



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estimación de zonas con peligro de avenidas
súbitas mediante el uso del índice de inundación
súbita utilizando sistemas de información
geográfica.**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geomático

P R E S E N T A

José Eduardo García Monroy

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Eduardo Reinoso Angulo



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

En memoria de mi madre Lidia García

¡Este logro es más tuyo que mío mamá!

Gracias infinitas.

En memoria de Catalina Monroy

¿Quién como yo? Con dos madres que me dieron todo su amor.

Esto también es para usted mamá.

En memoria de José García

Tancítaro, por siempre en mi memoria.

Agradecimientos

A mi madre Lidia García que, con su esfuerzo, amor y dedicación supo sacarme adelante, dándome las herramientas para afrontar la vida, seguir con mis estudios y alcanzar este momento. A ella quien no partió de este mundo hasta no verme crecer y dejar en mí con sus valores y educación el hombre que ahora soy, del cual espero se sienta orgullosa en donde quiera que esté ¡te amo mamá! gracias por todo.

A mi madre Catalina Monroy que, con su amor y cariño siempre cuidó de mí como si fuera su hijo, y quien estuvo con mi madre y conmigo cuidándonos y apoyándonos en todo momento, confiando siempre en que haríamos lo correcto, este logro también es de usted mamá, gracias.

A mis tíos Gabriel y Juanchis, quienes siempre me vieron como su hermanito menor gracias por todo su cuidado y cariño que me dieron desde chico; así como, a mis tíos mayores Gloria, Raúl, Gustavo y José quienes siempre estuvieron al pendiente de nosotros. A Claudia y Arturo que con su ejemplo, esfuerzo y apoyo pude sacar adelante mi carrera universitaria, gracias totales.

A los amigos “cchros” (Gabi, Gustavo, Moga y Alexis) y a los amigos universitarios (Hugo, Migue, Quique, Rogel, Amandita, Pavel, Arantxa, Eli y Ray), por los momentos compartidos a lo largo de la carrera, gracias.

Al Dr. Marco Antonio Torres por su paciencia, tiempo y asesoría en la realización de este trabajo, al Dr. Eduardo Reinoso por darme la oportunidad de realizar mi servicio social y mi trabajo de tesis en el Instituto de Ingeniería, al profesor Fernando Jaime Enríquez por la oportunidad de laborar con él y adquirir experiencia en distintos proyectos en el área de topografía y a mis sinodales que me dieron la oportunidad de presentar este trabajo de tesis, Maestra Tai, gracias por el seguimiento final, profesor Juan Manuel y profesor Roberto de la Cruz se los agradezco.

Por último, quiero agradecer a mi amada Universidad por abrirme las puertas de sus aulas, acogerme y brindarme su educación para forjarme como profesionista y enfrentar no solo los problemas del mundo laboral, sino también los problemas que tenemos como sociedad con la finalidad de lograr un México mejor, gracias UNAM.

Uno nunca sabe

¡Qué vida la mía!, ayer lloré, hoy reí, ¿mañana qué?

Me han dicho que por allí anda la felicidad rodando, ¿será que ya me toca?

Voy a ponerme mi mejor traje. Uno nunca sabe, uno nunca sabe...

-Irwin Valera

Resumen

Una inundación súbita es aquella causada por fuertes lluvias en un corto periodo de tiempo asociadas a diversos fenómenos meteorológicos como son las tormentas severas, huracanes, ciclones tropicales etc., siendo uno de los desastres naturales más comunes en todo el mundo. Estimar las posibles zonas potenciales de inundación debido a este tipo de fenómenos, es parte del objetivo de este trabajo, para ello es indispensable contar con datos de lluvia registrados a largo plazo y estudiar sus características desde la perspectiva de la esorrentía, esto con la finalidad de estimar un posible índice de peligro de inundación súbita. Cuantificar dicho índice conlleva obtener tres parámetros importantes dentro de un hidrograma de esorrentía tales como: el aumento de la rama ascendente (K), la magnitud de inundación (M) y un nuevo parámetro desarrollado que trata del aumento de la esorrentía al tiempo pico (R), y que en conjunto determinan una serie de índices llamados Factores de Gravedad Relativa que sirven para calcular el índice final de inundación que se puede ver reflejado en un análisis espacial de algunas regiones hidrológicas de la República Mexicana que se han analizado en el presente trabajo. Para obtener el escurrimiento generado por la precipitación efectiva (precipitación que genera esorrentía superficial) este trabajo contempla un método de acumulación que permite la dirección múltiple de flujo en base a las celdas de una mayor pendiente descendiente de un modelo digital de elevación con sistemas de información geográfica.

Índice

Resumen	1
Índice de figuras	4
Índice de tablas.....	6
Introducción	7
Capítulo 1. Aspectos Generales	10
1.1. El Ciclo hidrológico	10
1.2. Precipitación	11
1.3. Escurrimiento.....	11
1.3.1. Tipos de escurrimiento	11
1.4. Inundaciones	12
1.4.1. Clasificación de las inundaciones de acuerdo con su origen.....	12
1.4.2. Clasificación de las inundaciones por el tiempo de respuesta de una región hidrológica	14
1.5. Índices de inundación súbita.....	16
1.5.1. Índice potencial de inundación, FFPI (<i>Flash Flood Potential Index</i>).....	16
1.5.2. Índice de inundación súbita, FFI (<i>Flash Flood Index</i>).....	17
1.5.3. Índice modificado de inundación súbita, MFFI (<i>Modified Flash Flood Index</i>).....	18
1.5.4. Nuevo índice de inundación súbita	18
1.6. Sistemas de información geográfica	19
1.6.1. Análisis espacial.....	20
1.6.2. Datos vectoriales y datos ráster	20
1.7. Justificación.....	22
1.8. Objetivo	22

Capítulo 2. Antecedentes	23
2.1. Hidrogramas de escorrentía	23
2.1.1. Hidrogramas unitarios sintéticos.....	24
2.2. Índice de inundación súbita FFI (<i>Flash Flood Index</i>).....	29
2.2.1. Ecuaciones para obtener los factores del índice de inundación súbita.....	29
2.2.2. Factores de gravedad relativa	32
2.2.3. Cálculo del índice de inundación súbita.....	33
2.2.4. Nuevo índice de inundación súbita	33
Capítulo 3. Metodología.....	35
3.1. Datos	37
3.1.1. Modelo digital de elevación.....	37
3.1.2. Número de curva.....	40
3.1.3. Datos meteorológicos.....	42
3.2. Obtención de los parámetros hidrológicos	43
3.2.1. Cálculo de la precipitación efectiva	43
3.2.2. Cálculo del volumen de escurrimiento.....	45
3.2.3. Cálculo del tiempo de concentración	48
Capítulo 4. Caso de Aplicación.....	49
4.1. Regiones hidrológicas	50
4.2. Zona de estudio.....	51
4.2.1. Región hidrológica número 9, Sonora sur.....	53
4.2.2. Región hidrológica número 24, Bravo-Conchos	56
4.2.3. Región hidrológica número 25, San Fernando-Soto la Marina	56
4.2.4. Antecedentes de la región 24 y 25, Huracán “Alex”	57
4.3. Aplicación de la metodología propuesta	58
4.3.1. Obtención de la precipitación efectiva	60
4.3.2. Obtención del volumen de escurrimiento.....	62
4.3.3. Obtención del tiempo de concentración	64
4.3.4. Obtención del tiempo pico (<i>tp</i>), volumen mínimo de escurrimiento y gasto pico....	67

4.3.5. Cálculo de los parámetros K, M y R	69
4.3.6. Cálculo de los factores de gravedad relativa FK, FM Y FR	70
4.3.7. Cálculo del índice de inundación súbita.....	71
4.4. Obtención de tasas de excedencia.....	75
4.5. Validación de resultados	78
Capítulo 5. Conclusiones	91
Anexos	93
REFERENCIAS	100

