado. Para asegurar una mejor representación de la realidad, una vez obtenidos los resultados de la modelación se pueden combinar con información topográfica, de infraestructura, de población entre otra información geográfica de interés para establecer zonas de alto riesgo por inundaciones.

Una herramienta útil que facilita la validación de una modelación hidrológica para una inundación es la percepción remota, ya sea mediante sensores portados en plataformas satelitales o aeronaves. Estos sistemas, al proporcionar una amplia visión de la superficie terrestre son capaces de captar, con una periodicidad uniforme, distintos fenómenos y procesos que ocurren en ella (Chuvienco et al., 2010). La capacidad de obtener información espectral de la superficie permite establecer,

mediante diversas técnicas, las condiciones del suelo. Por ejemplo, la saturación de agua en el suelo y la presencia de vegetación que junto con información terrestre como topografía, permite identificar las huellas o patrones de humedad que dejó algún evento hidrometeorológico.

Los patrones espaciales que es posible obtener mediante distintas técnicas de PR, ayudaran a validar los resultados del modelo hidrológico, pues debido a su origen y naturaleza hidrológica se espera que tengan una distribución representativa del comportamiento del agua dentro de la cuenca y de esta forma hacer una comparación entre los datos simulados y verdaderos para establecer la confiabilidad del modelo y, posteriormente, que sean una fuente continua y confiable de datos que puedan mejorar y alimentar las modelaciones y sus resultados.

La información satelital, la del modelo hidrológico, la topografía del terreno y demás información geográfica de interés, se integra en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Ya que es una herramienta que permiten unir diversos tipos de información, en una base georreferenciada, esto es, información que contiene datos de su posición en el espacio. Al ser la información de diversa índole o disciplinas, esta podrá ser visualizada, analizada y utilizada en distintos procesos para generar nueva información y entregar un resultado que lleve a establecer mapas y, en consecuencia, acciones que en este caso eviten o mitiguen el impacto de una inundación (Abhas et al., 2012).

ii Objetivos

El objetivo principal del trabajo es la obtención de patrones espaciales generados de eventos hidrometeorológicos extremos (inundaciones), para comparar y validar los resultados obtenidos mediante una simulación, empleando un modelo hidrológico de inundaciones, con diferentes tiempos de retorno para la subcuenca del río Suchiapa.

Los objetivos particulares son:

1. Obtener un mapa de las extensiones alcanzadas por el agua durante inundaciones históricas de los fenómenos hidrometeorológicos extremos registrados para la zona de estudio.

2. Obtener patrones espaciales
3. Obtener el porcentaje de error del modelo mediante su comparación con los patrones espaciales obtenidos.
4. Zonificar el área de asentamientos humanos de acuerdo al riesgo por inundación (alto, medio o bajo).
5. Establecer acciones que estén encaminadas a mitigar el riesgo en caso de presentarse un evento de inundación en la zona de estudio.

iii Hipótesis

¿La aplicación de patrones espaciales obtenidos con técnicas de PR es útil para la validación de modelos hidrológicos de eventos hidrometeorológicos?

¿Es posible establecer zonas de riesgo por inundación con base en dichos patrones espaciales?

iv Antecedentes

El conocimiento de los procesos naturales que se llevan a cabo en el planeta y los efectos que estos tienen en el tiempo, el clima y el espacio pueden ser mejor comprendidos mediante el uso, estudio y análisis de información obtenida a través de técnicas de percepción remota (PR). Hoy día, la PR es una herramienta fundamental pues permite aprovechar de manera óptima los recursos y espacio con que se cuenta en la superficie, minimizando las alteraciones que estos procesos puedan llegar a tener por la actividad humana. Además, mediante la planeación adecuada de crecimiento demográfico y de urbanización, se pueden llegar a mitigar los efectos de algunos fenómenos naturales.

Eventos como terremotos, huracanes, inundaciones, etc. son producto de procesos naturales del planeta (Tarbuck et al., 2013); sin embargo, cuando su ocurrencia afecta a asentamientos humanos, el estudio y análisis de los factores que desencadenan estos fenómenos, las extensiones que alcanzan, las intensidades con las que ocurren, las duraciones que tienen y que tan frecuentemente pueden ocurrir se vuelve un tema de gran importancia.

Las inundaciones son los fenómenos que más se repiten cada año en todo el mundo, los que más pérdidas económicas y daños han causado a las sociedades en

comparación con otros fenómenos naturales, es por esto que se han desarrollado diversos métodos para simular estos eventos. Entre ellos, se cuenta con los modelos hidrológicos los cuales han ido evolucionando a través del tiempo y han sido utilizados para saber qué características podrían llegar a tener las inundaciones en sitios específicos y sus consecuencias (Abhas et al., 2012). Conocer la precisión de estos modelos, o que tan apegados a la realidad son sus resultados, es primordial, pese a saber que existe un grado de incertidumbre que es inherente a ellos y a la naturaleza impredecible de las inundaciones. Así, la validación de los resultados del modelo hidrológico es una parte esencial para la creación de mapas de riesgo por inundación (Abhas et al., 2012). La comparación de los resultados del modelo con datos de acontecimientos reales es un método que permite alcanzar este fin y la aplicación de técnicas de percepción remota sobre la información satelital es una herramienta eficaz, pues gracias a sus características capta la ocurrencia de inundaciones casi en tiempo real. Asimismo, los SIG ayudan a integrar la información, almacenarla, analizarla y procesarla para obtener resultados que lleven a la validación del modelo, pero además proporciona elementos para mitigar los efectos de las inundaciones

En general, México es un país, que por su ubicación geográfica, es altamente vulnerable a los fenómenos hidrometeorológicos, ya que está en medio de dos grandes océanos: el Atlántico al este y el Pacífico al oeste, además de estar entre las latitudes donde fenómenos como ciclones tropicales se forman de manera regular (CENAPRED, 2003). Debido a estas características, el país ha sufrido a lo largo de su historia numerosos desastres naturales y las inundaciones han sido parte de un gran porcentaje de estos. Una estimación de las víctimas fatales en México a consecuencia de estos fenómenos hidrometeorológicos cuantificó 2,767 personas, lo que representa un promedio cercano a los 140 individuos fallecidos anualmente. Asimismo, la cantidad de daños totales por este tipo de fenómenos entre los años de 1980 a 1999, fue estimada en 4,537 millones de dólares, lo que en promedio arroja 227 millones de dólares en pérdidas anuales (CENAPRED, 2004). Si bien, los fenómenos como los ciclones tropicales causan grandes daños en las zonas donde cruzan, también es cierto que cumplen una importante función al proveer de agua a las poblaciones, recargando mantos acuíferos y aliviando sitios en donde las sequías también son un problema para la población.

El estado de Chiapas al estar ubicado en la parte extrema sur de México, por su clima y su configuración topográfica, es uno de los estados más afectados por fenómenos hidrometeorológicos del país (CENAPRED, 2004). Las alteraciones climáticas,

resultado en gran parte por la gran problemática de deforestación y de su situación socioeconómica, hace a esta zona una de las más vulnerable a dichos fenómenos. Huracanes como Paulina en 1997, Mitch en 1998, Stan en 2005, Andrés en 2009 y la tormenta tropical Bárbara en 2007 han afectado a la entidad en las últimas décadas registrando daños totales por más de 14,000 millones de dólares solo por estos fenómenos. Por lo anterior, el estudio y análisis de información satelital para el establecimiento de patrones espaciales remanentes de fenómenos hidrometeorológicos extremos para la validación de modelos hidrológicos de inundación en esta zona es importante y clave en la cuenca del río Suchiapa y similares.

1. Zona de estudio: Subcuenca del río Suchiapa

1.1. Aspectos Generales

El estado de Chiapas por sus variadas formas del relieve posee gran diversidad climática, geológica, hidrológica y de suelos; por lo tanto, es una entidad que goza de abundancia de recursos naturales, los cuales han sido aprovechados en distintas actividades tradicionales por los seres humanos como ganadería, agricultura y pesca. En la Figura 1 se muestra la ubicación de Chiapas en el territorio Mexicano. Sin embargo debido a factores sociales, culturales, económicos y políticos, el aprovechamiento de los recursos ha sido excesivo poniendo en riesgo la permanencia de dichos recursos naturales, lo que define al estado como una zona que presenta diversas deficiencias en comparación a la media de desarrollo nacional (Pacheco et al; 1992).

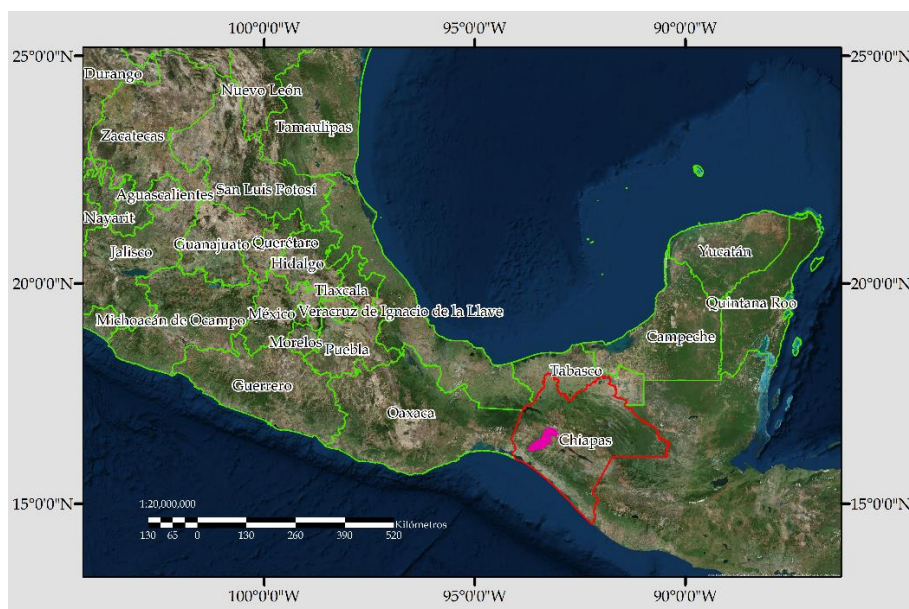


Figura 1. Ubicación en el estado de Chiapas, México y la Subcuenca del río Suchiapa.

El estado de Chiapas cuenta con una extensión de 73,670 km² y su territorio está dividido por 118 municipios (INEGI, 2014), siendo la capital del estado la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Al este de la capital fluye el río Grijalva, el cual forma al norte de la ciudad, el Cañón del Sumidero. El río Grijalva recibe las aguas de varias vertientes a través de su curso por el estado, uno de ellos es el río Suchiapa cuya subcuenca se encuentra al sur de la capital, como se muestra en la Figura 1 en color rosa. Las aguas

del río Suchiapa son aprovechadas para la agricultura, principal actividad de las entidades que abarca la subcuenca (INEGI, 2015).

1.1.1 Cuenca Hidrográfica

La subcuenca del río Suchiapa, con clave Región hidrológica (RH) 30Ei, forma parte de un grupo de doce subcuencas que forman parte de la cuenca RH30 río Grijalva-Usumacinta, la cual está conformada por siete subcuencas principales: RH30A río Usumacinta, RH30B río Chixoy, RH30C laguna de Términos, RH30D río Grijalva-Villahermosa, RH30E río Grijalva-Tuxtla Gutiérrez, RH30F río Grijalva-La Concordia y RH30G río Lacantún (INEGI, 2015).

La cuenca del río Grijalva-Usumacinta (RH30) es una cuenca transfronteriza que nace en Guatemala y abarca parte de los estados de Chiapas, Tabasco y Campeche. En particular, la cuenca del río Grijalva, en la parte que corresponde a México, está dividida en el Alto, Medio y Bajo Grijalva (Figura 2), ubicándose los dos primeros en la depresión central de Chiapas en el centro del estado, y el Bajo Grijalva en la Sierra Norte de Chiapas y la planicie costera del Golfo, la cual está en su mayoría dentro del estado de Tabasco (Rubio y Triana, 2006).

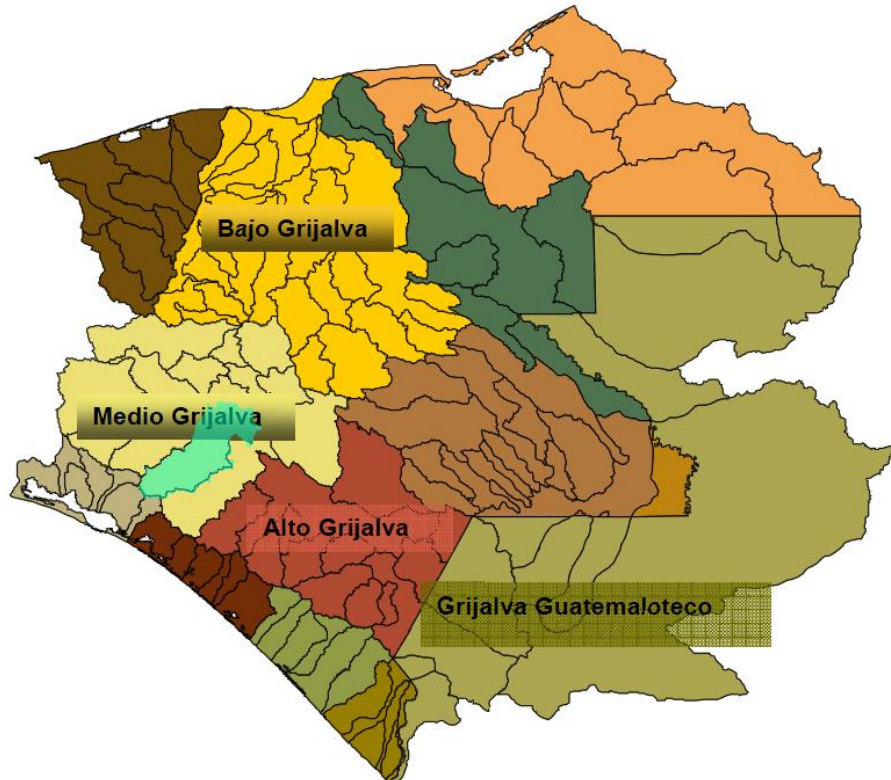


Figura 2. Cuenca RH30 y subcuencas del río Grijalva y su regionalización.
Fuente: Rubio y Triana (2006).

Según la información vectorial proporcionada por el INEGI (2010), en la Red Hidrográfica escala 1:50 000 edición 2.0, las coordenadas geográficas extremas de la subcuenca del río Suchiapa son: 16°11'21.86" a 16°44'59.81" Latitud Norte y 93°00'11.47" a 93°44'29.36" Longitud Oeste, drenando en un área de 2,046.43 km², con un perímetro de 330.97 km correspondiendo a una cuenca de tipo exorreica ubicada principalmente en la región del Medio Grijalva y en el alto Grijalva.

La subcuenca del río Suchiapa se ubica al oeste del estado de Chiapas y la contienen diez municipios: Arriaga, Berriozábal, Chiapa de Corzo, Jiquipilas, Ocozocoautla de Espinosa, Suchiapa, Tonalá, Tuxtla Gutiérrez, Villa Corzo y Villa flores, siendo los más importantes Ocozocoautla de Espinosa, Suchiapa, Tuxtla Gutiérrez y Villaflores por contener la mayor parte de su área, municipios que sumaban en el año 2010 una población de 755,096 habitantes. Dentro del área de la subcuenca mostrada en la Figura 3 existen nueve localidades urbanas: Benito Juárez, Copoya, Cristóbal Obregón, Doctor Domingo Chanona, El Jobo, Jesús María Garza, Nuevo México, Suchiapa y Tuxtla Gutiérrez (INEGI, 2010).

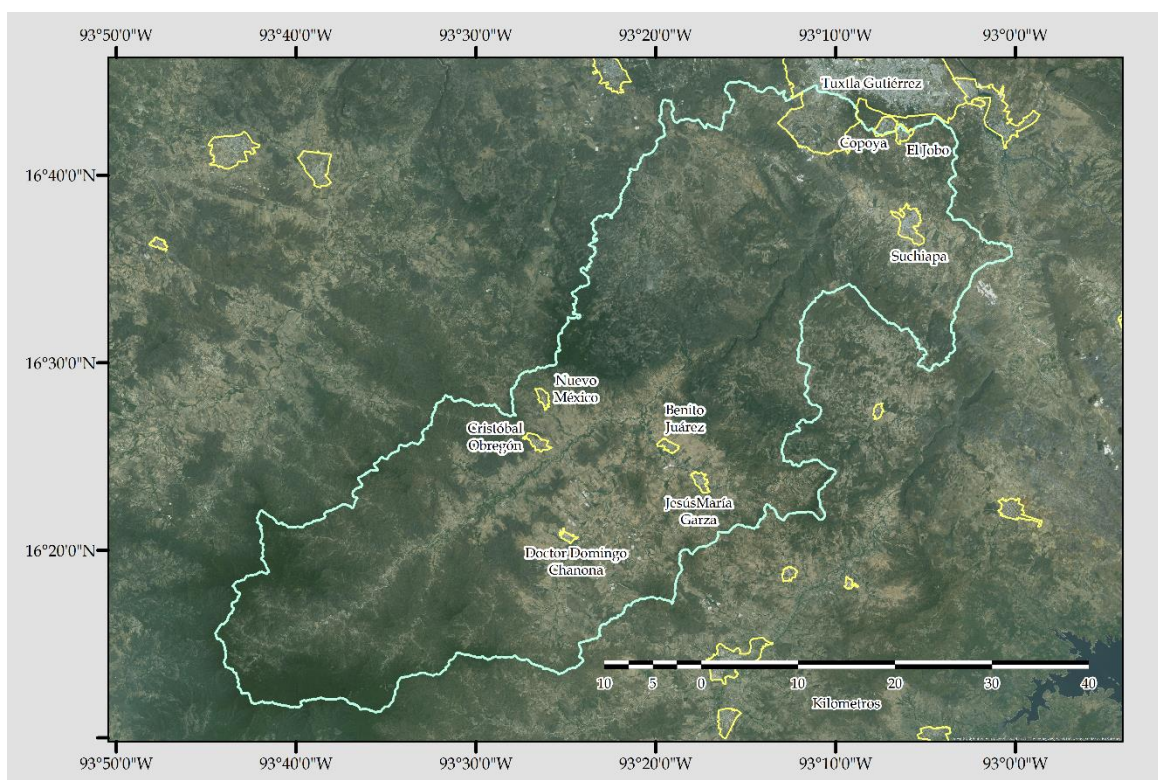


Figura 3. Subcuenca del río Suchiapa.

1.1.2 Fisiografía

La diversidad del relieve existente en Chiapas se presenta en una forma aproximada a franjas paralelas a la costa del pacífico, las cuales están identificadas como provincias o regiones fisiográficas. El estado de Chiapas se divide en tres provincias y diez subprovincias fisiográficas (CONABIO, 2013):

1. Llanura Costera del Golfo Sur, con una subprovincia:
 - a) Llanura y pantanos tabasqueños la cual ocupa la parte norte del estado.
2. Sierras de Chiapas y Guatemala, con cinco subprovincias:
 - a) Sierra Lacandona en la parte noreste del estado.
 - b) Sierras Bajas del Petén, al norte.
 - c) Altos de Chiapas, en la parte central.
 - d) Sierras del Norte de Chiapas, al norte y la discontinuidad fisiográfica.
 - e) Depresión Central de Chiapas, al sur-centro.
3. Cordillera Centroamericana, con cuatro subprovincias:
 - a) Sierras del Sur de Chiapas o Sierra Madre de Chiapas, que es una cadena montañosa que corre en dirección noroeste-sureste paralela a la línea de la costa
 - b) Volcanes de Centroamérica, ubicados al sureste.
 - c) Llanura Costera de Chiapas y Guatemala al sur, con una dirección noroeste-sureste.
 - d) Llanura del Istmo, ubicada al suroeste cercana al estado de Oaxaca.

La subcuenca del río Suchiapa, mostrada en el polígono de la Figura 4, está dividida en dirección noroeste-sureste por dos subprovincias la de Altos de Chiapas al noreste y por la Sierra Madre de Chiapas al sureste, pertenecientes a las provincias fisiográficas, de Las Sierras de Chiapas y Guatemala, y la Cordillera Centroamericana, respectivamente.

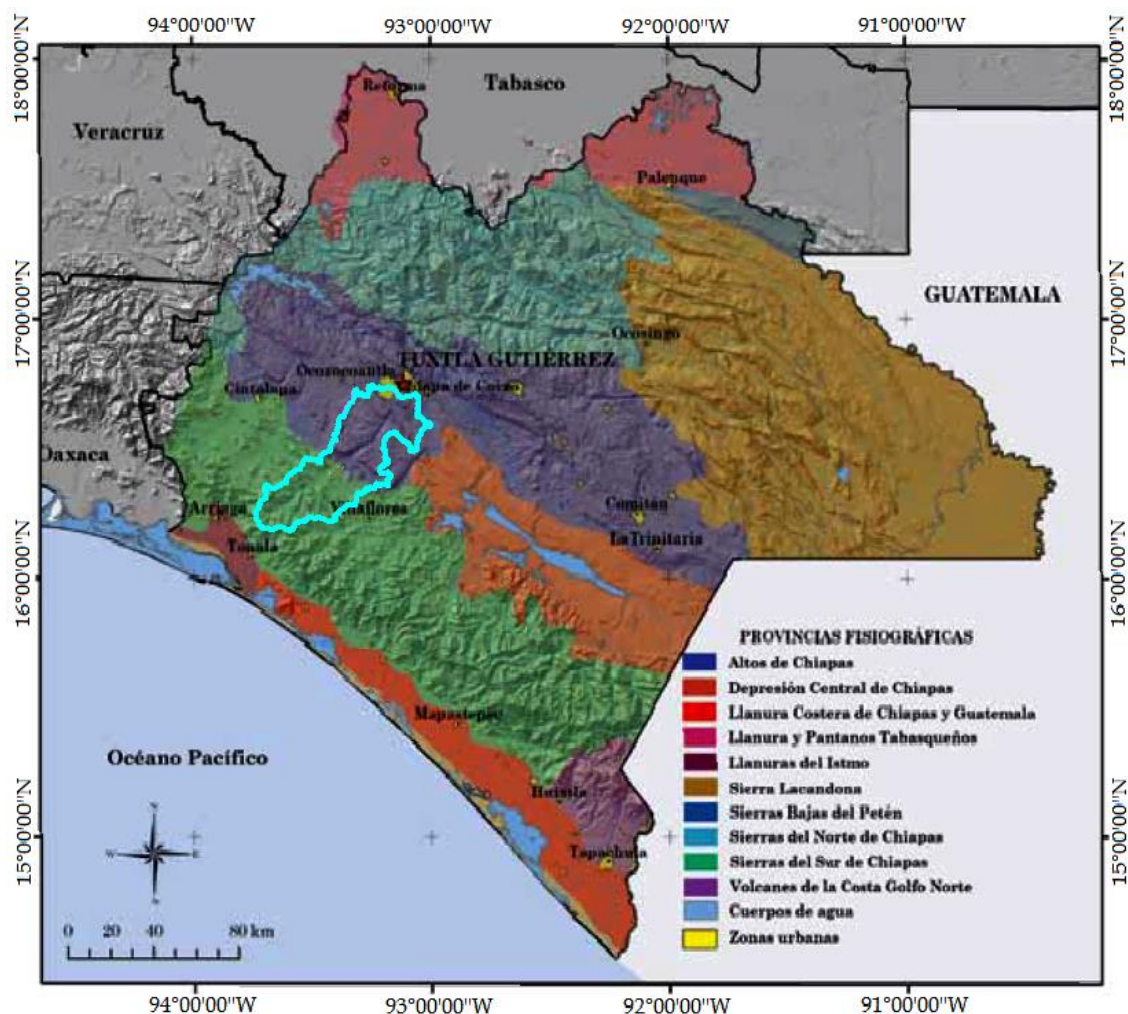


Figura 4. Subprovincias fisiográficas de Chiapas.

Fuente: CONABIO (2013).

En el relieve de los Altos de Chiapas predominan sistemas montañosos y valles de origen cárstico. Las formaciones más altas son los volcanes Tzontehuitz con 2,618 msnm (metros sobre el nivel medio del mar) y Huitepec con 2,761 msnm, los cuales son las mayores elevaciones del Altiplano Chiapaneco. Los suelos se caracterizan por ser delgados, pedregosos y de pendientes fuertes, y debido al suelo cárstico, la red hidrológica que se ha desarrollado es subterránea (CONABIO, 2013). Para Pacheco (1992), esta zona corresponde a la región de Meseta Central, cuyas extensiones aproximadas son: longitud de 160 km, ancho de 50 km y puntualiza las regiones del Altiplano más altas. Asimismo presenta una caracterización adicional de tres grandes mesetas: región de Cuxtepeques y Comitán con una elevación media de 1,600 msnm, región de Ixtapa cuya altitud aproximada es de 1,000 msnm (región que contiene al Cañón del Sumidero) y, finalmente, las regiones de Zinacantán y San Cristóbal de las Casas cuya altitud promedio 2,100 msnm.

La Sierra Madre de Chiapas o Sierras del Sur de Chiapas son un sistema montañoso cuya formación es paralela a la Llanura Costera del Pacífico, donde se encuentran las mayores altitudes del estado en el Volcán Tacaná con 4,093 msnm, ubicado al extremo sureste del estado en la frontera con Guatemala (CONABIO, 2013). Esta formación montañosa constituye el parteaguas de las dos vertientes del estado, la del Pacífico y la del Golfo, que forma parte de la Cuenca del Sistema Hidrológico Grijalva-Usumacinta cuya longitud es de aproximadamente 250 km, y un ancho de 50 km y de 65 km en el noroeste y sureste, respectivamente (Pacheco et al; 1992).

1.1.3 Clima

El estado de Chiapas cuenta con diversidad de climas que están en función de los valores de temperatura, precipitación y de relieve de la entidad. Los tipos generales de clima son: calidos(A), semicálidos (A[C]) y templados (C) (CONABIO, 2013).

Clima cálido (A): se distribuye en terrenos cuya altitud esta entre el nivel del mar hasta los 1,000 msnm y ocupa cerca de 74 % de la superficie total del estado. La temperatura media anual supera los 18° C en la costa de Chiapas y se interna al centro-sur del estado; su precipitación media anual es menor de 2,000 mm. Se subdivide en tres categorías: a) Cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw2), b) Cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (Am) y c) Cálido húmedo con lluvias todo el año (Af)

Clima semicálido A([C]): Cubre aproximadamente el 20 % de superficie del estado. Se presenta en terrenos que poseen una altitud que varía entre 1,000 y 2,000 msnm y tiene asociadas temperaturas medias anuales que van de 18 a 22° C, este tipo de clima, se encuentran tres subtipos: a) Semicálido subhúmedo con lluvias en verano (A)C(w1), b) Semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano (A)C(w2) y c) Semicálido húmedo con lluvias todo el año (A)C(w1).

Clima templado (C): Este tipo de clima presenta temperaturas medias anuales de entre 12 y 18° C y se encuentra en los terrenos que están por encima de los 2,000 msnm, los cuales representan aproximadamente 6 % del territorio Chiapaneco. Este clima se subdivide en dos tipos: a) Templado húmedo con lluvias en verano C(m)(w) y b) Templado subhúmedo con lluvias en verano C(w).

En la Figura 5 se observa la variedad de climas que se presentan y en particular aquellos presentes en la subcuenca del río Suchiapa (dentro del polígono), resultado de la configuración de su relieve y ubicación geográfica, entre los que destacan los climas cálidos y algunos de sus subclimas cálidos subhúmedos en las partes bajas de la subcuenca, así como los templados y algunos de sus subclimas templados con lluvia en verano en las partes altas de la misma.

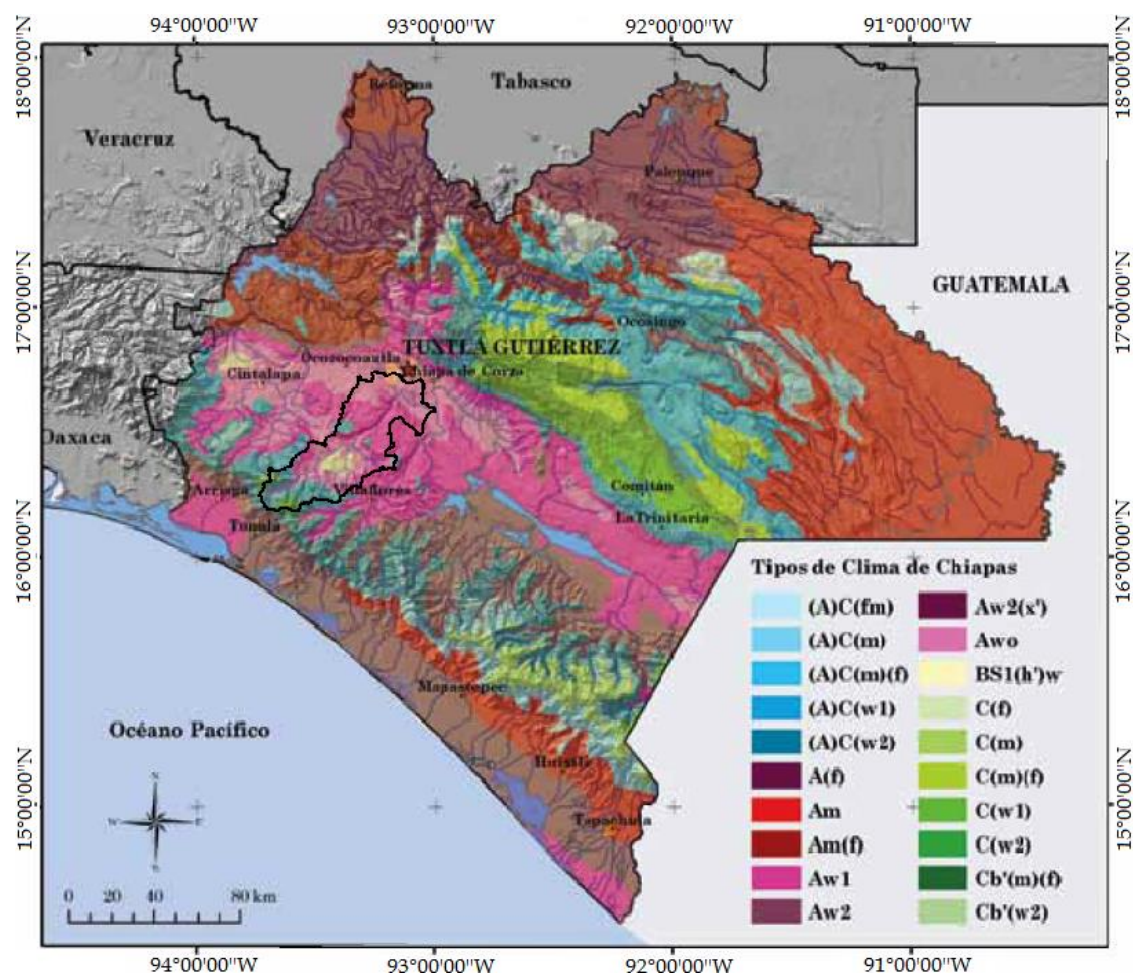


Figura 5. Climas del estado de Chiapas.
Fuente: CONABIO (2013).

Rubio-Gutiérrez y Triana-Ramírez (2006) hacen una clasificación de las lluvias de la región de acuerdo a su ubicación en la cuenca del río Grijalva, en donde en el Alto y Medio Grijalva (donde está ubicada la subcuenca del río Suchiapa) la precipitación media oscila entre los 1,200 y 1,700 mm anuales siendo de origen tropical el 95% de las precipitaciones. En la parte alta de la cuenca del Bajo Grijalva se encuentra una de las zonas de mayor precipitación del país, rebasando los 4,000 mm anuales donde

las lluvias se presentan todo el año. Finalmente en la planicie del Bajo Grijalva, la precipitación oscila entre 1,700 y 2,300 mm anuales.

1.1.4 Geología

El estado de Chiapas forma parte de la Región Chiapas, la cual abarca una porción este de Oaxaca, y se caracteriza por ser una región compleja en el plano regional ya que los movimientos neotectónicos dan lugar a los movimientos sísmicos por movimiento de las placas y por volcanes activos; El Chichón, al norte del estado, y el Tacaná, en el extremo sureste en la frontera con Guatemala. Las grandes unidades son la Sierra Madre de Chiapas o Sierra del Soconusco, la depresión de Chiapas y la Sierra Norte de Chiapas que se originaron en el Neógeno-Cuaternario.

La Sierra Madre de Chiapas, con una altitud media de 2,200-2,800 msnm, está constituida por rocas graníticas paleozoicas; se considera que estas rocas constituyen el basamento de las montañas plegadas, localizadas al noreste. Paralelamente, al suroeste de la Sierra, se extiende una planicie costera (llanura costera del Pacífico) formada por la nivelación de la base del conjunto montañoso, siendo de hasta 45 km de ancho en el Istmo de Tehuantepec y reduciéndose hasta 18 km hacia la población de Tonalá. La depresión (fosa tectónica) de Chiapas consiste en rocas sedimentarias cretácicas y terciarias (Paleoceno a Mioceno); que debido a la gran infiltración permitida por las calizas, las acumulaciones de aluviones son escasas, en cambio el relieve cárstico tiene un gran desarrollo. Paralelamente a la depresión de Chiapas y hasta el río Usumacinta, se extiende una serie de cadenas plegadas de rocas cretácicas y terciarias teniendo una anchura de 150 km terminando al norte en contacto con la planicie costera a los 100-200 msnm. Las lluvias de la región de hasta 4,000-4,500 mm anuales, junto con la neotectónica han favorecido el gran desarrollo cárstico en la superficie. El relieve cárstico, principalmente superficial en estas elevaciones de roca caliza, forma campos de lapiaz, superficies de nivelación, escalonadas de los 400 a los 2,000 msnm, donde las porciones más elevadas corresponden al altiplano (Altos de Chiapas). En las mesas cársticas se observa gran cantidad de dolinas además de formas como úvalas y poljés. Los volcanes activos en Chiapas están rodeados por rocas sedimentarias y un cuerpo intrusivo contiguo: El Chichón tuvo su última erupción en 1982, y El Tacaná que tuvo actividad en 1878 y 1950 (Lugo-Hubp, 1990). En la Figura 6 se muestran todas estas formaciones y su ubicación en el estado y la subcuenca del río Suchiapa.

La subcuenca del río Suchiapa (polígono azul de la Figura 6), en su parte baja pertenece a la subprovincia de los Altos de Chiapas, se encuentra en suelos de origen cárstico, llamados úvalas o poljés. Las rocas predominantes son las calizas, como las grutas y dolinas, es posible encontrar rocas de origen volcánico de manera aislada (CONABIO, 2013). En la parte alta de la subcuenca se ubica en la subprovincia de la Sierra Madre de Chiapas la cual está constituida esencialmente por rocas metamórficas con intrusiones graníticas de origen paleozoico (Pacheco et al., 1992).



Figura 6. Formas del relieve del sureste de México. Fuente: Lugo-Hubp (1990).

Asimismo en la Figura 6 se aprecia que las formas del relieve predominantes en la subcuenca del río Suchiapa corresponden al tipo 1 en la parte baja, el tipo 3 en la parte alta, el tipo 7 en la parte este-central de la cuenca y el tipo 21 a lo largo de la cuenca, los cuales son Montañas de rocas plegadas del mesozoico-terciarias,

municipios de Benito Juárez y Jesús María Garza, al final de su curso recibe los afluentes que vienen de las montañas de Los Altos de Chiapas ubicadas al sur de Tuxtla Gutiérrez fluyendo al sur del municipio de Suchiapa para finalmente desembocar en la cuenca del río Santo Domingo (Figura 8).

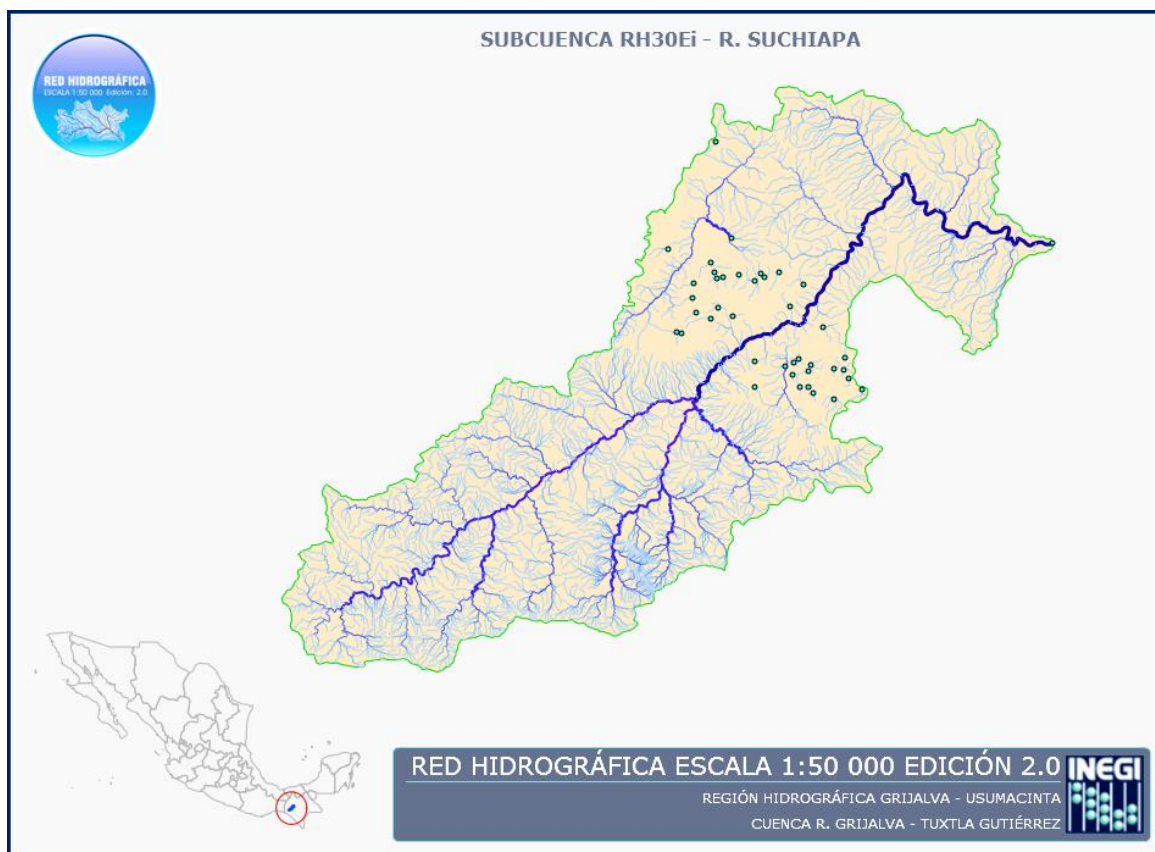


Figura 8. Hidrografía de la subcuenca del Río Suchiapa.

Fuente: INEGI, 2010.

1.1.6 Suelos

El territorio Chiapaneco tiene 15 unidades de suelo de las 25 con las que cuenta en total el territorio nacional, y tres unidades principales que ocupan el 53% del territorio del estado, los cuales son: litosoles, rendzimas y acrisoles. Los litosoles ocupan un 20% del territorio y se presentan frecuentemente en sierras, laderas y barrancas, se caracterizan por tener profundidades menores de 10 cm, con una susceptibilidad de erosión baja o ligera dependiendo del tipo de vegetación que soporten. Las rendzimas ocupan el 17% del territorio de Chiapas siendo típicos de vegetación de bosques tropicales, matorrales y presentándose en climas templados. También se caracterizan por ser suelos fértiles, con abundancia de humus, este tipo de suelo está generalmente ubicado sobre roca caliza o algún material rico en cal, no

son muy profundos y son generalmente arcillosos, su riesgo de erosión es alto si se presentan en laderas o lomas y su rendimiento para uso agrícola es bajo. Los acrisoles ocupan el 16.2% del territorio, se distinguen tres subunidades en Chiapas: hémicos, plánticos y órticos. Se presentan en regiones templadas y lluviosas presentando acumulaciones de arcilla en el subsuelo, su pH es ácido o muy ácido y tienen un rendimiento de bajo a muy bajo para uso agrícola y bajo para uso ganadero, siendo su mejor rendimiento el uso forestal, el resto lo ocupan otros tipos de suelo (CEIEG-Chiapas, 2005).

En la Figura 9 se muestra los tipos de suelo existentes en Chiapas y dentro del polígono los correspondientes a la subcuenca del Río Suchiapa. Destacan los suelos de tipo Litosol en la parte baja de la subcuenca, así como Rendzima y Yertizol en menor medida, Regosol en la parte alta, y suelos de tipo Cambisol, Luvisol, Feozem, y Planosol, en menor medida, en la parte central de la subcuenca.

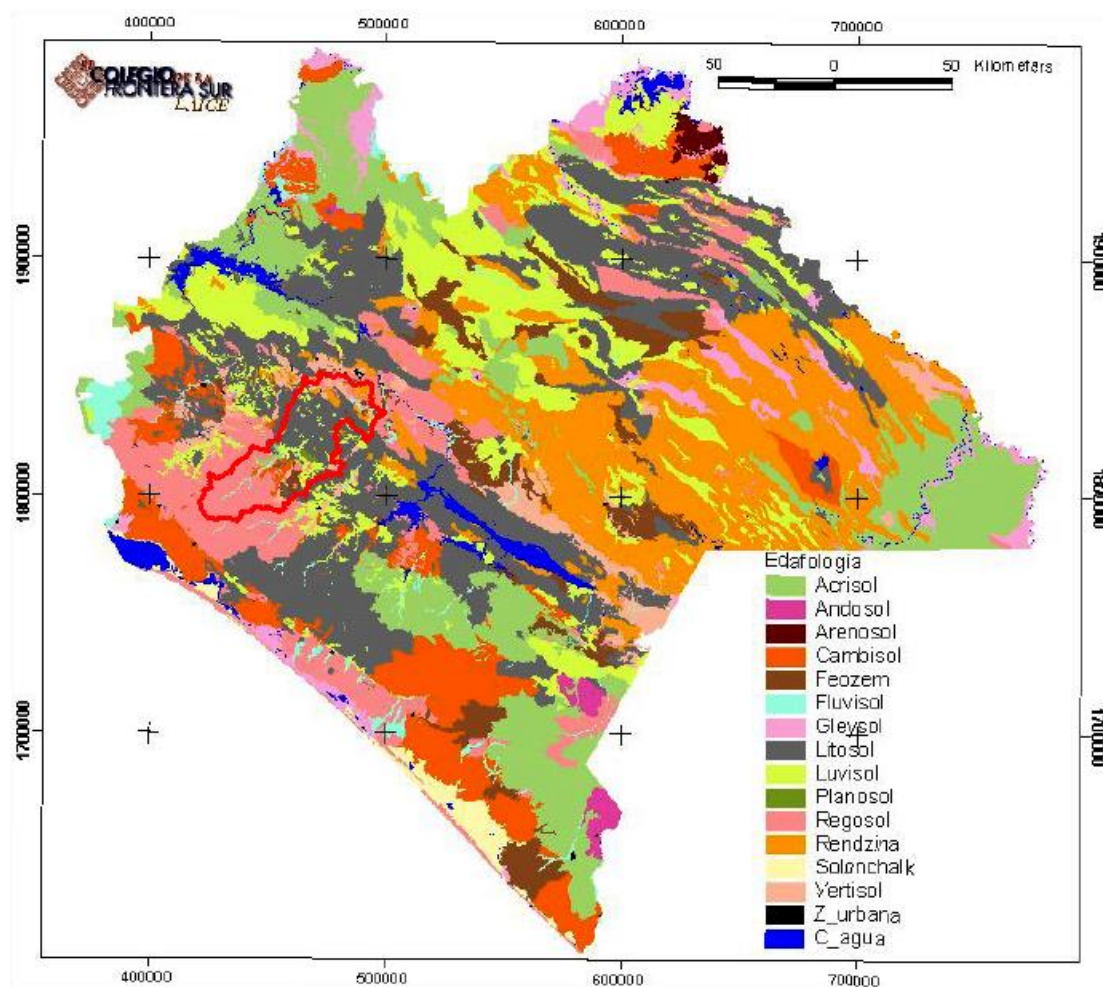


Figura 9. Unidades de suelo en el estado de Chiapas.

Fuente: CEIEG-Chiapas, 2005.

1.1.7 Vegetación

Chiapas por sus características cuenta con una diversidad muy amplia de tipos de vegetación, cuyas áreas han sido reducidas, alteradas, fragmentadas y deforestadas drásticamente debido a la necesidad de recursos de los asentamientos humanos y por la comercialización de sus maderas preciosas. Así, los ecosistemas naturales han sido sustituidos principalmente por áreas de uso agrícola, zonas urbanas y, en menor medida, ganadera (CEIEG-Chiapas, 2005).

Los principales tipos de vegetación presentes en la entidad de acuerdo con la Figura 10 son: bosques de coníferas, bosques de encino, bosques mesófilos de montaña, pastizales, selvas caducifolias, selvas perennifolias, vegetación hidrófila, vegetación inducida, vegetación secundaria, y vegetación agrícola.

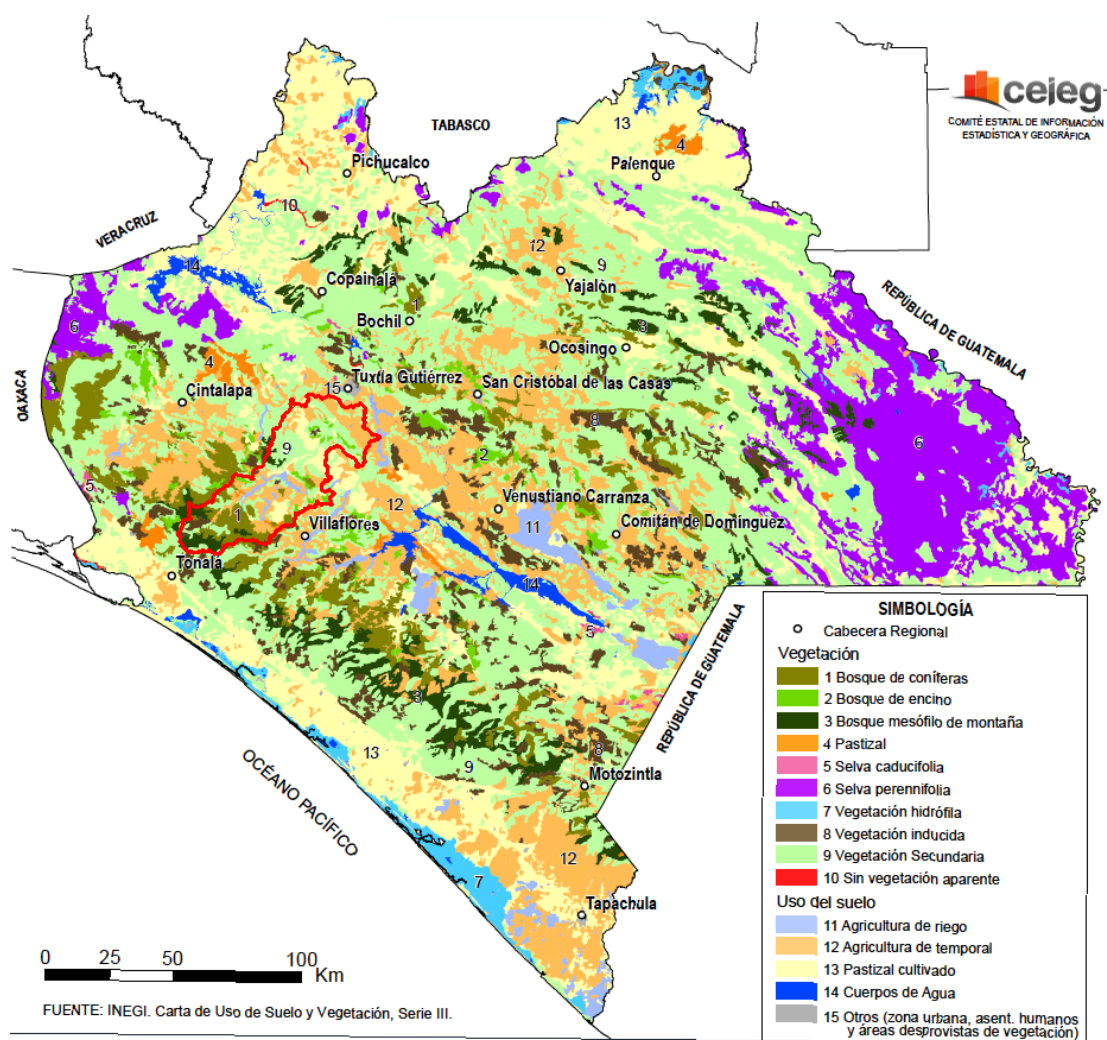


Figura 10. Tipos de vegetación y su distribución en Chiapas.

Fuente: CEIEG-Chiapas (2005).

De acuerdo con los datos vectoriales “Cartas de Uso del Suelo y Vegetación Tuxtla Gutiérrez - 2013 clave: E15-11 escala: 1:250 000” publicados por el INEGI, las áreas que ocupan los distintos tipos de cobertura en la subcuenca del río Suchiapa se muestran en la Figura 11.

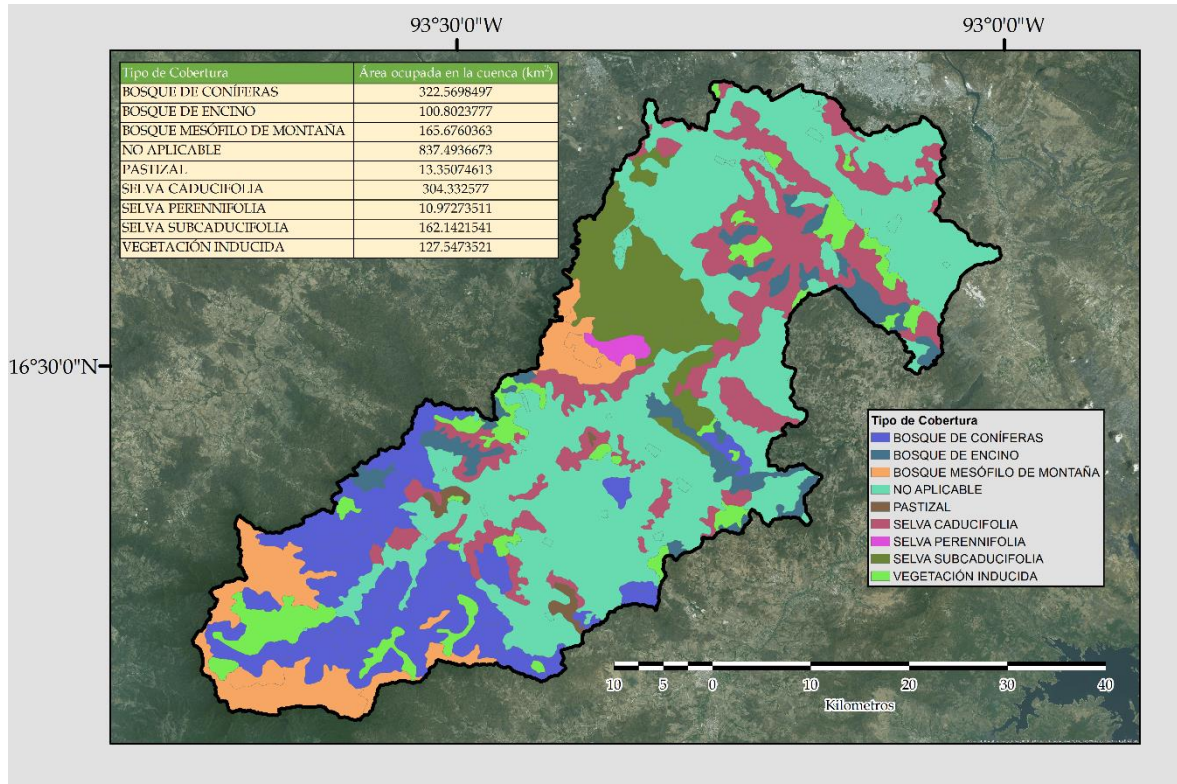


Figura 11. Tipos de cobertura y su área ocupada en la subcuenca del río Suchiapa.

Las áreas ocupadas por cada tipo de vegetación en la subcuenca, abarcan tanto vegetación primaria como secundaria, y el tipo de cobertura con descripción no aplicable la cual, bajo un análisis visual rápido, se puede asociar a áreas de cultivo.

La vegetación primaria y secundaria abarcan: el bosque mesófilo de montaña que se encuentra en las partes más altas de la cuenca al suroeste de la misma y en la parte central al oeste ocupando un área de aproximada de 165 km²; los bosques de coníferas ubicados también en las partes altas de la subcuenca y a los costados de ésta, ocupan un área de unos 322 km²; los bosques de encino están distribuidos irregularmente en áreas más pequeñas en distintas regiones de la subcuenca ocupando un área de más de 100 km²; los pastizales solo ocupan un área de 13 km²; la selva caducifolia cuya distribución es fragmentada en toda la subcuenca abarca un área de alrededor de 304 km²; siendo mucho menor el área ocupada por la selva perennifolia con cerca de 11 km²; la selva subcaducifolia cuenta con un área de 162

km² estando ubicada mayormente en la región de los altos; la vegetación inducida cuenta con un área de aproximadamente 127 km² que se distribuye de forma fragmentada por toda la subcuenca; y, finalmente, el registro de no aplicable, que abarca un área de unos 837 km².

Dentro de estos tipos de vegetación, la de mayor importancia para su conservación es la de los bosques mesófilos de montaña, pues juegan un papel importante y vital dentro del mantenimiento del ciclo hidrológico y ésta característica ha sido reconocida a nivel mundial. Estos albergan una gran variedad de flora por lo que son en realidad una comunidad de distintos tipos de vegetación como arboles caducifolios, encinos, hayas, pinos, especies perennifolias, distintos tipos de arbustos y flora del tipo de las epífitas que crece en el dosel arbóreo. La característica más representativa de estos ecosistemas, y que es indicador de su buena salud, es la presencia de nubes o niebla al nivel del dosel arbóreo, por lo que también son llamados bosques de niebla, selva nublada, bosque nebuloso o bosque nublado. A pesar de ocupar un área relativamente pequeña a nivel nacional (alrededor del 1% del territorio está ocupado por vegetación primaria de este tipo), es el ecosistema que alberga la mayor diversidad de flora y fauna con relación al área que ocupa. De ahí la importancia de conservar y recuperar estos ecosistemas.

1.2.Problemática

Chiapas a pesar de ser un estado con riqueza y variedad de recursos cuenta en contraste con problemáticas de diversa índole que irónicamente son consecuencia de la mala administración de sus riquezas. Problemáticas que tienen que ver con la población, el ambiente, el agua, todos relacionados entre sí pues son parte del mismo sistema y que al perturbar una parte las demás también se ven afectadas. A continuación se presentan algunas de las problemáticas más importantes que sufre el estado, así como sus causas y posibles consecuencias.

Esta sección se basa fundamentalmente en la publicación “La Biodiversidad en Chiapas” de la CONABIO para mayor detalle consultar CONABIO (2013).

1.2.1 Deforestación

La deforestación es una de las problemáticas más graves del estado, pues ha sido una práctica común en las últimas décadas, teniendo varios fines y llevándose a cabo

de varias maneras, siendo el desmonte para ganar área para la agricultura la principal razón. De forma similar grandes áreas de bosques y selvas son taladas para el aprovechamiento de sus maderas, práctica que se ha llevado a cabo sin las medidas pertinentes de repoblación teniendo graves consecuencias.

Una de las maneras en las que los bosques y selvas son deforestados es causando incendios para obtener de forma rápida el área necesaria para los cultivos; saliéndose de control en ciertas ocasiones lo que genera una mayor pérdida. Para el año 1998, el estado contribuyó con un 20% (198,000 ha) de la superficie total quemada de la República Mexicana siendo los bosques de pino y selvas caducifolias las superficies más afectadas. De las 1'405,578 ha cubiertas en 1975 por selvas húmedas solo el 54% permanecían sin perturbaciones para el año 2000 (761,265 ha), mientras el 18% (253,986 ha) se había convertido en pastos cultivados y el 21% (300,317 ha) en vegetación secundaria. En la Figura 12 se muestran varios incendios forestales que alcanzaron muy grandes proporciones en las partes medias y altas de la subcuenca y sus alrededores, perturbando aún más a los bosques del estado. Estos incendios fueron captados en abril del año 1988 por el Sensor TM del Landsat 5, y utilizando una combinación de falso color verdadero se realzan (en rojo) las áreas afectadas por el fenómeno.

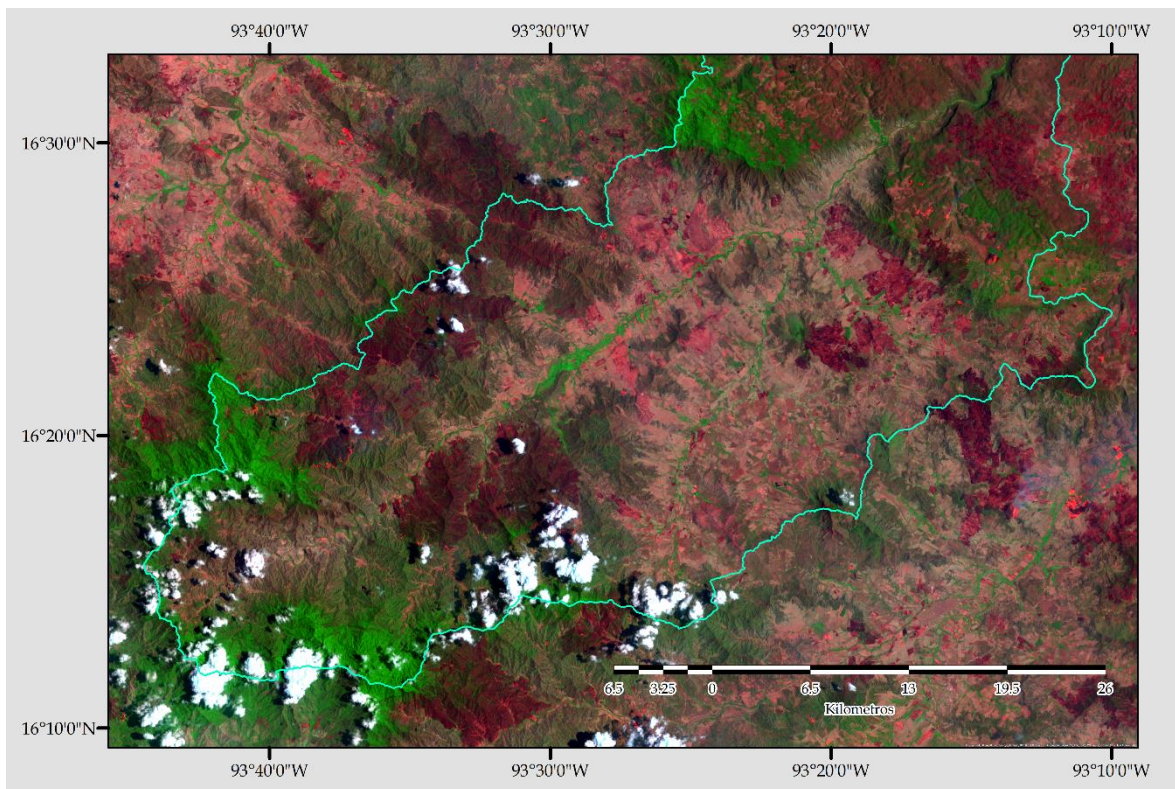


Figura 12. Incendios forestales en la subcuenca del río Suchiapa captados por el satélite Landsat 5.

La mayoría de los incendios se concentran en dos regiones: en los Altos de Chiapas, Montañas del Norte y en la Sierra Madre de Chiapas, siendo estas regiones las que tienen los índices más altos de erosión, una de las consecuencias que trae consigo la deforestación.

La deforestación de grandes áreas significa un cambio abrupto de uso de suelo cuyas frágiles características como delgadez y vocación forestal los hace susceptibles a sufrir una degradación y pérdida de nutrientes una vez que están siendo usados como suelos de uso agrícola. Además de que los rendimientos de los cultivos son bajos por esta misma razón. En general, las zonas deforestadas, que se ubican en las partes altas de la cuenca, se caracterizan por tener pendientes fuertes, donde en cortos periodos de tiempo tienen lugar acciones erosivas, deslaves, derrumbes, deslizamientos, y, un consecuente empobrecimiento al no existir raíces que sirvan de anclaje para estos suelos. Estas acciones erosivas se acentúan cuando hay ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos, pues al no haber una superficie de dosel arbóreo que proteja el suelo del impacto de las gotas de lluvia, genera que la erosión de los suelos ocurra de una manera más rápida. En las zonas bajas de una cuenca, los fenómenos por cambio de uso de suelo se presentan en asolvamiento de ríos, lagos, lagunas y estéreos, provocando inundaciones, etc.

El crecimiento de la población es el principal factor para que se de la deforestación, ya que al demandar recursos, la búsqueda de áreas para satisfacer las necesidades de alimentación y vivienda ejerce cada vez más presión sobre áreas de terreno con suelos frágiles y marginales, que una vez deforestados y usados de forma agrícola, ganadera, etc., los deja vulnerables a sufrir los procesos erosivos antes descritos.

De acuerdo con el Gobierno de Chiapas (2013), el Inventario Forestal Nacional de 1994 reportó que la entidad contaba con 5'100,100 ha de terrenos forestales, de los cuales 1'800,000 ha eran terrenos perturbados, representando un 35% de terrenos con vocación forestal. Adicionalmente, instituciones como el Colegio de la Frontera Sur, el INEGI y la UNAM reportaron que en el periodo de 1975 a 2000 se perdió por deforestación, una cantidad superior a 1'200,000 ha, representando un 28% de pérdidas de superficie con vocación forestal. También, se señala que según estudios de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) de las 3'700,000 ha de superficie forestal con las que cuenta la entidad actualmente, 2'300,000 ha son de superficie forestal degradada y 1'400,000 ha conservadas.

En el mismo documento del Gobierno de Chiapas (2013) se explican las causas de la pérdida de bosques, las cuales son: tala ilegal, incendios forestales, además de plagas y enfermedades forestales y baja superficie incorporada al manejo silvícola. Se mencionan acciones y medidas tomadas para combatir esta problemática, como el saneamiento de 15,462 ha efectuadas en el periodo 2007-2012. También en conjunto con el Centro Estatal de Control de Incendios Forestales (CECIF) se reportó una disminución del 62% pasando de 28,453 ha afectadas por incendios en el periodo 2001-2006 a 11,000 ha en el periodo 2007-2011; en este último periodo, se lograron incorporar 22,113 ha al manejo forestal sustentable.

En el área de estudio una de las zonas más afectadas por la deforestación es el municipio de Villaflores, pues este ocupa la parte alta montañosa de la cuenca en donde existían grandes áreas de bosques y ahora se tiene una muy alta vulnerabilidad debido a la erosión. La Figura 13 muestra los terrenos desmontados en laderas del municipio de Villaflores, región Frailesca, para la producción ganadera de doble propósito (carne y leche).



Figura 13. Deforestación en el municipio de Villaflores.
Fuente: CONABIO (2013).

1.2.2 Población

La población en Chiapas, en general, vive una situación socioeconómica adversa, pues la entidad tiene uno de los índices más altos de pobreza del país, el cual es tres veces mayor al del promedio nacional. Por consecuencia, es uno de los estados con menor desarrollo relativo, además de ser uno de los estados con mayor rezago en cuanto a cobertura servicios.

Sus índices de crecimiento demográfico son de los más altos del país con 2.2 en el periodo 2008-2010 a diferencia del nacional de 1.8 y de 0.3 en la Ciudad de México.

Una problemática de la población debido a los niveles de marginación, pobreza, y falta de empleo es la migración de localidades rurales hacia localidades urbanas en el mismo estado o en el extranjero en busca de mejores condiciones de vida ocasionando una presión económica, social y ambiental a los lugares de destino de los migrantes.

Como consecuencia, demanda una alta cantidad de recursos, infraestructura y equipamiento, que a su vez afecta al ambiente y biodiversidad pues los asentamientos se van expandiendo ocupando áreas y recursos de las zonas circundantes en las ciudades debido a una constante migración. En cuanto al desarrollo humano y bienestar de la población, es la entidad con el menor índice, siendo las poblaciones indígenas las zonas con mayor rezago. Referente a marginación, Chiapas, desde 1990, había ocupado el primer lugar, pero desde 2005 se encuentra por debajo del estado de Guerrero.

Las actividades que más se practican son la agricultura y ganadería y la pesca en zonas costeras. La agricultura, principalmente en zonas rurales, es de bajo rendimiento pues el suelo va perdiendo fertilidad; el maíz es el grano más cultivado, seguido del café. En las zonas rurales esta práctica agrícola es de subsistencia y es practicada por la población indígena.

La educación en Chiapas se encuentra en una situación de rezago, en 2005 de los 2'627,814 habitantes mayores de 15 años, el 26.1% eran analfabetas, siendo los de mayor atraso los municipios con mayoría de población indígena. A nivel estatal 21 de cada 100 personas mayores de 15 años no tiene ningún grado de escolaridad, 22 tienen primaria incompleta, 18 concluyeron la primaria, 15 terminaron la secundaria, 8 finalizaron la educación media superior y sólo 5 la educación superior (INEGI, 2005). Pese a lo anterior en el estado se han hecho esfuerzos por inculcar una educación ambiental cuyo fin es poder mitigar los daños ocasionados al medio ambiente por medio de prácticas sustentables y buenos manejos de los recursos naturales.

La subcuenca del río Suchiapa contiene regiones donde se tienen registrados los hogares más pobres no sólo del estado de Chiapas sino del país. Éstas regiones son Selva, Sierra, Los Altos y Fronteriza, que pertenecen a las regiones de Sierra y Los

Altos. Cabe mencionar que prácticamente todos los municipios que contienen a la subcuenca están clasificados con un índice de marginación alto.

Ya que la pobreza está fuertemente asociada con la degradación ambiental se puede entender de una mejor manera la situación ambiental del estado de Chiapas donde los indicadores de calidad de vida son de los más bajos del país al igual que la conservación de los ecosistemas.

1.2.3 Sector Hídrico

Chiapas es un estado que cuenta con vastos recursos hídricos pues tiene un intervalo de precipitación que varía de 150 a más de 4,000 mm anuales además de tener grandes volúmenes de agua superficiales y subterráneas; sin embargo, la situación es contraria en relación a la cobertura de servicios hídricos, cuya cobertura de agua potable es en zonas urbanas de 87.9%, y en zonas rurales de 69.7% ; el alcantarillado en zonas urbanas es del 91.7%, en la zona rural es de 59.2%; y el saneamiento de aguas residuales en zonas urbanas es de 53%, siendo en la zona rural de 0.6%. Los organismos que operan esta área de servicio se caracterizan por su administración poco efectiva, registrando un funcionamiento deficiente de la infraestructura, con pérdidas excesivas por fugas y tomas clandestinas, lo que genera permanentes subsidios para complementar las necesidades de la población.

Las principales causas de la problemática del sector hídrico y su desigual distribución, de debe a la dinámica poblacional, las actividades económicas y su desarrollo, los asentamientos urbanos y su expansión desordenada, la degradación de las cuencas, la sobreexplotación de los acuíferos y el cambio climático (Gobierno de Chiapas, 2013), siendo este último también consecuencia de estos mismos fenómenos a nivel global.

En adición a los problemas de cobertura del servicio, el mismo exceso de agua por fenómenos hidrometeorológicos afecta a una gran cantidad de la población y su infraestructura debido al desbordamiento de ríos. Por ejemplo, el huracán Stan en 2005, que impactó a una numerosa población y su infraestructura debido al desbordamiento de 98 ríos. Este huracán afectó directamente a 510 mil personas, las cuales estaban distribuidas en 499 localidades, ubicadas en 41 municipios (Vásquez Sánchez et al., 2008).

En este sentido, los fenómenos hidrometeorológicos extremos que más afectan a la entidad son las inundaciones, seguidas por sismos, deslaves y vulcanismo. El CENAPRED (2004) en los últimos años ha reportado que han sido afectadas 1'300,000 personas por inundaciones, causando pérdidas por 38,000 millones de pesos en daños acumulados, con una superficie afectada de 415 km². Los eventos que más afectaron a la entidad en las últimas décadas fueron las lluvias extraordinarias de 1998, el huracán Stan en 2005, las inundaciones en 1996, octubre de 2003 y en agosto de 2010 (Gobierno de Chiapas, 2013).

La erosión hídrica es otra de las problemáticas presentes y que está asociada con la deforestación, este fenómeno ocasiona pérdida de suelos superiores a 500 ton/ha/año (toneladas por hectárea al año), afectando 83% del territorio Chiapaneco, siendo especialmente crítica en la Sierra Madre de Chiapas, el Altiplano Central y en las Montañas de Norte, con valores que van de severos a extremos (mayores a 100 ton/ha/año); y de alto a severo (de 25 a 100 ton/ha/año) en la Selva Lacandona, Valles Centrales y Malpaso. Como ya se mencionó, la erosión hídrica se acelera debido a los procesos de deforestación los cuales a su vez provocan erosión de laderas, derrumbes y caída de árboles, formando tapones y, finalmente, inundaciones (Gobierno de Chiapas, 2013).

Otra problemática es la calidad de agua potable, pues en la entidad sólo operan cuatro plantas potabilizadoras que en promedio procesan 2,500 l/s, cantidad que queda por debajo del volumen requerido en los centros de población de 3,652 l/s, representando una cobertura del 55% del consumo de las cuatro ciudades donde operan estas plantas: Tuxtla Gutiérrez, Tapachula, San Cristóbal y Comitán. Esta problemática se acentúa si se considera el bajo nivel de saneamiento de las aguas antes de ser descargadas en los cuerpos de agua.

La zona de estudio al ser una zona con un grado de marginación y pobreza alto, no cuenta con la totalidad de cobertura del servicio hídrico, pues este se concentra en zonas urbanas, en menor medida en zonas rurales y siendo casi nula en regiones aisladas en las sierras pertenecientes a la subcuenca del río Suchiapa. Además de que el saneamiento de aguas es igualmente inexistente en las zonas alejadas de las localidades urbanas. Asimismo debido a sus índices de marginación y pobreza, los asentamientos humanos que se encuentran aislados en la zona de estudio son especialmente vulnerables a los fenómenos hidrometeorológicos y sociales, sufriendo con mayor frecuencia de inundaciones, deslaves, hambre y enfermedades.

2. Marco Teórico

Para tener una mejor comprensión del porqué de las problemáticas que enfrenta el estado de Chiapas, así como diversas sociedades en el mundo, se debe tener un mejor entendimiento de los procesos básicos que se llevan a cabo entre las distintas partes que conforman al planeta (sistema tierra) y como la alteración de estos procesos ha desencadenado un cambio en el clima mundial y al mismo tiempo en sus dinámicas y comportamientos locales. Siendo el ciclo hidrológico uno de los sistemas más sensibles y de más rápida respuesta ante la degradación del medioambiente y el cambio en el clima.

2.1 Cambio climático: Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico es el proceso de circulación del agua a través del planeta, en el cual se relacionan, conectan e interaccionan cuatro de los conceptos más importantes de las ciencias de la tierra: hidrósfera, atmósfera, superficie terrestre, y biosfera (Tarbuck et al., 2013), más una asociada a la energía (Black, 1990) que es la encargada de transmitir la energía necesaria para crear los cambios de estado del agua y de esta forma hacer que fluya por los cuatro sistemas (Figura 14).

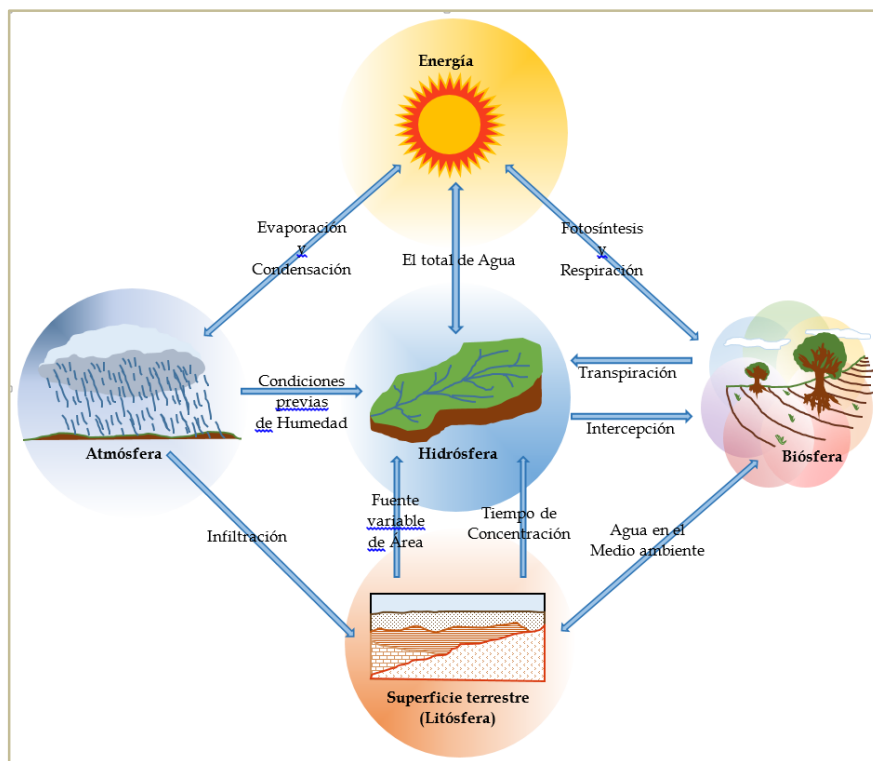


Figura 14. Interacción entre las esferas y el ciclo del agua, adaptado de "Realms of Water".
Fuente: Black (1990).

El ciclo hidrológico es un sistema complejo que integra una serie de procesos que al conjuntarse lo hacen posible. Para ello, es necesario la combinación e interacción de las características y propiedades de cada uno de los cuatro sistemas, ya que para que exista el movimiento del agua (hidrósfera) es necesario la intervención de la energía (sistema energético), que al entrar en contacto con la atmósfera llevan a cabo intercambios energéticos que permiten calentar el agua y transformarla en vapor, el cual se mueve a través de la atmósfera en forma de nubes impulsadas por el viento, creando el clima y así distribuyéndolo por todo el globo. Posteriormente, se precipita a la superficie de la tierra en forma de lluvia, nieve o hielo para ser aprovechada por los seres vivos (biosfera), dando además forma al paisaje a través de los lugares por donde fluye de regreso a los océanos o grandes depósitos de agua donde nuevamente se evapora para comenzar el proceso.

Describir los movimientos y cantidades del agua que fluyen a través de la atmósfera a la superficie terrestre, sus direcciones y cantidad de flujo sobre y bajo la superficie terrestre, las cantidades de infiltración, de retención, los lugares de deposición y su cantidad en el interior de los continentes, la cantidad que se evapora de los cuerpos de agua y transpiración de las plantas por la acción del sol, además de su interacción con los demás seres vivos, es la parte realmente compleja del ciclo hidrológico (Black, 1990).

Aunado a las variaciones del ciclo hidrológico, identificar como las actividades humanas han incrementado la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera y provocado un aumento en la temperatura global es un tema de interés. Si bien es cierto que la tierra sufre cambios climáticos cíclicos en largos periodos de tiempo, también se ha demostrado que se ha incrementado la temperatura global en un periodo de tiempo relativamente corto (Serrano, 2010; Tarbuck et al., 2013). De manera natural, el efecto invernadero es beneficioso para la vida en la tierra, pues regula su temperatura permitiendo la vida en la superficie terrestre; sin embargo, el uso de combustibles fósiles, junto con más actividades humanas que generan una gran cantidad de gases de efecto invernadero, además de la deforestación de grandes áreas, han provocado una desestabilización de este proceso provocando a su vez que las características de los patrones de lluvia, humedad del suelo, disponibilidad subterránea y superficial del agua se modifiquen, generando sequías e inundaciones (Serrano, 2010).

De acuerdo a Pokorný (2008), el ciclo hidrológico puede dividirse en dos: ciclo hidrológico largo o abierto y ciclo hidrológico corto o cerrado, los cuales se llevan a cabo desde manera interna en los continentes y en los océanos, y de manera local, siendo el más delicado pues cuando el paisaje sufre alteraciones, la manera en que interaccionan agua y paisaje también sufre modificaciones trayendo consecuencias negativas como cambios en el ciclo hidrológico a nivel local y regional, provocando a su vez cambios en el clima mundial.

La zona de estudio se caracteriza por ser una cuenca altamente vulnerable con alto grado de alteración, pues ha sufrido cambio de cobertura y uso de suelo, destacando la deforestación a gran escala, por lo que el clima local ha sido modificado.

A continuación se describen los parámetros del ciclo hidrológico influenciados por estas prácticas.

2.1.1 Precipitación

La precipitación es la acumulación de vapor de agua en la atmósfera, el cual resulta de procesos de evapotranspiración y su transporte por el viento. Una masa de aire puede sostener solo una cierta cantidad de vapor de agua; la cantidad máxima que puede albergar se conoce como saturación de vapor, esta característica del aire está en función de la temperatura, así entre mayor sea la temperatura mayor será la saturación y viceversa. Cuando la cantidad de vapor de agua excede la de saturación se inicia el proceso de precipitación (Serrano, 2010).

El almacenamiento y movimiento del agua en la atmósfera está condicionado a varios factores como son: presión, temperatura, humedad y acción del viento, los cuales son influenciados a su vez por la gravedad, la cantidad de energía irradiada por el Sol a diferentes latitudes, los movimientos de la Tierra (rotación, traslación e inclinación de su eje) los cuales hacen posible las distintas estaciones y su cambio con el paso del tiempo (Black, 1990).

Debido a los numerosos factores que afectan los movimientos y almacenamiento del agua en la atmósfera, ésta no precipita de manera uniforme ni en tiempo ni en espacio, e igualmente por estos factores puede precipitar de varias maneras, como lluvia, nieve, granizo, llovizna y aguanieve. La forma en la que el agua precipita depende del ritmo de enfriamiento del aire y su temperatura (Serrano, 2010).

Las principales características de la precipitación son su frecuencia, intensidad, duración, extensión, así como la cantidad de precipitación misma, estas permiten conocer el comportamiento y patrones en el movimiento del agua almacenada en la atmósfera. La mayoría del agua precipita en los océanos debido a que estos ocupan aproximadamente el 71% de la superficie terrestre, mientras la cantidad que precipita en el interior de los continentes, y que no se ha evaporado, cumple varios procesos antes de poder regresar al océano (Black, 1990).

En un ecosistema natural, los patrones de precipitación están bien definidos gracias a los ciclos hidrológicos cerrados, los cuales son favorecidos por el buen estado de bosques y selvas, en los que aún en largas ausencias de precipitación no hay signos de estrés por falta de agua en la vegetación. En los ecosistemas altamente alterados y deforestados, los patrones climáticos se modifican, cambiando las temperaturas locales y trayendo efectos como periodos largos de sequía seguidos de periodos cortos de lluvias muy intensas, además de ser eventos aún más impredecibles (Pokorný, 2008).

2.1.2 Evapotranspiración

La vaporización es el cambio de la fase líquida del agua a la gaseosa. Se llama evapotranspiración a todos los procesos de evaporación y transpiración que tienen lugar en una región. Ello incluye, la evaporación que se lleva a cabo en grandes masas de agua, en ríos, el suelo y superficies sin vegetación, además de la transpiración que se lleva a cabo en los organismos vegetales y animales como parte de sus procesos biológicos. Hay diferencia entre la evaporación que se lleva a cabo en la superficie de las hojas de la vegetación y la transpiración que viene desde dentro de la vegetación, interceptada y vaporizada por los estomas (Serrano, 2010).

Para que se lleve a cabo el proceso de evaporación debe haber una superficie de contacto entre la energía irradiada por el Sol y el líquido, la cual es llamada superficie de evaporación la cual puede ser el espejo de agua de un lago, río, superficie de las hojas de la vegetación o el suelo. Las moléculas de agua son cargadas de energía proveniente del Sol, lo que incrementa su energía cinética vibratoria, y cuando la amplitud de vibraciones sobrepasa la fuerza de atracción molecular, la molécula de agua se desprende de la masa del líquido saliendo de esa superficie y entrando a la capa de aire encima de ella. Aun cuando la energía solar no sea suficiente para evaporar el agua, la evaporación puede seguir ocurriendo, ya que la energía puede ser provista por otras condiciones atmosféricas (Serrano, 2010).

La fuente de evaporación más importante son los océanos, estos proveen una gran cantidad de vapor a la atmósfera, el cual precipitara en varias partes de la tierra. Se estima que un 60% de las aguas que precipitan en los continentes es evapotranspirada, dependiendo del régimen de precipitación, la estacionalidad, el tipo de suelo, la vegetación presente y el uso de suelo de la región (Serrano, 2010).

Los organismos vegetales como plantas y árboles aprovechan el agua para llevar a cabo sus procesos biológicos, transpirando el agua sobrante. Las plantas y árboles absorben el agua a través de sus raíces aprovechando los minerales disueltos en ella, además de ocuparla para crear energía a través de procesos bioquímicos con el dióxido de carbono que absorben. Aproximadamente un 99% del agua que absorben a través de sus raíces es transpirada hacia la atmósfera. Este proceso influye en las condiciones de humedad del suelo pues esta humedad es transportada a la atmósfera a través de la vegetación. La transpiración es un proceso continuo que ocurre aún en ausencia de precipitación, la tasa de transpiración está claramente asociada al régimen de precipitación, estación, profundidad de las raíces, tipo de suelo y su contenido de agua, densidad de vegetación y, especialmente, del tipo de vegetación (Serrano, 2010).

Es por ello que los bosques y selvas funcionan como reguladores de temperatura, amortiguadores en la distribución de agua en el suelo y tienen un papel importante en la disponibilidad de agua en las cuencas a las que pertenecen. La evapotranspiración es de vital importancia para mantener un ciclo hidrológico cerrado, pues las temperaturas locales dependen mucho del tipo de cobertura de suelo misma que al modificarse cambia las características de drenado de la cuenca, sus características hidrológicas y el clima (Pokorný, 2008).

2.1.3 Esguerrimiento

Es la porción de agua precipitada que ha alcanzado el suelo y, que debido a factores como la saturación de agua en el suelo y la disminución del índice de infiltración, esguerra y se almacena en depresiones de la topografía del terreno. Si la lluvia continúa, esta agua comienza a moverse hacia terrenos más bajos descargando el agua en arroyos, ríos, lagos o en los océanos. Este flujo de agua sobre la superficie se caracteriza por ser el más rápido comparado con los flujos por debajo de la superficie y de aguas subterráneas, ya que es el que tiene menos resistencia hidráulica y lo rigen las leyes de la hidráulica de superficie libre. La diferencia entre las cantidades de flujo superficial y sub-superficial lo determinan las tasas de infiltración, además

de factores climatológicos, geológicos e hidrológicos. Así, durante una lluvia muy intensa, los índices de infiltración tienden a ser menores y el flujo superficial será mayor que el flujo sub-superficial, al contrario que una lluvia ligera donde los índices de infiltración son mayores y, como consecuencia, el flujo sub-superficial será mayor que el superficial. El flujo de agua subterránea es el más lento, ya que además de estar en función de las características geológicas, geomorfológicas, topográficas, cantidad y densidad de la vegetación, el uso del suelo y el grado de perturbación, también lo definen la ocurrencia o distribución de agua subterránea. La perturbación del suelo debido a la urbanización reduce sustancialmente la tasa de infiltración e incrementa la cantidad de flujo superficial (Serrano, 2010).

El escurrimiento superficial, en ecosistemas como bosques o selvas, que no han sufrido perturbaciones, es un fenómeno que casi no se observa y en caso de darse solo se puede identificar por la distribución de la hojarasca del suelo y de pequeñas ramas, esto debido a que el agua precipitada es rápidamente “absorbida” mediante la infiltración; cuyo ritmo es mayor debido a que el suelo presenta una zona de raíces bien desarrollada. Además de que gran cantidad de agua queda retenida en las hojas y ramas de árboles para luego ser directamente evaporada de vuelta a la atmósfera (Black, 1990).