Índice de figuras

Figura 1. Número de eventos en los que la Cruz Roja Internacional ha participado entre los años 1919 a 2004.....	7
Figura 2. El ciclo Hidrológico	10
Figura 3. Componentes de un SIG.	19
Figura 4. Elementos de un formato vectorial: punto, línea y polígono.	20
Figura 5. Estructura genérica de una malla	21
Figura 6. Distribución de los valores de un ráster.....	21
Figura 7. Estructura de un hidrograma de escorrentía.....	23
Figura 8. Hidrograma Unitario Sintético Triangular.....	25
Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología empleada.....	36
Figura 10. Modelo digital de elevación con vista en perspectiva del estado de Chiapas.....	37
Figura 11. Diagrama de flujo que muestra el funcionamiento de la herramienta “fill”.	38
Figura 12. Región Hidrológica Sonora Sur, sin cuerpos de agua	39
Figura 13. Numero de Curva para la República Mexicana	41
Figura 14. Husos horarios con respecto al tiempo universal	43
Figura 15. Distribución del flujo acumulado utilizando los 4 algoritmos en un modelo digital de elevación.....	47
Figura 16. Tiempos de concentración siguiendo el algoritmo MD ∞	48
Figura 17. Regiones hidrológicas de la República Mexicana.....	50
Figura 18. Municipios con un mayor número de eventos por avenidas súbitas de 1970 al 2013 ...	51
Figura 19. Región hidrológica número 9 Sonora Sur, número 24 Bravo Conchos y numero 25 San Fernando-Soto la Marina, en conjunto con los Municipios afectados por avenidas torrenciales de 1970 al 2013.	53
Figura 20. El paso del Huracán Alex por el Río Santa Catarina bajo el puente del Papa	57

Figura 21. Región hidrológica número 9 y región hidrológica 25, sin cuerpos de agua y corregidas.	58
Figura 22. Subregiones Hidrológicas Río Medio Bravo, Río Álamo y Río San Juan sin cuerpos de agua y corregidas.....	59
Figura 23. Número de Curva para las regiones hidrológicas: 9, 25 y para las 3 subregiones hidrológicas de la región 24.....	60
Figura 24. Precipitación total y efectiva para las regiones hidrológicas: 9, 25 y las 3 subregiones hidrológicas de la región 24.....	61
Figura 25. Volumen de escurrimiento de la subregión Río Álamo.....	63
Figura 26. Tiempo de concentración por celda en la región 9.....	64
Figura 27. Tiempo de concentración por celda en la región 25 y subregiones de la región 24.....	65
Figura 28. Tiempo de concentración acumulado conforme a la trayectoria más larga en la región 9, región 25 y subregiones de la región 24.	66
Figura 29. Gasto pico en la subregión Río San Juan el día 2 de Julio del 2010.	68
Figura 30. Parámetros K, M y R de mayor magnitud en la subregión Río Medio Bravo.....	69
Figura 31. Factores de gravedad relativa del día 13 de Julio del 2004 en la región 9.	70
Figura 32. Índice flash flood del día 9 de Septiembre del 2002.	71
Figura 33. Resultado del FFI en fechas registradas por DESINVENTAR.	72
Figura 34. Índices obtenidos en la fecha del 2 de Julio del 2010 para las 3 subregiones de la región 24, Río Medio Bravo, Río Álamo y Río San Juan.	73
Figura 35. Índices obtenidos en la región 25 para el día 1 de Julio del 2010.	74
Figura 36. Municipios con una mayor tasa de excedencia en la región número 9.	75
Figura 37. Municipios con una mayor tasa de excedencia en la región número 25.	76
Figura 38. Zonas donde se obtuvieron tasas por arriba o igual a 0.3 en las tres subregiones.	77
Figura 39. Gráfica de dispersión entre las tasas obtenidas por DESINVENTAR Y TRMM de los municipios en la región número 9.....	79
Figura 40. Gráfico de líneas para los años en los que se registraron eventos en la región 9.....	80
Figura 41. Gráfica de barras para los eventos por municipio y año en la región 9.....	82
Figura 42. Gráfica de dispersión entre las tasas obtenidas por DESINVENTAR Y TRMM de los municipios de la región número 25.....	83
Figura 43. Gráfico de líneas para los años en los que se registraron eventos en la región 25.....	84
Figura 44. Gráfica de barras para los eventos por municipio y año en la región 25.....	85
Figura 45. Gráfica de dispersión entre las tasas obtenidas por DESINVENTAR Y TRMM de los municipios de las tres subregiones de la región 24.....	87
Figura 46. Gráfico de líneas para los años en los que se registraron eventos en las tres subregiones de la región 24.....	88
Figura 47. Gráfica de barras para los eventos por municipio y año en la región 24.....	90

Índice de tablas

Tabla 1. Asignación de factores de gravedad relativa desarrollado por Bhaskar (2000).....	32
Tabla 2. Comparación entre los resultados arrojados por 3 de los distintos índices de 13 eventos seleccionados con precipitación máxima anual durante 1973-2012.....	34
Tabla 3. Municipios con un mayor número de eventos en México por avenidas súbitas registrados por DESINVENTAR.....	52
Tabla 4. Eventos registrados por DESINVENTAR en la región número 9.	55
Tabla 5. Municipios con una mayor tasa de excedencia en la región 9 y posible área de peligro. .	76
Tabla 6. Municipios con una mayor tasa de excedencia en la región 25 y posible área de peligro.	76
Tabla 7. Mayor tasa de excedencia de las 3 subregiones y posible área de peligro.....	77
Tabla 8. Eventos y tasas por municipio en la región 9.	78
Tabla 9. Comparativa de eventos por año en la región 9.	80
Tabla 10. Eventos registrados por municipio y año en la región 9.	81
Tabla 11. Eventos y tasas por municipio en la región 25.	82
Tabla 12. Comparativa de eventos por año en la región 25.....	83
Tabla 13. Eventos registrados por municipio y año en la región 25.	84
Tabla 14. Eventos y tasas por municipio en las tres subregiones	85
Tabla 15. Comparativa de eventos por año en las tres subregiones.	87
Tabla 16. Eventos registrados por municipio y año en las tres subregiones.	88

Introducción

Las inundaciones son fenómenos que se presentan año con año en muchas partes del mundo. La Cruz Roja Internacional señala que durante el periodo de 1919 al 2004 han colaborado con ayuda en más eventos de inundaciones que de cualquier otro tipo de evento (Figura 1).

En la dinámica geomorfológica las inundaciones son un factor muy importante, sin embargo, cuando este tipo de fenómenos ocupan áreas donde existen asentamientos humanos o espacios dedicados para distintas actividades como la agricultura y la ganadería, son causa de daños, pérdidas de infraestructura e incluso vidas humanas Tarbuck et al. (2013).

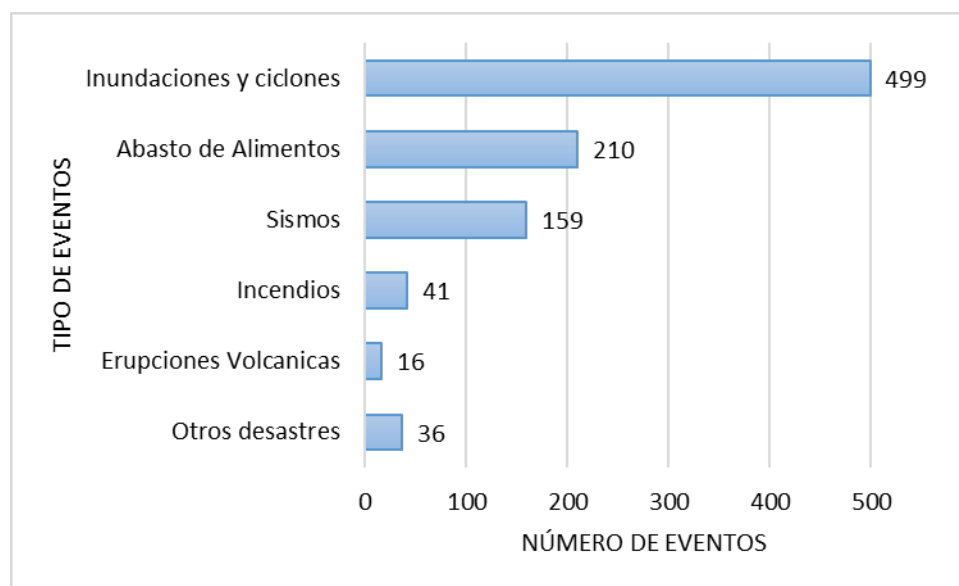


Figura 1. Número de eventos en los que la Cruz Roja Internacional ha participado entre los años 1919 a 2004, (Fuente: International Federation of Red Crescent Societies).