En contraste, un ecosistema cuyos suelos han sido altamente alterados tendrá una mayor presencia de escurrimiento superficial pues al no haber árboles o grandes masas de vegetación que retengan el líquido, el índice de infiltración se ve mermado, siendo fácilmente superado por la intensidad de la lluvia, saturando el suelo, y finalmente escurriendo superficialmente en grandes cantidades. En estudios hechos en República Checa se demostró que el escurrimiento superficial es mayor en un 40% en una cuenca donde la vegetación solo era de pastizales, en comparación con cuencas bien forestadas o de humedales (Pokorný, 2008). Este fenómeno además de traer consecuencias como la variabilidad de clima, lo que trae cambios bruscos en temperatura de la superficie del suelo, también erosiona el suelo disolviendo los minerales que en él se encuentran, causando su empobrecimiento y llevándolos a ríos y lagos los cuales sufren de eutrofización debido a los nutrientes que son arrastrados. Estos fenómenos modifican el ciclo hidrológico local e influyen en los cambios de clima global (Pokorný, 2008).

2.1.4 Infiltración

La infiltración es un proceso que sirve de enlace para el movimiento del agua entre la atmósfera y el suelo (Serrano, 2010). Se define como el movimiento del agua desde la atmósfera al suelo a través de una superficie de contacto (interfaz) definible pero intangible, esto porque no queda claro donde termina la atmósfera y empieza la superficie terrestre, debido a que existen poros o huecos en el suelo cerca de la superficie de distinto tamaño que cuando no están ocupados por agua u otro elemento, lo ocupa el aire que es parte de la atmósfera (Black, 1990).

La infiltración es un atributo del suelo de un determinado sitio dependiendo de varias características del mismo, como condiciones de la superficie (la presencia de hojarasca en la superficie del suelo) y características del horizonte superficial (su textura y estructura). Así, se define como capacidad de infiltración al máximo ritmo al que puede entrar agua al suelo dependiendo de los factores antes mencionados. Además en él también influyen factores como el ritmo al que el agua es suministrada, esto es la intensidad de precipitación y la tasa de percolación, que es el movimiento del agua hacia abajo del perfil del suelo, que a su vez está en función de la cantidad de agua en el suelo al inicio del evento y el tiempo que pasó desde el último evento (Black, 1990)

En ambientes naturales como bosques o selvas donde no ha habido alteraciones, la capacidad de infiltración es casi siempre lo suficientemente alta para no permitir que exista flujo superficial en forma de escurrimiento. Sin embargo, puede llegar a ocurrir, bajo situaciones de tormentas intensas, pendientes muy inclinadas y suelos delgados y previamente saturados, que exista escurrimiento superficial en pequeñas distancias, aunque es raro el cumplimiento de todas estas condiciones (Black, 1990).

En cambio cuando el suelo sufre drásticas alteraciones es posible que su índice de infiltración sufra reducciones llegando a ser cero. Aunque con la debida planeación y variando los grados de alteración y protección del suelo se puede recuperar el índice de infiltración incluso a los niveles que tenía el suelo antes de ser alterado. Por ejemplo, en zonas de pastizales donde no hay la suficiente cantidad de lluvia anual como para sostener un bosque y donde además hay actividad animal inducida por humanos (como lo es el ganado) puede haber una reducción en el índice de infiltración, a causa de la compactación del suelo, el cual puede ser revertido removiendo la causa de la compactación. En cambio en zonas de tala, el índice de infiltración que ha sido reducido habrá de recuperarse por sí solo pero lentamente,

dándole fin a esa actividad, y en zonas que sirvieron de camino es posible que se recupere aún más lento debido al alto grado de compactación del suelo (Black, 1990).

La infiltración permite al suelo amortiguar la irregular distribución del agua en la superficie terrestre, pues una vez que esta entra al suelo pasa a formar parte del manto freático, moviéndose de manera lateral hacia canales, corrientes o ríos contribuyendo en parte de su cauce o saliendo directamente del suelo en forma de manantiales, ojos de agua o por fuerzas geotérmicas en forma de geiseres (Black, 1990).

2.2 Inundaciones y su impacto

2.2.1 Inundaciones

Las inundaciones son un fenómeno global que causa extensa devastación, daños económicos y pérdida de vidas humanas. Su ocurrencia es la más frecuente de los desastres naturales y su frecuencia ha aumentado en los últimos veinte años; sólo en 2010, 178 millones de personas fueron afectadas por inundaciones, y las pérdidas económicas totales, en años excepcionales como en 1998 y 2010, sobrepasan los 40 billones de dólares. Las víctimas fatales son altas en países en vías de desarrollo donde los principales afectados son los sectores marginados de la sociedad, en particular mujeres y niños pertenecientes a estos grupos sociales (Abhas et al., 2012).

De acuerdo con Gupta (2010), las inundaciones se definen como una condición hidrológica, donde la descarga o caudal del río excede su capacidad de almacenamiento y cuya agua excedente fluye inundando parte del fondo del valle. A pesar de ser un fenómeno natural en la dinámica geomorfológica del paisaje, mientras las orillas de los ríos y sus valles de inundación sean poblados tendrán un componente de peligro y se ocasionará un desastre cuando inundaciones y asentamientos humanos compitan por el mismo espacio.

Las inundaciones afectan asentamientos humanos de todo tipo desde pequeñas poblaciones rurales, hasta grandes ciudades; sin embargo, causan mayores daños en asentamientos urbanos debido a su alta concentración de infraestructura, servicios, y actividad económica. Su ocurrencia en áreas rurales no es menos importante pues la vulnerabilidad de la población rural es mayor. Debido a la creciente tendencia de la población humana y su asentamiento en zonas urbanas, las inundaciones en estos

ambientes se ha vuelto un tema de sumo interés para las sociedades, pues representan un peligro creciente a través del paso del tiempo, ya que se estima que el 60% de la población se establecerá en zonas urbanas para 2030, y el 70% en 2050. En este sentido, la urbanización no planeada contribuye al crecimiento de riesgos de inundación debido a su expansión y asentamiento en zonas naturalmente inundables, siendo los sectores desfavorecidos de la población los que se instalan en orillas de las ciudades (Abhas et al., 2012).

El cambio climático como fenómeno global, causado por actividades humanas, tiene un gran impacto en el riesgo por inundaciones pues los patrones meteorológicos son afectados cambiando patrones locales de lluvia, de frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos y de las inundaciones mismas. Pequeños cambios de clima pueden significar incrementos o decrementos en las magnitudes de inundación, así como de los intervalos de recurrencia, donde se ha demostrado que inundaciones de 50 años y más son altamente sensibles a la variabilidad climática (Abhas et al., 2012; Benito et al., 2010; Gupta., 2010).

Las inundaciones pueden ser causadas por desbordamiento de ríos, por marea de tormenta, por lluvias extraordinarias, o fallas en sistemas artificiales construidos por el hombre (presas). Por lo general, las inundaciones en asentamientos humanos son consecuencia de la combinación de varios factores: ubicación en áreas inundables, ocurrencia de fenómenos extraordinarios y falla de los sistemas de drenaje u obras de protección contra estos fenómenos (barreras) (CENAPRED, 2004). En ambientes naturales, las inundaciones son un fenómeno esperado en ríos, sobre todo en los que están contenidos en cuencas que se encuentran en latitudes tropicales a lo largo del Ecuador, ya que es donde se dan las condiciones ideales para la formación de fenómenos hidrometeorológicos de gran magnitud. Estas inundaciones naturales y periódicas modifican la forma del canal del río y mantienen las características ecológicas de su planicie (Gupta., 2010).

Varios son los factores que están asociados al daño causado por las inundaciones siendo los más importantes: uso de suelo de la planicie de inundación, profundidad y velocidad del agua, ritmo de crecimiento y duración, estación del año, cantidad y tipo de sedimento transportado y depositado y, finalmente, la efectividad de previsión, advertencia y evacuación (Abhas et al., 2012; Keller et al., 2008). En general, el impacto de las inundaciones se clasifica en: directos o primarios, e indirectos o secundarios. Los directos son pérdidas humanas sufridas por la población, daños a las infraestructuras, casas, edificios y su contenido, vías de

comunicación, así como a animales y cultivos produciendo pérdidas o enfermedades. Los indirectos se asocian a desplazamiento temporal y a veces definitivo de la población de su lugar de residencia, además de causar hambruna y enfermedades, deteniendo la actividad económica de la región afectada implicando costos por reconstrucción de la infraestructura e inevitable freno de su desarrollo. El medio ambiente también sufre impactos indirectos pues puede causar erosión y deslizamientos de tierra afectando a la vegetación y caminos, y en las costas los tsunamis pueden causar pérdida de arrecifes y, en consecuencia, de diversidad marina. En los países en vías de desarrollo, las inundaciones impactan también los ya débiles sistemas políticos y la estructura de sus instituciones, pues la población percibe los desastres como consecuencia de pobres manejos y planeación ineficiente, cuya situación puede terminar en inestabilidad política.

2.2.2 Riesgo

El riesgo es el producto del peligro y la vulnerabilidad y ante un evento puede expresarse matemáticamente en un área específica y con un periodo de tiempo de referencia. Para Thouret (2010), el riesgo se refiere a la probabilidad de pérdida o el grado de daños causados cuando un evento peligroso ocurra. De acuerdo al Departamento de Asuntos Humanitarios de las Naciones Unidas, UNDHA (por sus siglas en inglés United Nations Department of Humanitarian Affairs), el concepto de evaluación del riesgo consiste en el estudio de un desastre potencial o real con el fin de estimar el daño esperado o causado para hacer recomendaciones que conduzcan a la prevención, preparación y respuesta a un desastre. Esencialmente, la evaluación de riesgo se da en términos de pérdida esperada de vidas, personas heridas, propiedad dañada y negocios parados.

Los principales pasos involucrados en el proceso de evaluación del riesgo son (Abhas et al., 2012):

- Estimación del peligro en referencia a la localización, nivel de severidad y frecuencia de la ocurrencia de un evento.
- Estimación de elementos expuestos al riesgo.
- Estimación de la vulnerabilidad.
- Estimación del riesgo mediante la integración del peligro, exposición y vulnerabilidad.

En la mayoría de los casos, la evaluación del riesgo se realiza con base en daños directos. Los daños indirectos son frecuentemente ignorados, conduciendo a una

subestimación de los costos totales causados por los desastres naturales. Aunque es difícil obtener los datos apropiados de los daños indirectos; el principal problema es medir de manera precisa el efecto domino en la economía, como los impactos en la infraestructura e interrupción de las comunicaciones. Con el fin de llevar a cabo una buena evaluación del riesgo y reducir la diferencia entre los daños reales y estimados, es necesaria la integración de las fuentes de daño primario y secundario de la evaluación de daños (Abhas et al., 2012).

Para Bründl et al. (2010), la gestión del riesgo permite evaluar, reducir y controlar el riesgo desde sus diferentes fuentes. El concepto de riesgo que los autores proponen está dirigido a responder las preguntas siguientes:

- ¿Qué puede pasar? (análisis del riesgo)
- ¿Qué está permitido que pase? (evaluación del riesgo) y
- ¿Qué se necesita hacer? (planeación y evaluación de medidas de mitigación).

Para alcanzar con éxito la gestión del riesgo, un paso fundamental es el análisis del riesgo mismo que consiste en cuatro partes:

- **Análisis del peligro:** tiene como meta determinar los escenarios que se tomaran en cuenta en el análisis de riesgo y como datos básicos están los procesos que se llevan a cabo en el terreno, topografía, fotografía aérea, imágenes satelitales. Todo aquello que permite crear un mapa geomorfológico del fenómeno dentro del área de estudio. Además de requerir información histórica para asumir posibles escenarios. El resultado del análisis de peligro es la creación mapas de intensidad. La intensidad del fenómeno es determinada mediante la modelación del proceso.
- **Análisis de exposición:** personas y bienes expuestos son determinados mediante su localización, su número, tipo, valor y probabilidad de exposición.
- **Análisis de consecuencias:** se combinan los resultados de los análisis de peligro y exposición, y se calculan las pérdidas o daños causados por el evento.
- **Cálculo del riesgo:** se obtiene como producto de la frecuencia de los escenarios dados con el daño calculado para estos escenarios. Puede expresarse como riesgo individual para cada una de las personas o como riesgo colectivo.

2.2.2.1 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad se define como el grado en el que un sistema es susceptible o incapaz (personas y bienes) de lidiar contra los efectos adversos de desastres naturales y está en función del carácter, magnitud y ritmo del peligro al que un sistema está expuesto, así como de la sensibilidad (grado en que un sistema es afectado adversa o benéficamente) y la capacidad de adaptación (la habilidad de un sistema de ajustarse a los cambios, moderar daños potenciales, tomar ventaja de las oportunidades o lidiar con las consecuencias) (Abhas et al., 2012). Thouret (2010), define a la vulnerabilidad como la proporción de elementos expuestos al peligro y que probablemente se pierdan si el evento peligroso ocurre.

Para la medición de la vulnerabilidad se han propuesto diversas escalas con variables fuertemente correlacionadas entre sí como: condiciones físicas, sociales, económicas y políticas del área de ocurrencia. Algunos de los principales factores que incrementan el grado de vulnerabilidad a desastres naturales como inundaciones, sobre todo en países en vías de desarrollo, son: pobreza, pobre calidad o condiciones de vida, falta de preparación y mantenimiento de defensas contra inundaciones, población creciente, construcción de asentamientos ilegales en zonas propensas al peligro, pobre o insuficiente mantenimiento de drenajes, inconciencia de la población y limitación en sistemas de advertencia temprana.

La evaluación de la vulnerabilidad se lleva a cabo con el fin de identificar las secciones más vulnerables de la sociedad y, así, priorizar la asistencia mediante la asignación de recursos. Evaluar la vulnerabilidad requiere considerar la localización del área, elementos amenazados (población y elementos físicos), nivel de tecnología disponible, tiempo requerido para la advertencia y respuesta de los residentes de cara al peligro. Los mapas de vulnerabilidad pueden ayudar a los tomadores de decisiones y administradores a identificar áreas de alta susceptibilidad e impacto, con el fin de reducir la vulnerabilidad y aumentar la capacidad mediante la concentración de esfuerzos en esas locaciones (Abhas et al., 2012).

2.2.2.2 Peligro

La Estrategia Internacional de las Naciones Unidas para la Reducción de Desastres, UNISDR (por sus siglas en inglés United Nations International Strategy for Disaster Reduction) define el peligro como el evento físico potencialmente dañino, ya sea un fenómeno o actividad humana que pueda causar lesiones o pérdida de la vida, daños

a la propiedad, desorganización política y social o degradación ambiental (Abhas et al., 2012). Para Keller et al. (2008), los peligros naturales son cualquier proceso (geomorfológico) que signifique una amenaza a la vida o propiedades humanas; sin embargo, un evento por sí mismo no es peligroso, se convierte en un peligro natural cuando afecta intereses humanos.

Los eventos de peligro tienen una probabilidad de ocurrencia en un periodo específico de una determinada área y tienen una intensidad determinada (Thouret, 2010). Los estudios enfocados al análisis de aspectos físicos y de fenómenos consideran el uso de información histórica a fin de evaluar el peligro. Para un mejor entendimiento de la naturaleza de las inundaciones hay tres aspectos a ser considerados: la probabilidad de ocurrencia, la magnitud e intensidad de ocurrencia y el tiempo que transcurrirá hasta la próxima ocurrencia (Abhas et al., 2012). La actividad humana puede desencadenar un aumento de la frecuencia o incidencia de eventos peligrosos, principalmente por actividades como el cambio de uso y cubierta del suelo (Goudie, 2010)

Los mapas de peligro son herramientas útiles para entender la exposición en un área determinada, además son útiles para planeación y toma de decisiones. Los mapas de riesgo por inundación se caracterizan por tener información como tipo de inundación, profundidad, velocidad y extensión de los flujos de agua y dirección de la inundación, y son preparados para determinados periodos de retorno (Abhas et al., 2012).

Herramientas como la Percepción Remota y SIG junto con información meteorológica y de modelos hidrológicos son útiles y hacen posible realizar mapas de riesgo y peligro con una alta precisión debido a sus características y a que trabajan con información de eventos reales ocurridos y registrados. La información obtenida de estos mapas tendrá como principal fin la mitigación del peligro que representa la ocurrencia de fenómenos como la inundaciones, aunque su potencial es aún más amplio, cubriendo un extenso rango de eventos geomorfológicos naturales cuyo desarrollo representa un peligro constante para las sociedades humanas.

2.3 Patrones espaciales de inundaciones

Los patrones están presentes en la naturaleza, así como en el comportamiento de los seres vivos, y aunque a veces no son percibidos de manera inmediata, son indicadores de como ocurren y han ocurrido los procesos que se llevan a cabo tanto en la vida diaria de los seres humanos, así como de los procesos naturales. Obtener patrones ha sido y es fundamental en muchas áreas de las Ciencias de la Tierra, y aunque en Hidrología el interés histórico ha estado en los patrones temporales, los patrones se encuentran presentes en un amplio rango de arreglos espaciales en los sistemas hidrológicos. A pesar de que se han logrado implementar modelos que simulan y representan la distribución espacial de los procesos hidrológicos que se llevan a cabo dentro de una cuenca, se ha tenido la necesidad de poder evaluar estos modelos para tener una certeza o confianza de su buen desempeño. En general, son relativamente pocas las investigaciones que se han hecho en las últimas décadas que hacen comparaciones entre patrones de procesos hidrológicos simulados y observados. En la mayoría sólo se han realizado comparaciones visuales simples, pero comparando entre los dos tipos de patrones arrojará información que no podría obtenerse mediante métodos convencionales (Grayson et al., 2000).

Gracias a información topográfica como los modelos digitales de elevación (MDE) y los varios análisis que se pueden originar de estos, así como del poder de procesamiento de las computadoras junto con software como los SIG, el interés de los patrones espaciales ha tomado gran relevancia dentro de la comunidad de la Hidrología. Esto aunado a la creciente preocupación medioambiental que ha tenido impacto en investigación, cuantificación y administración de los recursos naturales y de cómo los procesos hidrológicos son impactados por fenómenos antropogénicos como el cambio de uso de suelo o el cambio climático. Fenómenos que deben tomar en cuenta la variabilidad espacial que se observa en la naturaleza y hacer uso práctico de esas observaciones. Lo verdaderamente importante al usar patrones espaciales, es qué pueden abarcar un evento en tiempo real, proporcionando una mejor idea del comportamiento hidrológico y sus sistemas, con lo que se puede hacer predicciones del evento con alta precisión (Grayson et al., 2000).

Una fuente de datos que describen el estado y características de la superficie terrestre a lo largo del tiempo es la percepción remota. A través de este tipo de información y por medio de distintas técnicas es posible establecer patrones de distintos tipos de fenómenos en la superficie terrestre, siendo de principal interés los generados por

inundaciones causadas por eventos meteorológicos extraordinarios cuyos patrones se espera que tengan una fuerte correlación pues son generados por un tipo particular de fenómeno (precipitación, y escurrimiento) y afectan el sistema terrestre en forma particular (contenido de agua).

2.3.1 Percepción remota

Esta sección se basa fundamentalmente en la publicación “Fundamentals of Satellite Remote Sensing” para mayor detalle consultar Chuvieco (2010).

La percepción remota es una técnica que permite obtener información sin estar en contacto con el objeto de estudio (superficie terrestre). La información se presenta a través de imágenes de la superficie terrestre obtenida por sensores portados en plataformas espaciales, aunque también hay sensores portados en aeronaves. En este trabajo se ocupará información obtenida por medio de los primeros.

Para que sea posible el registro de información a distancia, tiene que haber algún tipo de interacción entre el sensor y la superficie terrestre, esta interacción esta originada por la energía irradiada por el Sol. Esta energía que interacciona entre las cubiertas terrestres y el sensor es conocida como radiación electromagnética. Al incidir en la tierra, parte de esta radiación es dispersada por las capas de la atmósfera y las nubes, y la que llega a la superficie, es reflejada de distintas maneras de acuerdo a las propiedades y características reflectivas de la cubierta. Finalmente, la energía reflejada por la cubierta terrestre viaja de vuelta al espacio donde atraviesa nuevamente las nubes y la atmósfera dispersándose parte de ésta antes de llegar al sensor y quedar registrada. Además de la reflexión existen otras dos maneras de adquirir información: por emisión y por emisión-reflexión, la primera ocurre cuando la cubierta irradia su propia energía y esta queda registrada en el sensor (volcanes activos, incendios, etc.), y la segunda se da cuando el propio sistema sensor es capaz de emitir un haz energético dirigido a la superficie terrestre para posteriormente registrar la reflexión, en este caso este tipo de sensores son los llamados activos.

Las características de propagación o transmisión de la radiación electromagnética pueden explicarse mediante dos teorías: una donde la energía se comporta como un haz ondulatorio y la otra como una sucesión de unidades discretas de energía, conocidas como fotones o cuantos, los cuales no tienen masa. Estas teorías se atribuyen a Huygens-Maxwell y Planck-Einstein, respectivamente. La primera teoría explica que la energía electromagnética se transmite de un punto a otro como un haz

ondulatorio, armónico, continuo y a la velocidad de la luz, el cual contiene dos campos de fuerza ortogonales entre sí, un campo eléctrico y otro magnético, cuyas características de flujo energético pueden definirse por dos elementos: longitud de onda (λ) y frecuencia (F), los cuales están inversamente relacionados (Figura 15). Se define como:

$$c=\lambda F \quad [1]$$

Donde c es la velocidad de la luz ($300,000 \text{ km.s}^{-1}$), λ es la longitud de onda expresada en micrómetros ($1\mu\text{m}=0.000001\text{m}$), y F la frecuencia expresada en Hertzios (ciclos por segundo).

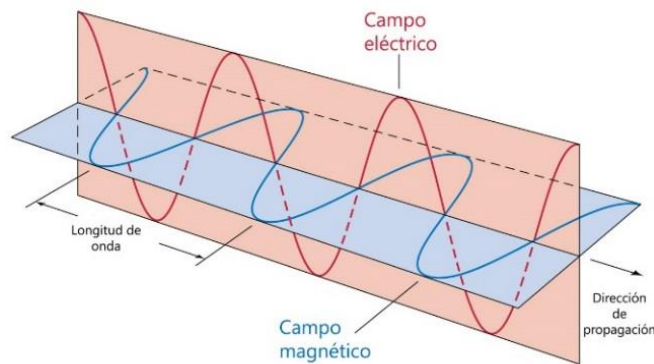


Figura 15. Esquema de una onda electromagnética.
Fuente: curiosoando.com.

La segunda teoría conocida como teoría cuántica explica que puede calcularse la cantidad de energía transportada por un fotón siempre y cuando se conozca su frecuencia:

$$Q=hF \quad [2]$$

Donde Q es la energía radiante de un fotón (Julios), F a la frecuencia y h a la constante de Planck ($6.6 \times 10^{-34} \text{ Js}$). Al despejar F en [1] y sustituirla en [2] se obtiene:

$$Q=h(c/\lambda) \quad [3]$$

La ecuación [3] significa que a mayor frecuencia (o menor longitud de onda) el contenido energético será mayor y viceversa, lo que implica que las ondas cortas

cargan con un contenido energético más alto y este va decayendo conforme las longitudes de ondas se van haciendo más largas.

El espectro energético de radiación electromagnética es continuo y abarca desde las ondas de longitud más corta o de mayor frecuencia como los rayos gama, X y ultravioleta, hasta los de longitud más larga o de menor frecuencia utilizados para las telecomunicaciones. En la Figura 16 se identifican porciones discretas de radiación electromagnética que muestran un comportamiento similar, permitiendo de esa manera definir distintas bandas en el espectro y así clasificar las características de las ondas reflejadas por las cubiertas de la superficie terrestre de acuerdo a sus longitudes de onda o frecuencia.

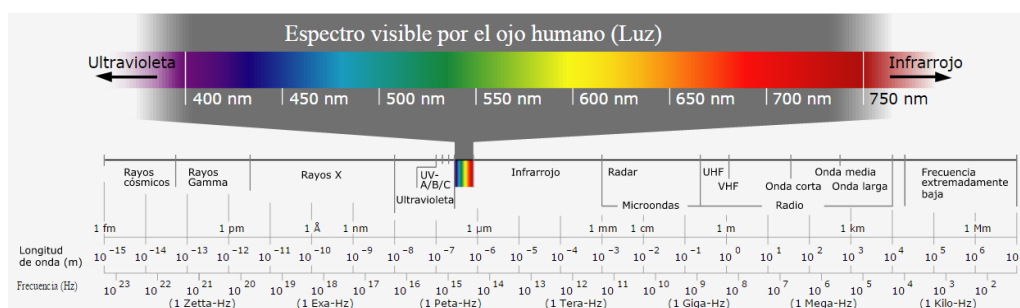


Figura 16. Espectro electromagnético.

Fuente: Horst Frank, 2006.

Para la percepción remota existen varias regiones de interés las cuales son: a) el espectro visible, que va de los 0.4 a los 0.7 μm , b) infrarrojo cercano, de 0.7 a los 1.3 μm , c) infrarrojo medio, de los 1.2 a 8 μm , d) infrarrojo térmico abarcando de 8 a 14 μm , y e) microondas con su longitud de onda mayor a 1 mm.

Un sistema de percepción remota está constituido por los elementos siguientes (Figura 17):

- 1 Fuente de energía, que es el origen de la radiación electromagnética que detecta el sensor, es pasiva cuando es externa a este y activa cuando es emitido por dicho sensor. La fuente más importante de energía pasiva es el Sol.
- 2 Objeto observable, en este caso la superficie terrestre, provista de distintas cubiertas: vegetación, agua, distintos tipos de suelo, asentamientos humanos; los cuales reciben la radiación energética de (1) y la reflejan o emiten de acuerdo con sus propiedades físicas.

- 3 Sensor, compuesto por el sensor en sí y la plataforma en que va portado. El sensor tiene como función primordial el captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla, y gravarla o enviarla directamente a un sistema de recepción. Para que exista un registro de información en el sensor, tiene que haber una interacción energética entre la superficie terrestre y dicho sensor, ya sea por la reflexión de energía solar, la emisión de radiación de la propia cubierta o de un haz energético artificial emitido por el propio sensor.
- 4 Sistema de recepción-comercialización, donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se grava en un formato apropiado, se le hacen las correcciones necesarias y, finalmente, se distribuye a los usuarios interesados.
- 5 Interprete, el cual convierte los datos en información temática de interés, ya sea visual o digitalmente, facilitando la evaluación del objeto en estudio.
- 6 Usuario final, es el encargado de analizar la información e interpretarla, así como de dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven.

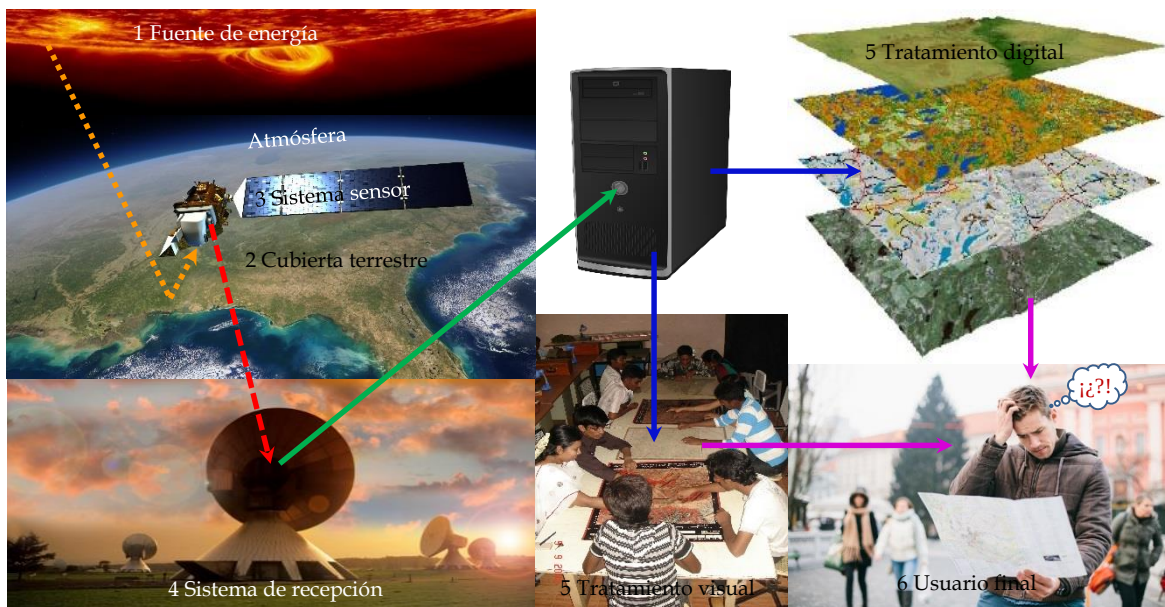


Figura 17. Componentes de un sistema de percepción remota.
Fuente: Adaptado de Chuvieco, 2000.

La información obtenida mediante esta técnica dada a la gran cobertura de una misma área y su periodicidad, producto de las orbitas repetitivas de los satélites en los que van montados los sensores y la altitud a la que se encuentran, resulta en una herramienta ideal para una amplia gama de aplicaciones. Así, es posible la observación de distintos tipos de fenómenos, darles seguimiento, comprender su dinámica y analizar las causas que los desencadenan y sus consecuencias. Otra ventaja de usar esta herramienta es la obtención de información en regiones del

espectro electromagnético que no son visibles para la visión humana ya que dependiendo del tipo de sensor, puede registrar información, además de la región visible, en las regiones del espectro infrarrojo cercano, medio, térmico, y microondas. Dichas regiones son útiles para estudiar diversos fenómenos y propiedades de las coberturas de la corteza terrestre como la humedad del suelo.

La información satelital es registrada en bandas individuales, así una imagen satelital llamada escena, y dependiendo del tipo de sensor que la registre, está compuesta por un cierto número de bandas, una para cada región del espectro electromagnético empleado.

Una característica vital de un sistema espacial de percepción remota es la resolución del sistema sensor, esta resolución está dividida en cuatro distintos tipos:

Resolución espacial:

Básicamente se refiere al tamaño del píxel de la escena, el cual permitirá distinguir objetos hasta cierto tamaño o separar distintos tipos de cubierta. La resolución espacial está en función de varios factores como la altura orbital del satélite donde está montado el sensor, la velocidad de exploración, número de detectores etc. La resolución espacial también depende del objetivo del sistema sensor pues de esto dependerá el nivel de detalle que se desee obtener en la escena.

Resolución espectral:

Se refiere al número y anchura de las bandas espectrales que puede registrar un sensor espacial, por lo general se busca que estas bandas sean lo suficientemente estrechas para recoger información de regiones específicas del espectro, ya que si son demasiado anchas pueden llegar a registrar información de dos distintas bandas arrojando valores promedio en los que se perdería información valiosa del objeto de interés. El número de bandas que registre un sensor nuevamente estará en función de los objetivos de su diseño.

Resolución radiométrica:

Indica que tan sensible es el sensor, esto es su capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral, como la información recibida está en formato digital también puede entenderse como el rango de niveles de grises que puede tener cada píxel. Estos niveles van del blanco al negro y están definidos por el número de bits con que se registra la escena. De esta manera en una imagen de 8 bits (8 bits, $2^8 = 256$) cada píxel tiene un rango de 256 tonos entre el blanco y el negro, así esta

característica ayuda a poder interpretar y discriminar de mejor manera la información obtenida por el sensor.

Resolución temporal:

Se refiere a la frecuencia con que el sensor adquiere imágenes de un mismo sitio o porción de superficie terrestre. Está en función de los objetivos para los que fue diseñado el sensor.

Como toda herramienta, la percepción remota tiene sus limitantes que tienen que ver con las características propias de cada sensor ya que puede ser que las resoluciones manejadas no sean suficientes para resolver problemas específicos. Otra limitante es la imposibilidad de varios sensores de registrar información útil cuando hay presencia de nubes, afectando su resolución temporal; los sensores registran información de la superficie terrestre pero son incapaces de registrar fenómenos que se llevan a cabo por debajo de las nubes o debajo de la superficie terrestre. Así, esta herramienta complementa de manera eficiente las técnicas convencionales de búsqueda de datos, como el trabajo de campo.

2.3.2 Sistemas de Información Geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son herramientas o sistemas computacionales que permiten la captura, almacenamiento, consulta, análisis y visualización de información geoespacial. Gracias a su formato digital, la información es fácilmente almacenada y manipulada, y con la capacidad actual de las computadoras, es posible la integración de distintos tipos de datos de gran tamaño de una manera rápida.

La información geoespacial con la que trabajan los SIG, describe la localización y características del objeto de interés en el espacio. La habilidad de los SIG de manipular y procesar información geoespacial, los distingue de otros sistemas de información, permitiendo su uso en distintas disciplinas (Chang, 2012).

Los datos geoespaciales que alimentan a un SIG pueden ser en formato vectorial o ráster. Los datos vectoriales registran la variabilidad y características discretas de la zona de estudio. Características con localizaciones y formas bien definidas, por medio de entidades geométricas simples como: puntos, líneas y polígonos, las cuales tienen dimensión y propiedad. Así, un punto tiene dimensión cero y tiene como propiedad su ubicación; una línea tiene dimensión uno y tiene como propiedad su

longitud en adición a su ubicación; y un polígono es de dimensión dos y tiene como propiedad su área y perímetro en adición de su ubicación. Los datos vectoriales se dividen en dos grandes grupos: modelos de datos georrelacionales y modelos de datos basados en objetos. En los primeros, los atributos y geometrías se almacenan en un sistema dividido, mientras que en los segundos se usa un solo sistema para almacenar tanto atributos como geometrías. A pesar de ser entidades simples para la representación del entorno, su uso no es tan simple, pues depende de la escala del mapa. Por ejemplo, a una escala muy grande, una ciudad puede parecer un punto, pero ese punto a una escala mucho menor tendrá la forma de un polígono (Chang, 2012). Una característica importante de los datos de modelo vectorial es la topología, este término se refiere a propiedades e interrelaciones de los objetos geométricos que no varían después de ciertas transformaciones (Chang, 2012). Los datos de un modelo vectorial pueden tener, o no, topología en caso de que no la tengan se considera que son de tipo puramente cartográfico pues sus elementos no tienen relación entre sí (Olaya, 2011). El uso de topología requiere archivos adicionales para almacenar las características y relaciones espaciales entre las entidades ya sean de punto, línea o polígono. Las principales ventajas de su uso son el aseguramiento de la calidad e integridad de los datos y un mejor proceso de análisis en el SIG (Chang, 2012). La geometría de este tipo de datos esta almacenada en dos archivos: uno con terminación x.shp (shape), el cual almacena la geometría de las entidades, y el otro con terminación x.shx encargado de almacenar los datos espaciales de las entidades. Los archivos shape no contienen topología, las principales ventajas de usar archivos sin topología es que estos pueden ser visualizados de manera más rápida en la pantalla a diferencia de aquellos con topología. Los archivos x.shx no tienen propietario, lo que hace posible su interoperabilidad, esto es, tienen la posibilidad de ser usados en diferentes softwares de SIG (Chang, 2012).

A diferencia de los datos vectoriales que sirven para representar características discretas cuya forma y posición está bien definida, los datos en modelo ráster son más útiles para representar fenómenos continuos, los cuales serían mucho más complicados de representar para los datos vectoriales. Así, es posible seguir fenómenos que varían continuamente a través del tiempo como la erosión del suelo, la elevación del suelo y precipitación. Un modelo de datos ráster representa una superficie continua, la cual se divide en filas, columnas y celdas o también llamados píxeles, estos contienen un valor que representa las características de un fenómeno espacial en la posición en la que se encuentra la celda, el valor puede ser entero o decimal. Esto es los datos ráster se entienden como una matriz cuyos valores son almacenados en un arreglo bidimensional, lo que con la capacidad actual de las

computadoras permite una manipulación, agregación y análisis más sencillos en comparación a los datos vectoriales (Chang, 2012). (Chang, 2012).

Para Olaya (2011), los datos ráster se caracterizan por su sistematicidad, ya que existe una relación implícita entre las celdas debido a su posición contigua, por no solaparse y cubrir todo el espacio, y sus elementos básicos, o principales, son:

1. Una localización exacta de alguna celda y una distancia entre celdas que permite conocer las coordenadas de todas las demás debido a su regularidad.
2. Un conjunto de valores correspondientes a las celdas.

A pesar de que los modelos de datos ráster, carecen de la precisión en la representación de características espaciales que tienen los modelos de datos vectoriales, tienen la ventaja de tener celdas cuya ubicación es fija.

El tamaño de celda de los datos ráster determina su resolución, así un tamaño de celda de 30 m, representará un área de 900 m², una de 10 m representará un área de 100 m², siendo una resolución más fina que la de 30 m y representando con más detalle características del fenómeno en estudio. Una desventaja de usar tamaños de celdas grandes es que no se puede representar con precisión la localización espacial de las características del fenómeno o puede haber una mezcla de características en los valores de las celdas. Como la mezcla de superficies boscosas con suelos desnudos. Sin embargo, reducir los tamaños de celda requiere que los datos tengan un mayor volumen y, en consecuencia, los tiempos de procesamiento sean más largos.

Olaya (2011) representa los componentes de un SIG en tres subsistemas (Figura 18):

- Subsistema de datos: Básicamente se refiere a la gestión de los datos en el sistema SIG, su entrada, salida, su acceso y gestión por otros subsistemas.
- Subsistema de visualización y creación cartográfica: Crea representaciones a partir de los datos, su interacción y edición.
- Subsistema de análisis: Métodos y procesos para el análisis de los datos.

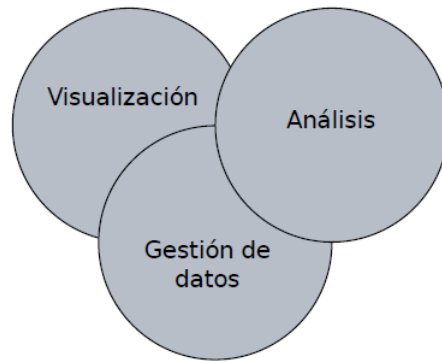


Figura 18. Subsistemas de un SIG.

Fuente:Olaya, (2011).

Olaya (2011) considera que un aspecto muy importante es el de visualización, pues este subsistema es usado en mayor medida, y a pesar de que un SIG tiene capacidades mucho mayores, para el usuario medio, la visualización está en primera línea del conjunto de capacidades de un SIG. Así propone cinco componentes principales en un SIG (Figura 19):

- Datos: Son la materia prima necesaria para el SIG, necesarios para el trabajo y los que contienen información geográfica.
- Procesos: Métodos enfocados al análisis de los datos.
- Visualización: Métodos y fundamentos relacionados con la representación de los datos.
- Tecnología: Software y hardware SIG.
- Factor organizativo: Engloba los elementos relativos a la coordinación entre personas, datos y tecnología, o la comunicación entre ellos.

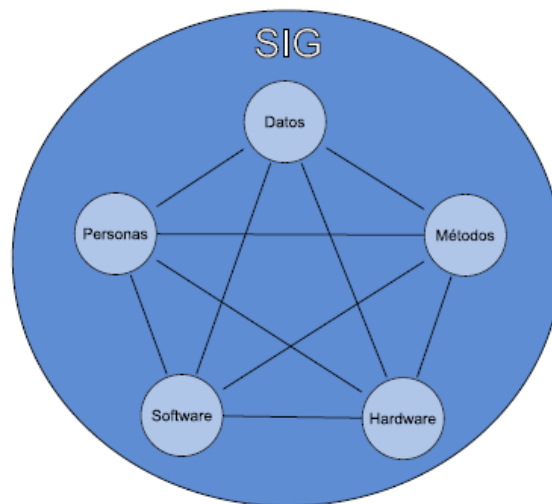


Figura 19. Componentes de un SIG.

Fuente:Olaya, (2011).

Los elementos básicos son datos, métodos, software, hardware y personas, aunque Chang (2012) define los métodos, como el conjunto de formulaciones y metodologías a aplicar sobre los datos y propone que el funcionamiento de los SIG requiere, además de la información geoespacial, los componentes siguientes (Chang, 2012):

- Hardware: Se refiere al equipo físico, que cuente con un sistema operativo.
- Software: El código fuente y la interfaz de usuario del propio SIG.
- Gente: Los usuarios y profesionales de los SIG, los que definirán los objetivos y el uso que se les dará.
- Infraestructura: El ambiente físico, organizacional, administrativo, y cultural que es necesario para apoyar el funcionamiento de los SIG.

Con lo cual Olaya y Chang coinciden aunque con nombres diferentes.

2.3.3 Métodos para comparar patrones espaciales de inundaciones

En lo referente a las inundaciones, los modelos hidrológicos son aprovechados para realizar estudios de predicción, de acuerdo con la información meteorológica, histórica y actual del sitio de interés. Esta información comprende datos de precipitación, humedad, temperatura, etc. Las predicciones están dadas comúnmente en términos de probabilidad, y se asocian con los períodos de retorno, o intervalos de recurrencia, que tienen eventos de distintas magnitudes, los cuales varían para cada cuenca dependiendo de sus características. Los períodos de retorno están definidos como el tiempo promedio entre eventos de determinada magnitud asumiendo que los distintos eventos son aleatorios. Esta probabilidad de inundación es la inversa del período de retorno (Abhas et al., 2012).

Los modelos numéricos junto con la información topográfica que brindan los MDE, arrojan como resultado información de las características que tendría una inundación en un sitio específico: datos de velocidades y dirección del flujo, profundidad, extensión, etc. (Bladé et al., 2012). Estos modelos, especialmente útiles para simular procesos hidrológicos, han sido también usados para probar la hipótesis acerca del comportamiento de sistemas naturales; sin embargo, la calidad de las simulaciones y las representaciones de los procesos espaciales han sido difíciles de valorar o evaluar debido a la falta de datos de campo apropiados. En este sentido, las capacidades de modelación de procesos espaciales pueden ser mejoradas o perfeccionadas mediante el uso de patrones observables de respuestas hidrológicas. Estos patrones proporcionan información suficiente que puede ser

utilizada para probar los modelos de manera más rigurosa y, de esta manera, obtener un mayor conocimiento del comportamiento hidrológico del que proporcionan los métodos convencionales (Grayson et al., 2000).

Este trabajo plantea la validación del modelo FluBidi (Modelo hidráulico de Flujo Bidimensional) para diferentes periodos de retorno empleando patrones espaciales de la huella de inundaciones históricas ocurridas y que ponen en riesgo a la subcuenca de Suchiapa en el estado de Chiapas, México.

2.3.3.1 Modelo FluBidi

En la actualidad, el uso de las computadoras ha permitido la creación y prueba de modelos matemáticos, los cuales representan los diferentes elementos del ciclo hidrológico y han permitido comprender sus complejas interrelaciones. Estos análisis matemáticos y su aplicación hacen posible la simulación de procesos hidrológicos.

El modelo FluBiDi (De Luna, 2015) se basa en un modelo para Pronóstico de Esguerrimiento (MPE), desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, que tiene la finalidad de obtener el hidrograma de esguerrimiento de una cuenca con un modelo de parámetros distribuidos. Estos modelos proveen una mejor interpretación de los procesos hidrológicos e incorporan diversas variables y parámetros del ciclo hidrológico y de la cuenca hidrográfica. Los resultados van desde una serie de datos de flujo fluvial sintéticos, características de calidad del agua o tasas de recarga de agua subterránea. Básicamente, los datos de entrada son datos de precipitación de lluvia; aunque se pueden emplear otras variables como nieve, temperatura, radiación o evapotranspiración potencial. Los modelos de cuenca urbana pueden incorporar una descripción de su red de drenaje, mientras que los modelos de cuenca rural pueden contener hidrogramas unitarios, curvas tiempo-área o subrutinas de propagación. Una de las mayores desventajas de los modelos hidrológicos es el alto requerimiento de datos de entrada, que no siempre existen o están disponibles, por lo cual su uso es aún limitado (Refsgaard y Abbott, 1996).

Los modelos distribuidos se fundamentan en principios físicos que se basan en ecuaciones de pequeña escala, suponiendo que son posibles los cambios de escala empleando valores paramétricos. Dado esto, las ecuaciones físicas de pequeña escala no son fáciles de generalizar en un sistema heterogéneo, Beven (1996) considera que

se deben establecer las limitaciones del proceso de modelización. Por ejemplo, establecer un marco de incertidumbre, así los parámetros dependientes de la escala puede considerar un modelo estadístico de heterogeneidad.

La aplicación típica de la modelación de cuencas consiste en: (1) seleccionar el tipo de modelo, (2) formular el modelo y construcción, (3) medir la exactitud del modelo, y (4) aplicar el modelo en la cuenca de estudio.

En este caso, el modelo FluBiDi incluye análisis complejos que involucran variaciones temporales y espaciales de parámetros entrantes al sistema hidrológico (precipitación) y aquellos que salen de este (escurrimiento, evapotranspiración e infiltración). Para este último, se sigue el método de número de curva o SCS (Soil Conservation Service) con la premisa de que el suelo se seca después de una lluvia. El modelo se basa en las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento y de conservación de masa, de manera que para calcular el flujo del agua en una planicie de inundación se debe resolver el sistema de ecuaciones diferenciales bajo ciertas condiciones iniciales y de frontera, y se emplea el método diferencias finitas puesto que no existe un método analítico para encontrar la solución de las ecuaciones mencionadas (De Luna, 2015). Las ecuaciones que resuelve el modelo parten de las ecuaciones que rigen el impulso:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + X - F_{sx} = \frac{du}{dt}$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + Y - F_{sy} = \frac{dv}{dt}$$

Donde p es la presión hidrostática (kgf/m^2), X y Y son fuerzas por unidad de masa en las direcciones x y y (m/s^2), F_{sx} y F_{sy} son fuerzas por unidad de masas asociadas a la resistencia del movimiento en las direcciones x y y (m/s^2), u y v son las velocidades de flujo en las direcciones x y y respectivamente (m/s^2), y x y y son direcciones verticales y horizontales en el sistema cartesiano. Estas ecuaciones después de varias consideraciones y ajustes quedan de la siguiente forma:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{n^2 |u| u}{h^{4/3}} = -\frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial Z}{\partial x}$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{n^2 |v| v}{h^{4/3}} = -\frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial Z}{\partial y}$$

La ecuación de conservación de masa puede escribirse como:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S$$

Donde:

$$U = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}; F = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 + gh^2/2 \\ huv \end{pmatrix}; G = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hu^2 + gh^2/2 \end{pmatrix}; S = \begin{pmatrix} r - f \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{pmatrix}$$

El área (en proyección horizontal) de la llanura a inundarse, se divide en celdas de forma rectangular de largo Δx y ancho Δy . El conjunto de estas celdas forma una malla (Figura 20). En este caso, se considera que las velocidades corresponden al valor promedio en la vertical (profundidad sobre la superficie) y dado que se asume el secado después de la lluvia, el flujo a diseñar es sobre una región con (mojada) o sin agua (seca) en una celda centro del dominio de cálculo, por lo cual la pendiente del terreno es un factor relevante y se toma en las dos direcciones horizontales. Así, las velocidades de desplazamiento del agua se aplican en cada dirección y la profundidad del agua en las zonas donde ocurre la inundación (De Luna, 2015).

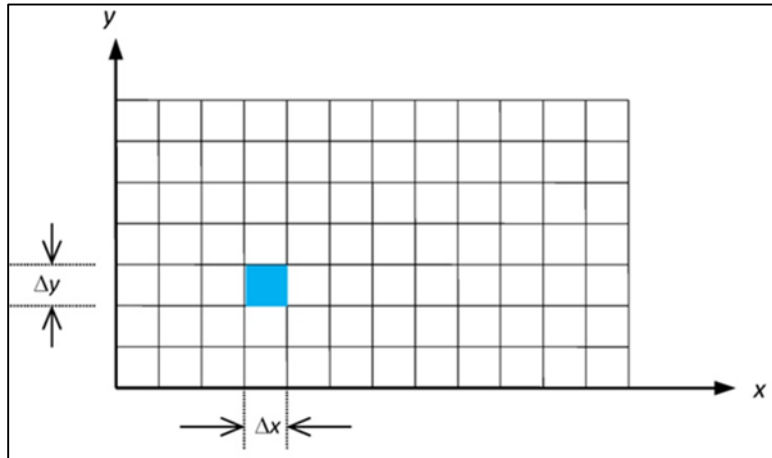


Figura 20. Zona de cálculo dentro de la cual se encuentra el área de inundación.

Fuente: De Luna, 2015

Para modelar el proceso de transformación de la lluvia en escurrimiento, por un lado se estima que parte de la lluvia no se transforma en escurrimiento (pérdidas) y otra parte si lo hace (diferencias) (modelo de producción) y, por otro lado, se establece como se desplaza el escurrimiento a través de la cuenca hasta llegar al sitio de interés (modelos de transferencia). Asimismo, el modelo FluBiDi plantea un modelo matemático para simular el flujo en llanuras aledañas al cauce para obtener el área

inundada, la magnitud de los niveles y de las velocidades del agua que se alcanzan durante la creciente. Lo anterior, permite definir las zonas de riesgo como aquellas donde el agua provoca daños debido a la velocidad de la corriente o por el tirante alcanzado por el agua.

3. Datos Disponibles

3.1. Datos Vectoriales

Los datos vectoriales que se obtuvieron de la página web del INEGI (2015) incluyen temas como recursos naturales: geología, edafología, hidrología, uso de suelo y vegetación, climatología, fisiografía, uso potencial del suelo, humedales potenciales y territorio insular (Tabla 1). Además, se adquirieron los datos de cartografía urbana, catastro, datos de relieve, geodesia, imágenes del territorio, marco geoestadístico nacional, nombres geográficos y topografía. Los datos manejados por el INEGI y que están disponibles para descarga son datos en formato shape.

Tabla 1. Datos vectoriales descargados de la página del INEGI. Fuente: INEGI, 2015.

Geometría	Nombre	Edición/Version
Pu	RH30Ei_dr.shp	2.0
L	RH30Ei_hl.shp	2.0
Po	RH30Ei_hl.shp	2.0
Po	RH30Ei_subc.shp	2.0
Pu	RH30Ei_to.shp	2.0
Po	mge2013v6_2.shp	6.2
Pu	mglr2013v6_2.shp	6.2
Po	mglu2013v6_2.shp	6.2
Po	mgm2013v6_2.shp	6.2
Po	canicula.shp	
L	CorrienteAgua.shp	
Po	cuerposAgua.shp	
L	evapotranspiracion.shp	
L	Fallasfracturas.shp	
Po	humedadSuelo.shp	
Pu	Minas y otras ubicaciones geograficas.shp	
L	precipitacionMediaAnual.shp	
Po	Provincias fisiograficas.shp	
Po	rocas.shp	
Po	Sistema de Topoformas.shp	
Po	Subprovincias fisiograficas.shp	
L	temp.shp	
Po	unidadesClimaticas.shp	
Po	Uso del suelo y vegetacion.shp	
Po	VegetacionDensa.shp	
Po	e1511_usv250s5a.shp	2013
Pu	e1511_usv250s5c.shp	2013
Po	e1511_usv250s5d.shp	2013
Pu	e1511_usv250s5e.shp	2013
Pu	e1511_usv250s5f.shp	2013
Po	e1511_usv250s5g.shp	2013
Po	e1511_usv250s5h.shp	2013
Pu	e1511_usv250s5i.shp	2013
L	e1511_usv250s5l.shp	2013

Po	e1511_usv250s5l.shp	2013
Pu	e1511_usv250s5o.shp	2013
Pu	e1511_usv250s5p.shp	2013
Po	e1511_usv250s5v.shp	2013
Po	con_nal_06-11-2013.shp	2013
Pu	edaf_puntos_sii.shp	2013
Po	objetos_edaf_06-11-2013.shp	2013
Po	Suelos.shp	2013

Pu= Punto; L=Línea; Po=Polígono.

3.2.Datos Ráster

Los modelos de datos ráster disponibles son imágenes satelitales proporcionadas por la USGS (United States Geological Survey) y obtenidas del programa Landsat, el cual fue puesto en órbita por la NASA desde la década de 1970, con el propósito de administrar los recursos con los que cuenta el planeta (Chuvieco et al., 2000). Entre las características más importantes de los datos provenientes de las distintas plataformas Landsat es que cada escena satelital cuenta con varias bandas, o imágenes, que representan la información obtenida en una determinada porción del espectro electromagnético. Dichas bandas e intervalos del espectro están definidos en función de los procesos energéticos que se llevan a cabo en la superficie terrestre, su respuesta es registrada en aquellos intervalos donde hay más actividad de los fenómenos de interés (Chuvieco et al., 2000).

Otros datos ráster disponibles, igualmente obtenidos del INEGI (2014), son datos de relieve, cuyas celdas tienen valores de elevación en metro sobre el nivel del mar (msnm). Estos modelos de elevación son llamados Continuo de Elevaciones Mexicano Edición 3 (CEM 3.0) y están disponibles en varias resoluciones: 120m, 90m, 60m, 30m y 15m. También se pueden descargar modelos digitales de alta resolución (LiDAR) a 5m de tipo superficie y terreno; sin embargo, sólo cubren una pequeña parte de la cuenca en estudio.

Las escenas satelitales descargadas de la USGS fueron seleccionadas por la ausencia de nubes o por tener poca cantidad de ellas; esto con el fin de poder tener información de utilidad y observar la superficie del sitio de interés. Además, debido a que la subcuenca del río Suchiapa se ubica entre dos escenas, se descargaron dos archivos de diferente columna por fecha (22/48 y 22/49) para poder cubrir la totalidad del área de interés. En la tabla 2 se muestran los datos ráster descargados:

Uso de patrones espaciales para la validación de un modelo hidrológico de inundaciones. Caso de estudio:
Subcuenca del río Suchiapa

Tabla 2. Información ráster descargada de la USGS y el INEGI. Fuente: USGS INEGI, (2015).

Tipo	Nombre	Año	Sensor
ES	LM20230481975339AAA05	1975	L2MSS
ES	LM30230481980160AAA05	1980	L3MSS
ES	LM30230491980160AAA05	1980	L3MSS
ES	LT50220481986070XXX03	1986	L5TM
ES	LT50220491986070XXX03	1986	L5TM
ES	LT40220481988116XXX03	1988	L4TM
ES	LT40220491988116XXX03	1988	L4TM
ES	LT40220481992079XXX02	1992	L4TM
ES	LT40220491992079XXX02	1992	L4TM
ES	LT50220481993009XXX04	1993	L5TM
ES	LT50220491993009XXX04	1993	L5TM
ES	LT50220481993041AAA04	1993	L5TM
ES	LT50220491993041AAA04	1993	L5TM
ES	LT50220481993329XXX02	1993	L5TM
ES	LT50220491993329XXX02	1993	L5TM
ES	LT50220481995015XXX01	1995	L5TM
ES	LT50220491995015XXX01	1995	L5TM
ES	LT50220481996002AAA03	1996	L5TM
ES	LT50220491996002AAA03	1996	L5TM
ES	LT50220481996066XXX01	1996	L5TM
ES	LT50220491996066XXX01	1996	L5TM
ES	LT50220481997004XXX01	1997	L5TM
ES	LT50220491997004XXX01	1997	L5TM
ES	LT50220481998087XXX01	1998	L5TM
ES	LT50220491998087XXX01	1998	L5TM
ES	LT50220481998103XXX01	1998	L5TM
ES	LT50220491998103XXX01	1998	L5TM
ES	LE70220482000085EDC00	2000	L7ETM+
ES	LE70220492000085EDC00	2000	L7ETM+
ES	LE70220482001087EDC00	2001	L7ETM+
ES	LE70220492001087EDC00	2001	L7ETM+
ES	LE70220482002010SGS00	2002	L7ETM+
ES	LE70220492002010SGS00	2002	L7ETM+
ES	LE70220482002298EDC00	2002	L7ETM+
ES	LE70220492002298EDC00	2002	L7ETM+
ES	LC80220482013208LGN00	2013	L8OT
ES	LC80220492013208LGN00	2013	L8OT
ES	LC80220482014051LGN00	2014	L8OT
ES	LC80220492014051LGN00	2014	L8OT
ES	LC80220482014067LGN00	2014	L8OT
ES	LC80220492014067LGN00	2014	L8OT
ES	LC80220482014099LGN00	2014	L8OT
ES	LC80220492014099LGN00	2014	L8OT
MDE	cem30_workspace_cem3_r15	2013	N/A

ES=Escena Satelital; Li= Landsat I; MSS=Multispectral Scanner; TM=Thematic Mapper; ETM+=Enhanced Thematic Mapper Plus; OT= OLI & TIRS; MDE= Modelo digital de elevaciones; N/A= No Aplica

Los sensores cuya información se descargó son: MSS: (Landsat 2 y 3) cuya área de cobertura es de aproximadamente 170 km de norte a sur por 185 km de este a oeste; también se descargaron datos de TM (Landsat 4 y 5), ETM+ (Landsat 7) y OLI-TIRS (Landsat 8) con una cobertura aproximada de 170km de norte a sur por 183 km de

este a oeste para los tres sensores. Sus características espectrales así como su resolución espacial se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Características espectrales y resolución para los sensores de los satélites Landsat. Fuente: USGS, (2015).

Sensor	Satelite que lo porta y número de bandas		Rango del Espectro (μm)	Resolución (m)
Multispectral Scanner (MSS)	Landsat 1-3	Landsat 4-5		
	Banda 4	Banda 1	0.5-0.6	60*
	Banda 5	Banda 2	0.6-0.7	60*
	Banda 6	Banda 3	0.7-0.8	60*
	Banda 7	Banda 4	0.8-1.1	60*
Thematic Mapper (TM)	Landsat 4-5			
	Banda 1		0.45-0.52	30
	Banda 2		0.52-0.60	30
	Banda 3		0.63-0.69	30
	Banda 4		0.76-0.90	30
	Banda 5		1.55-1.75	30
	Banda 6		10.40-12.50	120**(30)
Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	Landsat 7			
	Banda 1		0.45-0.52	30
	Banda 2		0.52-0.60	30
	Banda 3		0.63-0.69	30
	Banda 4		0.77-0.90	30
	Banda 5		1.55-1.75	30
	Banda 6		10.40-12.50	60*** (30)
	Banda 7		2.09-2.35	30
Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Landsat 8			
	Banda 1		0.43-0.45	30
	Banda 2		0.45-0.51	30
	Banda 3		0.53-0.59	30
	Banda 4		0.64-0.67	30
	Banda 5		0.85-0.88	30
	Banda 6		1.57-1.65	30
	Banda 7		2.11-2.29	30
	Banda 8		0.5-0.68	15
	Banda 9		1.36-1.38	30
	Banda 10		10.60-11.19	100****(30)
	Banda 11		11.50-12.51	100****(30)

*Tamaño de pixel del MSS era originalmente de 79x57 metros; ahora los sistemas de producción remuestrean los datos a 60 metros.

**Las bandas del TM fueron adquiridas a 120 metros de resolución, pero son remuestreadas a pixeles de 30 metros.

***La banda 6 del ETM+ es adquirida a 60 metros de resolución, pero es remuestreada a pixeles de 30 metros.

****Las bandas TIRS son adquiridas a 100 metros de resolución, pero son remuestreadas a 30 metros en los datos entregados.

3.3.Datos Meteorológicos

Con el fin de determinar los periodos secos o de lluvia, así como la variación de temperatura en el área de estudio, se obtuvo información meteorológica de siete estaciones climatológicas (CLI COM; SMN, 2015) ubicadas dentro del área de la subcuenca (Figura 21).

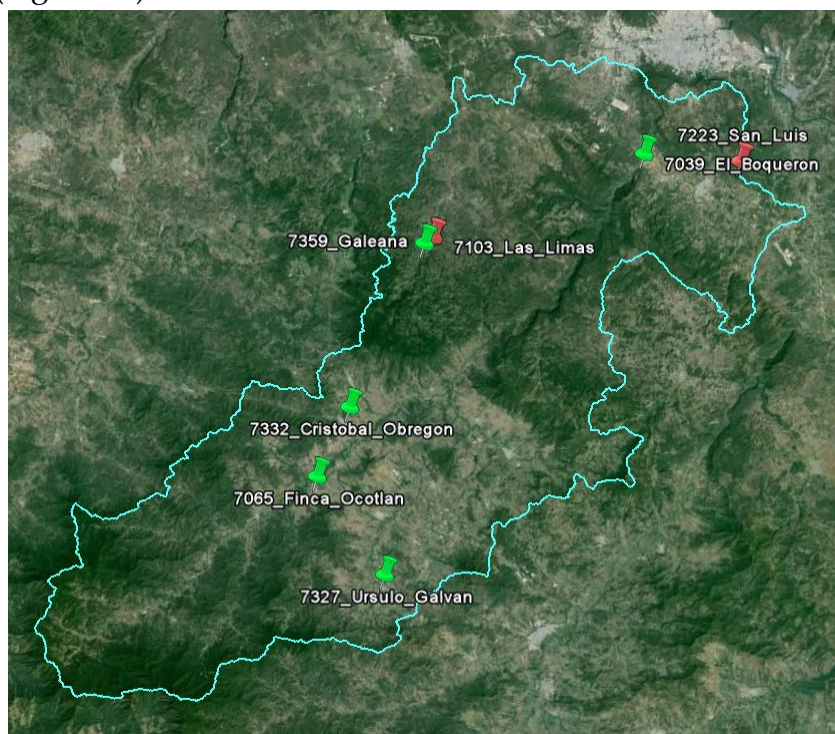


Figura 21. Estaciones climatológicas de la subcuenca del Río Suchiapa.

Las estaciones, clave y nombre, son: 7039 El Boqueron, 7065 Finca Ocotlan, 7103 Las Limas, 7223 San Luis, 7327 Ursulo Galvan, 7332 Cristobal Obregon y 7359 Galeana, las cuales proporcionan información continua de valores como lluvia y temperatura. Aunque la 7103 y la 7223 (marcador rojo en la Figura 21) sólo cuentan con registros de 1970-1999 y 1974-1983, respetivamente.

Para observar los comportamientos tanto de la temperatura como de la precipitación, se calcularon valores promedios mensuales para cada año de un periodo de 37 años de estas dos variables para las estaciones 7039, 7065 y 7327, respectivamente. Se eligieron dichas estaciones ya que además de tener los registros más completos (1975-2012), están repartidas en tres importantes zonas de la subcuenca: la 7039 en la comunidad urbana de Suchiapa, la 7065 en el valle de la subcuenca y la 7327 ubicada junto a la zona montañosa. Los años en los que los registros se interrumpieron para uno o varios meses seguidos se descartaron.

3.3.1 Precipitación

Los datos de precipitación se graficaron en las Figuras 22, 23 y 24. En la Figura 22 se muestra la gráfica para la estación 7039 El Boqueron, ubicada en Suchiapa. El periodo de lluvias generalmente empieza en el mes de mayo y termina en octubre. La precipitación promedio mensual alcanzó niveles máximos de 18 mm en el año de 1996, asociado a la presencia del huracán Alma y Boris, que tuvieron lugar entre el 20 de junio y el 1 de julio de ese año, siendo de categoría 2 y 1 respectivamente. Además es de mencionar los años de 1988 y 1998 en los que se registró máximos de 14 mm en agosto y 13 mm en septiembre, respectivamente. Se ha llegado a mínimos de hasta 1.5 mm en los años de 1997 y 2002. También se han registrado años como en 1992 o 1989 donde no hubo presencia de eventos importantes, pues no se presenta pico alguno en los registros, y los valores mínimos se registraron en 2 mm, mientras los máximos apenas estuvieron entre los 5 y 6 mm. Igualmente se aprecia que hubo un pico atípico en el mes de octubre del año 2005 casi similar al presentado en 2003. Los meses en lo que se presentan mayores precipitaciones son junio, agosto y septiembre, pues en estos meses puede apreciarse una mayor cantidad de picos.

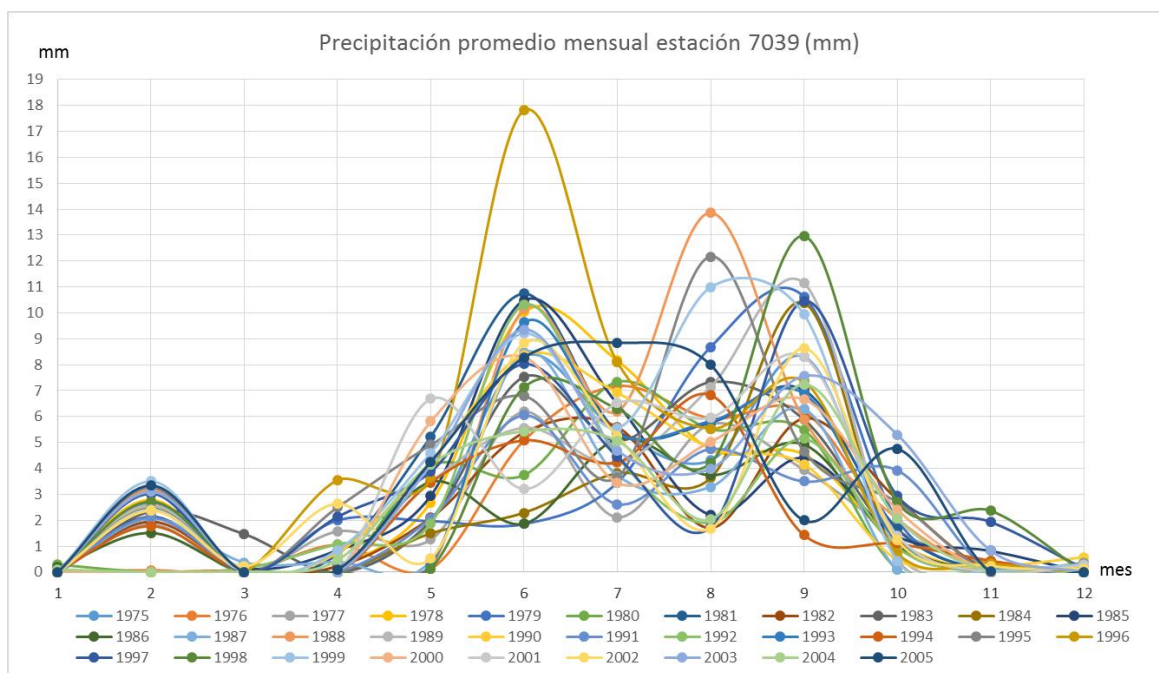


Figura 22. Precipitación promedio mensual para la estación El Boqueron, 1975-2005.

En la Figura 23 de la estación Finca Ocotlan ubicada en el valle de la subcuenca, la temporada de lluvias al igual que en la estación de El Boqueron empieza en mayo y termina en octubre, aunque hay lluvias atípicas que comenzaron en el mes de abril

para dos años consecutivos en 1983 y 1984 con 8 mm de precipitación. Ha habido valores máximos que sobrepasan los 18 mm y casi alcanzaron los 19 mm en los años de 2002 y 2003 en los meses de agosto y septiembre, respectivamente; siendo el año 2003 aquel con una importante presencia de precipitaciones durante toda la época de lluvias. Asimismo se han presentado meses sin lluvias en los años 1976, 1983 y 1984 en el mes de agosto.

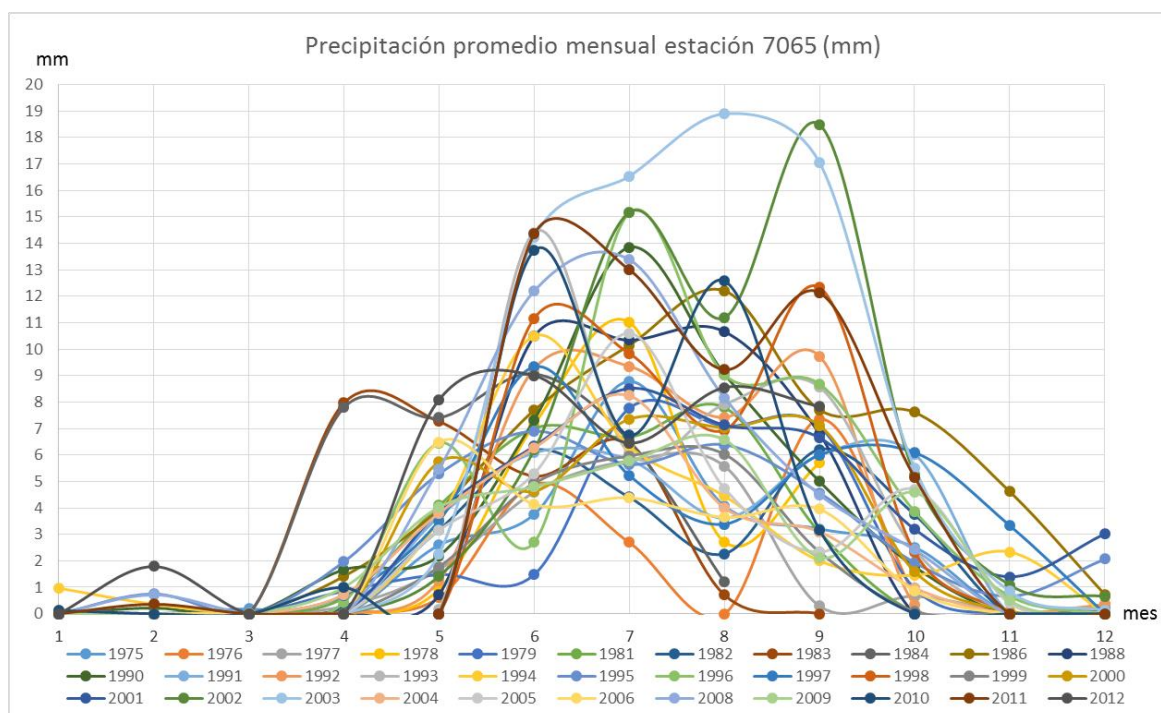


Figura 23. Precipitación promedio mensual para la estación Finca Ocotlan, 1975-2012.

Se observa una mayor variabilidad en comparación con la Figura 22. Cabe mencionar que al igual que en la estación de El Boqueron se presenta un máximo similar de 10.6 mm para el año 2005, además de un pequeño pico en el mes de octubre, pero a diferencia de El Boqueron las precipitaciones no mostraron un patrón. A diferencia de la estación de El Boqueron no es posible apreciar y establecer en que meses hay una mayor presencia de eventos, pues estos se presentan en todos los meses de la temporada lluviosa.

En la Figura 24 se muestra la gráfica de la estación Ursulo Galvan ubicada cerca de la región montañosa de la subcuenca, se observa que los máximos en esta región casi han alcanzado o sobrepasado los 32 mm en los años 2000 y 2005 en los meses de junio y julio. Los mínimos han alcanzado 0 mm en los años 1985 y 1991 en los meses de junio y septiembre, respectivamente, y aunque la época lluviosa empieza y

termina en los meses de mayo y octubre, en este último mes se han registrado lluvias atípicas con 17 mm y 18 mm para los años de 2005 y 2007, respectivamente. A diferencia de las dos estaciones anteriores, en esta estación se presentó uno de los mayores máximos en el año 2005, pues en el mes de julio se registró un promedio de 32 mm, por lo que los bajos registros en las estaciones anteriores para este año pueden deberse a condiciones locales. Aunque en esta estación al igual que en la anterior de Finca Ocotlan no puede establecerse en qué meses se presenta una mayor cantidad de picos, si se puede apreciar que los mayores registros se han presentado en los meses de junio, julio y septiembre.

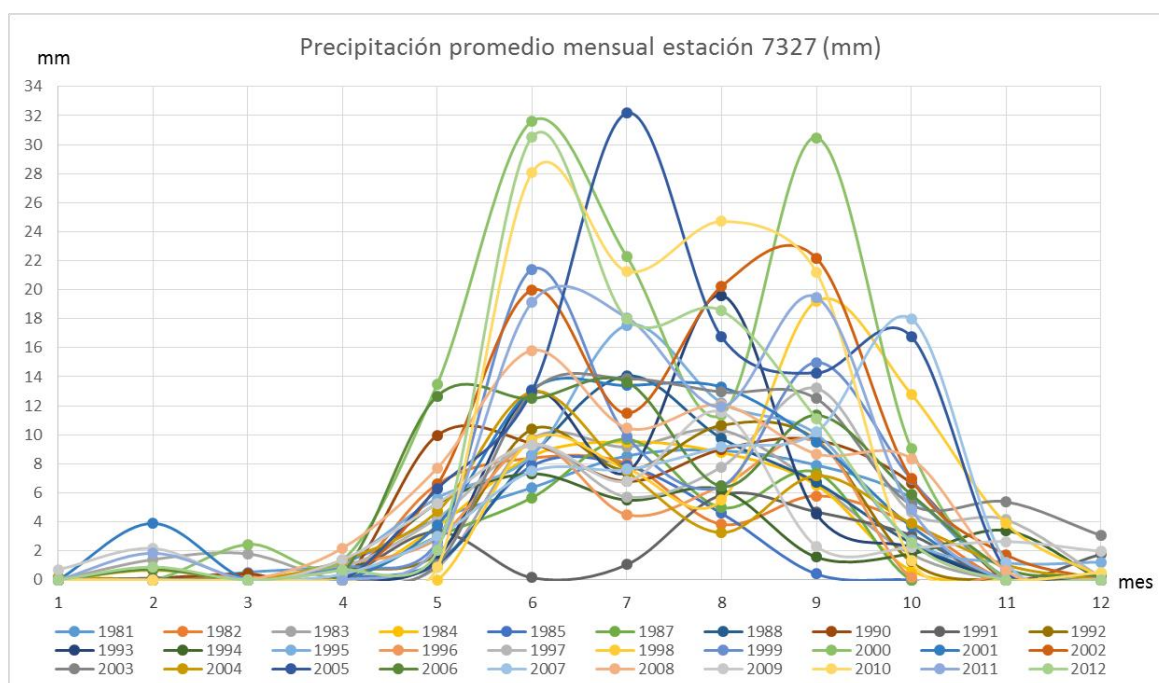


Figura 24. Precipitación promedio mensual para la estación de Ursulo Galvan, 1981-2012.

En general, la precipitación no muestra un comportamiento similar o un pico bien definido sino varios durante la temporada de lluvias, con eventos atípicos en abril y octubre que se presentaron en los años 1983, 1984, 2005 y 2007 en las zonas que contienen a las estaciones de Finca Ocotlan y Ursulo Galvan. Los años en los que se han presentado lluvias extraordinarias son 1996, 2000, 2002, 2003, 2005 entre otros en las tres regiones donde se ubican las estaciones.

El registro de las estaciones muestra que en la zona montañosa hay un mayor régimen de precipitación en comparación con las estaciones ubicadas en el valle y en la comunidad urbana, esto se asocia a las características locales como el tipo y uso de suelo, los cuales influyen en los procesos del ciclo hidrológico pues cubiertas

urbanas, agrícolas y boscosas influyen de manera distinta en este proceso. Además el mayor registro de precipitaciones coincide con: a) la mayor presencia de bosques, presentándose en estos un mayor flujo del agua debido a los ciclos hidrológicos cerrados, y b) la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos.

3.3.2 Temperatura

Los valores de temperatura que se muestran en la Figura 25 corresponden a la estación 7039 El Boqueron. En esta gráfica es interesante observar un comportamiento similar en casi todas las curvas, pues la temperatura muestra una variación de 4 °C en promedio, salvo algunos registros de temperaturas atípicas para el mes de febrero en los años de 1988 y 2000 en los que se alcanzó alrededor de 21.5 y 22.5 °C respectivamente, esto es, 2.5°C por arriba del promedio registrado para esa estación en ese mes. Los valores mínimos se presentan en los meses invernales con valores de entre 16 y 17 °C, siendo de alrededor de 22 °C en la época lluviosa.

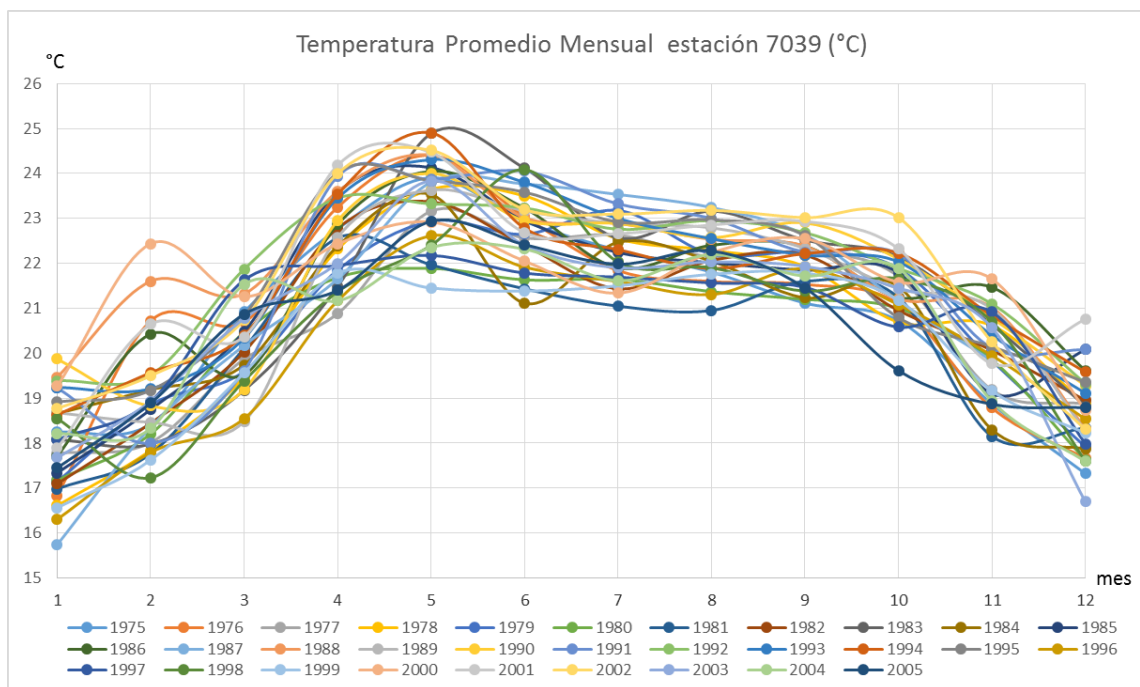


Figura 25. Temperatura promedio mensual para la estación de El Boqueron

En la Figura 25 se observa que la temperatura alcanza su máximo valor en el mes de mayo, y a partir de este mes comienza a descender, dando inicio la época lluviosa. El comportamiento similar de esta grafica se asocia a que al estar ubicada en una localidad urbana donde no se espera que se presenten grandes variaciones de temperatura en comparación con las comunidades rurales, las cuales están más

expuestas a los fenómenos climáticos y tienen coberturas vegetativas que atenúan la incidencia de la radiación en la superficie terrestre. Las estaciones en zonas urbanas se encuentran por lo general en azoteas, esto es rodeadas de cemento, o bien en patios de escuelas con alta absorción de radiación y, por tanto, temperaturas más elevadas que en zonas rurales.

La Figura 26 ilustra los valores de temperatura de la estación 7065 Finca Ocotlan, en esta gráfica se observa una mayor variación de la temperatura en comparación a la anterior, el promedio es de 6 °C se presentó un mínimo atípico en el mes de febrero de 1991 y diciembre de 2003, el cual alcanzo los 15.6 °C, cuando los valores mínimos oscilan entre los 17 y 19 °C. De la misma manera un valor máximo atípico se registró el mes de septiembre de 2009, alcanzando los 26.4 °C, sobrepasando por 1 °C los valores máximos registrados por la estación para esa zona. La dispersión de los valores en la gráfica hace que no sea posible apreciar de manera clara los picos o si existe alguna tendencia en el comportamiento de esta variable; el estar ubicada en una zona rural donde existe una gran cantidad de áreas de cultivo y estar más expuesta a los fenómenos hidrometeorológicos puede explicar el porqué de la mayor dispersión de los datos.

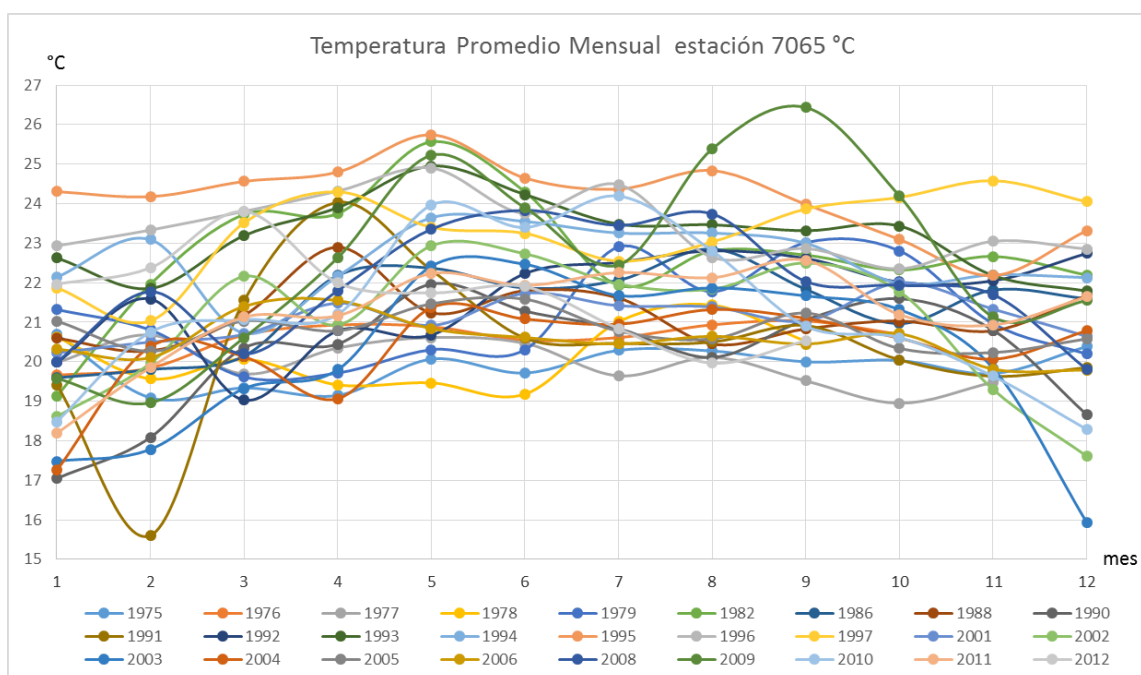


Figura 26. Temperatura promedio mensual para la estación de Finca Ocotlan.

En la Figura 27 se graficaron los registros de la estación 7327 Ursulo Galvan, y se observa una mayor variación de la temperatura que la observada en las estaciones

del El Boqueron y Finca Ocotlán, siendo de hasta 12 °C en promedio las diferecnias. Se aprecia que ha habido años como en 2006 y 2008 en la que la temperatura promedio del año fue baja pues registro máximos de entre 19 y 19.5 °C y mínimos de 14 °C, 4 °C más bajos en comparación con lo demás años registrados por la estación. También hubo registro de una temperatura atípica en el mes de diciembre de 1999 donde se registró una temperatura promedio de 24.5 °C, casi similar a las temperaturas máximas registradas por la estación en los meses de abril(24.6 °C en 1982 y 1988) y mayo (24.8 °C en 1981).

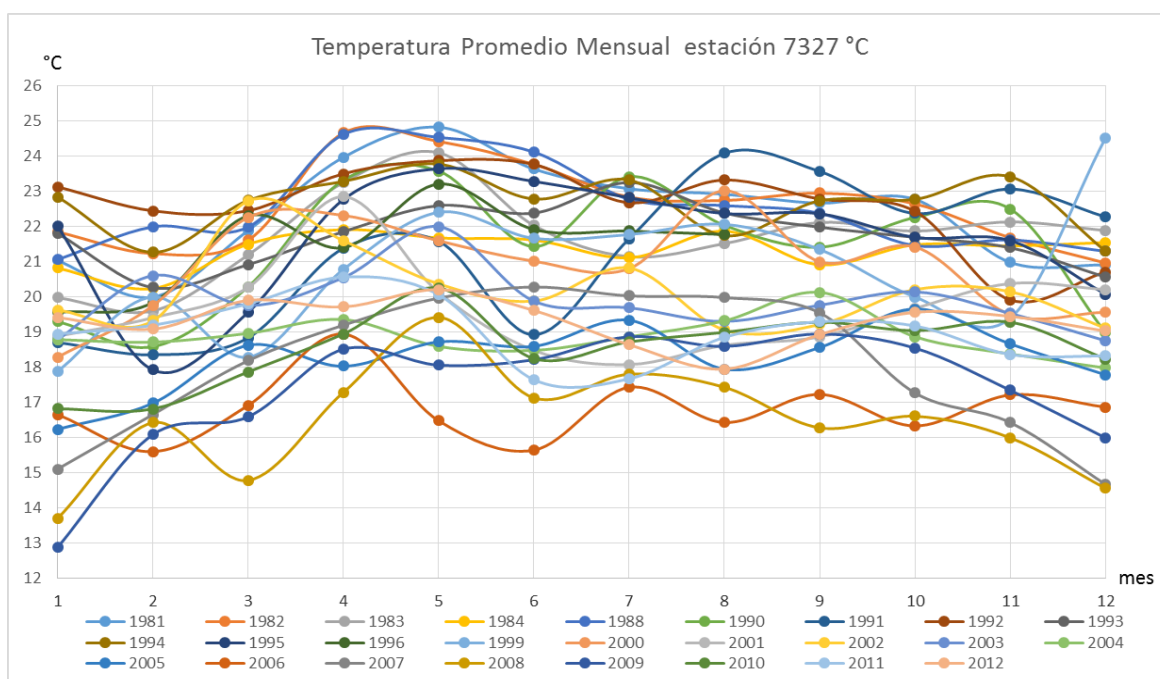


Figura 27. Temperatura promedio mensual para la estación de Ursulo Galvan

En general, la temperatura en la subcuenca muestra un comportamiento más disperso conforme se aproxima a la zona montañosa y similar en la zona urbana, pues es esta zona donde el comportamiento mostrado sigue una marcada tendencia. Dado que los datos son más dispersos en las dos estaciones de valle y montaña y se tienen comportamientos atípicos en los valores promedios máximos y mínimos para algunos años, esto puede asociarse a la alteración de los bosques y los cambios en el uso de suelo en esta zona, pues es en la que existen más áreas deforestadas convertidas en agrícolas. Estas mayores variaciones en las cercanías de la zona montañosa, al igual que los valores de precipitación, se asocia a que, está más expuesta a ciclos hidrológicos cerrados más comunes en bosques en buen estado generando un mayor régimen de precipitación y, por consiguiente, una mayor variación de temperatura resultado del mayor flujo de agua entre el suelo y la atmosfera.