Los efectos negativos de estas mismas se deben en gran medida por la misma actividad humana como: la urbanización, la deforestación, la erosión y la ubicación de viviendas en zonas aledañas a cuerpos de agua, entre otras. Regularmente vienen acompañadas de material sólido proveniente de las partes altas de una montaña, cuya cantidad depende de la intensidad de sus escurrimientos y de las características de la cubierta vegetal, tipo y uso de suelo, así como de la pendiente las cuales definen las áreas de depósito del material de arrastre.

Hoy en día la prevención de fenómenos hidrometeorológicos es muy importante, ya que muchos de ellos pueden ser impredecibles e inevitables, surge la necesidad de llevar a cabo diversas medidas de mitigación, tanto estructurales como no estructurales, que provoquen una disminución de los efectos de desastres provocados por ciclones tropicales o lluvias intensas. Modernas tecnologías y esquemas de coordinación y comunicación permiten ahora monitorear y detectar muchos de estos fenómenos para prevenir anticipadamente sus efectos, facilitando la toma de decisiones y la implementación de medidas para disminuir sus efectos.

Dentro de las medidas no estructurales destaca la elaboración de mapas de riesgo como una herramienta útil para autoridades de protección civil, de desarrollo urbano y ordenamiento territorial, en la delimitación de áreas de peligro para la población (CENAPRED, 2006).

Es importante definir Riesgo y 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 provocado por un fenómeno natural o actividad humana y el Riesgo es el producto del peligro que ante un evento puede expresarse matemáticamente en un área específica y con un periodo de tiempo de referencia (Thouret , 2010).

Para la elaboración de mapas de riesgo hidrometeorológico, específicamente de inundaciones, y avenidas súbitas, es necesario contar con metodologías para cada uno de estos fenómenos, que permitan, de manera clara y relativamente sencilla, su obtención a través de una combinación de mapas de peligro. Los análisis de riesgo por inundación, hoy en día generalmente se basan en métodos indirectos como la modelación fisicomatemática. En dicho contexto, la aplicación de modelos habitualmente tiene como objetivo documentar la magnitud y probabilidad de daños por inundación, a partir de simulaciones basadas en registros históricos de lluvia (Uribe et al. 2010).

Las consideraciones anteriores se abordan en este trabajo de tesis compuesto por una estructura de 5 capítulos. El primer capítulo; *Aspectos generales*, nos presenta una breve descripción del ciclo hidrológico del agua, la precipitación, la escorrentía, las inundaciones y los posibles métodos para detectar avenidas súbitas, así como también una breve descripción de lo que son los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el objetivo de este trabajo, en el segundo capítulo; *Antecedentes*, se exponen todas aquellas ecuaciones necesarias para el cálculo de un hidrograma unitario triangular de escorrentía y el índice de inundación súbita. En el capítulo 3; *Metodología*, se abordan los métodos y los datos empleados para llevar a cabo el cálculo del índice de inundación súbita mediante un análisis espacial. En el cuarto capítulo se presenta el caso de aplicación mediante la metodología antes descrita, así como los resultados y la validación de estos para que finalmente en el último capítulo de este trabajo se expongan las conclusiones.

Capítulo 1. Aspectos Generales

1.1. El Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es el proceso mediante el cual el agua se mantiene en constante circulación, en donde se relacionan cuatro de los conceptos más importantes de las ciencias de la tierra: hidrósfera, atmósfera, superficie terrestre y biosfera (Tarbuck et al. 2013). Su fundamento es que toda gota de agua recorre un circuito cerrado en cualquiera de sus tres estados: líquido, gas o sólido. Partiendo de una nube como elemento de origen, de la cual se tiene distintas formas de precipitación (Menderey, 2005).

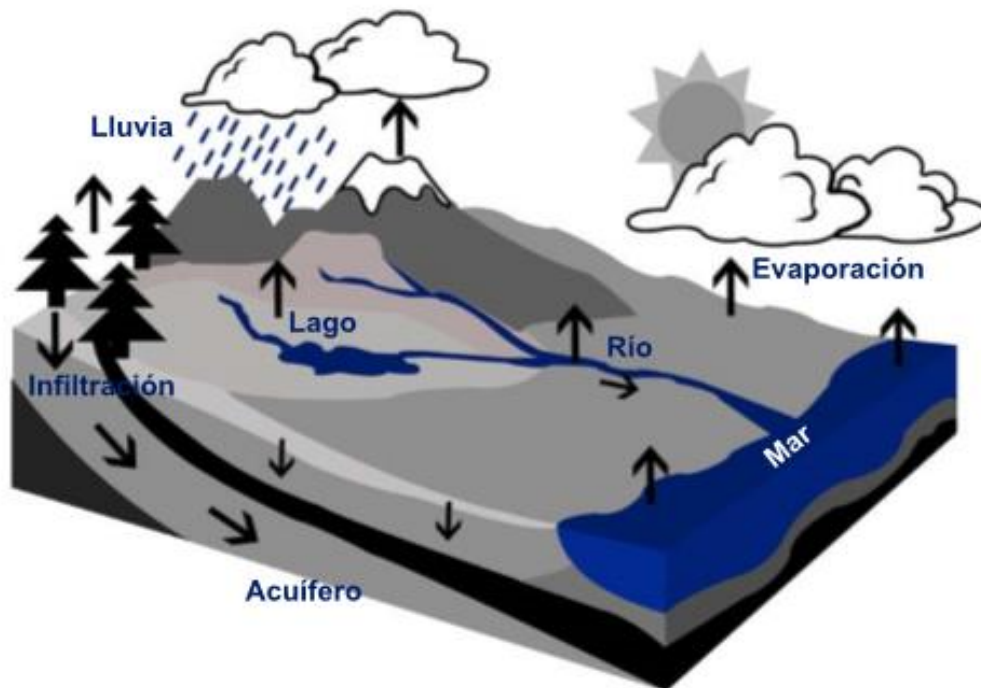


Figura 2. El ciclo Hidrológico (Sistema Nacional de Protección Civil, CENAPRED, Inundaciones)

1.2. Precipitación

La precipitación es el producto de la condensación de agua en la atmósfera que al estar acumulada permite la formación de nubes y al saturarse llega a caer en cualquier momento en forma de lluvia, llovizna, nieve, aguanieve o granizo hacia la superficie terrestre (Pérez, 2017).

La precipitación se divide en tres categorías (Pérez, 2017):

- Precipitación líquida
- Precipitación glacial: llovizna congelada y lluvia congelada (aguanieve).
- Precipitación congelada: nieve, bolitas de nieve, granos de nieve, bolitas de hielo (aguanieve), granizo, bolitas o copos de nieve y cristales de hielo.

1.3. Escurrimiento

El escurrimiento es la parte de la precipitación que llega a alimentar a las corrientes superficiales, continuas o intermitentes de una cuenca o una región hidrológica y que puede circular por debajo o sobre la superficie terrestre para llegar a una corriente y ser drenada hasta la salida de una cuenca o bien alimentar un lago (Breña y Jacobo, 2016).

1.3.1. Tipos de escurrimiento

- Escurrimiento superficial o directa.

Corresponde a la precipitación que no se infiltra en ningún momento y llega a la red de drenaje moviéndose sobre la superficie del terreno por la acción de la gravedad. Además, la precipitación no queda tampoco detenida en las depresiones del suelo, y escapa a los fenómenos de evapotranspiración. El escurrimiento superficial es el más rápido de todos.

- Ecurrimiento hipodérmico o subsuperficial.

Es aquel que, habiéndose infiltrado en el suelo, se mueve subhorizontalmente para reaparecer súbitamente al aire libre como manantial e incorporarse a microsurcos superficiales que lo conducirán a la red de drenaje.

- Ecurrimiento subterráneo.

Corresponde a la precipitación que se infiltra hasta el nivel freático, desde donde circula hasta alcanzar la red de drenaje. El ecurrimiento subterráneo es el más lento de todos.

1.4. Inundaciones

Conforme al glosario internacional de hidrología (OMM/UNESCO, 2012), la definición oficial de una inundación es: “Desbordamiento del agua fuera de los confines normales de un río o cualquier masa de agua”. En este caso, “confín normal” debe entenderse como aquella elevación de la superficie del agua que no causa daños. Salas y Jiménez (2004), definen una inundación como: “Aquel evento que, debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica, provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o penetración de agua en sitios donde regularmente no la hay y, generalmente, daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura”.