3.4. Datos del Modelo Hidrológico FLUBIDI

La simulación consideró toda la Cuenca del Cañon del Sumidero y empleó los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas para posteriormente seleccionar los trenes de precipitaciones que se relacionan con las inundaciones por desbordamiento de cauces y por la acumulación de lluvia en la cuenca (precipitación de cuenca propia). Las estaciones seleccionadas por contar con registros continuos y confiables fueron Puente Colgante, El Burrero, Chiapilla y VillaFlores. En primer lugar se obtuvieron valores de lluvia efectiva, y se realizó un análisis pre precipitaciones obteniendo los hietogramas asociados a distintos periodos de retorno (Tr) como se muestra en la Figura 28a para la estación de Chiapilla. Para cada año registrado se obtuvo el valor máximo de lluvia diaria y se aplicó la función de distribución de probabilidad Doble Gumbel para así obtener láminas de lluvia acumulada por trenes de tormenta para n días consecutivos, siendo $n = 1, 2, \dots, 10$, para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 50 y 100 años (Fuentes et al., 2013). Asimismo, se contó con datos de escurrimiento medio diario de las estaciones hidrométricas 30014-Puente Colgante (1948-1963) y 30089-Puente Colgante II (1964-1979) del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) (IMTA, 2013) y se realizó el análisis de los escurrimientos registrados a fin de calcular la evolución en el tiempo de las inundaciones. La Figura 28b representa el hidrograma correspondiente a las estaciones Puente Colgante I+II para 1973, que fue el año con el escurrimiento más importante del periodo registrado por ambas estaciones, para los periodos de retorno de interés (2, 5, 10, 50 y 100 años).

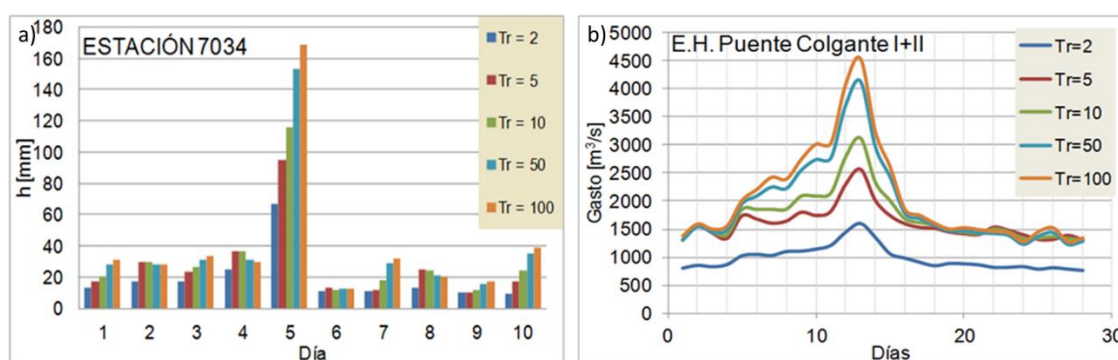


Figura 28.- a) Hietogramas de la Chiapilla y b) escurrimientos en la E.H. Puente Colgante I+II (1948-1979), para diferentes periodos de retorno

Se estimó que el evento ocurrido en 1973 registró un caudal máximo de $3,799 \text{ m}^3/\text{s}$ lo que coincide con un tiempo de recurrencia de 50 años mostrado en la Figura 29 donde se observan los escurrimientos y precipitaciones registrados

simultáneamente para las estaciones hidrométricas, Puente Colgante I y II y se observa un desfase entre la ocurrencia de los trenes de precipitación previos a la ocurrencia del pico del hidrograma histórico de alrededor de 3 días, aspecto a tomarse en cuenta para la simulación matemática de los fenómenos de lluvia-escurrimiento.

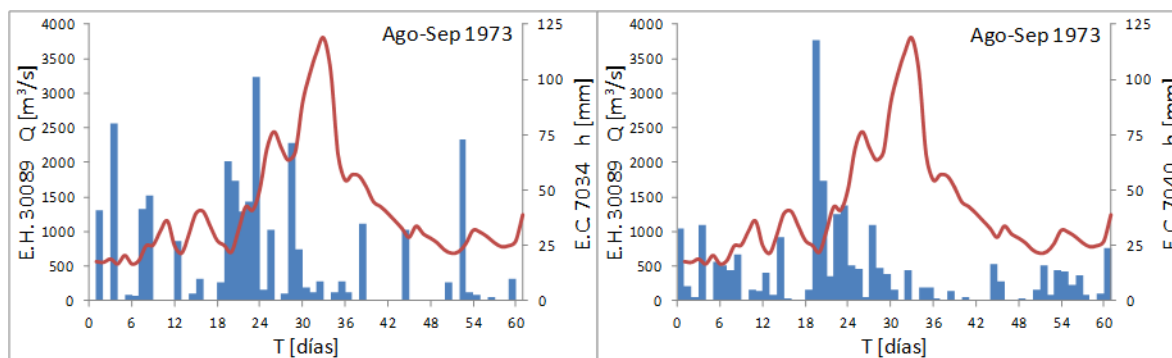


Figura 29.- Simultaneidad de eventos de precipitación y escurrimiento históricos en 1973, para las estaciones climática e hidrométrica de Puente Colgante I y II.

Finalmente, se simulan los eventos máximos que han tenido lugar, en especial, la simulación se realizó para la avenida máxima que se presentó en agosto-septiembre de 1973 y provocó inundaciones severas en Chiapa de Corzo, Tuxtla Gutiérrez y Suchiapa. Es importante mencionar que la parte del Medio Grijalva a la altura de la unión de los ríos Suchiapa y Grijalva en el municipio de Chicoasén corresponde a una depresión central formada de rocas sedimentarias con predominio de calizas, areniscas y conglomerados formando pequeños lomeríos con un intemperismo bajo por lo que no tienen efectos importantes de erosión hídrica. No así la erosión antropogénica, la cual es alta al favorecer la deforestación para la conversión en zonas agrícolas, aumento de asentamientos humanos y obras hidráulicas como las presas Angostura y Chicoasén.

Los datos, resultado de la simulación con el modelo hidrológico FluBidi, se dividen en tres tipos de valores: profundidad máxima, velocidad máxima y severidad, cada uno de estos tres tipos de resultados son presentados en forma de cinco archivos de texto simple, por lo que al final se cuenta con 15 archivos. Cada uno de dichos archivos contiene información de pares ordenados X y Y los cuales representan coordenadas proyectadas en el sistema UTM zona 15. Cada par ordenado está ligado a los datos de profundidad máxima, velocidad máxima y severidad, en unidades de metros, metros por segundo y un número que representa distintos grados de

severidad, respectivamente. En la Figura 30 se muestra el formato en el que están presentes los datos de profundidades máximas del modelo hidrológico.

X	Y	PROF_MAX
451900	1770900	7.486
451800	1771000	0.086
453600	1771000	1.086
451900	1771100	0.076
453500	1771100	1.025
453200	1771300	7.078
454400	1771300	0.596
453100	1771400	0.097
452600	1771600	0.123
453000	1771600	4.026
454700	1772100	1.23
454800	1772300	2.844
454200	1772500	0.052
453000	1772800	0.076

Figura 30. Formato de los datos de profundidad máxima, resultado del Modelo Hidrológico

Cada uno de los cinco archivos en que se dividen los tres tipos de resultados, representan el producto de un periodo de retorno (Tr). Los periodos simulados son: de 2, 5, 10, 50 y 100 años. Estos datos pueden exportarse a una hoja en Excel y, posteriormente, ser visualizados en un SIG, en donde se verán como datos en formato de puntos. Cada punto representa un área de 10,000 m² o una hectárea (100m x 100m).

4. Metodología

Para alcanzar los objetivos del presente trabajo se propone la metodología descrita en la Figura 31, la cual parte del análisis de la información disponible (ráster, vectorial y del modelo hidrológico).

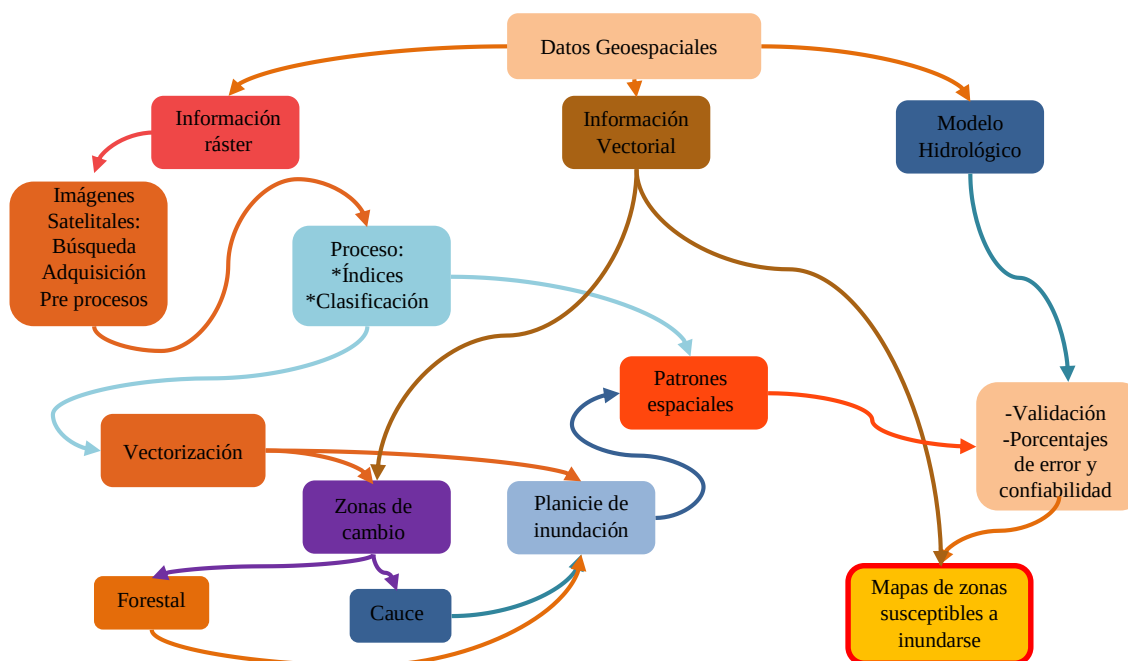


Figura 31. Metodología utilizada.

En general, la información ráster es preparada y pre-procesada, esto es, se crean mosaicos y hacen correcciones radiométricas (cálculo de reflectancias), para realizar un cálculo de valores físicos y un análisis espacio-temporal. De estos análisis se obtienen cambios en el uso del suelo, cambios en la dirección de los cauces, el área de la planicie de inundación y patrones espaciales que sirven para validar el modelo Flubidi para Tr de 2, 5, 10, 50 y 100 años y así cartografiar las zonas con alto riesgo de inundación.

4.1. Métodos aplicados

4.1.1 Análisis espacio-temporal de las imágenes satelitales

La información ráster consta de ortofotos e imágenes satelitales, estas últimas antes de poder ser utilizadas fueron sujetas a una preparación previa. Esta preparación

considera desde que el área de estudio no está cubierta por una sola escena satelital, requiriendo un par de escenas por fecha (para las columnas/filas 22/48 y 22/49) y, en consecuencia, la creación de un mosaico que cubra el área de interés y el recorte de este.

Posteriormente, se realizó el pre-procesamiento, el cual consistió en la corrección radiométrica, esto es el cálculo de los valores de reflectancia a partir de los niveles digitales de las escenas. Las correcciones geométricas y atmosféricas no fueron necesarias. Las escenas adquiridas están clasificadas como productos de nivel uno (Level 1 product) lo cual indica que las escenas han pasado por tratamientos geométricos aplicados a base de algoritmos desarrollados por la USGS para garantizar la precisión geométrica de sus productos. En el caso de la corrección atmosférica, esta no se aplica al tener imágenes sin nubes o neblinas cubriendo la zona de estudio.

El cálculo de reflectancias se realizó debido a que las escenas son de distintos sensores y fechas por lo que no se puede hacer una comparación directa entre ellas, al tener distintas características tanto radiométricas como espectrales. El cálculo de los valores de reflectancia permite comparar los cambios teniendo en cuenta una sola característica física de la superficie en lugar de seis distintas características radiométricas de seis distintos sensores (Chander et al., 2009; Chuvieco et al., 2010).

La reflectancia se calcula a partir de los valores digitales aplicando ecuaciones con valores determinados para cada tipo de sensor. Los valores son proporcionados en el metadato de la escena, específicamente de la sección "RADIOMETRIC_RESCALING". Para el cálculo de las reflectancias se utilizó la ecuación y los valores proporcionados en Chander (2009), donde primero se calculó la radiancia y de esta la reflectancia por longitud de onda (λ).

Cálculo de radiancias:

$$L_{\lambda} = (RADIANCE_MULT_BAND * Q_{CAL}) + RADIANCE_ADD_BAND \quad [4]$$

Donde:

L_{λ}	Radiancia espectral en la apertura del sensor
RADIANCE_MULT_BAND	Factor multiplicativo contenido en el metadato
RADIANCE_ADD_BAND	Factor aditivo contenido en el metadato
Q_{CAL}	Valores digitales de cada banda de la escena (0-255 MSS, TM y ETM+; 0-65536 OLI-TIRS)

Cálculo de reflectancias:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{ESUN_{\lambda} * \sin \theta_{SE}} \quad [5]$$

Donde:

ρ_{λ}	Reflectancia al tope de la atmósfera
Π	Constante matemática ≈ 3.141592654
L_{λ}	Radiancia espectral en la apertura del sensor
d	Distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas
$ESUN_{\lambda}$	Irradiancia exoatmosférica media solar (para cada banda)
θ_{SE}	Ángulo de elevación solar

Los parámetros “ d ”, “ $ESUN_{\lambda}$ ” y “ θ_{SE} ” son característicos de cada escena de acuerdo al día y la hora en que fue registrada.

Para las escenas del 2014 del Landsat 8, el cálculo de las reflectancias se realizó de forma directa con los datos que proporcionan sus respectivos metadatos por lo que no hubo necesidad de hacer el cálculo de radiancias. La reflectancia se calcula como:

$$\rho_{\lambda} = \frac{(REFLECTANCE_MULT_BAND * Q_{CAL}) + REFLECTANCE_ADD_BAND}{\sin \theta_{SE}} \quad [6]$$

Donde:

ρ_{λ}	Reflectancia al tope de la atmósfera con corrección por θ_{SE}
REFLECTANCE_MULT_BAND	Factor multiplicativo contenido en el metadato
REFLECTANCE_ADD_BAND	Factor aditivo contenido en el metadato
Q_{CAL}	Valores digitales de cada banda de la escena
θ_{SE}	Ángulo de elevación solar.

Empleando el comando Model Maker de ERDAS, se calcularon las reflectancias para cada banda de las escenas empleadas. La Figura 32 muestra el modelo obtenido para el sensor TM de Landsat 4.

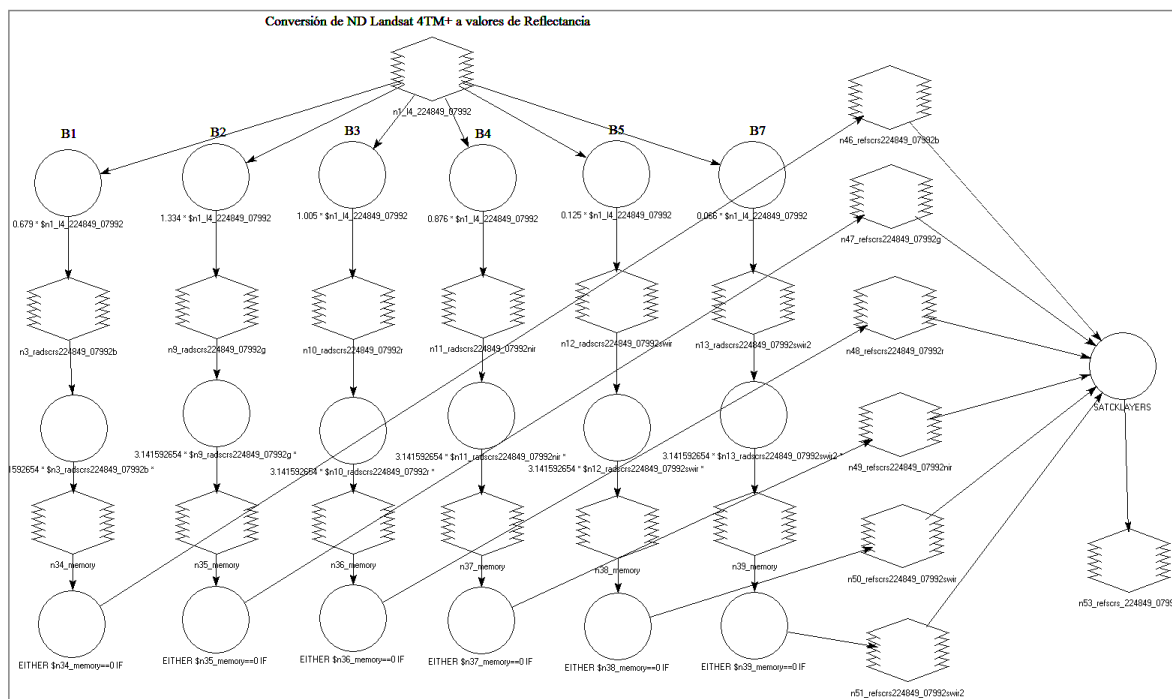


Figura 32. Modelo utilizado para el cálculo de reflectancias para el sensor TM de Landsat 4

Una vez que se tienen los valores de reflectancia, se realizó un análisis espacio-temporal, el cual permite identificar los cambios que ha habido a lo largo del tiempo en la zona de estudio. Para este análisis, se seleccionaron seis escenas satelitales abarcando un periodo de tiempo aproximado de 40 años, y ocupando información de 6 satélites del programa espacial Landsat. Cada escena se buscó tuviera un periodo de 10 años. Además, se consideró que correspondieran a estaciones del año similares para evitar confundir cambios estacionales con cambios reales y así poder observar las dinámicas de las cubiertas terrestres. Sin embargo, debido a condiciones atmosféricas, los periodos de tiempo no fueron exactamente de 10 años. La escena más antigua encontrada y adquirida de la zona de estudio es del 5 de diciembre de 1975 (DOY 339) correspondiente al sensor Multispectral Scanner (MSS), del satélite Landsat 2. Las otras imágenes son del 8 de junio del año 1980 (DOY 160) y corresponde al sensor MSS del Landsat 3; del 19 de marzo del año 1992 (DOY 079) del sensor TM del Landsat 4; del 28 de marzo de 2001 (DOY 087) del sensor ETM+ del Landsat 7; del 1 de abril de 2011 (DOY 091) correspondiente al sensor TM del Landsat 5 y finalmente, del 9 de abril de 2014 (DOY 099) del sensor OLI-TIRS del Landsat 8.

A partir de las reflectancias de las imágenes seleccionadas, se realizó el cálculo del índice normalizado de diferencia de vegetación (NDVI) para cada una de las seis escenas utilizando las bandas del rojo e infrarrojo cercano. La ecuación utilizada es:

$$NDVI = \frac{IR-R}{IR+R} \quad [7]$$

Donde:

NDVI Índice normalizado de diferencia de vegetación
IR Banda del Infrarrojo de la escena satelital
R Banda del Rojo de la escena satelital

Para obtener una visualización rápida y eficaz de los cambios en la cubierta forestal se hizo una composición multitemporal con los índices de vegetación obtenidos de las seis fechas, comparando dos escenas de distinta fecha a la vez; se usó la escena más antigua en el cañon rojo y la más reciente en el verde del visualizador, dejando el azul vacío (Chuvieco et al., 2010). Usando esta técnica, los cambios en la reflectancia de la cubierta forestal pueden apreciarse de acuerdo con el criterio siguiente:

- Verdes vivos, si hubo incremento en los valores reflectancia, esto es, si una cubierta paso de ser de una distinta a bosque (reforestación de bosques).
- Rojos vivos, si hubo pérdida en los valores, esto es, una cubierta que pasó de ser de bosque a una distinta (deforestación).
- Amarillos corresponden a zonas que muestran los mismos valores o similares a lo largo del tiempo, quiere decir que no hubo cambios significativos.
- Rojos o verdes oscuros, grises y negros para los demás tipos de cubiertas.

A fin de cuantificar los cambios en las distintas coberturas, y no solo apreciarlos visualmente, se realizó una clasificación no supervisada para discriminar las superficies boscosas. Sin embargo, para las escenas del año 1975 a 2011, las cubiertas urbanas se confunden con cubiertas brillosas como pastizales claros o suelos desnudos, porque su respuesta reflectiva es similar y los sensores, debido a sus características de resolución radiométrica, no alcanzan a discriminar entre estos tipos de cubiertas. Para la escena del 2014 de Landsat 8, la clasificación arrojó mejores resultados gracias a sus características radiométricas donde las cubiertas

urbanas fueron bien diferenciadas de las demás; resolución de 16 bits en lugar de 8 como los sensores anteriores.

Para las escenas que presentaron problemas en discriminar los asentamientos urbanos, se hizo el cálculo del Índice de Composición Biofísica (BCI, Biophysical Composition Index), el cual separa las superficies impermeables directamente ligadas con superficies urbanas, suelos desnudos y vegetación (Chengbin et al., 2012). La ecuación para su cálculo es la siguiente:

$$BCI = \frac{\frac{H+L}{2} - V}{\frac{H+L}{2} + V} \quad [8]$$

Siendo:

$$H = \frac{Brig - Brig_{min}}{Brig_{max} - Brig_{min}}, V = \frac{Gree - Gree_{min}}{Gree_{max} - Gree_{min}} \text{ y } L = \frac{Weth - Weth_{min}}{Weth_{max} - Weth_{min}}$$

Donde

Brig	Transformación TCT de brillo (brightness)
Brig _{min}	Valor mínimo del TCT de brillo
Brig _{max}	Valor máximo del TCT de brillo
Gree	Transformación TCT de verdor (greeness)
Gree _{min}	Valor mínimo del TCT de verdor
Gree _{max}	Valor máximo del TCT de verdor
Weth	Transformación TCT de humedad (wethness)
Weth _{min}	Valor mínimo del TCT de humedad
Weth _{max}	Valor máximo del TCT de humedad

Para la aplicación del BCI es necesario calcular las transformaciones Tasseled Cap (TCT, Tasseled Cap Transformation) cuyos coeficientes son proporcionados por Huang, (2002) y Chuvieco (2010), para los sensores ETM+ del Landsat 7 y TM del Landsat 4 y 5, respetivamente. Los coeficientes para el cálculo del TCT para Landsat 8 son proporcionados por Baig, (2014).

El cálculo de los Índices NDVI, TCT's y BCI se hizo mediante la herramienta Model Maker de Erdas (Figura 33), modificando los parámetros para el cálculo de los TCT para cada tipo de sensor.

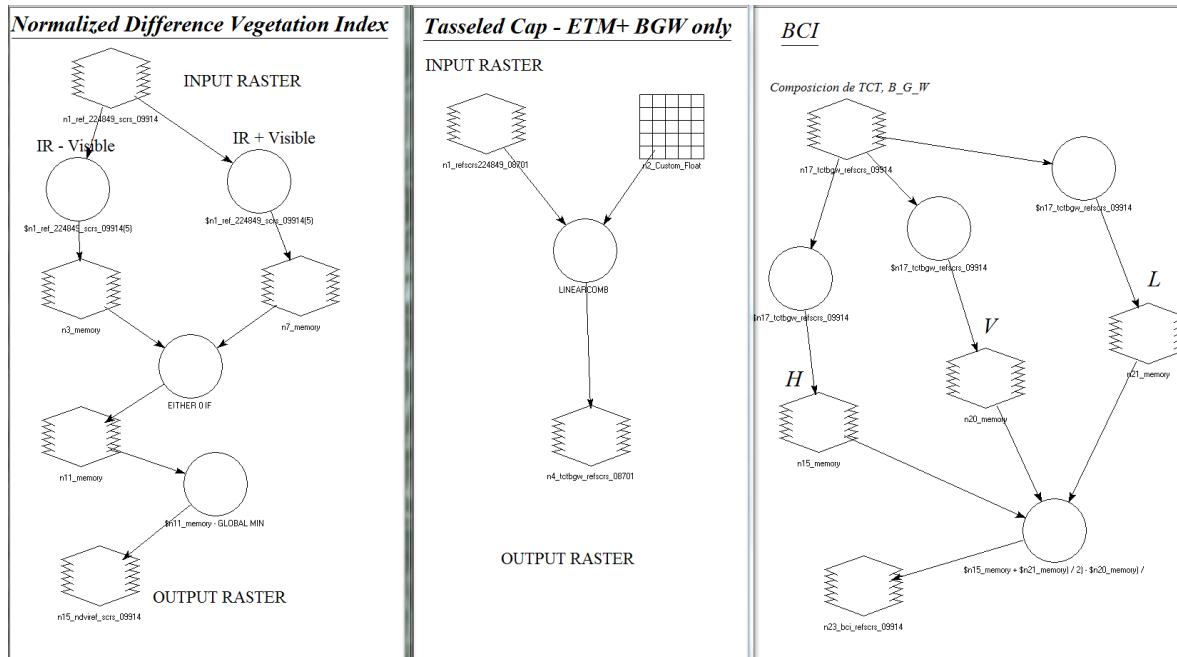


Figura 33. Modelos Utilizados para calcular índices de NDVI, TCT y BCI

Después del cálculo de los BCI, se procedió a extraer las cubiertas de asentamientos urbanos para lograr una clasificación mejorada combinando la información de la primera clasificación y los resultados del BCI. Finalmente, se obtuvieron las áreas de las distintas cubiertas para los distintos años y adicionalmente cuantificar los cambios que han tenido lugar en la subcuenca a lo largo del tiempo ya que con este análisis se sabe cómo y cuánto se ha deforestado la zona de interés. Asimismo con ésta información se establecen las características de drenado de la cuenca, empezando en las partes altas que son vías de captación y retención natural del agua durante eventos hidrometeorológicos y terminando en las partes bajas o deltas aluviales que tienden a inundarse. Ésta característica de retención de agua se ve mermada en la mayoría de la subcuenca del Río Suchiapa, al no haber superficies boscosas que retengan el agua, por lo que ésta escurre en mayores cantidades hacia ríos modificando su cauce y planicie de inundación aguas abajo (Pokorný, 2008).

4.1.2 Análisis del cauce y su planicie

El cauce del río Suchiapa es dinámico y aunque en una parte presenta pendientes considerables, las cuales forman una especie de encañonamiento, ha sufrido modificaciones a través del tiempo. Estas modificaciones se aprecian en la información satelital, incluso al usar datos de mediana resolución (satélites Landsat). Mediante procesos de realce es posible hacer combinaciones entre las bandas

disponibles a fin de identificar distintas cubiertas del suelo y cuerpos de agua. Estos reales permiten vectorizar el cauce del río Suchiapa y su planicie, para ello se utilizaron cuatro escenas en las que se observaron los cambios en la forma del cauce y la planicie más drásticos, y usándolas como imágenes base para definir la forma del cauce ante diferentes eventos ocurridos. Las imágenes corresponden al DOY/año: 070/1986, 329/1993, 298/1992 y 208/2013.

Teniendo en cuenta las zonas donde el cauce ha sufrido cambios, usando las ortofotos y el MDE es posible delimitar el cauce principal, tributarios y la planicie de inundación. Esta última, se obtiene utilizando las ortofotos y el MDE como apoyo, logrando mejores resultados, pues es posible ver marcas de agua mediante las ortofotos, y las zonas más bajas de la topografía donde se acumularía el agua con ayuda del MDE verificando la información obtenida con los patrones espaciales. La ubicación de estas zonas de cambio corresponde a variaciones en la altitud y topografía de la zonas que contienen al río, ya que es donde el perfil del río tiene un gradiente o pendiente bajo (Figura 34), dándole más libertad de movimiento al cauce del río al disiparse la energía cuando fenómenos hidrometeorológicos ocurren e inundando la zonas y generando pérdidas económicas importantes.

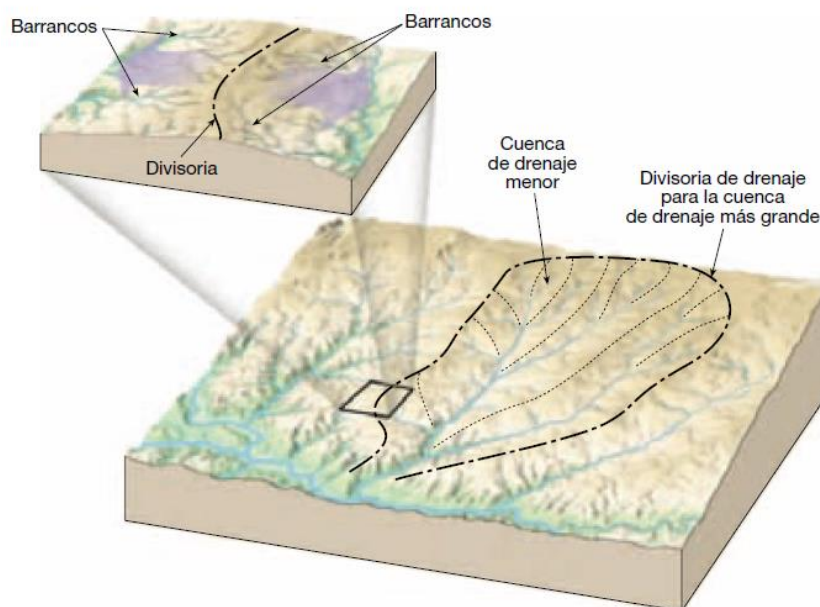


Figura 34. Gradiente de un río.

4.1.3 Establecimiento de patrones espaciales

Los fenómenos hidrometeorológicos que tienen lugar en las superficies continentales permiten identificar patrones espaciales con base en las características del suelo y la vegetación, así como de las características de drenado de la cuenca, pues el agua captada por estas superficies, luego de infiltrarse o escurrir, llega a las partes más bajas de su topografía formando canales intermitentes, arroyos y ríos. En estos últimos, es común el desarrollo de una planicie de inundación donde los suelos además de presentar una mayor humedad son altamente fértiles por lo que la vegetación que contienen es más vigorosa. Esto permite establecer aquellas zonas por las que tiende a fluir el agua y, dado que el flujo en estas zonas se repite evento tras evento, se identifican patrones de escurrimiento. A fin de establecer los patrones espaciales de eventos hidrometeorológicos se aplicó el parámetro de humedad (wetness) de la transformación TCT cuyos coeficientes están dados en función del sensor empleado por las ecuaciones siguientes (Baig et al., 2014; Chuvieco et al., 2010; Huang et al., 2002):

$$Wetness_{TM} = [0.1509, 0.1973, 0.3279, 0.3406, -0.7112, -0.4572] \times \begin{bmatrix} b1 \\ b2 \\ b3 \\ b4 \\ b5 \\ b7 \end{bmatrix} \quad [9]$$

$$Wetness_{ETM+} = [0.2626, 0.2141, 0.0926, 0.0656, -0.7629, -0.5388] \times \begin{bmatrix} b1 \\ b2 \\ b3 \\ b4 \\ b5 \\ b7 \end{bmatrix} \quad [10]$$

$$Wetness_{OLI} = [0.1511, 0.1973, 0.3283, 0.3407, -0.7117, -0.4559] \times \begin{bmatrix} b2 \\ b3 \\ b4 \\ b5 \\ b6 \\ b7 \end{bmatrix} \quad [11]$$

El cálculo de este índice permite conocer la distribución de la humedad en el suelo, y debido a que los lugares más húmedos están directamente relacionados a los lugares de almacenamiento o depósito de agua, es posible extraer estos patrones de humedad y establecer la configuración y extensión de una inundación sobre la planicie del río.

Una vez que se calculó el índice, se normalizó para que los valores estuvieran en rangos de 0 a 1, posteriormente se enmascararon o aislaron los valores de humedad altos pues estos valores son propios de cuerpos de agua y se asignó que los patrones

espaciales corresponden a zonas húmedas asociándolas con vegetación vigorosa y suelos húmedos.

Los resultados ráster, se convirtieron en información vectorial y de esta manera se obtienen solo los patrones espaciales de humedad de interés.

4.1.4 Comparación de patrones espaciales con el modelo hidrológico

Una vez se han obtenido los patrones espaciales, estos se integran al SIG para crear una capa que pueda sobreponerse sobre los resultados de velocidad, profundidad y severidad del agua ante eventos hidrometeorológicos con periodos de retorno (Tr) de 2, 5, 10, 50 y 100 años y se analiza el grado de concordancia entre ambos. Los resultados de profundidades máximas (Figura 35) indican la elevación a la que llegaría el agua en las partes más bajas de la topografía en caso de darse un evento.

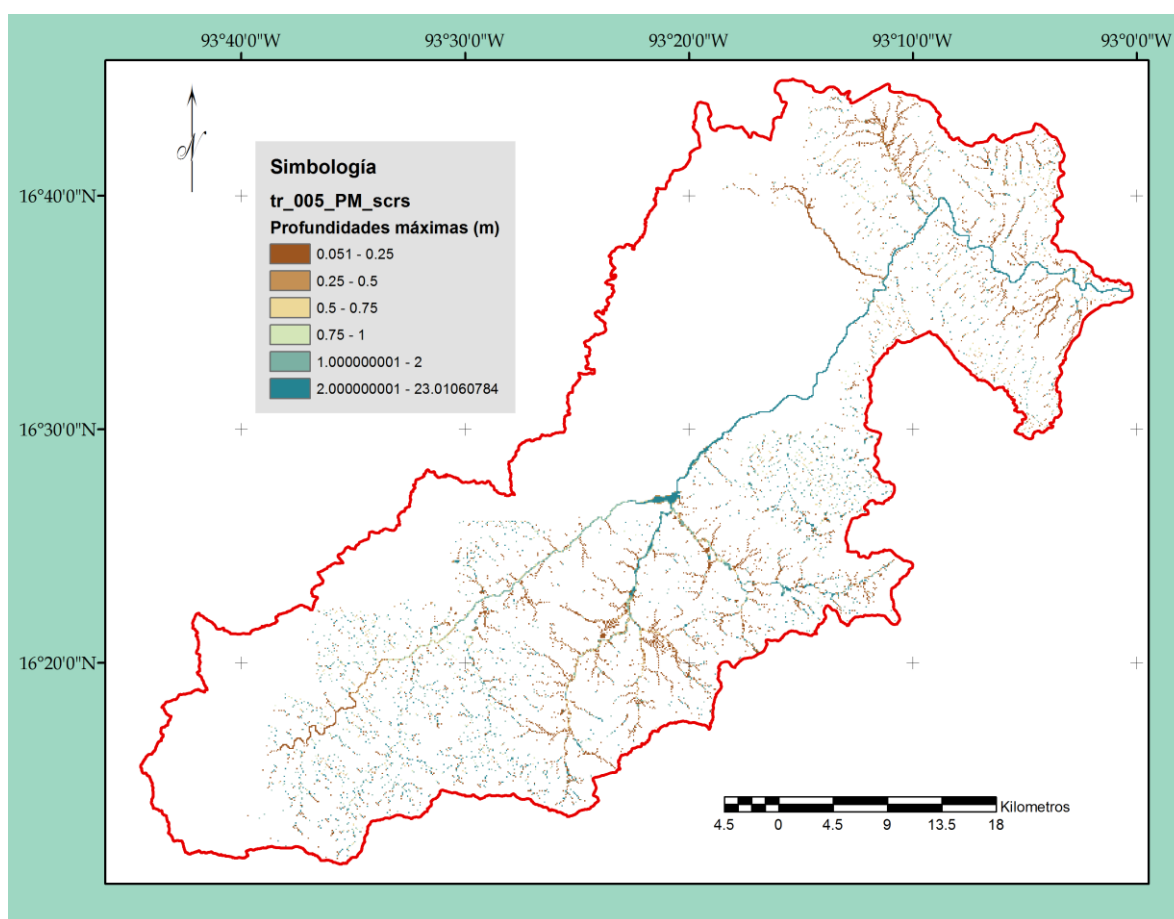


Figura 35. Resultados del modelo hidrológico de profundidades máximas para un Tr de 5 años en la subcuenca del río Suchiapa.

En la Figura 35 se observa que las mayores profundidades se dan en los valles de la subcuenca, donde la altitud es más baja, y en donde concurren varios afluentes de la red hidrológica de la subcuenca provocando un efecto de cuello de botella y, en consecuencia, mayores profundidades. También, profundidades significativas se generan sobre la parte encañonada del río.

Los resultados de velocidad máxima proporcionan información de las velocidades que el flujo de agua puede alcanzar en caso de darse un evento de cierta magnitud. En la Figura 36 se muestran los resultados de velocidades máximas para un Tr de 100 años. Aquí se observa que esta magnitud es mayor al final de las laderas o pendientes fuertes, o donde el cauce se estrecha, pues tiene que llevar la misma cantidad de agua en una menor anchura. Asimismo, los resultados del modelo indican que entre más se acerca el Río a su desembocadura mayor energía acarrea, aunque se disipa al llegar a la confluencia con otras corrientes.

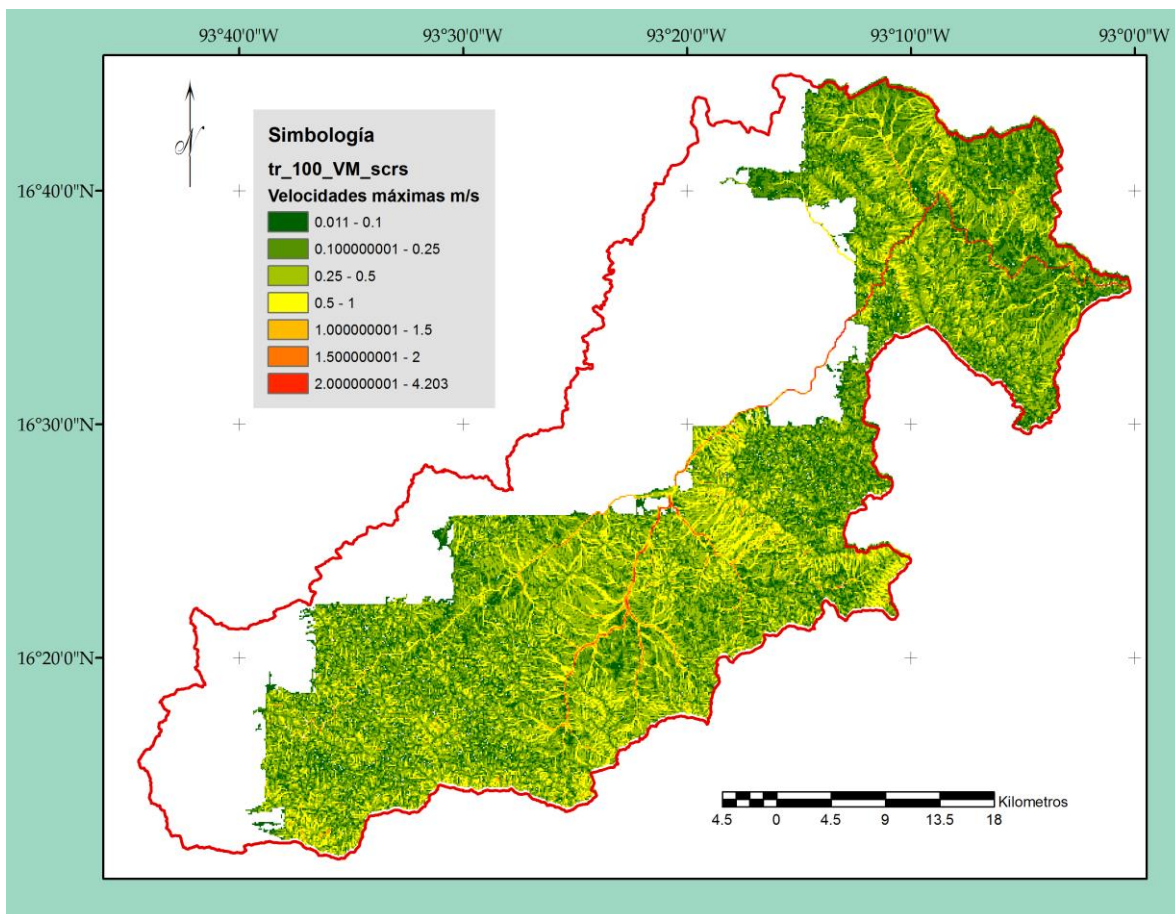


Figura 36. Resultados del modelo hidrológico de velocidades máximas para un Tr de 100 años en la subcuenca del río Suchiapa.