Las clasificaciones más comunes a inundaciones pueden ser por su origen, o bien por tiempo que tardan en presentarse sus efectos. Salas y Jiménez (2004) las clasifican de la siguiente manera:

1.4.1. Clasificación de las inundaciones de acuerdo con su origen

- Inundaciones pluviales.

Sucedan cuando el agua de lluvia satura la capacidad del terreno para drenarla, acumulándose por horas e incluso días sobre éste. Su principal característica, es que el agua acumulada es precipitada sobre esta zona y no la que viene de alguna otra parte (por ejemplo, de la parte alta de la cuenca).

- Inundaciones fluviales.

Estas se presentan cuando el agua de los ríos se desborda sobre la superficie de los terrenos aledaños.

La principal diferencia con las inundaciones pluviales es que en este tipo de inundaciones el agua que se desborda sobre los terrenos aledaños corresponde a precipitaciones registradas en cualquier parte de la cuenca y no necesariamente a lluvia sobre la zona afectada.

Es importante observar que el volumen que escurre sobre el terreno a través de los cauces se va incrementando con el área de aportación de la cuenca, por lo que las inundaciones fluviales más importantes se darán en los ríos con más longitud o que lleguen hasta las planicies costeras.

- Inundaciones costeras.

La disminución de la presión atmosférica y los fuertes vientos generados por los ciclones tropicales sobre la superficie del mar, el nivel medio asciende y debido a la marea alta permite que este penetre tierra adentro, en las zonas costeras, generando el cubrimiento de grandes extensiones de terreno.

Jiménez et al. (2003), menciona en el fascículo de ciclones tropicales que el oleaje en el océano puede ser provocado por diferentes factores; sin embargo, su causa más común es el viento y que la suma de los efectos de ambos fenómenos, puede causar importantes estragos.

- Inundaciones por falla de infraestructura hidráulica.

Puede generar una inundación aún más grave que las antes mencionadas: si la capacidad de las obras destinadas para protección es insuficiente, la inundación provocada por la falla de dicha infraestructura será mayor que si no existiera obras.

Las obras hidráulicas deben de estar diseñadas para operar ante niveles ordinarios y extraordinarios del agua que contienen. Sin embargo, algunas veces es necesario desfogar o abrir en forma controlada algunas compuertas para evitar un riesgo mayor.

1.4.2. Clasificación de las inundaciones por el tiempo de respuesta de una región hidrológica

Los tiempos de respuesta de los escurrimientos en cada una de las cuencas o regiones hidrológicas y sus pendientes definen si las inundaciones son de carácter súbito o de carácter lento. Lo anterior significa que en regiones cuya respuesta hidrológica sea lenta se generen inundaciones en un tiempo relativamente largo (del orden de varias horas o días); en las cuales ocurren principalmente daños materiales. Mientras que cuando una inundación se genere en poco tiempo (desde unos cuantos minutos, hasta un par de horas) se llama inundación súbita, causando, principalmente, la pérdida de vidas humanas en zonas pobladas (Salas y Jiménez, 2004).

- Inundaciones lentas.

Cuando ocurre una precipitación capaz de saturar el terreno, es decir, cuando no hay más capacidad para que el agua sea absorbida por el suelo, conforme avanza, proporcionalmente se incrementa con el área drenada, si el volumen que fluye por el cauce excede la capacidad de éste, se presentan desbordamientos sobre sus márgenes y el agua desalojada puede permanecer horas incluso días sobre el terreno inundado. En las zonas urbanas donde el agua de lluvia no tiene manera de infiltrarse por el tipo de suelo, que por lo regular es concreto, su única opción es el sistema de alcantarillado, al saturarse este mismo, el agua tiende a incrementar su volumen, quedando estancada, por lo menos hasta que el sistema de alcantarillado se desahogue.

Este tipo de inundaciones se presentan normalmente donde la pendiente del cauce es pequeña o el sistema de alcantarillado, es deficiente, provocando desbordamientos en las partes aledañas.

La presencia de los sistemas meteorológicos puede generar que este tipo de inundaciones sean pronosticadas a tiempo, por lo que no deberían ocasionar daños importantes, sin embargo, la realidad es otra, ya que la falta de instrumentos para monitorear este tipo de lluvias en muchos casos no permite anticipar la ocurrencia y como consecuencia al llegar la crecida las personas la perciban como una inundación súbita.

- Inundaciones súbitas.

Las inundaciones súbitas o avenidas súbitas son el resultado de lluvias repentinas e intensas, las cuales pueden ocasionar que pequeñas corrientes se transformen, en cuestión de minutos, en violentos torrentes capaces de causar grandes daños. Este tipo de inundaciones, se presentan frecuentemente en cuencas ubicadas en zonas con montaña de fuerte pendiente, donde existen pequeños valles, barrancas, abanicos aluviales al pie de estas y suelos arcillosos que dificultan la infiltración de agua. De igual manera se pueden presentar debido al rompimiento de un bordo, presa o represa, e incluso en ciudades cuyo piso o suelo presenta un alto coeficiente de escurrimiento. Así donde antes una tormenta humedecía la tierra y regaba la hierba y los árboles, ahora bastan unos cuantos minutos para generar una violenta avenida de agua.

Salas y Jiménez (2004), consideran que una manera de caracterizar una inundación súbita es por el llamado “Tiempo de concentración de una cuenca”, el cual si es menor a 2 horas es posible que se presente una avenida súbita. Sin embargo, es evidente que esta clasificación obedece también al tiempo de respuesta de las instituciones de protección civil, ya que, por ejemplo, si ante la ocurrencia de una inundación el tiempo requerido es de 5 horas, entonces para este caso en particular las avenidas que se presenten en menos de 5 horas serán consideradas como súbitas. Su característica y peligrosidad se basan en que ocurren de manera imprevista, lo que dificulta alertar con cierto tiempo de antelación.

De acuerdo con la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, NOAA por sus siglas en inglés (National Oceanic and Atmospheric Administration) se necesitan tan solo 60 cm de agua para barrer un vehículo aguas abajo y una velocidad de 2.7 m/s para arrastrar piedras de hasta 45 kg (Melina y Rowan, 2010). Cuando el régimen del río es normal la velocidad suele ser inferior a 1 m/s en casos de pendiente suave, en ríos de mucho caudal y de pendiente acentuada la velocidad llega a ser de 4 m/s y en casos de crecida excepcionales pueden alcanzar velocidades entre 5 y 10 m/s.

1.5. Índices de inundación súbita

La mejor manera de entender el comportamiento de este tipo de fenómenos es a través de la observación, el análisis, el monitoreo y la comparación con eventos anteriores de la misma naturaleza (Benito y Houdson, 2010). Hoy en día existen diferentes tipos de herramientas para detectarlos con anticipación y así plantear acciones que ayuden a mitigar las pérdidas económicas y humanas.

Los índices de inundación súbita son una manera de estimar zonas potenciales a inundaciones súbitas, los cuales consisten en una serie de cálculos, basados en información fisiográfica, geológica e hidrológica de una región o cuenca hidrológica. Existen diferentes tipos de índices, algunos de ellos desarrollados específicamente con las características fisiográficas y geológicas de la zona en estudio y otros de ellos contemplando no solo las características fisiográficas y geológicas, sino que también contemplan información hidrológica, obtenida por una serie anual de precipitaciones máximas.

1.5.1. Índice potencial de inundación, FFPI (*Flash Flood Potential Index*)

El FFPI por su acrónimo en inglés, es un índice desarrollado por Greg Smith en colaboración con otros (Zogg y Deitsch, 2013), el cual pretende describir cualitativamente el riesgo de una región hidrológica a inundaciones súbitas con base a sus propias características estáticas:

- Pendiente.
- Cobertura/Usos de suelo.
- Tipo/Textura del suelo.

Una de las ventajas del FFPI es que los parámetros con los que se genera pueden ser modificados dependiendo de las características fisiográficas propias de cualquier región que se desee analizar.

El FFPI es un índice relativo, su valor varía del 1 al 10 y es el resultado de un modelo compuesto por capas que representan a los datos asociados a los atributos de la respuesta hidrológica de la cuenca o de la región.

Al ingresar zonas de peligro a avenidas súbitas, el FFPI permite reconocer al usuario que zonas podrían ser las más afectadas por estos fenómenos, sin embargo estimar zonas propensas a avenidas súbitas con este índice no es del todo conveniente, debido a que no toma en cuenta datos hidrometeorológicos históricos, ya que si bien la región puede tener las características fisiográficas para que haya una avenida súbita, bien no puede tener las características hidrometeorológicas para que haya una, por lo cual nos podría arrojar zonas de peligro erróneas a inundaciones súbitas.

1.5.2. Índice de inundación súbita, FFI (*Flash Flood Index*)

Desarrollado por Bhaskar, French y Kyaimah (2000), el FFI a diferencia del FFPI, se basa en la información proporcionada por hidrogramas de escurrimiento simulados para una serie anual de precipitaciones máximas para con ello cuantificar el posible peligro en una región a una avenida súbita.

Depende del cálculo de tres parámetros, los cuales generan un índice propio que al promediarse en conjunto obtienen un solo valor FFI:

- Aumento de la rama ascendente, K.
- Magnitud de inundación, M.
- Tiempo de respuesta de inundación, T.

Sin embargo, a pesar de utilizar datos históricos de precipitación, las estimaciones que se han hecho con este índice no han coincidido con la distribución real de los daños. Muchas veces ha generado predicción de daños a niveles muy altos como si se tratara de una posible avenida súbita cuando en realidad se trata de inundaciones tradicionales, por lo que distinguir unas inundaciones de otras no es del todo certero (Kim y Choi, 2013).

1.5.3. Índice modificado de inundación súbita, MFFI (*Modified Flash Flood Index*)

Además de considerar los datos históricos de precipitación para calcular los parámetros K y M, el MFFI toma en cuenta la intensidad de lluvia presente en la zona de estudio (B-S Kim y H-S Kim, 2013), el tiempo de respuesta está contemplado dentro de las características del aumento de la rama ascendente, por lo que el índice de T, pasa a formar parte del índice de K, y la intensidad de lluvia está considerada como un nuevo parámetro, tomando en cuenta la concentración máxima de la precipitación en 1 hora formando en conjunto con K y M, el Índice Modificado de Inundación Súbita.

La ventaja que tiene este índice es que permite distinguir las zonas potenciales a avenidas súbitas de las zonas habituales a inundaciones tradicionales debido a que toma en cuenta la intensidad de lluvia, pero obtener los datos hidrológicos de muchos años en una región cuyo aforo sea regular es difícil y es complejo calcular este tipo de índice.

1.5.4. Nuevo índice de inundación súbita

Desarrollado por Kim y Choi (2011, 2015), y basado en el índice elaborado por Bhaskar et al. (2000), este índice representa una modificación a las distintas ecuaciones utilizadas por Bhaskar, además de considerar un nuevo parámetro:

- Aumento de la escorrentía media al tiempo pico o descarga pico, R.

Al igual que el MFFI, el tiempo de respuesta en este índice es considerado dentro de las características del parámetro K, por lo que el índice es calculado solo con los parámetros K y M, además del nuevo parámetro R.

Otra diferencia es que este índice no se calcula con el promedio de los parámetros, si no con el producto de estos mismos elevados a una determinada potencia que representa el peso dado a cada parámetro dando así cierta ventaja sobre el promedio de los 3 factores anteriormente con el mismo peso.

1.6. Sistemas de información geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica (también conocidos con los acrónimos SIG en español o GIS en inglés), son un conjunto de herramientas diseñadas para obtener, almacenar, recuperar, analizar y desplegar datos espaciales del mundo real (INEGI, 2014).

Los SIG en el contexto general, pueden dividirse en los siguientes componentes: recursos humanos, datos, equipos, programas y procedimientos, que interactúan bajo una administración central y de relaciones bien definidas de acuerdo con los objetivos propuestos.

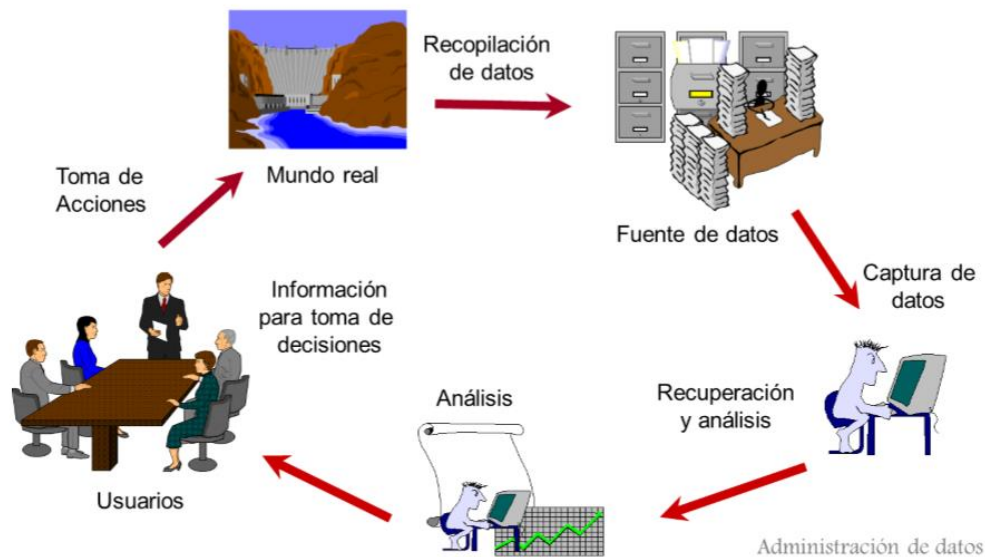


Figura 3. Componentes de un SIG (Sistemas de Información Geográfica, INEGI).

Actualmente existen un gran número de programas en el mercado basados en Sistemas de Información Geográfica, que ofrecen una gran gama de herramientas, las cuales constituyen una solución altamente aceptable para realizar un análisis de algún estudio en específico y facilitar la toma de decisiones al gestor. Algunos creados por la comunidad de usuarios y distribuidos bajo una licencia GNU (código abierto) y otros de carácter comercial, distribuidos con licencia de pago.

1.6.1. Análisis espacial

Con los SIG recogemos información del mundo que nos rodea, todo fenómeno que se requiera estudiar es recogido y cartografiado e integrado en el sistema, describiendo su localización y sus características. Una manera de entender mejor este tipo de fenómenos es mediante un análisis espacial, el cual nos ayuda a separar por partes el objeto en estudio hasta llegar a sus componentes principales para entenderlo y estudiarlo de una mejor manera.

El análisis espacial es la conjugación de técnicas que buscan separar, procesar, clasificar y presentar con criterios cartográficos el estudio cuantitativo y cualitativo de aquellos fenómenos que se manifiestan en el espacio y que son objeto de nuestro estudio.

1.6.2. Datos vectoriales y datos ráster

Los datos geoespaciales que alimentan a un SIG pueden ser en formato vectorial o ráster. Los datos vectoriales registran características con localizaciones y formas bien definidas, por medio de entidades geométricas simples como: puntos, líneas y polígonos, las cuales tienen dimensión y propiedad.

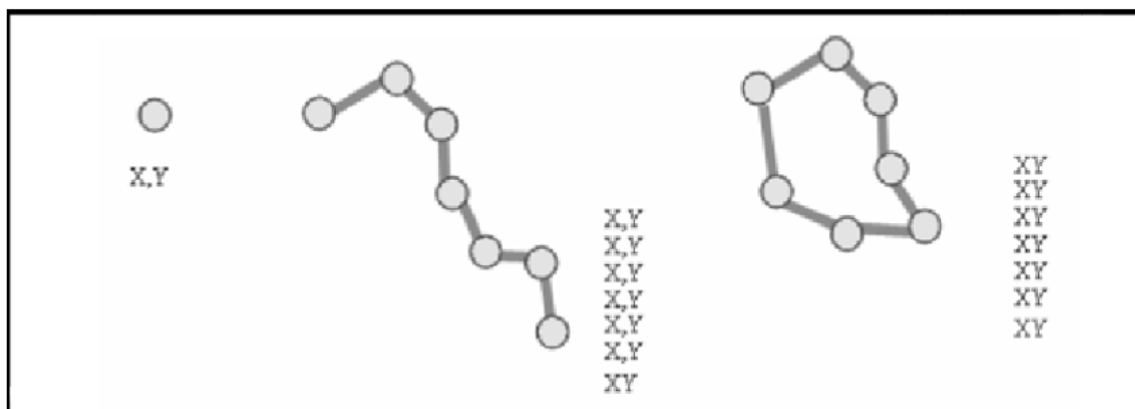


Figura 4. Elementos de un formato vectorial: punto, línea y polígono. (SHAHAB, 2008).