La comparación con los resultados de severidad señala la concordancia de zonas y comunidades que estén expuestas a algún tipo de riesgo debido a fenómenos hidrometeorológicos dada su proximidad con los patrones espaciales de humedad obtenidos. En la Figura 37, se muestran los resultados de severidad para un Tr de 100 años:

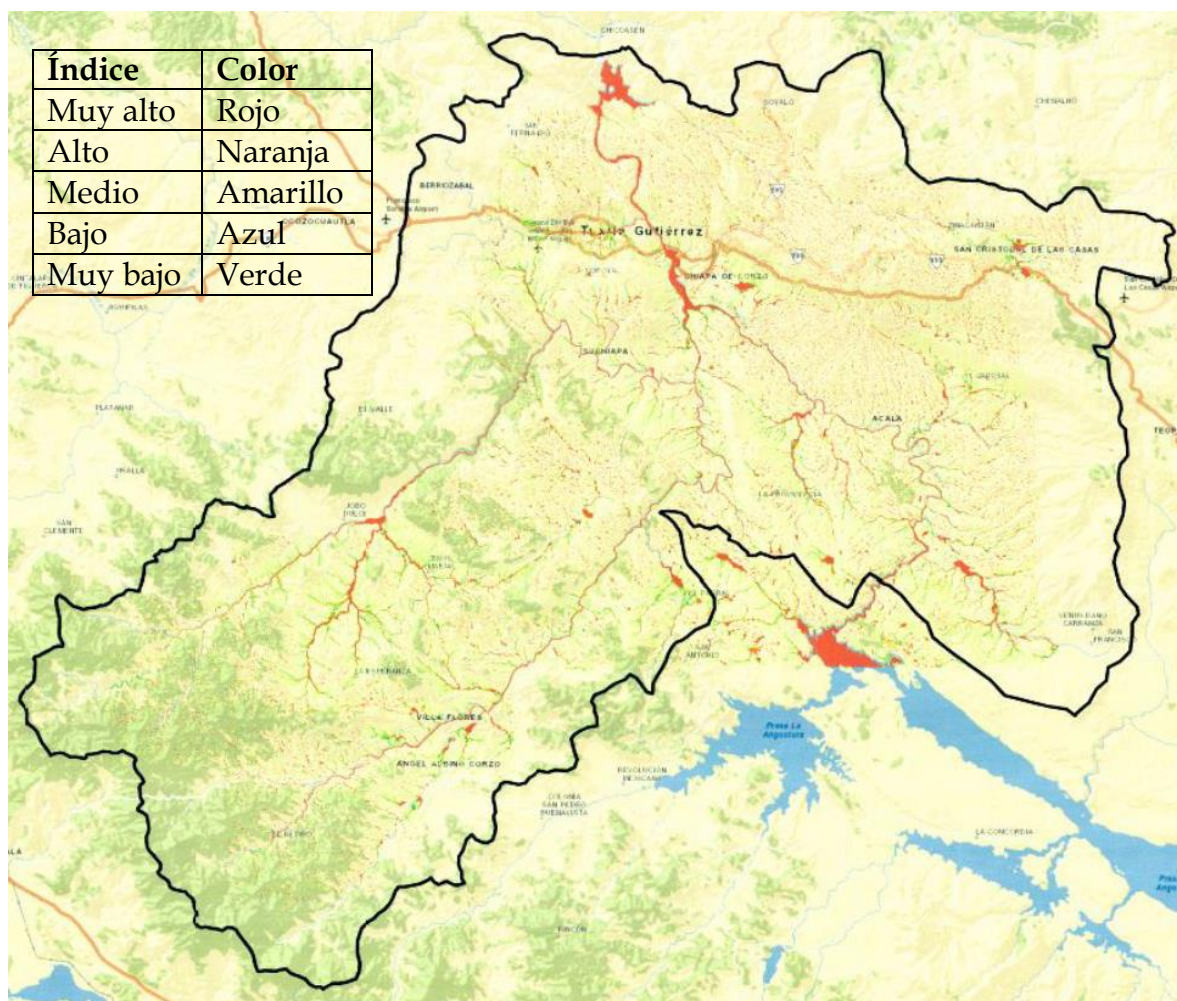


Figura 37. Resultados de severidad para un Tr de 100 años

Puede observarse que los índices de severidad están en función de la proximidad a cuerpos de agua cuyas velocidades y profundidades alcanzan valores máximos; sin embargo, no se consideró la cercanía de localidades o viviendas a orillas de zonas montañosas y con pendientes fuertes lo que posiblemente se deba a que los resultados del modelo no alcanzaron estas áreas de la subcuenca. Aquí el efecto es de flujos instantáneos, donde las velocidades alcanzadas pueden arrastrar grandes objetos incluyendo los cimientos de las casas habitación.

4.2. Resultados

Los resultados se muestran en función de la metodología planteada.

4.2.1 Dinámica de la cubierta forestal en la SCRS

El análisis espacio temporal de la subcuenca del Río Suchiapa permitió visualizar las dinámicas de deforestación, y cuantificar estos cambios a lo largo de un periodo de 40 años.

La técnica de composición multitemporal, utilizando los índices de vegetación NDVI, mostró 15 comparaciones temporales entre los índices de las seis fechas utilizadas; 339/1975, 160/1980, 079/1992, 087/2001, 091/2011 y 099/2014), (Tabla 4). Siempre usando la fecha más antigua en el cañon rojo y la más reciente en el verde.

Tabla 4. Combinaciones posibles mediante la composición multitemporal

VS	Cañon Rojo					
Cañon Verde	Fecha	1975	1980	1992	2001	2011
	1975					
	1980	✓				
	1992	✓	✓			
	2001	✓	✓	✓		
	2011	✓	✓	✓	✓	
	2014	✓	✓	✓	✓	✓

De acuerdo con la Tabla 4, el índice 339/1975 se comparó con todas las fechas, menos consigo mismo, el de 1980 se comparó con todos los índices cuya fecha es posterior, menos con el más antiguo del año 1975 y consigo mismo, y de esta forma se procede hasta el la comparación del índice de 2011 y 2014.

Las comparaciones que más destacaron por el cambio en la superficie forestal fueron: 1975vs1980 (Figura 38), 1980vs1992 (Figura 39), 1975vs2001 (Figura 40), 1992vs2001 (Figura 41) y 2001vs2014 (Figura 42). En estas composiciones, se observa

la dinámica en los cambios de la superficie forestal, pues se pueden definir en dónde y cómo han sido dados los cambios en cada periodo de tiempo y de esta manera describir el proceso de deforestación.

Analizando cada Figura se tiene:

La Figura 38 muestra la visualización del periodo entre 1975 y 1980 con varios sitios deforestados, destacando la parte media-este de la subcuenca. Aunque las pérdidas en las partes altas de la cuenca también son apreciables. Los colores oscuros, rojos y verdes indican cambios temporales debidos a los cultivos que existen en la subcuenca. Asimismo, se observa una recuperación en la zona media-este al tener colores verdes claros pues estos colores indican que ha habido una recuperación en la cubierta forestal.

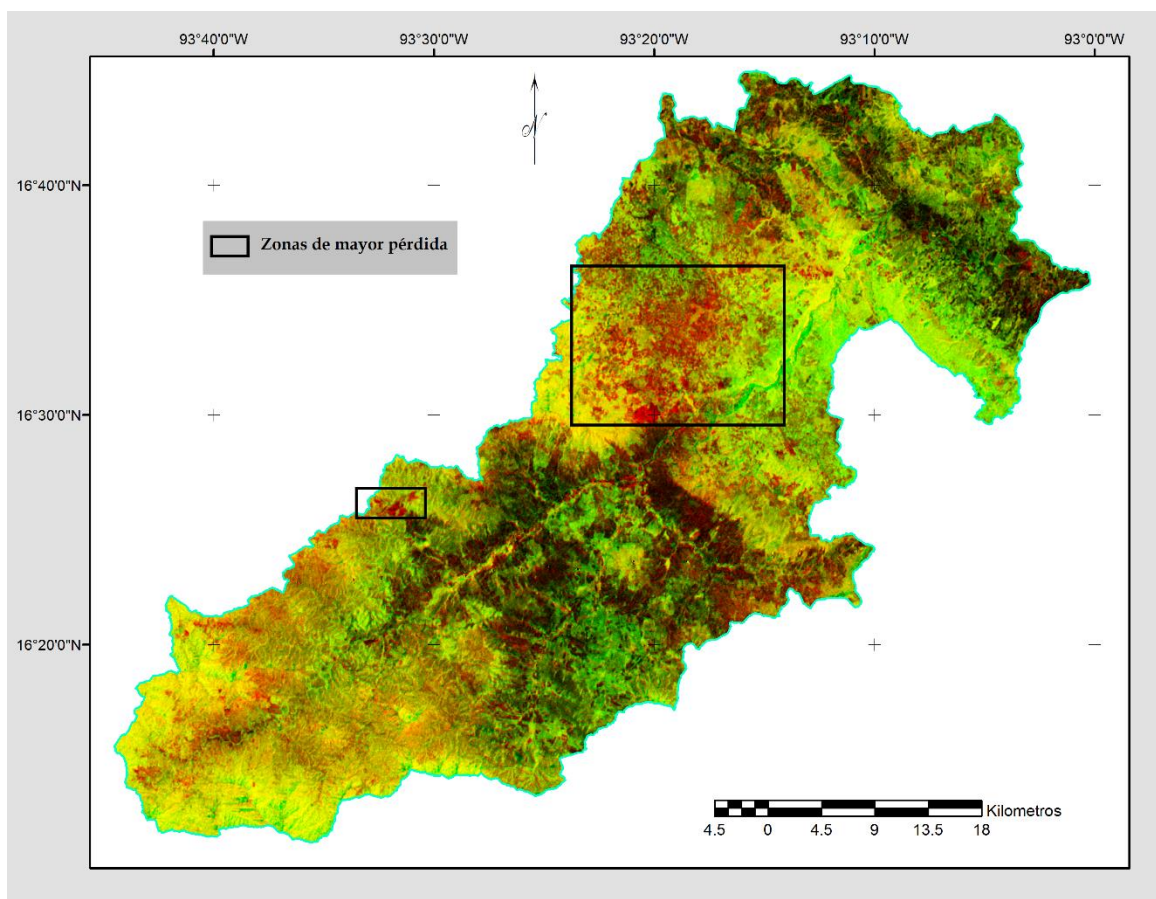


Figura 38. Comparación entre NDVI de 1975 y 1980

En la Figura 39, que representa el periodo entre 1980 y 1992, se aprecia una gran pérdida de bosques en la parte noreste de la subcuenca. Las pérdidas en las partes altas de la cuenca se siguieron dando. Igualmente se observan perdidas en las zonas de cultivo esto por la temporalidad de estos últimos. También se observa las zonas en las que se conservaron las superficies boscosas en colores amarillos en las zonas montañosas y algunas pequeñas zonas donde se aprecia una reforestación en colores verdes claros.

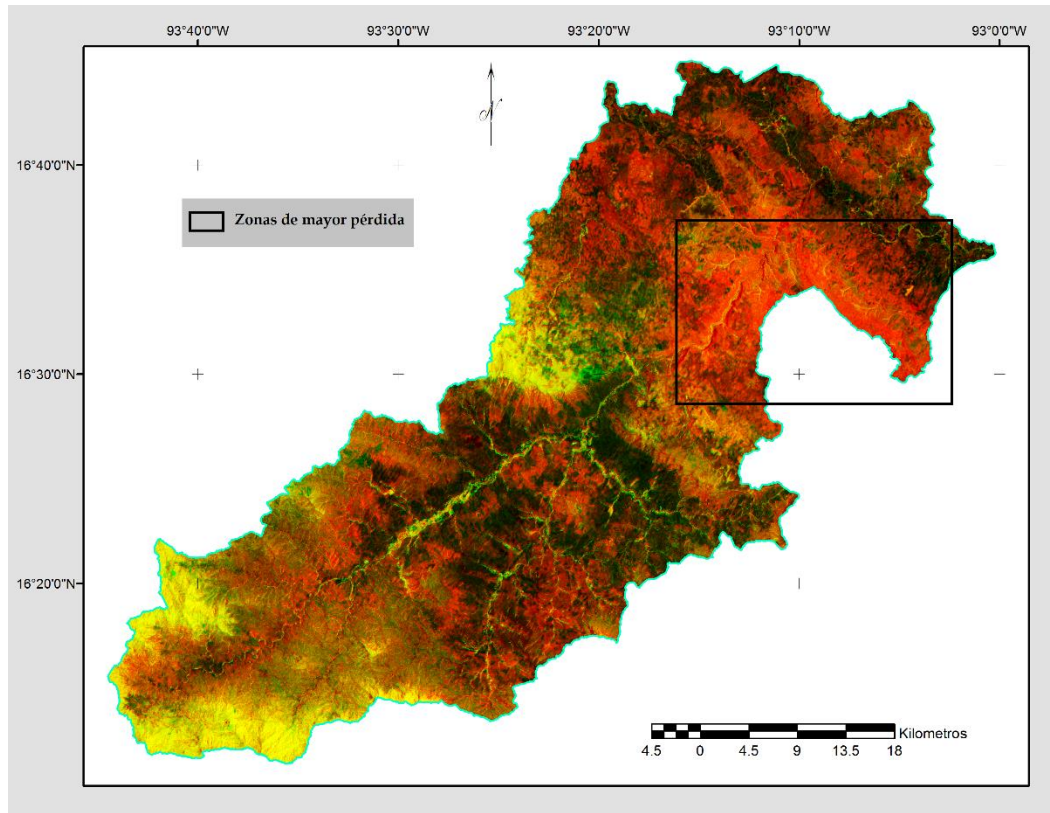


Figura 39. Comparación entre NDVI de 1980 y 1992

La Figura 40, que abarca el periodo entre 1975 y 2001, muestra las pérdidas que hubo en la cubierta forestal luego de 26 años. Al abarcar un periodo de tiempo más largo se pueden apreciar de mejor manera los cambios en el bosque, pues se acentúan las pérdidas en las partes altas que se fueron dando paulatinamente entre los periodos del 1975 vs 1980 y 1980 vs 1992, por lo que se aprecia una reducción en los colores amarillos y, en consecuencia, un aumento en los tonos rojos vivos. También se observan los grandes cambios en la cubierta en la parte noroeste de la subcuenca. Las áreas de cultivo se muestran en colores negros al igual que los asentamientos humanos. Las áreas de bosque que se conservaron muestran colores amarillos.

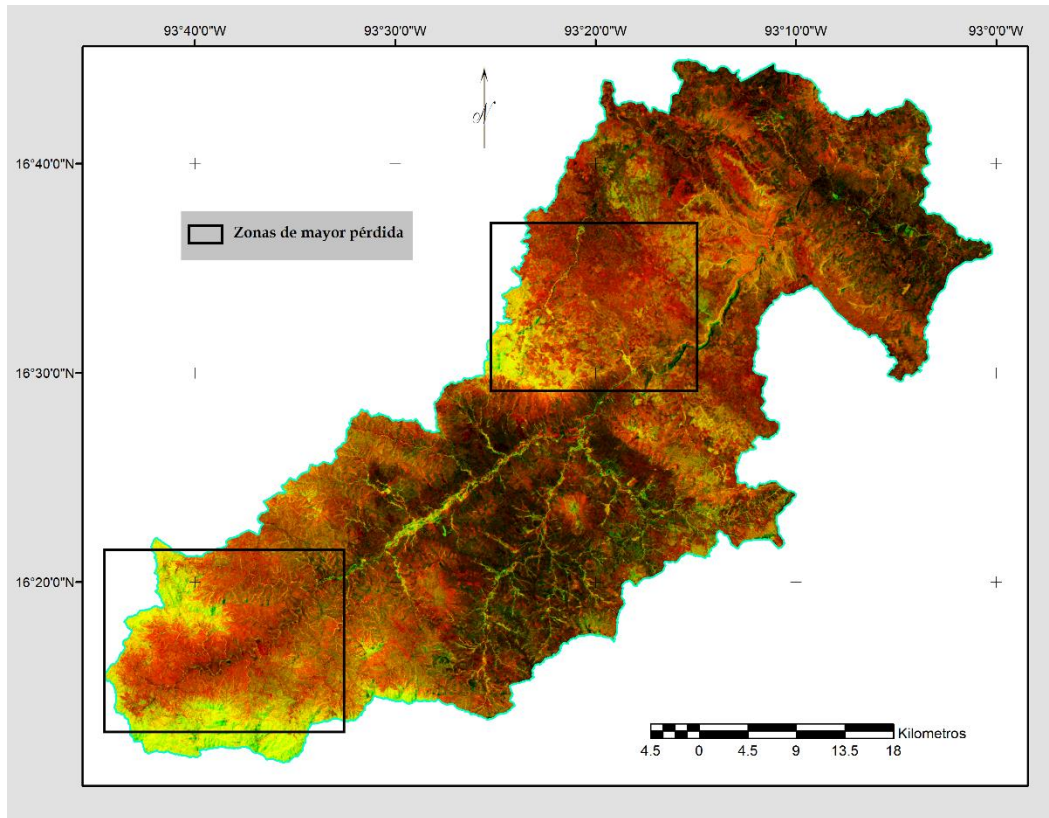


Figura 40. Comparación entre NDVI de 1975 y 2001

Con base en las observaciones de las Figuras 38, 39 y 40 se establece que el periodo entre 1975 y 2001 es aquel donde hubo una mayor pérdida de bosques ya que predominan los tonos rojos vivos en las zonas boscosas. Sin embargo, se observa que en 1992 hacia 2001, el ritmo de deforestación parece detenerse como se muestra en la Figura 41, ya que al comparar entre sus NDVI, los colores predominantes son oscuros, negros y amarillos, lo que quiere decir que las características reflectivas de las cubiertas forestales no sufrieron grandes modificaciones.

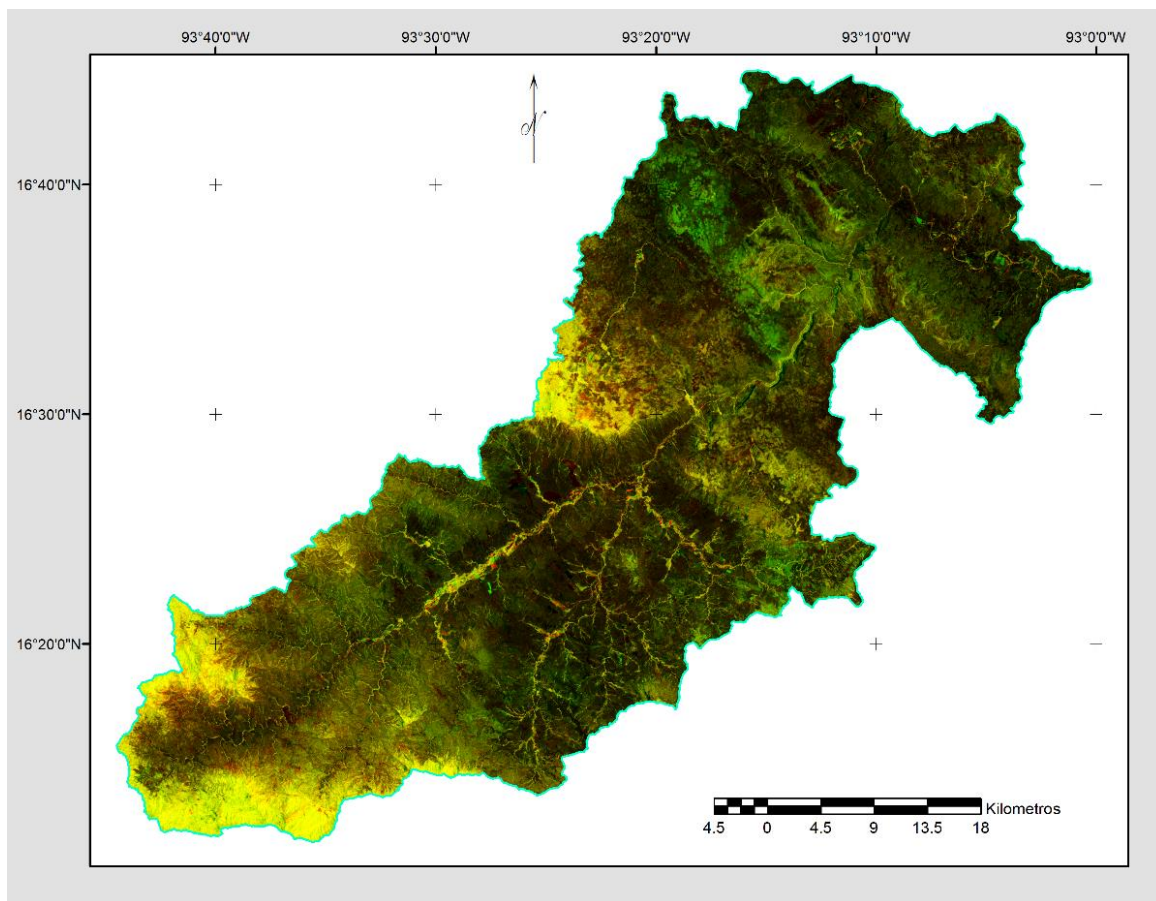


Figura 41. Comparación entre NDVI de 1992 y 2001

El último periodo que se identificó es el de una aparente recuperación de la cubierta forestal, pues en la comparación de los NDVI de los años de 2001 y 2014 (Figura 42) se observa que las zonas marcadas anteriormente con pérdidas importantes ahora muestran colores verdes aunque muy pocos en tonos vivos, además varias zonas forestales muestran predominancia de colores amarillos y verdes.

Pese a lo observado en la Figura 42, el área perdida de cubierta forestal sigue siendo mayor a la recuperada. También, la coloración verde de la visualización puede deberse a cambios estacionales, pues los verdes que se aprecian como ya se ha mencionado son oscuros en su mayoría, siendo claros sólo en zonas muy pequeñas. Las zonas amarillas muestran aquellos sitios en donde los bosques se han conservado en buen estado que representa un 12.26% del área total de la subcuenca.

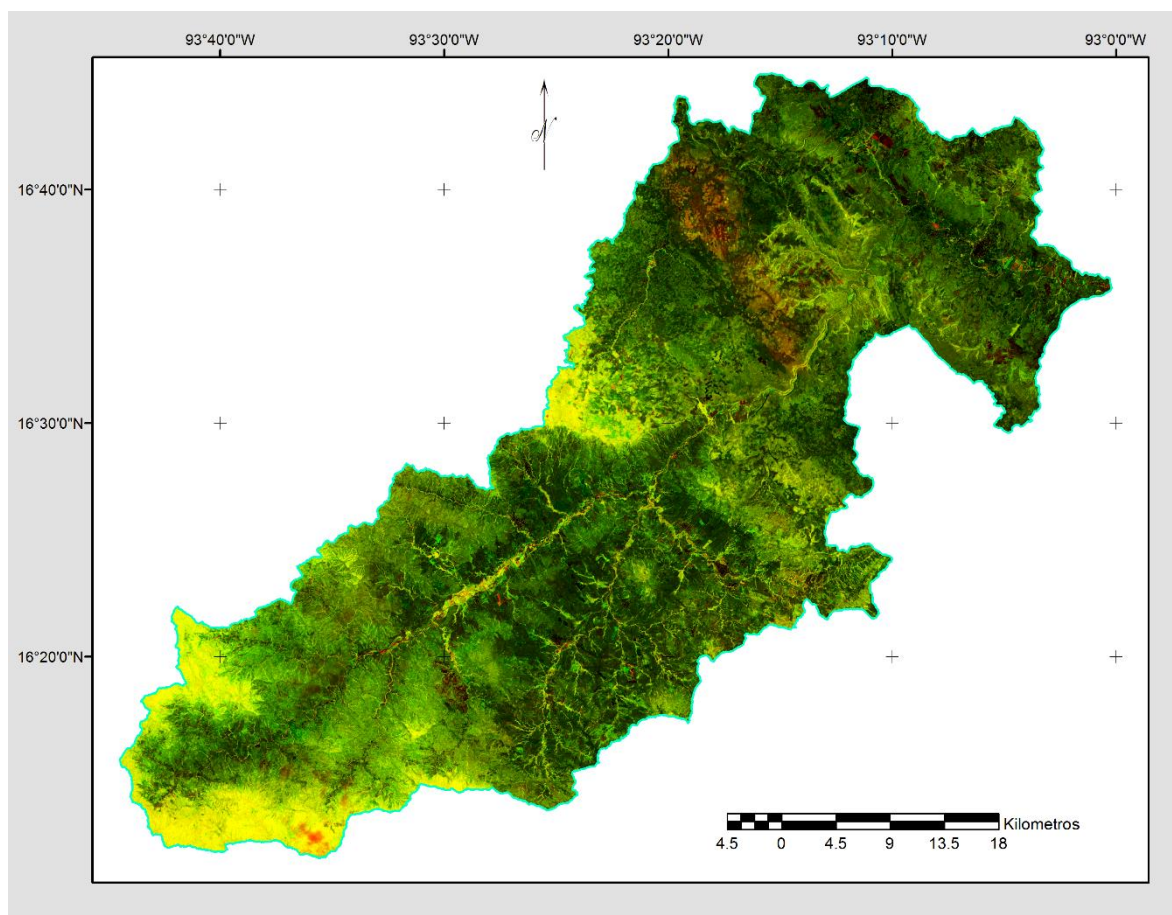


Figura 42. Comparación entre NDVI de 2001 y 2014

Para poder cuantificar los cambios en la superficie forestal de la subcuenca se realizaron clasificaciones no supervisadas, así como su mejoramiento mediante el BCI, esto para poder analizar el crecimiento de la cubierta de asentamientos humanos a través del tiempo. Las cubiertas clasificadas son: Bosque, Bosque Alterado, Bosque altamente alterado, Pastizal/Cultivo_1, Pastizal/Cultivo_2, Sombra/Agua.

En la clasificación se observan los cambios que ha sufrido la cubierta forestal desde 1975, los cuales han sido significativos, pues en el año de 1975 las áreas boscosas ocupaban 1458.1 km² entre los tres tipos de bosque clasificado, y para el año 2014 ocuparon un área de 1235.7 km² (Tabla 5), representando el 84.7% del área original, este porcentaje disminuye drásticamente si se considera que el área de los bosques en el año 2011 era de 998.7 km², esto es el 68.5% del área boscosa original de 1975.

La Tabla 5 contiene la información de las cantidades de área que ocupa cada tipo de cubierta en los distintos años del análisis, se observa la disminución de las cubiertas

forestales, así como un aumento en las áreas definidas como de pastizales o cultivo, esto como consecuencia del rápido aumento en las áreas ocupadas por asentamientos humanos.

Tabla 5. Resultados del análisis espacio- temporal.

	Áreas de cobertura de la Subcuenca del Río Suchiapa de 1975-2014 (km ²)					
Cobertura\Año	1975	1980	1992	2001	2011	2014
Asentamiento humano/Nube	N/A	N/A	4.08	5.66	13.74	13.84
Bosque	598.12	495.41	116.70	160.03	116.48	250.68
Bosque Alterado	519.49	394.07	150.34	151.83	158.37	181.30
Bosque altamente alterado	340.57	314.08	867.07	752.52	723.86	803.73
Pastizal/Cultivo_1	398.95	558.76	627.92	573.32	766.84	688.30
Pastizal/Cultivo_2	181.56	282.56	212.95	314.53	193.29	96.38
Sombra/Agua	N/A	N/A	65.83	86.99	72.32	10.65
Total de área de bosques:	1458.18	1203.57	1134.11	1064.39	998.70	1235.71

En las Figuras 43, 44 y 45 se muestran 3 de las 6 clasificaciones realizadas, correspondientes a las escenas de 1975, 2001 y 2014, respectivamente, al ser los años más representativos de cambio en la subcuenca.

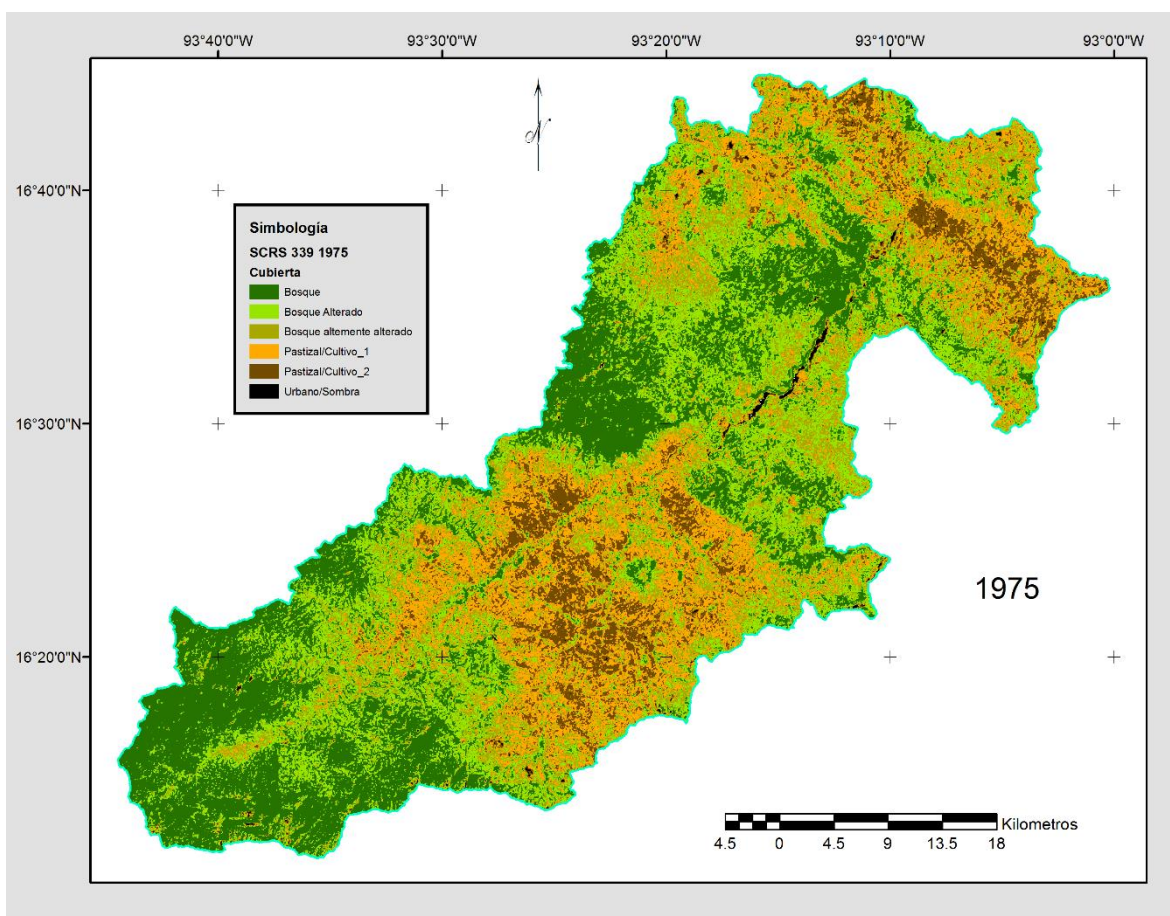


Figura 43. Clasificación para el año 1975

En la Figura 43 se muestra la clasificación del año 1975, en esta se puede observar que áreas fueron ocupadas por bosques, y como el bosque predominante era el de buen estado mostrado en color verde oscuro, las zonas de pastizales y de cultivo al tener una respuesta reflectiva similar se les asignó una misma categoría, las zonas de asentamientos humanos de la misma manera se confunden con cubiertas brillosas por lo que no fueron identificadas.

En la clasificación de 2001 (Figura 44) se aprecia la pérdida que tuvo la cubierta forestal, asimismo se puede observar el crecimiento en el área ocupada por los bosques perturbados y muy perturbados, así como de las áreas ocupadas por pastizales o cultivos en las partes altas de la cuenca.

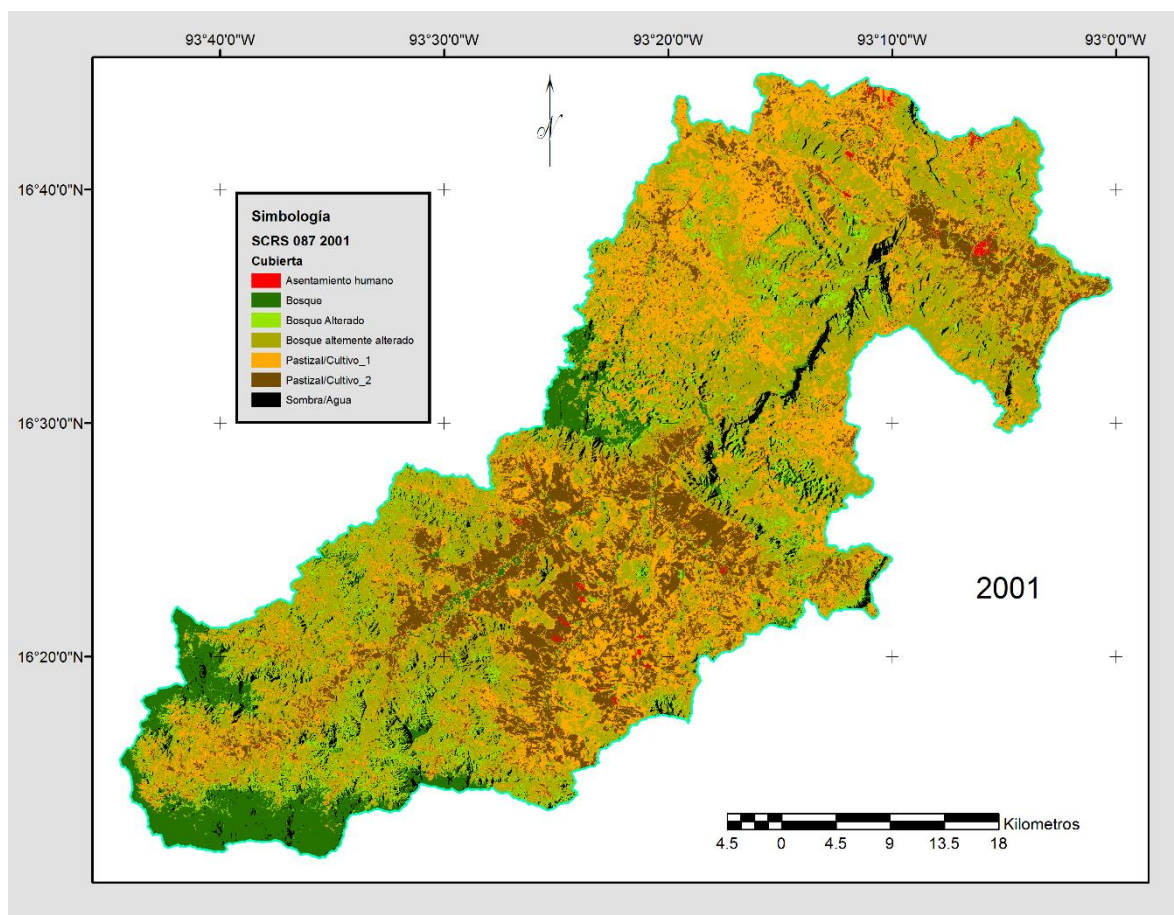


Figura 44. Clasificación para el año 2001

En esta clasificación, las cubiertas de asentamientos humanos fueron identificadas gracias al mejoramiento realizado con el BCI, observándose en colores rojos. Las comunidades presentes en la subcuenca, aunque son pequeñas, predominan las

comunidades rurales (a excepción se Suchiapa y parte de Tuxtla Gutiérrez), las cuales están dispersas y ubicadas en variadas regiones de ésta.

En la clasificación del 2014 (Figura 45) no fue necesario su mejoramiento mediante su combinación con el BCI, en esta se observa una tendencia similar de la cubierta boscosa; sin embargo, las cantidades arrojan mayores cifras en el área que ocupan, esto puede deberse a que la clasificación hecha para el Landsat 8 dio como resultado un muy menor número de sombras en las zonas montañosas en comparación con las clasificaciones echas para los satélites anteriores. Esto debido a la mejor resolución radiométrica de su sensor que permite discriminar los distintos tipos de cubierta. Las sombras que fueron captadas son las provocadas por nubes presentes en la subcuenca, estas a pesar de la mejor resolución radiométrica del sensor fueron clasificadas como asentamientos humanos por su respuesta reflectiva similar, pero se tuvo cuidado al considerar las aportaciones de las clases en total.

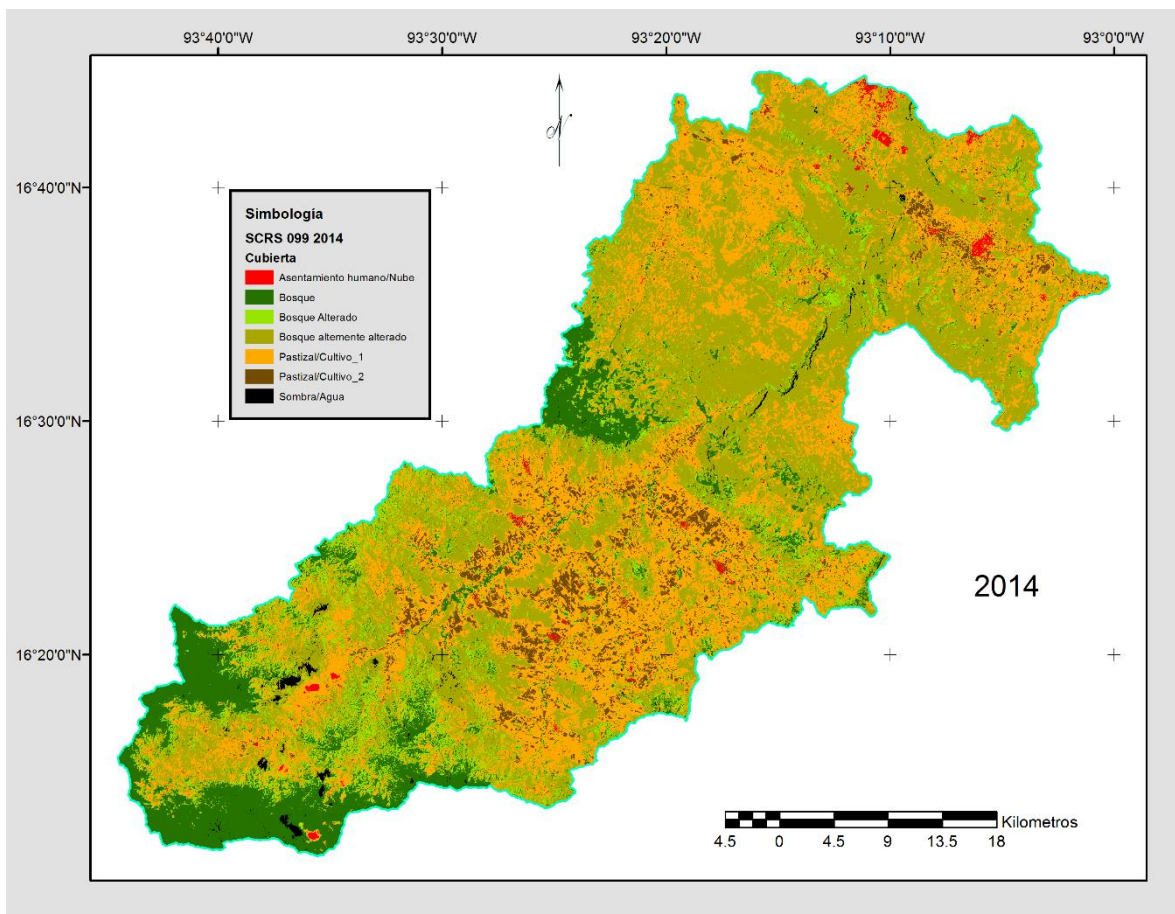


Figura 45. Clasificación para el año 2014

La Figura 46 muestra la gráfica obtenida de la Tabla 5 y lo observado en las Figuras 43, 44 y 45. La gráfica muestra el comportamiento de las cubiertas de las 6 escenas clasificadas desde 1975 hasta 2014. Se aprecian las disminuciones en las cubiertas de bosque y bosque alterado, así como el aumento de los bosques altamente alterados. También se puede observar un aumento de los pastizales o cultivo del tipo 1, mientras que los pastizales o cultivos de tipo 2 muestran un comportamiento más estable comparado a las demás curvas.

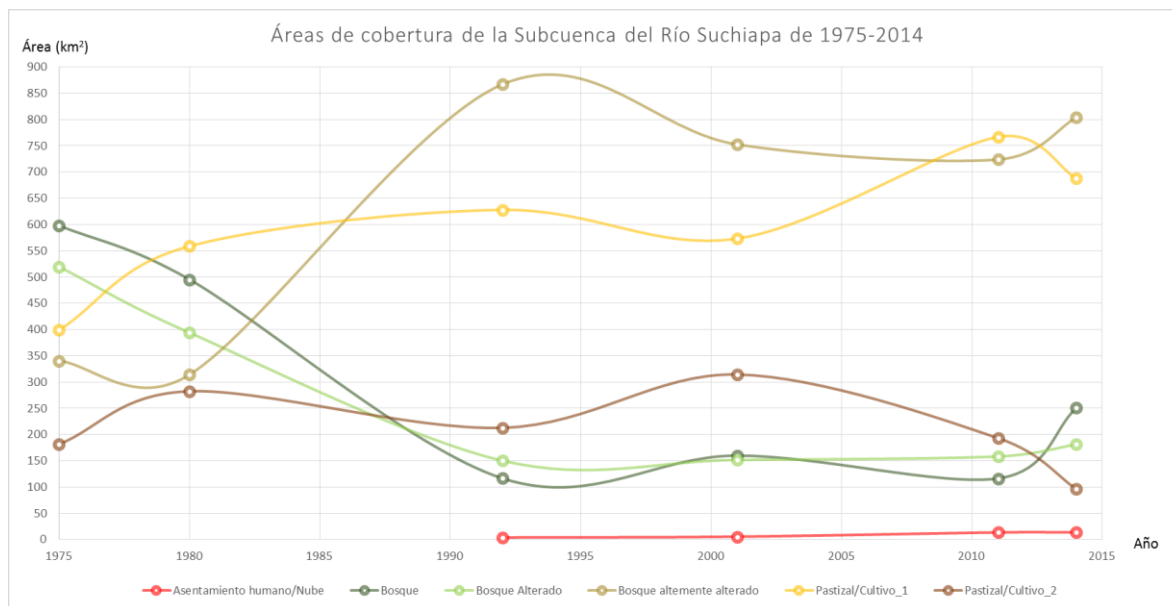


Figura 46. Gráfica que muestra la dinámica de las coberturas a través del tiempo.

El comportamiento de la cubierta de asentamientos urbanos no se aprecia claramente en la Figura 46 por lo que en la Figura 47 se muestra está cubierta de manera individual y observando su rápido crecimiento.