Los datos ráster representan una superficie continua en forma de malla, la cual se divide en filas, columnas y celdas o también llamados píxeles.

Este formato puede utilizarse para conocer características puntuales de ciertos lugares, lo que permite tener diferentes valores para cada punto y modelar rasgos o fenómenos que varían sobre una superficie continua.

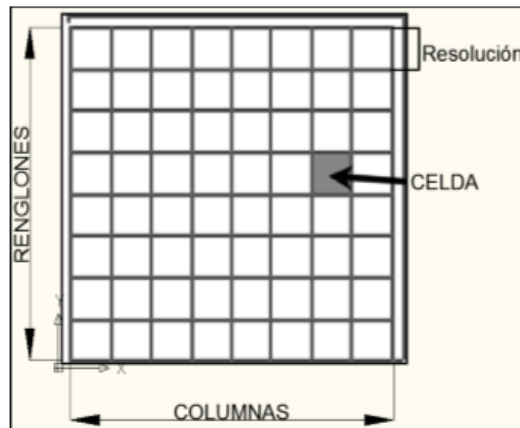


Figura 5. Estructura genérica de una malla. (SHAHAB, 2008).

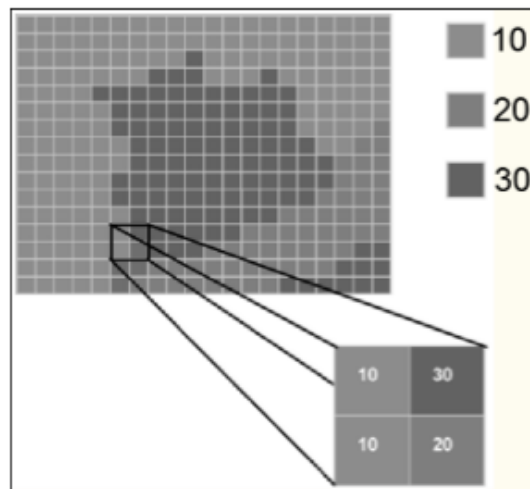


Figura 6. Distribución de los valores de un ráster. (SHAHAB, 2008).

La habilidad de los SIG para manipular y procesar información geoespacial permite su uso en un amplio campo laboral de distintas disciplinas. Y una manera de estimar zonas potenciales a inundaciones súbitas puede ser llevada a cabo mediante SIG.

1.7. Justificación

Las características climáticas y geomorfológicas han proporcionado, en los últimos años, un favorable medio ambiente para peligros de inundación súbita persistente, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), puso de manifiesto que, si bien el número de lluvias ha disminuido, la ocurrencia de eventos con lluvias más intensas ha aumentado (IPCC, 2007). Como consecuencia de ello, las avenidas súbitas se han convertido en un fenómeno muy común y debido a que son repentinas, a diferencia de una inundación lenta, pueden cobrar una mayor cantidad de vidas humanas.

El presente trabajo utiliza entonces el índice de inundación súbita que permita identificar las zonas más propensas a este tipo de inundación, con base en análisis y acordes con la información disponible, ya que, si bien hoy en día no se pueden evitar, se pueden prevenir con el fin de que los daños en un futuro próximo se vean disminuidos.

1.8. Objetivo

Estimar zonas potenciales a avenidas súbitas mediante un análisis espacial del índice de inundación súbita implementado por Kim y Choi (2011, 2015), generado a partir de parámetros fisiográficos e hidrometeorológicos, utilizando sistemas de información geográfica.

Capítulo 2. Antecedentes

2.1. Hidrogramas de escorrentía

Desde el pasado las inundaciones se han caracterizado por el tipo de lluvia por el cual se generan, por lo que se ha hecho un esfuerzo para examinar estas características desde la perspectiva de la escorrentía. Obtener un hidrograma de escurrimiento, correspondiente a una lluvia dada, nos permite conocer el comportamiento de esta misma en una cuenca o región hidrológica, de igual manera nos permite ver la capacidad de respuesta que tiene la cuenca o región con la lluvia y analizar su comportamiento ante una avenida.

En hidrología se denomina hidrograma a la representación gráfica de la variación de un caudal en relación con el tiempo en determinado punto de una cuenca o región hidrológica. En esencia, el hidrograma contiene el comportamiento ante determinado patrón de precipitación sobre ella, reflejando la relación entre las condiciones fisiográficas y la relación lluvia-escorrentía (Sánchez, 2011).

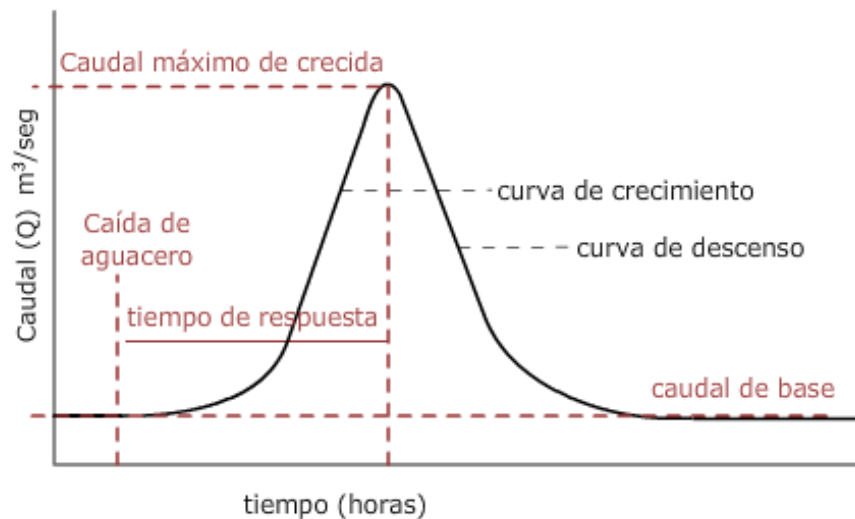


Figura 7. Estructura de un hidrograma de escorrentía. (Sánchez, 2011).

En la figura 7 se observan los componentes principales de un hidrograma y a continuación se muestra la descripción de cada uno de estos.

Curva de crecimiento (Rama Ascendente). Es aquella parte del hidrograma que muestra una fuerte pendiente positiva, uniendo el punto asociado al gasto antecedente con el segmento correspondiente a la cresta o pico del escurrimiento.

Caudal máximo de crecida (Cresta o pico del hidrograma). Es el valor máximo del escurrimiento registrado en el hidrograma.

Curva de descenso (Rama descendente). Se inicia cuando se presenta el gasto pico y puede ser que el descenso sea lento, mostrando pendientes relativamente pequeñas; corresponde a la disminución progresiva del caudal.

Caudal base (Curva de agotamiento). Es la parte del hidrograma en que el caudal procede solamente de la escorrentía básica. Es importante considerar que la curva de agotamiento por lo regular es más alta que el punto de inicio del escurrimiento directo, esto debido a que parte de la precipitación que se infiltró está ahora alimentando el cauce.

Tiempo de respuesta (Tiempo pico). Es el tiempo que transcurre entre la tasa inicial de escurrimiento y la tasa pico de escurrimiento. Su punto de partida es el tiempo base.

Tiempo base. Es el intervalo comprendido entre el comienzo y el fin del escurrimiento directo.

2.1.1. Hidrogramas unitarios sintéticos

La mejor manera para obtener un hidrograma es disponiendo de registros simultáneos de lluvia y escurrimientos, sin embargo, no siempre se cuenta con estos datos, pero se puede estimar un hidrograma unitario sintético para una cuenca o región hidrológica, a partir de las características fisiográficas (Breña y Jacobo, 2006). Los hidrogramas unitarios sintéticos se construyen en base a fórmulas obtenidas empíricamente y el más importante es el hidrograma unitario triangular (HUT), el cual fue desarrollado por Víctor Mockus en 1950 y es utilizado por el SCS (*Soil Conservation Service*), que a pesar de su simplicidad proporciona los parámetros fundamentales de un hidrograma: Caudal punta (Q_p), tiempo base (t_b) y el tiempo en que se produce la punta (t_p).