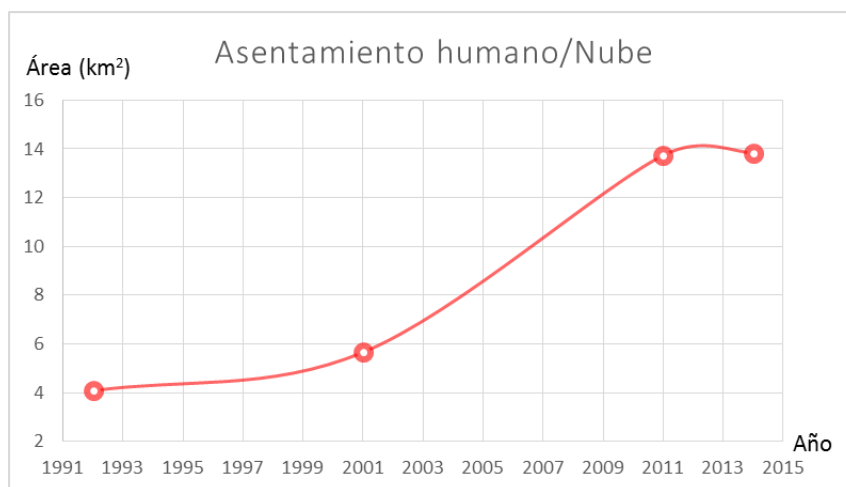


Figura 47. Comportamiento de la cubierta de asentamientos urbanos

De la figura 47, se establece que el periodo de mayor crecimiento de la población es entre los años de 1999 a 2011, luego de este periodo se observa una disminución en el ritmo de crecimiento.

En la Figura 48 se muestra un resumen del comportamiento de la cubierta forestal y la magnitud de sus áreas, así como los porcentajes del tipo de bosques que la componen.

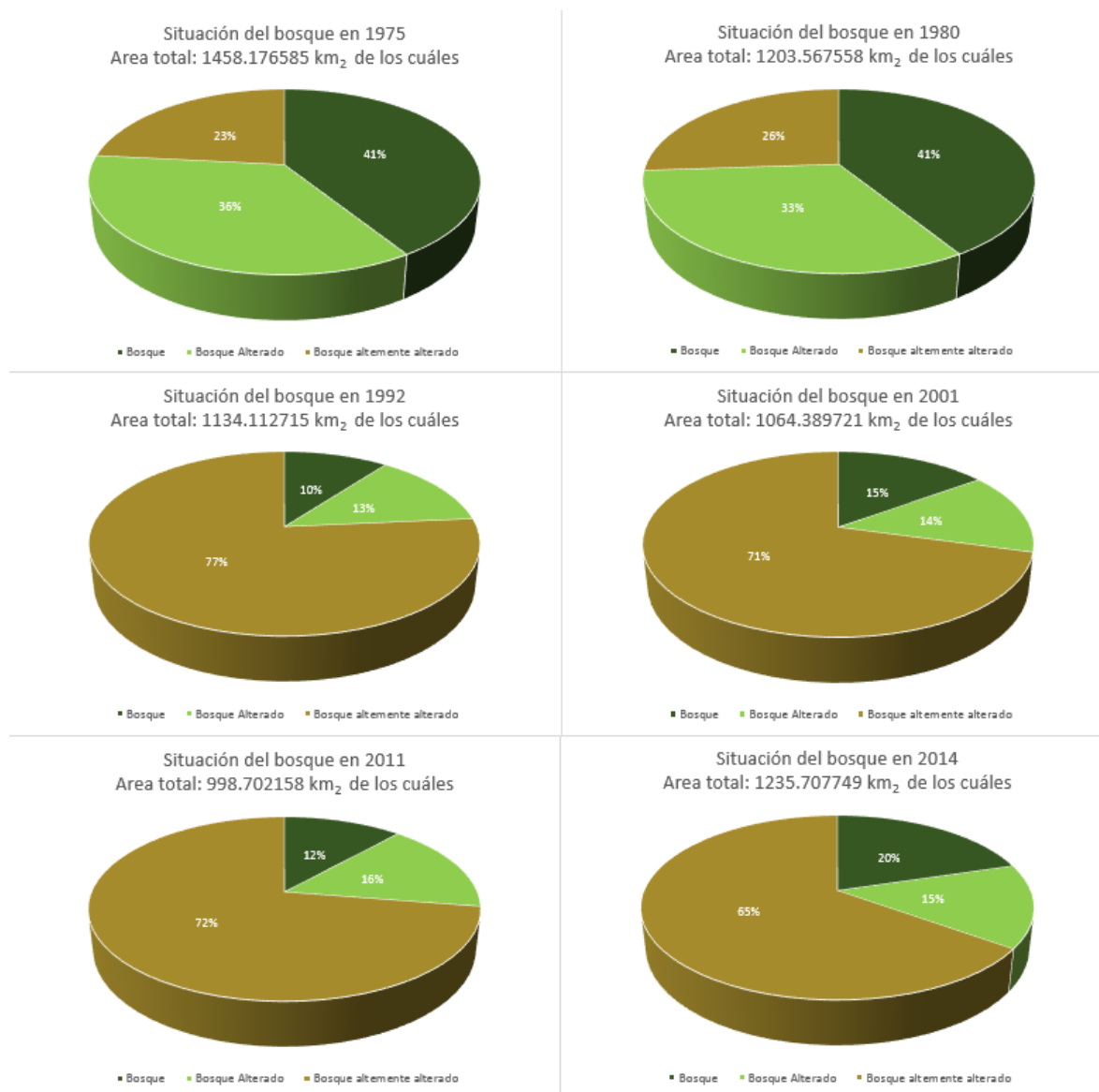


Figura 48. Situación de la cubierta forestal a través del tiempo.

Se aprecia la manera en que disminuyó la cubierta forestal a través del tiempo, y como el tipo de bosque predominante es el de tipo muy perturbado debido a la sobreexplotación y deforestación. A pesar de que se observa un aparente aumento

de la superficie boscosa sana para el 2014 (20%), en comparación con la del año de 1975 (41%), representa un porcentaje menor de la mitad.

4.2.2 Cauce y Planicie de inundación

Mediante el uso de la información disponible y obtenida de las comparaciones realizadas y clasificaciones se trazó el cauce del río Suchiapa y la extensión de su planicie de inundación. Las ortofotos son un gran apoyo ya que en ellas se apreciaron manchas de agua que no se perciben ni son captadas por las escenas satelitales. Asimismo, el uso de modelos digitales de elevación (MDE) permitió confirmar que el trazado de la planicie corresponde a las partes más bajas de la topografía de la subcuenca.

El cauce y su dinámica son resultado de procesos hidrometeorológicos y de la evolución geomorfológica del mismo río, y se realizó mediante la visualización del trazado de cuatro cauces principales, donde se observaron cambios importantes (años de 1986, 1993, 2002 y 2013). La formación de geoformas y cambios en la forma del cauce se presentaron sobre todo en los valles donde la baja pendiente de la cuenca permite mayor libertad de movimientos laterales al río (depósito o erosión), movimientos que ocurren con el paso del tiempo y después de eventos hidrometeorológicos severos. A partir de cada trazo y su análisis conjunto, se identificaron cuatro zonas mostradas en la Figura 49 donde el cambio en la forma del cauce es fácilmente apreciado.

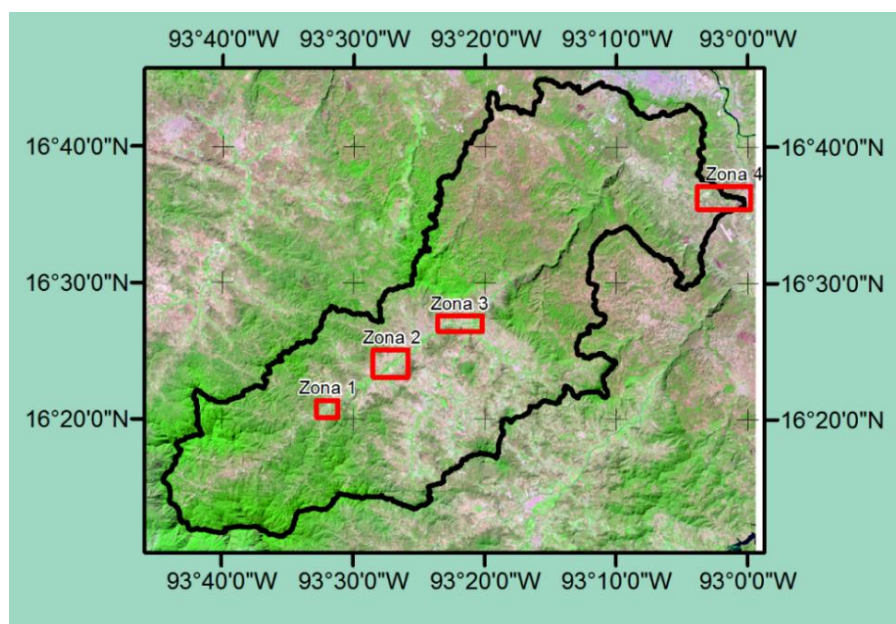


Figura 49. Zonas donde el cauce sufrió cambios importantes.

La zona 1 se ubica entre el valle del Río y la zona montañosa, la zona 2 se encuentra donde la planicie de inundación, la zona 3 se encuentra donde convergen dos afluentes del Río Suchiapa y la zona 4 en la desembocadura del río Suchiapa. Estas cuatro zonas siguen el origen y sentido de flujo del río y están ubicadas donde se presentan cambios significativos en la geomorfología de la cuenca.

La Figura 50 muestra los cambios observados en la zona 1 ubicada donde da inicio la zona montañosa de la subcuenca; la parte más alta de la zona es de 648 msnm y la más baja es de 634 msnm. Se presenta un primer cambio en la forma del cauce (ensanchamiento) en los cauces de 329/1993 y 298/2002 con respecto del cauce más antiguo de 070/1986 (recuadro a). Posteriormente, se da un segundo cambio pues el cauce en la imagen 208/2013 formó un meandro desplazándose al norte alrededor de 120 metros. El recuadro b igual muestra cambios importantes respecto al cauce de 1986. En particular se aprecia la pérdida de un meandro y la formación de otro, cuya dirección de desplazamiento es hacia el este, siendo mayor el meandro en 1993 con el paso del evento Calvin, el cual fue un huracán categoría dos, que se presentó del 4 al 9 de julio de 1993.

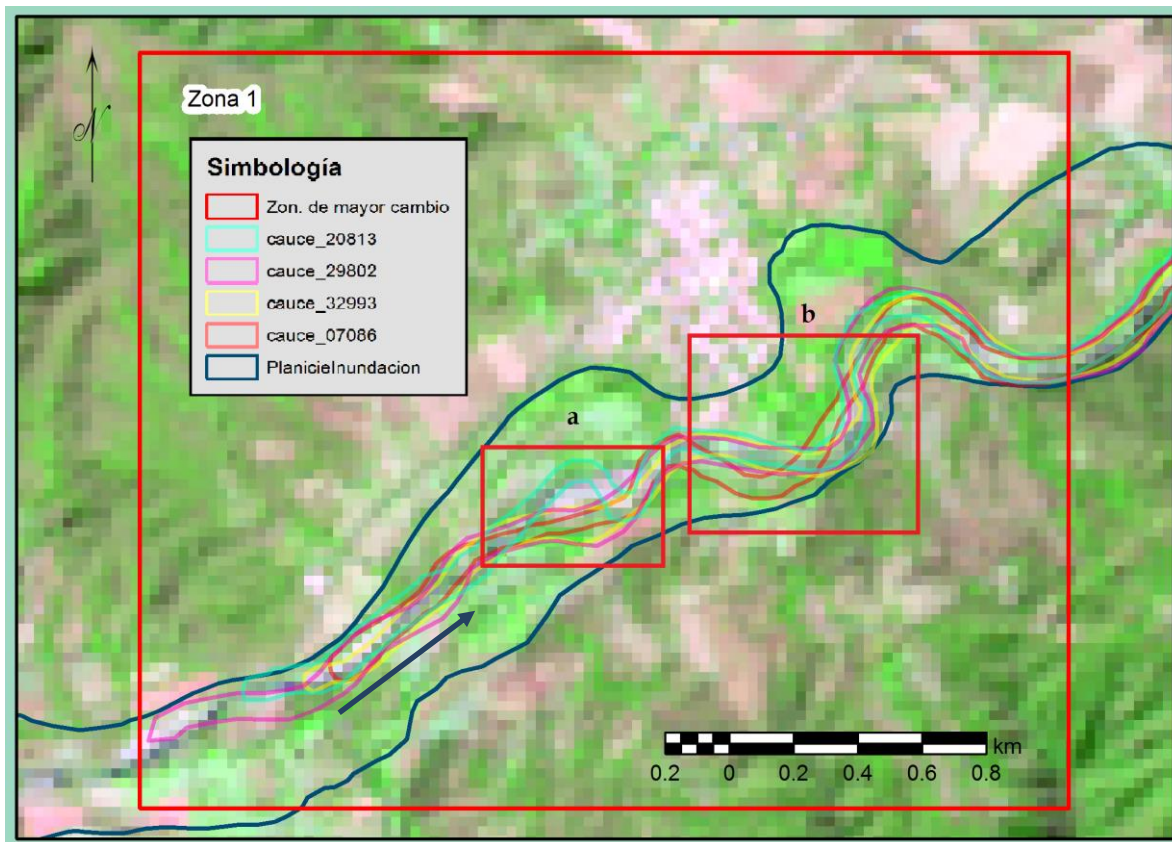


Figura 50. Cambios en la geomorfología del cauce en la zona 1 de la subcuenca.

Las zonas donde el cauce no sufrió cambios se asocia a que la topografía del terreno se estrechó encañonando el Río, esto se confirma al ver los trazos con el CEM de fondo. Así, las zonas donde ocurren cambios son zonas donde se forman en general pequeños valles.

En la zona 2, mostrada en la Figura 51, corresponde al valle de la subcuenca, la diferencia de altura entre la parte más alta (620 msnm) y la más baja (600 msnm) del cauce en la imagen es de alrededor de 20 metros. Los cambios más significativos están indicados en los recuadros pequeños: en el 'a' el cauce en el año 1993 cambia con respecto al cauce en 1986 desplazándose hacia el norte y manteniendo el desplazamiento hasta el 2013; en el recuadro 'b' el cambio más notorio es el del cauce del año 2002 con respecto al cauce más antiguo, su desplazamiento es hacia el sureste formando un meandro; en el recuadro 'c' se muestran cambios importantes al sur principalmente en 1993, donde hay un cambio hacia la margen derecha; y, finalmente, en el recuadro 'd' se presenta una zona donde el cauce ha sufrido un importante cambio para el año de 2013, pues hubo un desplazamiento del cauce hacia el este.

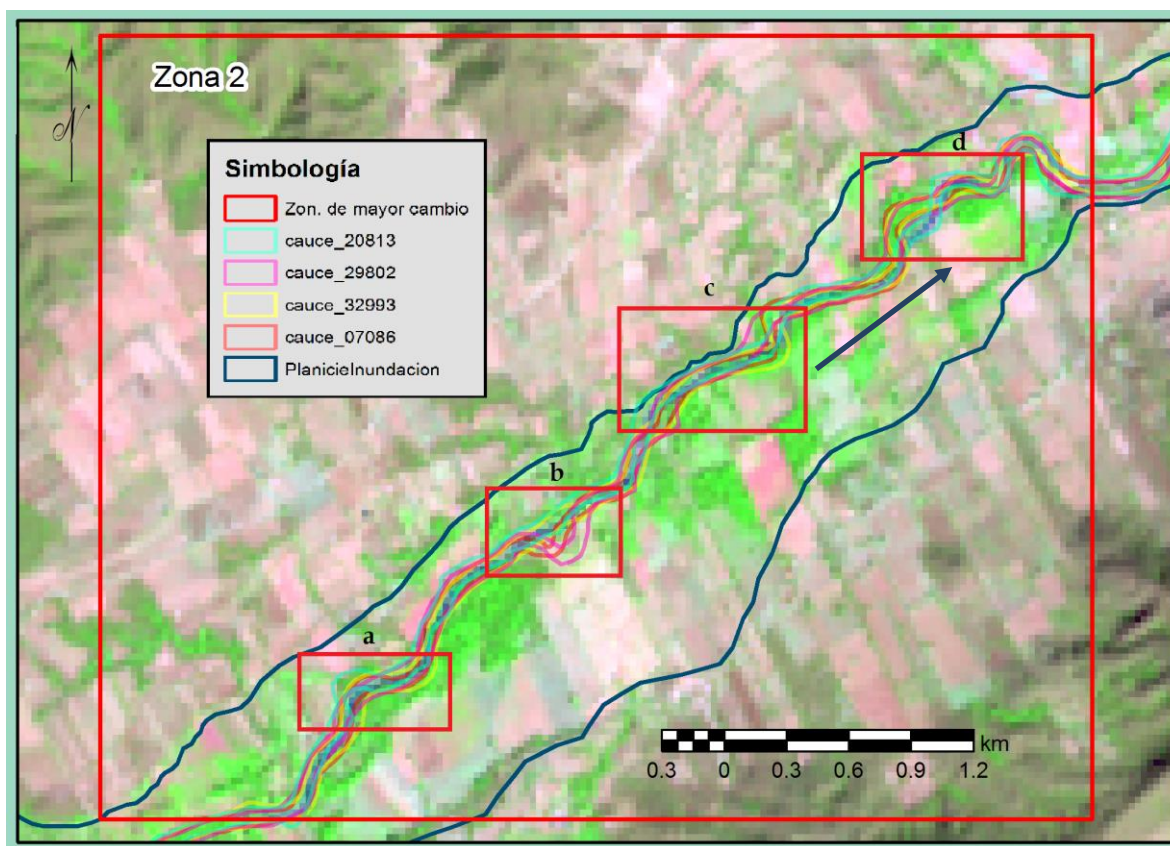


Figura 51. Cambios en la geomorfología del cauce en la zona 2 de la subcuenca.

En general los cambios en la zona 2 se asocian a la diferencia de alturas, ya que el agua descarga su energía en el valle formando meandros y remansos en las zonas marcadas. También se observa que el margen derecho tiene una altura similar al Río, pues existe una mayor cantidad de zonas de cultivo en comparación con su margen izquierda, esta observación es confirmada mediante el CEM y el trazo de la planicie de inundación.

Del mismo modo en la zona 3 (Figura 52) donde el cauce del Río se junta con otros afluentes, se identifican cuatro sitios principales de cambio, modificando el cauce y la planicie significativamente resultado del alto dinamismo del río. La diferencia de alturas entre la parte más alta (588 msnm) y más baja (564 msnm) del cauce a la izquierda y derecha de la imagen respectivamente es de alrededor de 24 m. El cauce en esta zona es sinuoso, con sitios donde son evidente las zonas de depósito y erosión de sedimentos en ambas márgenes, dando lugar a geomorfounidades como barras, islas, meandros, etc.

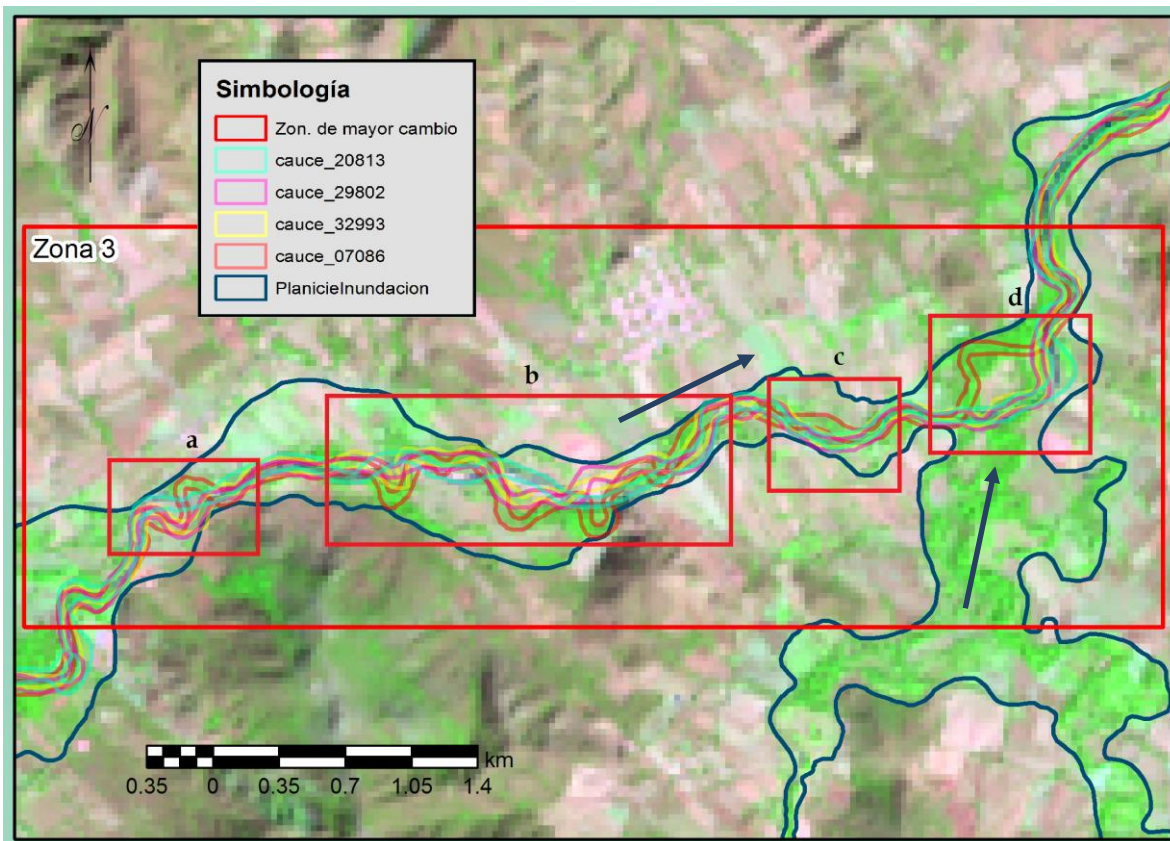


Figura 52. Cambios en la geomorfología del cauce en la zona 3 de la subcuenca.

Los cambios mayores con respecto al cauce de 1986 se dieron en 1993 con el paso del evento Clavin, perdiendo y creando meandros incluso sobre la margen opuesta del río en 1986, siendo muy evidente en el recuadro 'd' antes de la confluencia de Río Suchiapa y sus afluentes provenientes del sureste.

En la zona 4 (Figura 53) se identifican tres lugares donde se presentaron cambios en la forma del cauce en el año 2013, probablemente debido al paso de los huracanes Bárbara y Erick en mayo (28-30) y julio (4-9), respectivamente. En el recuadro 'a', se formó un meandro sobre la margen izquierda hacia el norte. En el recuadro 'b' se observa que el cauce se acortó perdiendo meandros. En el recuadro 'c' se

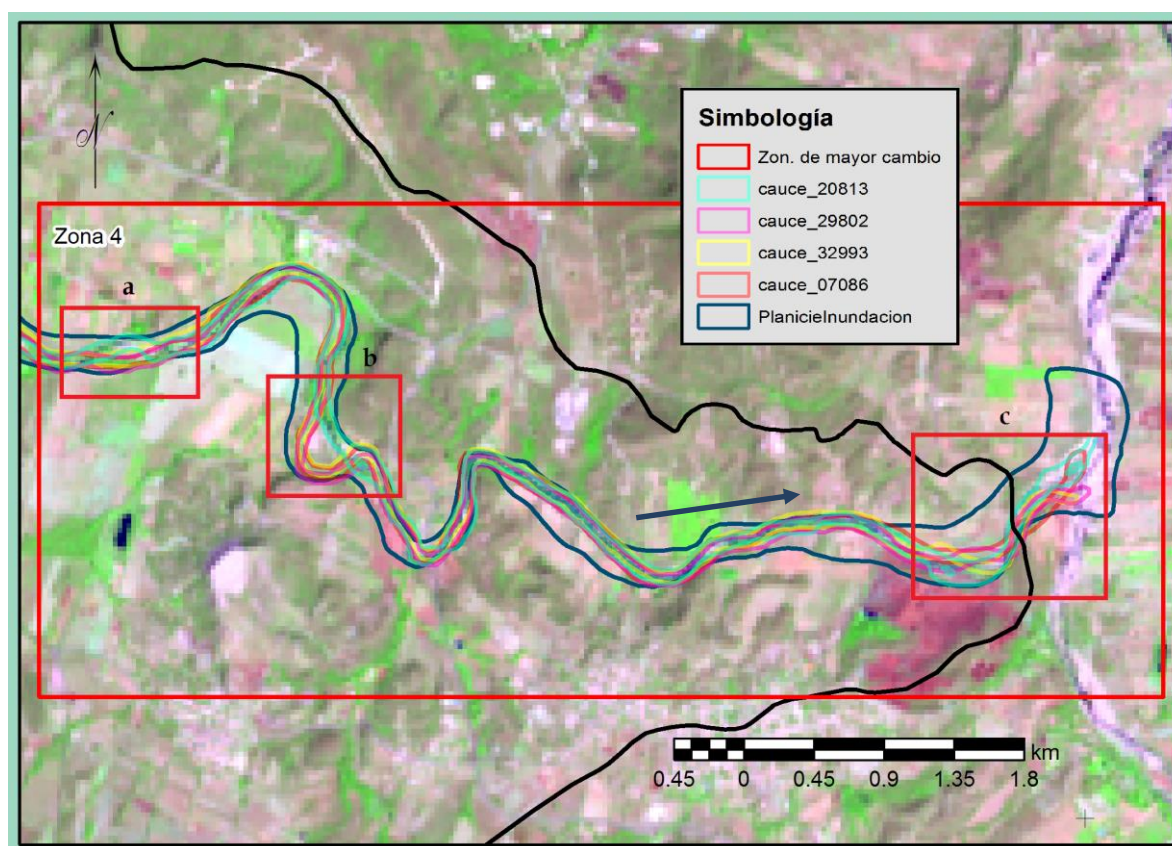


Figura 53. Cambios en la geomorfología del cauce en la zona 4 de la subcuenca.

La diferencia de alturas entre la parte más alta del cauce y la más baja en la imagen es de alrededor de 22 m, siendo de 416 msnm y de 394 msnm, respectivamente. En esta última parte de la cuenca, las márgenes del río se estrechan debido al efecto del encañonamiento del cauce debida a la topografía de la zona, por lo que su planicie también es estrecha. Al final de la cuenca en el recuadro 'c', los cambios observados en la forma del cauce, se asocia a un puente vehicular que modificó el cauce aguas

abajo, desplazándolo sobre la margen izquierda aproximadamente 100 metros para posteriormente descargar su cauce en el Río Santo Domingo.

4.2.3 Patrones espaciales de humedad

Se obtuvieron catorce patrones espaciales de humedad de escenas de los años 1988, 1993, 1995, 1996, 1997, 1998, 2000, 2001, 2002 y 2014, los cuales contienen información de la distribución del agua en la subcuenca para varias etapas temporales. Estos patrones corresponden con la extensión de las zonas de inundación en la planicie, lo que permite validar la configuración de la planicie de inundación del río Suchiapa.

Debido a que el índice (TCT wetness) con el que se identificaron los patrones realza las superficies con baja reflectividad o albedo que están directamente relacionadas al agua, los patrones espaciales obtenidos no sólo pertenecen a zonas húmedas, sino que también incluyen vegetación vigorosa (por su alto contenido en agua). Para evitar problemas con las sombras de las nubes y la topografía, ya que estas dan una reflectividad similar a zonas húmedas, se extrajeron los patrones originados por sombras y zonas boscosas.

En las Figuras 54 y 55 se presentan los patrones obtenidos bajo una visualización simultánea, la cual permite establecer de mejor manera la extensión de la planicie de inundación, así como de la red de drenado de la subcuenca. Se omitió la parte del río que esta encañonado al no tener zonas de peligro para asentamientos humanos y porque a lo largo de este tramo, el río se encuentra bajo la sombra provocada por el cañón por el que pasa.

En la Figura 54 se presentan en el recuadro los patrones espaciales de humedad ubicados en los valles de la subcuenca, se puede observar como la mayor densidad espacial de patrones se presenta en las zonas donde se trazó la planicie de inundación lo que confirma su ubicación dentro de la subcuenca.

El modelo de drenaje de la subcuenca es dendrítico, esto es, se caracteriza por sus formas ramificadas, las cuales están definidas por los patrones espaciales de humedad obtenidos de la subcuenca, definiendo asimismo los afluentes y tributarios más importantes. Se puede apreciar que el Río Suchiapa tiene dos principales afluentes uno que viene desde el sur y el otro desde la parte sureste de la subcuenca, uniéndose cerca de la población de Nueva Tenochtitlan. Asimismo, sobre el río

Suchiapa aguas arriba sobre la margen izquierda se tienen los tributarios que cruzan por los poblados de Progreso Agrario, Cristobal Obrego y Nuevo México

En la Figura 55 se observa que los patrones espaciales de humedad corresponden con la forma estrecha del cauce del río, lo que indica que el río esta entre pendientes pronunciadas en sus dos márgenes. Se pueden identificar tres tributarios del río Suchiapa, uno al noroeste proveniente del sur de Tuxtla Gutiérrez (estación el Boquerón), otro al norte en la parte central de la imagen que pasa al oeste del poblado de Suchiapa, y el otro que viene desde el sur (río Sto. Domingo).

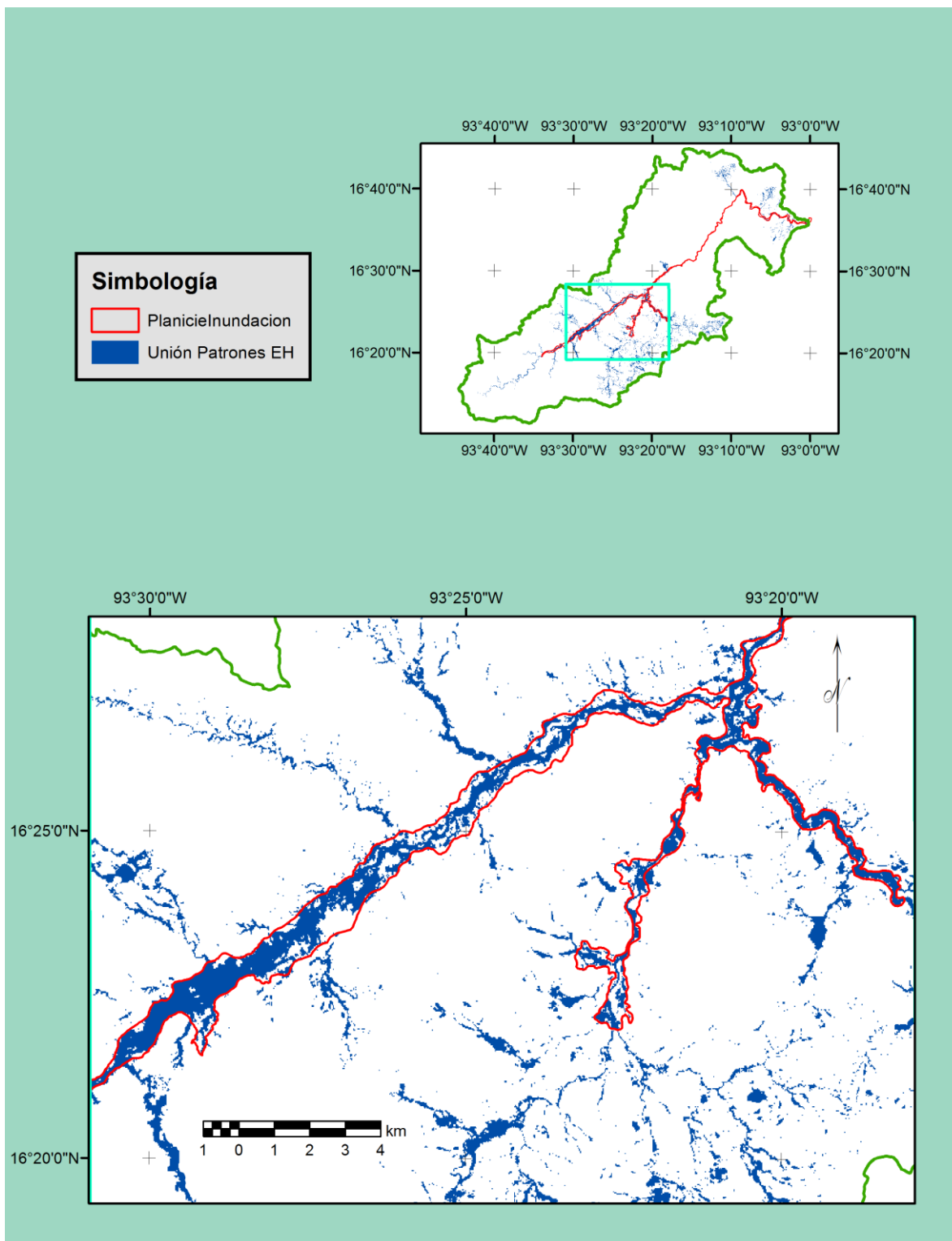


Figura 54. Unión de patrones espaciales de humedad y planicie de inundación.

Dado que las imágenes satelitales no registran huellas de agua que si son percibidas por las ortofotos, estas discrepancias quedan de manifiesto en los huecos entre los patrones y la planicie de inundación.

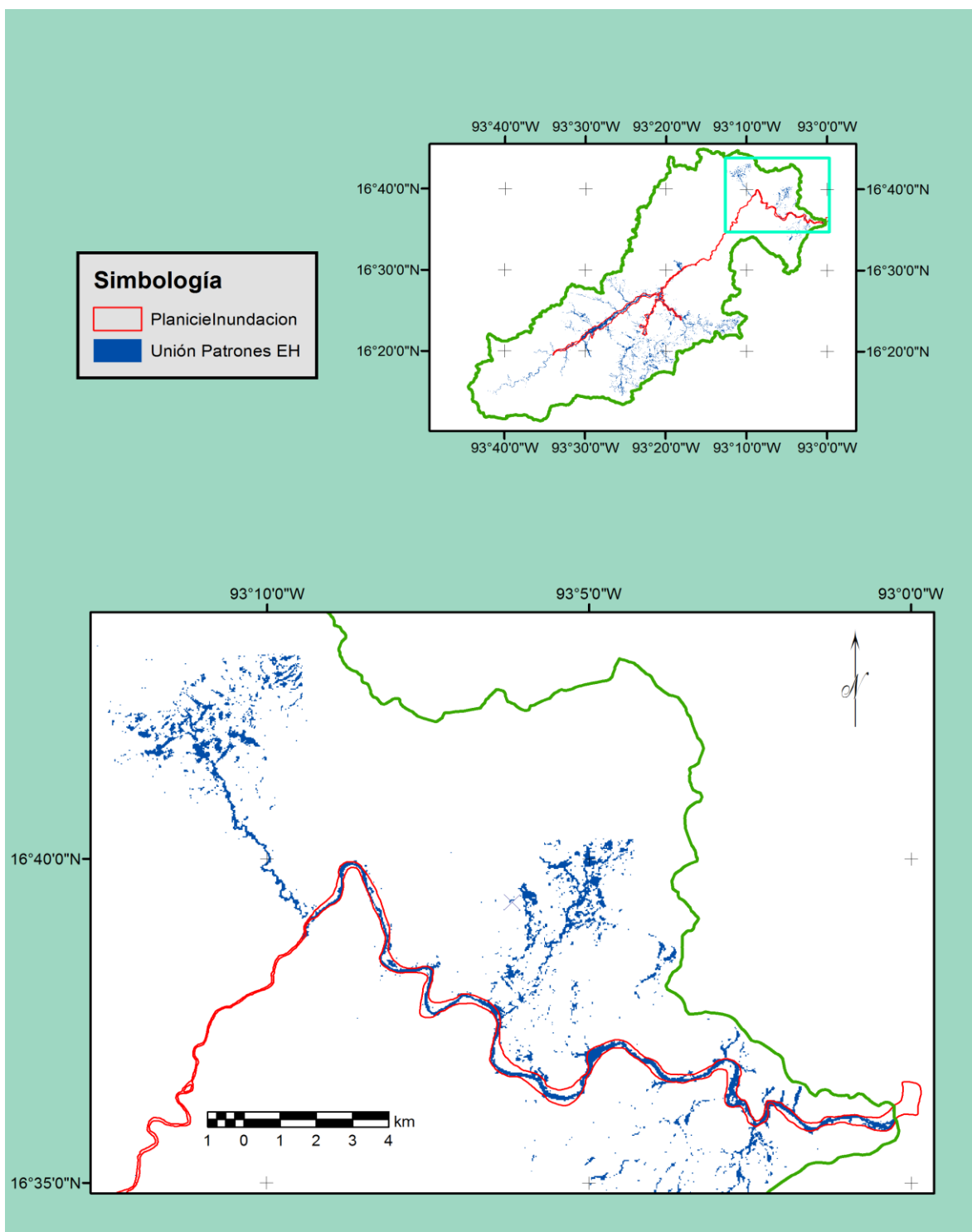


Figura 55. Unión de patrones espaciales de humedad y planicie de inundación.

La comparación en las Figura 54 y 55 permite confirmar la correspondencia tanto de la distribución espacial como de la forma de los patrones espaciales y de la planicie

de inundación trazada, indicando la extensión que ha alcanzado el agua dentro de la subcuenca.

4.2.4 Validación del modelo hidrológico

Para establecer el desempeño de los resultados entregados por el modelo hidrológico, primero se realizó una validación visual para confirmar la coincidencia espacial de los resultados máximos del modelo y los patrones espaciales de humedad, siendo esta comparación buena, pues los valores máximos para profundidades y velocidades coinciden espacialmente con los patrones de humedad.

Posteriormente para poder hacer un análisis cuantitativo, se identificó el área coincidente de los resultados del modelo hidrológico con respecto a los patrones espaciales de humedad, a los que se les consideró como información real. Para alcanzar este objetivo, se realizó una selección por localización de los resultados del modelo que se intersectan con los patrones espaciales y se extrajeron. En la Figura 56, se muestra la comparación entre patrones espaciales de humedad y resultados de profundidades máximas del modelo hidrológico para un Tr de 5 años, además de las áreas que se descartaron de los patrones espaciales, como los tributarios de la margen izquierda del río Suchiapa, asimismo se omitieron los resultados para los Tr de 2 y 100 años por arrojar resultados similares a los Tr de 5 y 50 años, respectivamente.

Los cuadros rosas en la Figura 56 muestran las áreas que se recortaron de los patrones, pues los resultados del modelo no las cubren. También es posible visualizar la cantidad de pequeños escurrimientos resultados del modelo, y que no fueron captados mediante los sensores satelitales. Después se recortó el polígono correspondiente a los patrones, considerándolo como el área total de la superficie sujeta a inundación en la cuenca.

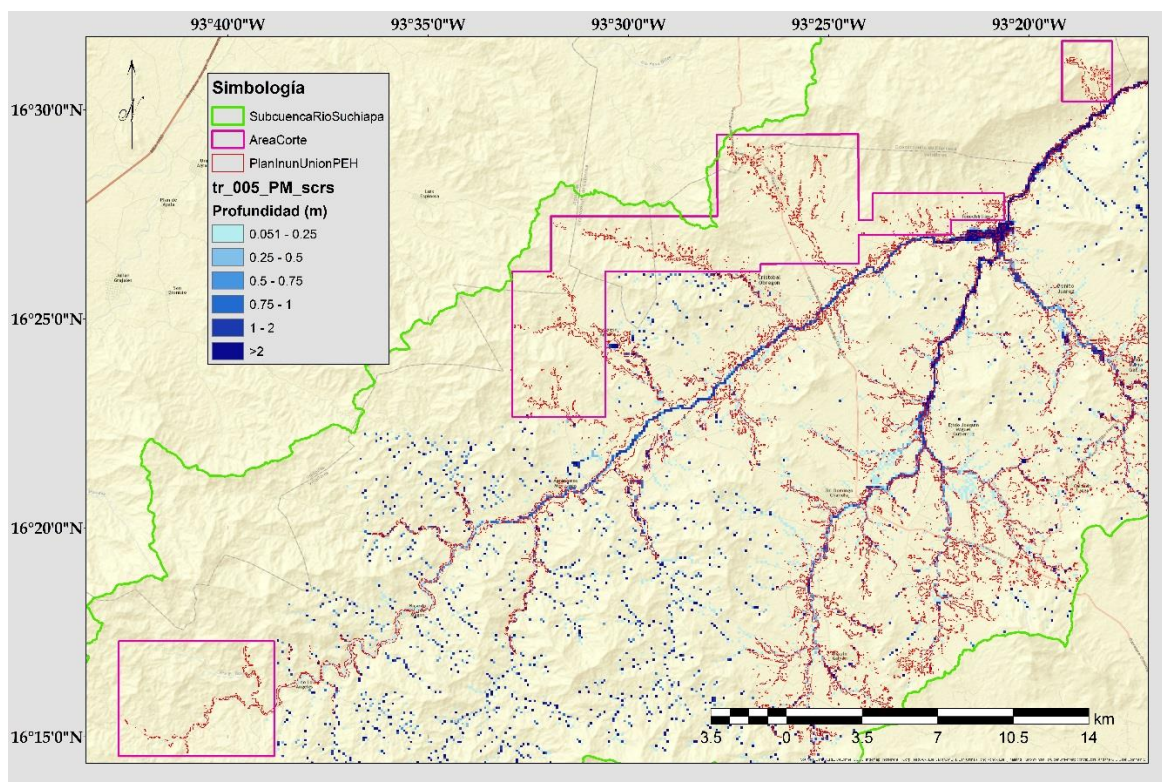


Figura 56. Comparación entre patrones espaciales de humedad y resultados de modelo hidrológico de profundidades máximas para un Tr de 5 años.

Para realizar la validación fue necesario transformar los datos ráster del modelo a información vectorial tipo polígono, esto con el fin de poder procesar la información y calcular las áreas coincidentes del modelo con respecto a la de los patrones. Este objetivo se alcanzó realizando una selección por localización entre la intersección de cada uno de los polígonos de los tres Tr de profundidades máximas del modelo hidrológico, con el polígono de los patrones espaciales y su posterior extracción. Las áreas y su porcentaje de similitud con los patrones espaciales de humedad obtenida mediante el proceso descrito se presentan en la Tabla 6:

Tabla 6. Porcentajes de similitud y error entre áreas coincidentes de los PEH y los resultados de profundidades máximas del modelo hidrológico.