La expresión del caudal punta Q_p , se obtiene igualando, el volumen de agua escurrido, el cual se obtiene del área bajo la curva del hidrograma.

$$V_e = hp_e * A \dots (1)$$

Donde:

$V_e =$ Volumen de agua escurrido

$hp_e =$ Altura de precipitación efectiva.

$A =$ Área de la cuenca.

Con el área que se encuentra bajo el hidrograma de la figura 8:

$$V_e = \frac{1}{2} t_b * Q_p \dots (2)$$

Donde:

$t_b =$ Tiempo base.

$Q_p =$ Caudal punta.

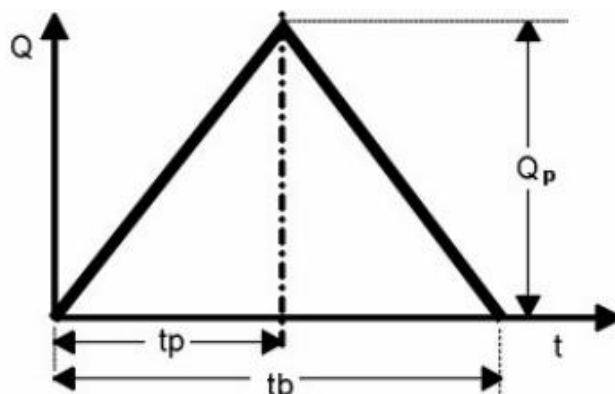


Figura 8. Hidrograma Unitario Sintético Triangular.

Describiendo los componentes de la figura 8 se tiene que:

Caudal o gasto de la región hidrológica (Q). Se define como el volumen de escurrimiento por unidad de tiempo (m^3/s).

Caudal o gasto pico de crecida (Qp). Al igual que el caudal máximo de crecida de la figura 7 es el valor máximo del escurrimiento registrado en el hidrograma y este dado de igual manera por (m^3/s).

Tiempo pico (tp). Es el tiempo que transcurre desde que se inicia el escurrimiento directo hasta el pico del hidrograma.

Tiempo base (tb). Es el intervalo comprendido entre el comienzo y el fin del escurrimiento directo.

De igualar la ecuación (1) con la ecuación (2), se tiene que:

$$hp_e * A = \frac{1}{2} t_b * Q_p$$

$$Q_p = \frac{2hp_e * A}{t_b} \dots (3)$$

Haciendo la transformación de unidades en (3), si:

$$A \text{ esta en } km^2 \quad hp_e \text{ en } mm \quad t_b \text{ en } hr \quad Q_p \text{ en } \frac{m^3}{s}$$

Se tiene:

$$Q_p = \frac{2hp_e * A}{t_b} * \frac{mm * km^2}{hr} * \frac{1hr}{3600s} * \frac{1m}{10^3mm} * \frac{10^6 * m^2}{1km^2}$$
$$Q_p = 0.5555 * \frac{hp_e * A}{t_b} \frac{m^3}{s} \dots (4)$$

De donde:

$Q_p =$ Caudal punta en m^3/s

$hp_e =$ Altura de precipitación efectiva en mm.

$A =$ Área de la cuenca en km^2

$t_b =$ Tiempo base en hr.

Del análisis de varios hidrogramas, Mockus (1950) concluye que el tiempo base y el tiempo pico se relacionan mediante la expresión:

$$t_b = 2.67t_p \dots (5).$$

Y a su vez el tiempo pico se expresa como: $t_p = \frac{de}{2} + t_r \dots (6)$

Donde:

$t_p =$ Tiempo pico en horas.

$t_r =$ Tiempo de retraso en hr.

$d_e =$ Duración en exceso en hr.

El tiempo de retraso se estima mediante el tiempo de concentración t_c , de la forma:

$$t_r = 0.6t_c \dots (7)$$

Donde:

$t_c =$ *Tiempo de concentración en hr.*

El tiempo de concentración, se puede estimar con la ecuación de Kirpich:

$$t_c = 0.000325 * \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \dots (8)$$

Donde:

$t_c =$ *Tiempo de concentración en hr.*

$L =$ *Longitud del cauce principal en m.*

$S =$ *Pendiente del cauce en m/m.*

Además, la duración en exceso con la que se tiene mayor caudal pico, a falta de mejores datos, se puede calcular aproximadamente para cuencas grandes, como:

$$d_e = 2\sqrt{t_c} \dots (9)$$

O bien para cuencas pequeñas, como:

$$d_e = t_c \dots (10)$$

Sustituyendo la ecuación (5) en la ecuación (4), resulta:

$$Q_p = 0.5555 * \frac{hp_e * A}{2.67 * t_b} \gg Q_p = 0.208 * \frac{hp_e * A}{t_p} \dots (11)$$

Además, sustituyendo la ecuación (9) y la ecuación (10) en la ecuación (6), resulta:

$$t_p = \frac{1}{2} * 2\sqrt{t_c} + 0.6 * t_c \gg t_p = \sqrt{t_c} + 0.6 * t_c \dots (12)$$

Con las ecuaciones (5), (11) y (12) se pueden calcular finalmente las características del hidrograma unitario triangular.

2.2. Índice de inundación súbita FFI (*Flash Flood Index*)

Desarrollado por Bhaskar, French y Kyiamah en el año 2000, (investigadores en el área de ingeniería civil, sistemas hidrológicos, hidráulicos y de recursos hídricos) el FFI es la base de la cual han partido distintos autores para determinar posibles avenidas súbitas. Debido a que los datos necesarios no siempre están disponibles o las ecuaciones de los parámetros resultan indeterminadas, el FFI ha tenido distintas modificaciones con la finalidad de facilitar su cálculo y mejorar su precisión. A continuación, se presentan las diferentes ecuaciones para el cálculo de los parámetros, así como también sus respectivas modificaciones.

2.2.1. Ecuaciones para obtener los factores del índice de inundación súbita

1) Aumento de la rama ascendente, K.

Bhaskar et al. (2000) presentó la rama ascendente de la curva como una ecuación exponencial de forma general:

$$Qp = Q_0 e^{Kt} \dots (13)$$

Donde:

$Q_0 =$ Descarga inicial específica.

$Q_p =$ Caudal máximo de crecida.

$K =$ Aumento de la rama ascendente de la curva.

$t =$ Tiempo en días.

Esta función, que generalmente se usa para las curvas de recesión del hidrograma, no solo tiene un problema en describir la rama ascendente de la curva en casos de hidrogramas con doble punta, sino que también tiene una dificultad en la definición de la descarga inicial específica Q_0 , que para hidrogramas simulados puede ser cero (Kim y Choi,2011).

Eung Seok Kim y Hyun Choi (2011), investigadores del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Sunmoon y Yeungnam, respectivamente, modificaron la ecuación del parámetro K , el cual toman como la pendiente media de la rama ascendente, como se muestra a continuación:

$$K = \frac{Q_p/A}{t_p} \dots (14)$$

Donde Q_p es el caudal máximo de crecida, t_p el tiempo que hay entre el comienzo del evento y el final de este (tiempo pico), A es el área de drenaje de la cuenca y por último K , la pendiente media de la rama ascendente en unidades de $\frac{mm}{h^2}$.

Básicamente, el aumento de la rama ascendente de la curva es una medida de inclinación de la creciente extremidad del hidrograma de crecida y por lo tanto grandes valores del parámetro K pueden estar asociados con una alta velocidad de escorrentía (Kim y Choi, 2011, 2012 y 2015).

2) Magnitud de inundación, M.

La magnitud de inundación, M , está representada como una relación entre el caudal máximo de crecida y el caudal promedio a largo plazo.

$$M = \frac{Q_p}{Q_a} \dots (15)$$

Donde:

$Q_a =$ Descarga media a largo plazo.

Sin embargo, la descarga media a largo plazo no solo no está disponible en cuencas no aforadas, además es cancelada más adelante en la obtención del factor de gravedad relativa por lo que Kim y Choi asumieron un umbral de descarga con un periodo de retorno para 2 años (Kim y Choi, 2015) pero también optaron por sustituir la descarga media a largo por el área de drenaje de la cuenca (Kim y Choi, 2011) quedando de la siguiente manera:

$$M = \frac{Q_p}{A} \dots (16)$$

Donde Q_p es el caudal máximo de crecida, A el área de drenaje de la cuenca y M la magnitud de inundación la cual capta la variabilidad del caudal, por lo que, cuanto mayor sea su valor, más grave es la inundación.