Shape	Area (km ²)	% de similitud con PEH	% de error
PEH (Plan. Inun)	62.288728		
Tr_005vsPEH	46.310174	74.35	25.65
Tr_010vsPEH	79.090574	78.77	21.23
Tr_050vsPEH	100.140572	62.20	37.80

Hay que hacer mención de que los resultados mostrados en la Tabla 6, no reflejan un mal desempeño del modelo hidrológico, pues los distintos Tr's se compararon con patrones que representan el máximo de extensión que podría llegar a alcanzar un evento extraordinario de inundación, por lo que el porcentaje para el Tr de 5 años es el esperado por el modelo. Además los resultados máximos del modelo están contenidos dentro y alrededor de los polígonos de los patrones espaciales confirmando su buen desempeño al obtener un porcentaje de error menor al 25% en el caso del Tr de 10 años. Para el Tr de 50 años se presentó una sobreestimación de la extensión de una inundación, sobrepasando el área cubierta por los patrones y arrojando un error del 37.80%, este resultado se debe a la gran cantidad de tributarios que el modelo considera, y que al hacer la selección de áreas coincidentes quedan dentro del análisis.

En la Figura 57 se muestran los patrones espaciales recortados junto con los resultados del modelo para un Tr de 50 años en la zona de los valles de la subcuenca. Se puede apreciar la cantidad de pequeños escurrimientos que establecen los resultados del modelo y que los sensores no alcanzan a captar.

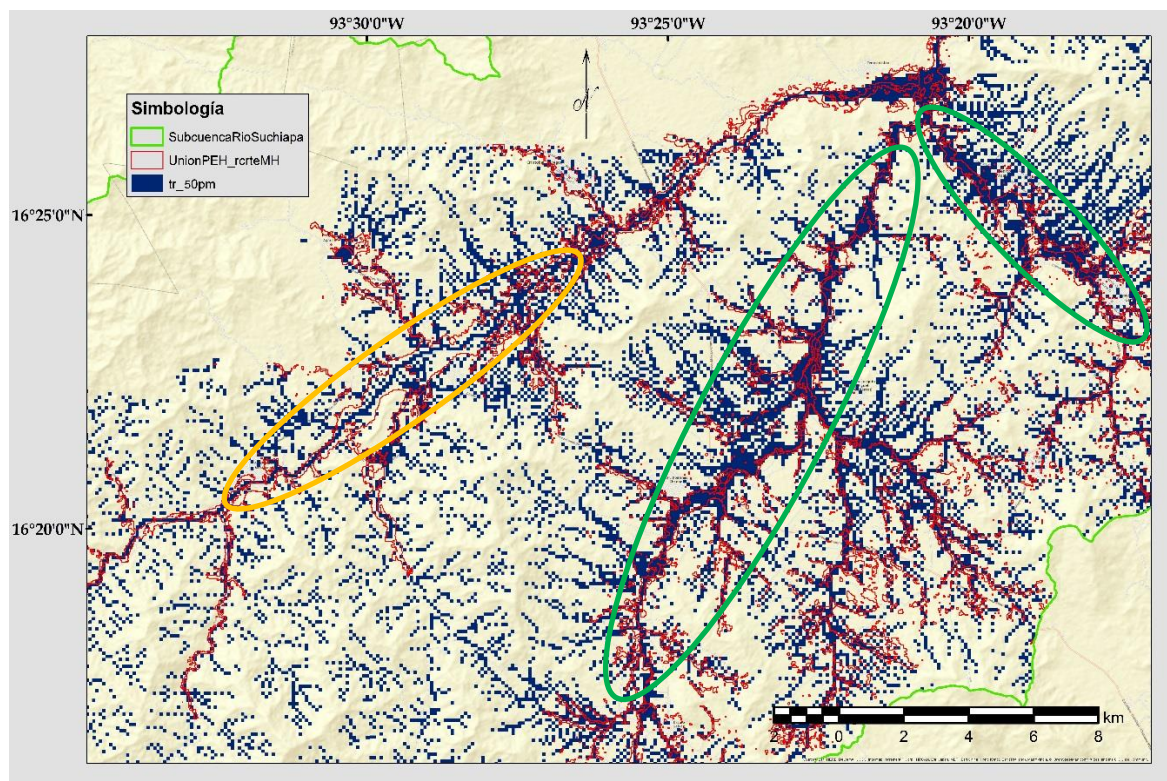


Figura 57. Comparación entre patrones espaciales de humedad y resultados de profundidades máximas para un Tr de 50 años.

También como se ha mencionado, existen zonas de deposición de agua representadas por los patrones espaciales que no son representadas por los resultados del modelo hidrológico, así como sitios donde existe una sobreestimación de áreas inundables, los cuales arrojan los resultados del análisis realizado previamente, mostrados dentro de los óvalos amarillo y verde de la Figura 57, los cuales muestran los sitios de subestimación y sobreestimación, respectivamente.

Del mismo modo en la Figura 58 se presenta la misma comparación entre los resultados del modelo para un Tr de 50 años de profundidades máximas y los patrones espaciales para la zona cercana a la desembocadura del río Suchiapa. Se aprecian nuevamente los pequeños tributarios representados por el modelo, y a diferencia de la zona de los valles, en esta zona existe una mayor coincidencia entre las áreas de los patrones y los resultados del modelo hidrológico.

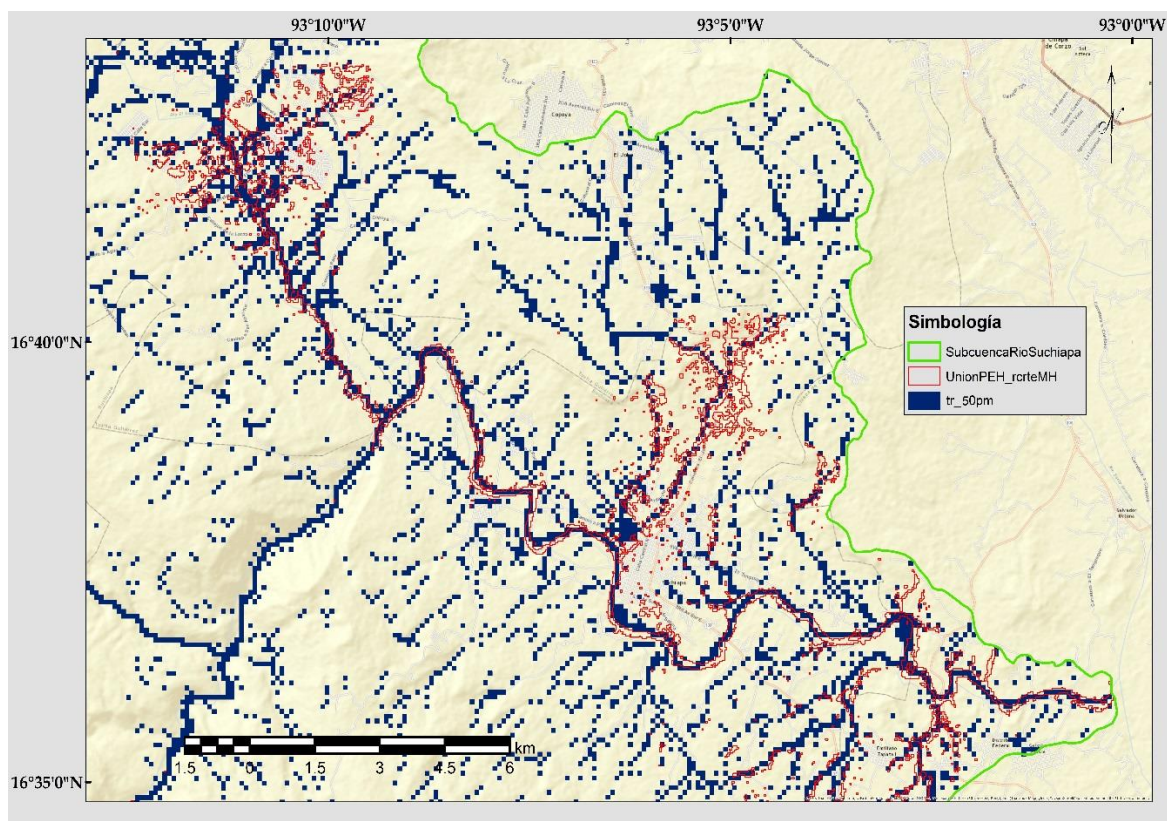


Figura 58. Comparación entre patrones espaciales de humedad y resultados de profundidades máximas para un Tr de 50 años.

Como se había mencionado, las zonas donde se presentan sobreestimaciones, así como subestimaciones, son las correspondientes al valle de la subcuenca, como se aprecia en la Figura 59, donde se presenta la comparación entre los patrones espaciales y los resultados del modelo luego de realizar la selección por localización. A la izquierda de la Figura 59, se observa que los resultados no cubren la totalidad del área inundable pues estos representan un cauce estrecho, sin consideración de planicie alguna como la representada por los patrones espaciales.

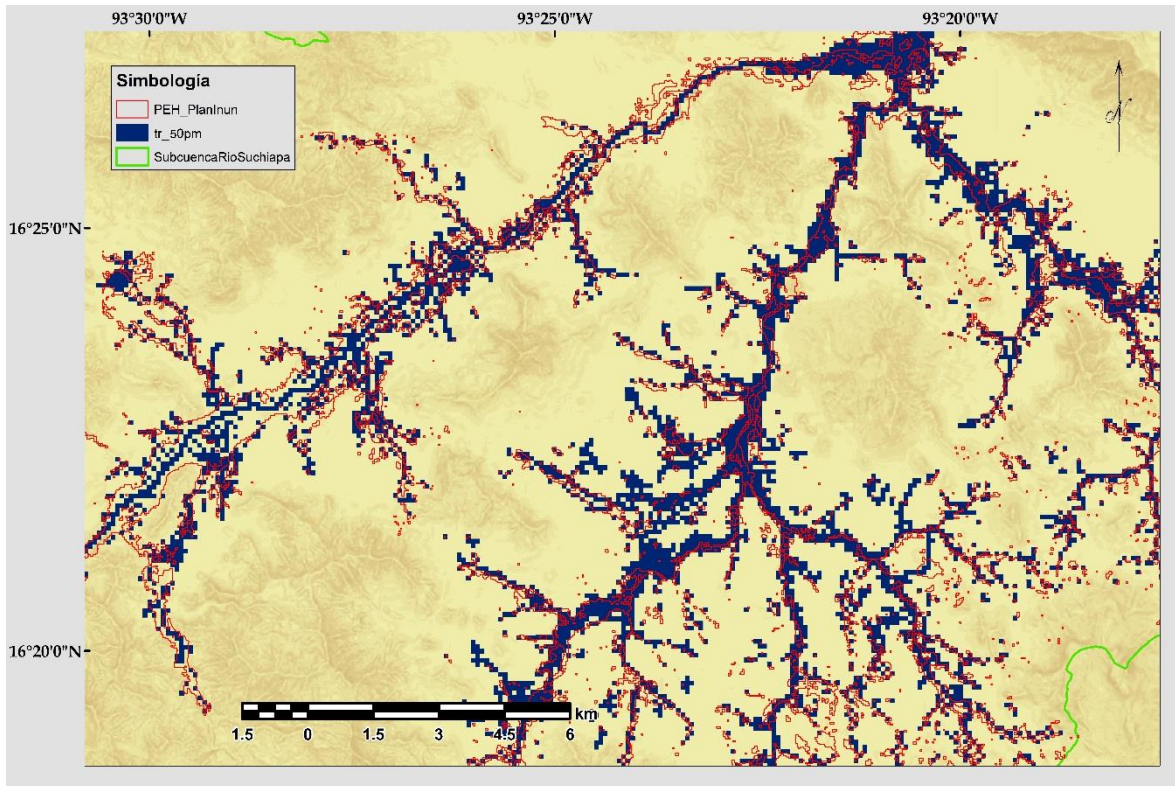


Figura 59. Coincidencia entre áreas del modelo para un Tr de 50 años de profundidades máximas y PEH.

Esta deficiencia queda mejor apreciada en la Figura 60, donde se presenta los resultados del Tr de 50 años para profundidades máximas y una imagen satelital correspondiente al 27 de julio de 2013, fecha posterior a la ocurrencia de varios eventos hidrometeorológicos en o cerca de la zona de Chiapas, entre los cuales los más importantes fueron el Huracán Barbara (28-30 de mayo), Huracán Cosme (23-27 de junio), Huracán Dalia (30 de junio-07 de julio) y Huracán Erick (4-9 de julio), siendo el único que tocó la superficie continental en la zona de Chiapas el Huracán Barbara, pero dejando todas lluvias abundantes. De la misma forma, en los tributarios ubicados a la derecha de la Figura 59, se ve de manera clara una sobrestimación de los resultados del modelo hidrológico en comparación con los patrones espaciales detectados.

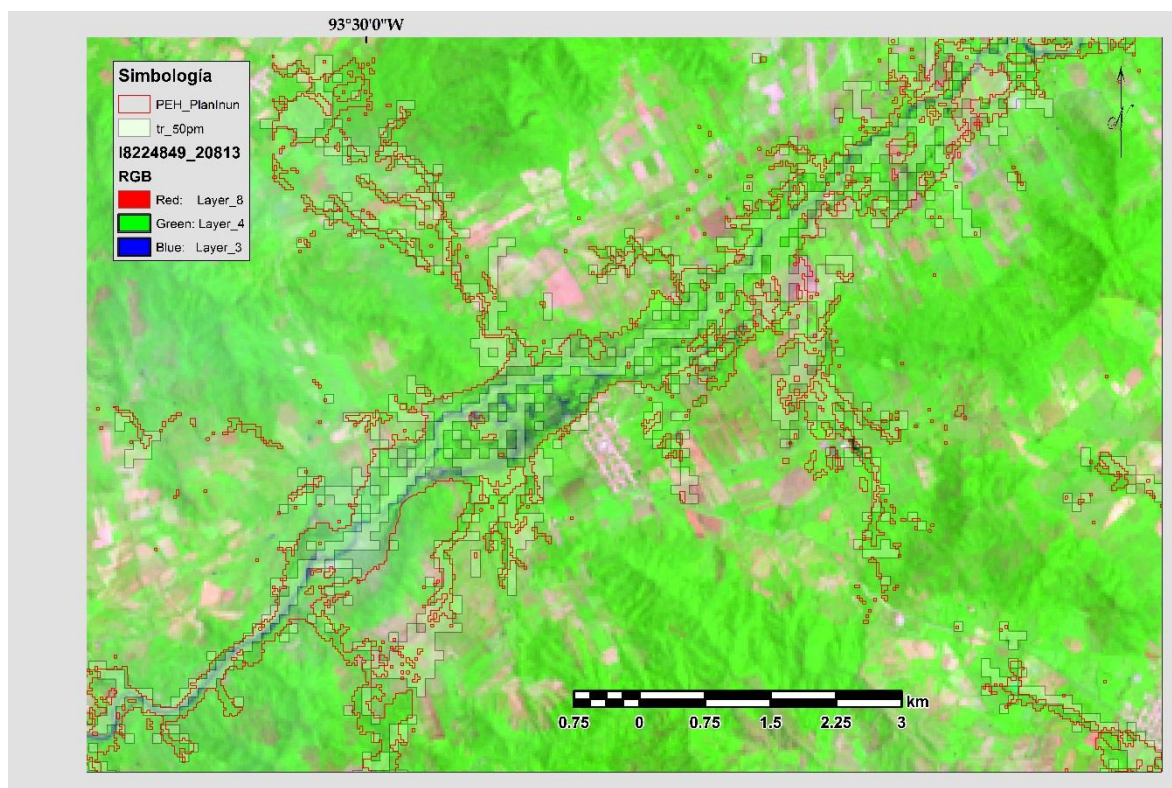


Figura 60. Comparación de inundación del valle de la subcuenca con patrones espaciales y resultados de profundidades máximas para un Tr de 50 años.

En la imagen presentada en la Figura 60 se observa una inundación ocurrida en el valle de la subcuenca el 27 de julio de 2013, la escena satelital es presentada en una combinación de falso color verdadero en la que las cubiertas con vegetación y el suelo son bien diferenciados de cuerpos de agua, esto con el fin de poder apreciar de mejor manera el fenómeno. Igualmente se observa la zona representada por los patrones como zona inundable así como la de los resultados del modelo hidrológico.

4.2.5 Zonas en riesgo en la SCRS

La subcuenca del Río Suchiapa, por su configuración, ubicación y características de drenado, no es una cuenca que tenga una planicie de inundación con una amplia extensión o que este bien desarrollada, pues su ubicación en zonas montañosas contribuyen al rápido drenado de la cuenca; sin embargo, por su misma ubicación y características topográficas, es susceptible a ser alcanzada por fuertes fenómenos hidrometeorológicos cada año, los cuales llegan a causar un aumento en los niveles del agua en los cauces principales y, por tanto, daño a zonas pobladas o con alguna actividad económica. La subcuenca se caracteriza por estar poblada por numerosas localidades rurales marginadas a lo largo de su longitud, las cuales son altamente

vulnerables a desastres naturales por el tipo de las viviendas que las conforman. Por ello es de interés identificar el grado de riesgo en el que se encuentran de sufrir una inundación. El modelo matemático consideró tres tipos de vivienda para el análisis de severidad (velocidad y profundidad), las cuales tienen las siguientes características:

- Tipo 1: Muros de madera con cubierta metálica, o de estructura metálica con cubierta de lámina o contrueros con material de desecho como lámina de cartón, palma, tejamanil (enramado cubierto de arcilla); techo flexible; cuando existe cimentación, zapata de mampostería; altura de un nivel.
- Tipo 2: Muros de mampostería simple; techo flexible; cimentación de zapata de mampostería; altura de un nivel.
- Tipo 3: Muros de mampostería reforzada con castillos y dalas, muros de mampostería reforzada con castillos y dalas con malla y mortero o de mampostería de piezas huecas con refuerzo interior; techo y entrepisos rígidos; cimentación con zapata corrida de concreto o mampostería; altura de uno a cinco niveles.

Siendo la tipo 1, la más vulnerable a fenómenos naturales, y el más común en las zonas rurales de la subcuenca. El tipo 2 es también común encontrarlo en este tipo de poblaciones, siendo el menos probable el tipo 3, aunque este último tipo se asocia a las poblaciones más importantes como Tuxtla Gutiérrez, Chiapa de Corzo, Suchiapa y alguna comunidad urbana.

En la Figura 61 se presenta la densidad de los tipos de vivienda 1 y 3 dentro de la subcuenca del río Suchiapa.

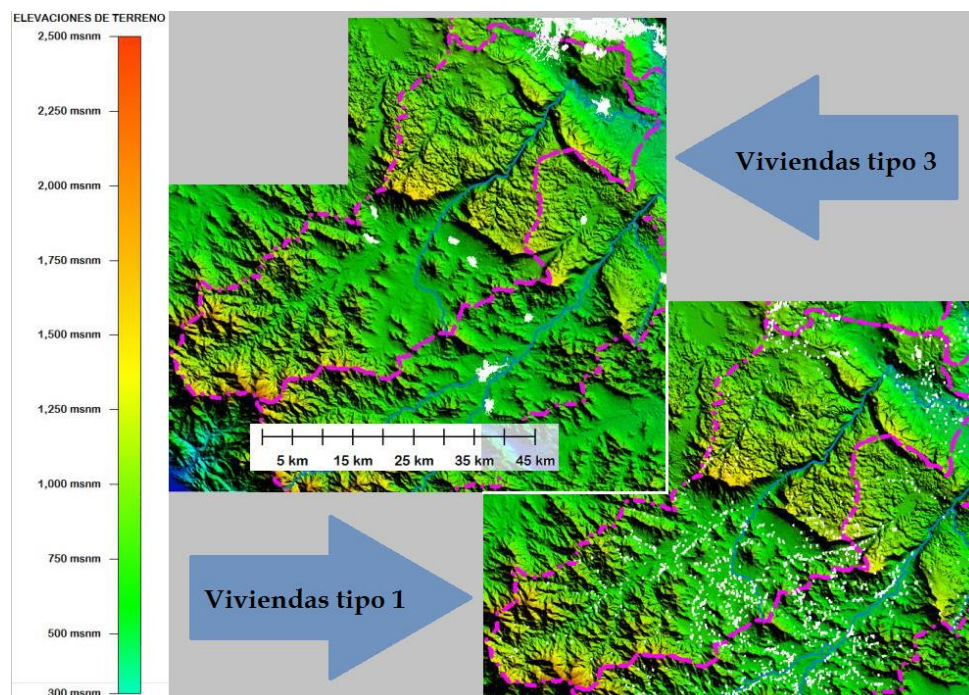


Figura 61. Viviendas tipo 1 y 3 asociadas al tipo de comunidad presente en la subcuenca del río Suchiapa.

Es importante mencionar que se consideraron todas las comunidades rurales y urbanas ubicadas dentro o próximas a los patrones espaciales, a diferencia del análisis de severidad resultado del modelo hidrológico que solo consideró la proximidad a cuerpos de agua.

El principal riesgo en zonas montañosas es que por sus fuertes pendientes, una vez ocurrida una avenida, el flujo instantáneo por su velocidad transporta escombros y sedimentos pudiendo ser de gran volumen o tamaño. Estos efectos son más severos cuando existe una gran deforestación como ocurre en la parte alta de la subcuenca, a diferencia de las zonas más bajas, donde el agua una vez superada la capacidad del cauce, ocupara parcial o totalmente el área de su planicie, afectando las áreas ocupadas por los asentamientos humanos. En ambos casos, los impactos son más desastrosos cuando se tienen lluvias continuas dejando el suelo saturado y si además hay grandes extensiones de suelos impermeables como ocurre en la subcuenca.

La Figura 62 muestra los grados de riesgo en la parte de las montañas y el valle de la subcuenca del río Suchiapa; estas zonas de riesgo se definieron en base a los patrones espaciales y su proximidad a ellos. Asimismo, se observan las comunidades rurales y urbanas existentes en esta zona, siendo posible identificar si se encuentran dentro de alguna zona con algún grado de riesgo de ser inundada.

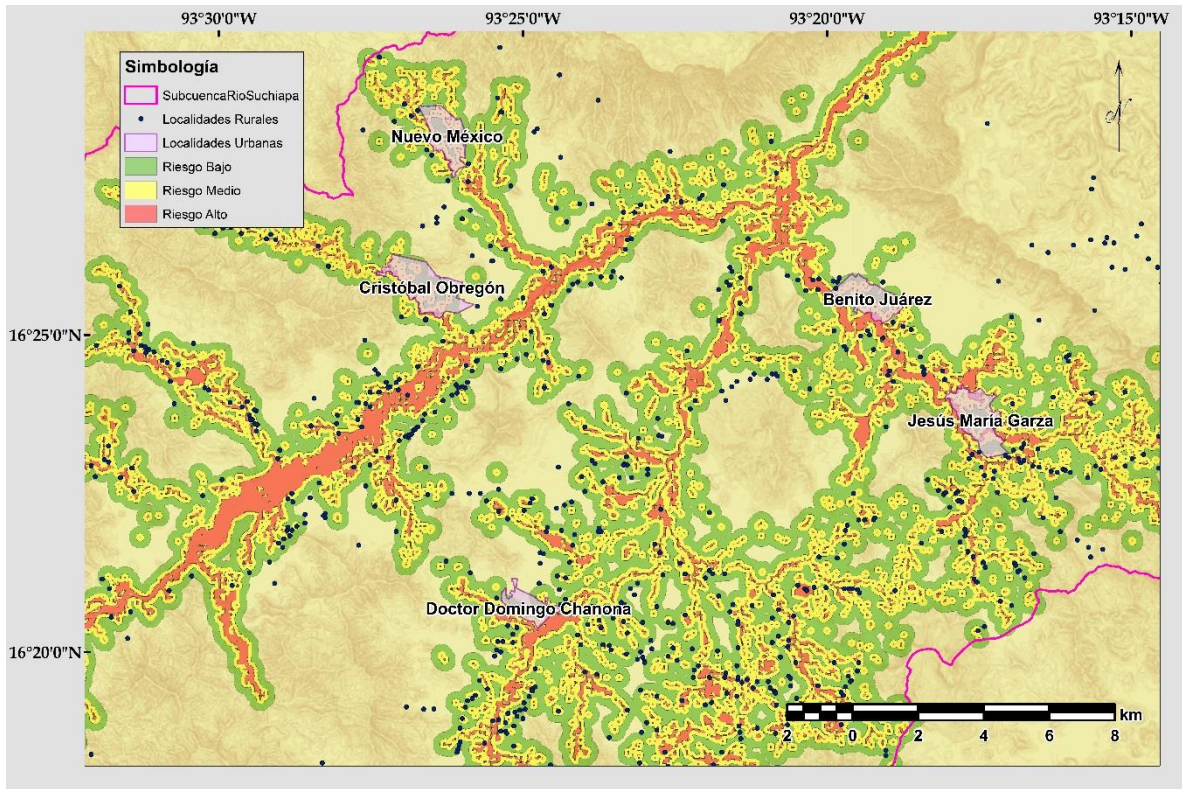


Figura 62. Zonificación del riesgo de inundación en la subcuenca se acuerdo a la proximidad a la planicie.

En la Figura 62 se observa que la mayoría de las comunidades rurales se encuentran dentro de alguna zona con riesgo medio o bajo, siendo un número menor las que están directamente dentro de una zona de riesgo alto. En cuanto a las comunidades urbanas todas tienen porciones de área dentro de cada una de las zonas en riesgo principalmente porque se ubican en la planicie de inundación de los ríos.

Para saber las cifras exactas de comunidades rurales que se encuentran en cada una de las zonas, se realizó una selección por localización, la cual arrojó las cantidades mostradas en la Tabla 7.

Tabla 7. Situación de riesgo de las localidades rurales dentro de la subcuenca del río Suchiapa.

Total de localidades rurales en la SRS	1283	100
Localidades en riesgo		
Grado de riesgo	# de localidades	Porcentaje
Alto	73	5.7
Medio	413	32.2
Bajo	365	28.4
Nulo	432	33.7

De acuerdo a la Tabla 7, existe un pequeño porcentaje (5.7%) de las localidades dentro de áreas con un grado alto de peligro; sin embargo, hay un porcentaje

considerable dentro de zonas con riesgo medio siendo de 32.2%. También existe un alto porcentaje de comunidades ubicadas en zonas de riesgo bajo o nulo, siendo estas últimas las que no se encuentran ubicadas dentro de ninguna zona de riesgo.

En la Figura 63 se muestra el alto riesgo de inundación de las zonas del río Suchiapa en la parte baja de la cuenca próxima a la desembocadura. En general, las ciudades de Tuxtla Gutiérrez y Suchiapa, presentan un riesgo de más del 60% de su área con diferentes niveles, es posible concluir que la vulnerabilidad de las zonas urbanas asentadas en las riberas de los ríos es extrema.

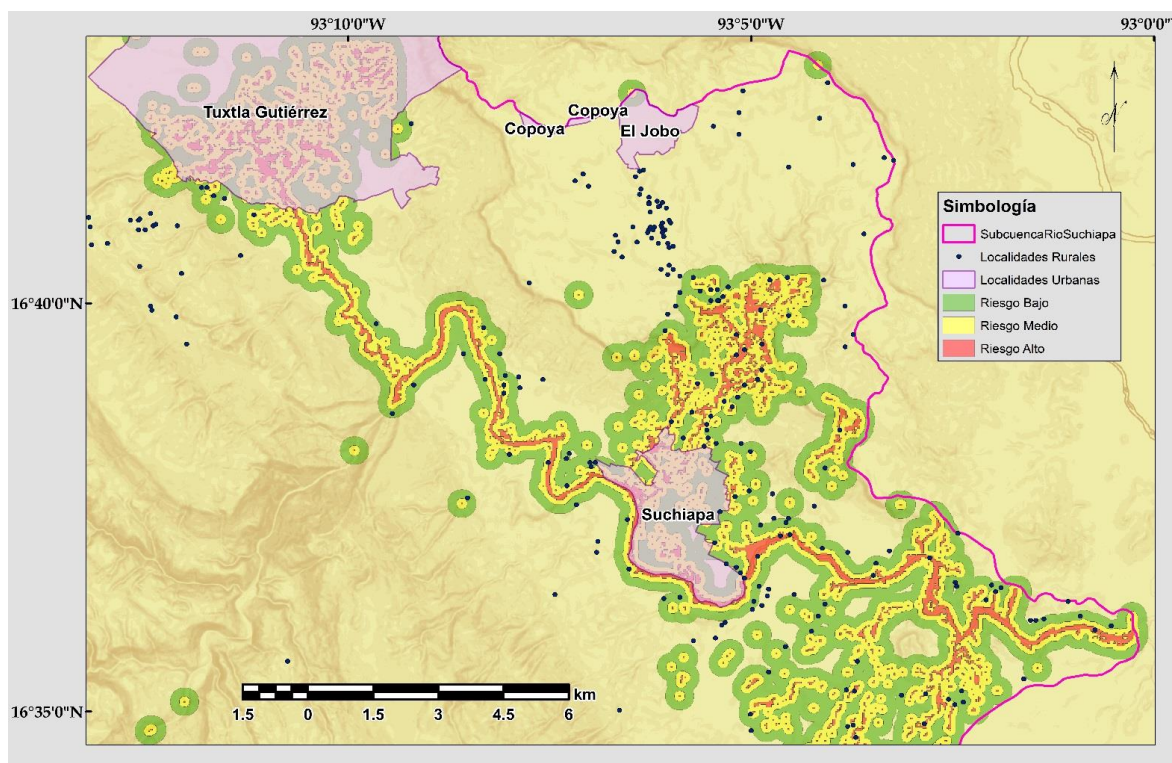


Figura 63. Zonificación del riesgo de inundación en la subcuenca se acuerdo a la proximidad a la planicie.

En los casos de las comunidades urbanas dentro de la subcuenca, se puede evaluar la presencia o construcción de barreras de protección en las ciudades a lo largo del río. Otra acción puede ser la desviación de las aguas antes de cruzar el río o acciones como evitar asentarse dentro de las zonas de alto riesgo para prevenir algún posible desastre, evitar actividades que promuevan la deforestación de bosques, no tirar desechos o escombros en vías públicas, ríos o arroyos, acatar las indicaciones de las autoridades en caso de un próximo o inminente fenómeno hidrometeorológico severo, son acciones básicas e importantes para prevenir desastres naturales. Sin embargo, aún existen problemas de fondo que atenderse, los cuales requieren de un

importante esfuerzo colectivo encaminado a resolver los problemas de rezago en la calidad de vida y educación (ambiental, reproductiva, valores) de grandes porciones de sociedades humanas, los cuales están directamente ligados a problemas ambientales. Estas problemáticas solo se resolverán mediante una continua cooperación entre los gobiernos y las sociedades, el establecimiento de actividades y leyes que pongan de manifiesto la importancia de un medioambiente sano, así como de nuestro papel como especie en el entorno, de la administración de recursos naturales y su conservación, por medio de una adecuada educación, un uso adecuado del suelo y la instauración de límites en cuanto la explotación de recursos naturales. Esto es, diferentes acciones o planteamientos pueden ser propuestos para lograr un manejo adecuado e integral de las inundaciones.

5. Conclusiones y recomendaciones

En el presente trabajo de tesis se pone de manifiesto la importancia del uso de datos espaciales (imágenes de satélite) y los procesos (técnicas de percepción remota y SIG) para derivar a partir de estos, información de utilidad para describir fenómenos naturales que impactan a la sociedad y medio ambiente.

La información obtenida es una importante fuente de datos para el conocimiento y la administración de los recursos naturales dentro de las sociedades, ya que permite describir y entender cómo se originan y comportan fenómenos dinámicos que han ocurrido y ocurren en la superficie terrestre. Fenómenos como la deforestación, crecimiento urbano, cambios en el cauce de los ríos, distribución espacial de las redes de drenaje, modificaciones en la planicie de inundación, los cuales pueden conocerse de mejor manera e incluso se pueden predecir sus efectos en la atmósfera (cambio de clima) y superficie terrestre (inundaciones o sequía).

En este sentido, el uso de imágenes de satélite permitió en una primera comparación cualitativa identificar una importante deforestación dentro de la subcuenca del Río Suchiapa, que posteriormente se confirmó mediante un análisis cuantitativo, el cual indicó que en comparación con datos forestales del año 1975, las superficies de bosques sanos se redujeron poco más de un 50% para el año 2014; incluso gracias a una conciencia ambiental que a partir de 2011 redujo la tasa de deforestación en la zona. Cabe mencionar, que la deforestación como tal puede revertirse a largo plazo siempre que a corto y mediano plazo se planteen acciones que permitan la recuperación, mediante la participación humana, de las zonas afectadas. También se concluye que estos cambios en el tipo de suelo afectaron directamente el clima local y regional al estar directamente relacionados con la variabilidad de la precipitación (espacial y temporal) y los cambios de temperatura. Importantes cambios se observaron en regiones bien definidas por el tipo de clima, suelos, vegetación y topografía de la subcuenca como son: urbana, valles, bosques, pues el clima local se modifica generando una zona de interfase entre el bosque y el desmonte, alterando las condiciones del suelo y vegetación, las características de drenado y, por tanto, los regímenes de lluvia.

Para establecer el cambio de uso de suelo, se aplicaron técnicas conocidas para clasificación de imágenes mediante el NDVI, pero se identificaron problemas para poder discriminar de manera precisa las superficies impermeables, directamente

ligadas a asentamientos humanos y suelos desnudos. Para ello, se empleó el índice BCI, logrando una mejora considerable en la clasificación lo que permitió una mejor comparación con los sensores anteriores a la plataforma Landsat 8.

La aplicación de distintas técnicas de percepción remota (realce, filtrado, clasificaciones, entre otras) permitió extraer patrones espaciales del flujo del agua en la subcuenca, que permiten en conjunto entender y predecir junto con modelos hidrológicos y variables hidráulicas los riesgos a la población y su economía por eventos hidrometeorológicos (ej. huracanes, depresión y tormentas tropicales). El análisis multi-temporal para un periodo de casi 40 años permitió unir diversos patrones de flujo obteniendo un polígono que representara las extensiones máximas de inundaciones que han tenido lugar en la subcuenca, resultando en un mapa de inundación. Los mapas de inundación ayudan a establecer zonas en riesgo, información que es de importancia, toda vez que la zona de estudio es altamente vulnerable a eventos hidrometeorológicos que propicien tormentas de gran magnitud o intensidad o frecuencia.

De igual manera, se demostró la utilidad de los patrones espaciales obtenidos para validar los resultados del modelo hidrológico FLUBIDI (modelo de simulación de inundaciones 2D), arrojando porcentajes de error aceptables. Es importante mencionar que pese a que los porcentajes de error fueron de 25% para un Tr de 2 años y 37.8% para un Tr de 50 años, el modelo considera toda la subcuenca como fuente de aportación además de la lluvia local en diferentes tiempos durante la simulación, y los patrones, el resultado de flujos preferenciales de escurrimiento. Dado esto, las áreas difieren entre el modelo y los patrones, pero no deben variar en un alto porcentaje al grado que no compartan polígonos similares una vez que se tiene ya la inundación. Con base en esto, los porcentajes obtenidos tienden a ser menores, demostrando que el modelo tiene un buen desempeño y alta confiabilidad. Adicionalmente, el establecimiento de patrones y la validación del modelo FluBiDi puso de manifiesto que un importante porcentaje del área de todas las localidades urbanas, dentro de la subcuenca, se encuentran en zonas con diversos grados de riesgo de ser inundadas a diferencia de las zonas rurales cuya vulnerabilidad es baja al estar dispersas y ser de bajo ingreso, las cuales presentaron un bajo riesgo.

De lo anterior se concluye que las hipótesis planteadas sí se cumplen, esto es, es posible extraer patrones espaciales a partir de la información satelital mediante el empleo de técnicas de percepción remota y SIG, que estos patrones fueron útiles para establecer un mapa de inundación, para validar un modelo hidrológico

(FLUBIDI), y para zonificar áreas de acuerdo a un alto, medio y bajo riesgo de ser inundadas en función del grado de vulnerabilidad que presentan y los peligros que corren.

Finalmente, analizando los beneficios sociales y ecológicos de usar esta metodología es de mencionar que el tener la posibilidad de ubicar y cuantificar aquellas localidades sujetas a riesgo alto y medio, permite un mejor y eficaz manejo de las inundaciones. Esto se traduce en el establecimiento de acciones que estén encaminadas a mitigar o minimizar el riesgo de sufrir inundaciones, pues permite enfocar la atención, recursos y actividades directamente en estas zonas altamente susceptibles. Por ejemplo, en los casos de las comunidades urbanas dentro de la subcuenca, se puede evaluar la presencia o construcción de barreras de protección en las ciudades a lo largo del río. Sin embargo, esto no significa que se resuelvan este tipo de impactos, toda vez que aún existen problemas de fondo que deberán atenderse de manera integral por el gobierno y sociedad, de forma que el esfuerzo se encamine a solventar los problemas de rezago en la calidad de vida y educación (ambiental, reproductiva, valores) de grandes porciones de la sociedad, los cuales están directamente ligados a problemas ambientales como es el caso de la deforestación.

Referencias

Abbas, K. Jha; Robin Bloch; Jessica Lamond, 2012: Cities and Flooding: A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century, The World Bank, Washington DC.

Baig, Zhanga, Shuai, Tong, 2014: Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance, *Remote Sensing Letters*, 5,5, 423-431.

Benito G., Houdson P., 2010: Flood hazards: the context of fluvial geomorphology. In I. Alcantara-Ayala, A. Goudie (eds.), *Geomorphological hazards and disaster prevention*, Cambridge University Press, 111-128, Reino Unido.

Black, Peter E., 1990: *Watershed Hydrology*, Prentice-Hall, New Jersey

Bladé, E.; Cea, L.; Corestein, G.; Escolano E.; Puertas, J.; Vázquez-Cendón, E; Dolz, J.; y Coll. A., Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30, 1, 1-10.

Bründl M., Bartelt P., Schweizer J, Keiler M, Glade T, 2010: Review and future challenges in snow avalanche risk analysis. In I. Alcantara-Ayala, A. Goudie (eds.), *Geomorphological hazards and disaster prevention*, Cambridge University Press, 111-128.

CENAPRED, 2004: INUNDACIONES serie de fascículos, Secretaría de Gobernación

Chander, G., B. L. Markham, and D. L. Helder, 2009: Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113, 893-903.

Chang, Kang-Tsung, 2012: *Introduction to Geographic Information Systems*, McGraw-Hill, New York.

Chengbin Deng, Changshan Wu, 2012: BCI: A biophysical composition index for remote sensing of urban environments. *Remote Sensing of Environment*, 127, 247-259.

Chuvieco E.; Huete A., 2010: *Fundamentals of Satellite Remote Sensing*, CRC Press, USA.

CEIEG-Chiapas, 2005: Programa de Ordenamiento Territorial de Chiapas, Disponible en: http://www.ceieg.chiapas.gob.mx/home/wp-content/uploads/2008/02/productos/geografico/PEOT_30nov2005.pdf. [Página web consultada en mayo de 2015].

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2013: *La biodiversidad en Chiapas: Estudio de Estado*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad/Gobierno del Estado de Chiapas. México.

CONABIO. 2010: El Bosque Mesófilo de Montaña en México: Amenazas y Oportunidades para su Conservación y Manejo Sostenible. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 197 pp. México D.F., México.

De Luna F. 2015: Modelo hidráulico de flujo bidimensional para estimar el escurrimiento a partir de la precipitación, Candidato a Doctor en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México. Defensa Tema Doctoral 2015-2, Ciudad de México

Gobierno de Chiapas, 2013: Plan Estatal de Desarrollo Chiapas 2013-2018, Secretaria de Planeación, Gestión Pública y Programa de Gobierno, Tuxtla Gutiérrez

Grayson, R; Blöschl, G, 2000: Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modeling, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Goudie A., 2010: Introduction. In I. Alcantara-Ayala, A. Goudie (eds.), Geomorphological hazards and disaster prevention, Cambridge University Press, 33-47.

Gupta A., 2010: The hazardouness of high-magnitude floods. In I. Alcantara-Ayala, A. Goudie (eds.), Geomorphological hazards and disaster prevention, Cambridge University Press, 97-109.

Horst Frank, 2006: Imagen disponible en:
https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico [Página web consultada en mayo de 2015].

Huang, C., B. Wylie, L. Yang, C. Homer, and G. Zylstra, 2002: Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 1741-1748.

INEGI, 2008: Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México, Dirección de Capacitación, Disponible en: http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/INTERNET/1-GEOGRAFIADEMEXICO/MANUAL_CARAC_EDA_FIS_VS_ENERO_29_2008.pdf. [Página web consultada en marzo de 2015].

INEGI, 2014: Datos vectoriales y ráster disponibles en <http://www.inegi.org.mx/default.aspx>, [Página web consultada en mayo de 2014].

Keller E; Blodgett R, 2008: Natural Hazards: Earth's Processes as Hazards, Disasters, and Catastrophes, Pearson.

Lugo-Hubp. 1990, J. El relieve de la República Mexicana, Revista Inst. Geología UNAM, 9, 1, 82-111.

Olaya, Víctor, 2011: Sistemas de Información Geográfica, Libro disponible en línea.

Pacheco, Teresa; Ortiz, A. Pedro; Medina, Leopoldo; Sánchez, Manuel; Salazar, Carlos, 1992: Recursos y desarrollo de Chiapas hasta 1990, Talleres Gráficos del Estado, Tuxtla Gutiérrez.

Pokorný, J.; Rejsková, A., 2008: Water Cycle Management. In Jorgensen (eds), Applications in Ecological Engineering, Elsevier, 332-340, Amsterdam.

Rubio-Gutiérrez, H., Triana-Ramírez, C., 2006: Gestión integrada de crecientes caso de estudio México: río Grijalva (en línea): Ginebra, Suiza, Organización Meteorológica Mundial, publicado septiembre de 2006, disponible en <www.apfm.info/pdf/case_studies/cs_mexico.pdf>, [Página web consultada en Junio de 2015].

Singh, V. P., 1995: Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications, Colorado USA.

Tarback, E. J.; Lutgens, F. K., y Tasa, D., 2013: Ciencias de la Tierra, Pearson, Madrid, 445-478.

Thouret J., 2010. Volcanic hazards and risks: a geomorphological perspective. In I. Alcantara-Ayala, A. Goudie (eds.), Geomorphological hazards and disaster prevention, Cambridge University Press, 13-32.

Vásquez Sánchez, 2008: Zonas afectadas por el Huracán Stan en las regiones Istmo-Costa, Sierra y Soconusco (investigación para su ordenamiento), El Colegio de la Frontera Sur, San Cristóbal de Las Casas, México.

Imagen disponible en: <https://curiosoando.com/que-es-una-onda-electromagnetica> [Página web consultada en mayo de 2015].