3) Tiempo de respuesta de inundación, T.

Eung y Hyun (2011, 2012), demostraron que el tiempo de respuesta de una inundación representa características similares a las de la rama ascendente de la curva, descartando así el índice del tiempo de respuesta T , el cual lo consideran dentro del parámetro K .

2.2.2. Factores de gravedad relativa

Bhaskar et al. (2000), agrupó los parámetros en determinados intervalos, con base en estos, a cada valor le asigno un Factor de Gravedad Relativa. Es decir que si el parámetro K, iba de 0 a 30, el primer intervalo iba de 0 a 5, el segundo de 6 a 10 y así sucesivamente hasta llegar a 30, una vez hecho esto, al primer intervalo le dio un factor de gravedad relativa de 1, al segundo de 2, hasta alcanzar el máximo factor como se muestra a continuación:

Tabla 1. Asignación de factores de gravedad relativa desarrollado por Bhaskar et al. 2000.

Intervalos de Clase K (1/día)	Factor de Gravedad Relativa	Numero de Eventos
De 0 a 5	1	6
De 6 a 10	2	12
De 11 a 15	3	5
De 16 a 20	4	3
De 21 a 25	5	2
De 26 a 30	6	2

El problema radica en la cuantificación de estos factores de gravedad relativa mediante el uso de una escala ordinal diferente en la asignación, donde la elección de intervalos de clase en cierta medida es arbitraria (B-S Kim y H-S Kim, 2013).

Kim y Choi (2011, 2012 y 2015), calcularon todos los factores de gravedad relativa conforme a la misma relación de escala para cada valor máximo registrado como se describe a continuación:

$$RSi = \frac{Si}{Smax} \dots (17)$$

Donde:

Si = Es la evaluación para cada una de las características del hidrograma como *K* y *M*.

Smax = Es el valor máximo registrado de cada una de las características.

RSi = Es el factor de gravedad relativa normalizada.

2.2.3. Cálculo del índice de inundación súbita

Bhaskar et. al (2000), determinó el índice de inundación como el promedio de los tres factores de gravedad relativa, como muestra la siguiente ecuación:

$$FFI = \frac{RK + RM + RT}{3} * 100 (\%) \dots (18)$$

Sin embargo, debido a que el factor de gravedad relativa RT representa características similares al factor RK ya que está contemplado en el cálculo del parámetro K, el índice bien puede ser calculado con el promedio de RK y RM solamente (Kim y Choi, 2012).

$$FFI_2 = \frac{RK + RM}{2} * 100 (\%) \dots (19)$$

2.2.4. Nuevo índice de inundación súbita

Kim y Choi (2015), implementaron el índice de inundación con un nuevo parámetro que contempla el volumen del caudal máximo de inundación.

- Aumento de la escorrentía media al tiempo pico o descarga pico, R.

Al igual que K y M, es normalizado para obtener su respectivo factor de gravedad relativa y la ecuación para calcular este parámetro se muestra a continuación:

$$R = \frac{Vp/A}{Tp} \dots (20)$$

Donde R, es la escorrentía media que sube al tiempo pico del caudal y Vp es el volumen del caudal máximo de inundación. Un alto valor de la escorrentía media representa un severo daño potencial de inundación por un gran volumen de agua.

Si bien anteriormente se tomó el promedio de los factores de gravedad relativa para obtener el índice FFI, ahora bien, se toma el producto de los tres factores, RK, RM y RR, elevados a una determinada potencia, dada por un peso asignado a cada factor, quedando así el nuevo índice de inundación súbita:

$$FFI_3 = RK^\alpha * RM^\beta * RR^\gamma \dots (21)$$

Donde α , β y γ , son el peso para cada factor de gravedad relativa, respectivamente, cuya suma debe ser igual a 1 (Kim y Choi, 2015).

Tabla 2. Comparación entre los resultados arrojados por 3 de los distintos índices de 13 eventos seleccionados con precipitación máxima anual durante 1973-2012. (Kim y Choi, 2011,2012 y 2015)

No. Eventos	Fecha	Qp (m ³ /s)	Tp (hr)	Vp (m ³)	K	M	R	FFI	FFI ₂	FFI ₃
1	07/22/1980	71.7	17	210821.4	0.91	0.77	0.74	26.25	27.61	17.36
2	07/19/1986	80.5	7	461212.2	2.47	0.86	3.94	48.33	43.92	43.97
3	07/22/1987	70	4	357967.8	3.76	0.75	5.35	68.34	52.51	53.46
4	07/14/1988	111.5	12	1793484	2.00	1.19	8.93	43.22	48.16	59.99
5	07/26/1989	77.4	7	535617	2.38	0.83	4.57	47.20	42.23	45.03
6	09/11/1990	92.8	24	418546.8	0.83	0.99	1.04	27.35	32.70	20.59
7	07/13/1993	70.4	13	857307.6	1.16	0.75	3.94	29.95	29.54	32.73
8	06/30/1994	123.6	20	848916	1.33	1.32	2.54	37.01	45.52	35.62
9	07/01/1997	98.7	18	1332559.8	1.18	1.05	4.42	32.34	37.39	38.22
10	06/30/2001	98.3	5	466016.4	4.23	1.05	5.57	69.57	64.35	63.09
11	07/16/2006	67.5	15	1352212.2	0.97	0.72	5.39	26.89	27.00	33.67
12	08/05/2007	183.3	7	731340	5.63	1.96	6.24	85.71	100.0	88.75
13	07/24/2008	70.6	19	410560.2	0.80	0.75	1.29	24.59	26.35	19.92
	Valor Mínimo	67.50	4.000	210821.40	0.799	0.721	0.741	24.58	26.35	17.35
	Valor Máximo	183.3	24.00	1793484.0	5.631	1.959	8.928	85.71	100.0	88.75
	Valor Promedio	93.56	12.923	752043.185	2.127	1.000	4.150	43.59	44.40	42.49

Área m²= 16740000

En la Tabla 2 se puede observar como el índice FFI₃, el cual está dado por el producto de los factores de gravedad relativa, disminuye en algunos casos su valor con la finalidad de tener un valor más certero y evitar posibles valores que muestren un alto índice de inundación súbita cuando en realidad se trate de inundaciones lentas

Capítulo 3. Metodología

El presente trabajo y la metodología aplicada para la detección de zonas con peligro a avenidas súbitas está basado en los estudios: “*Assessment of Vulnerability to Extreme Flash Floods in Design Storms*” y “*A method of flood severity assessment for predicting local flood hazards in small ungauged catchments*” ambos realizados por Eung Seok Kim¹ y Hyun II Choi,² en los años 2011 y 2015 respectivamente, estos estudios desarrollan e implementan el índice elaborado por Bhaskar et al. (2000), dando como resultado un nuevo índice de peligro de inundación súbita para su uso en predicciones de inundaciones severas locales en pequeñas cuencas no aforadas.

Las avenidas súbitas han sido estudiadas principalmente en términos de la perspectiva climatológica. Kim y Choi tomaron en cuenta eventos con el flujo máximo de inundación entre hidrogramas de escorrentía máxima anual para 40 años, del periodo de 1973 a 2012, producidos por un modelo de lluvia-escorrentía. Sin embargo, el escurrimiento de una cuenca se ve afectado no solo por factores climatológicos sino también fisiográficos, por lo que es importante considerar áreas, pendiente y uso de suelo.

Dado que el sistema local de observación y advertencia de inundaciones no suele estar disponible en la mayoría de las cuencas, esta metodología pretende determinar las posibles zonas con peligro a inundaciones súbitas mediante un análisis espacial, integrando información hidrometeorológica y fisiográfica en un SIG, para su respectivo análisis y procesamiento, con apoyo de un modelo digital de elevación, datos de lluvia para un periodo de 18 años y el número de curva para la República Mexicana.

A continuación, en la figura 9 se muestra un diagrama de flujo que resume de forma general la metodología propuesta para alcanzar los objetivos del presente trabajo.

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Sunmmon University, 100, Kalsan-ri, Tangjeong-myeon, Asan-si, Chungnam-do 336-708, Republica de Korea.

² Departamento de Ingeniería Civil, Yeungnam University, 214-1, Dac-dong, Gyeongsan-si, Gyeongbuk-do 712-749, Republica de Korea.

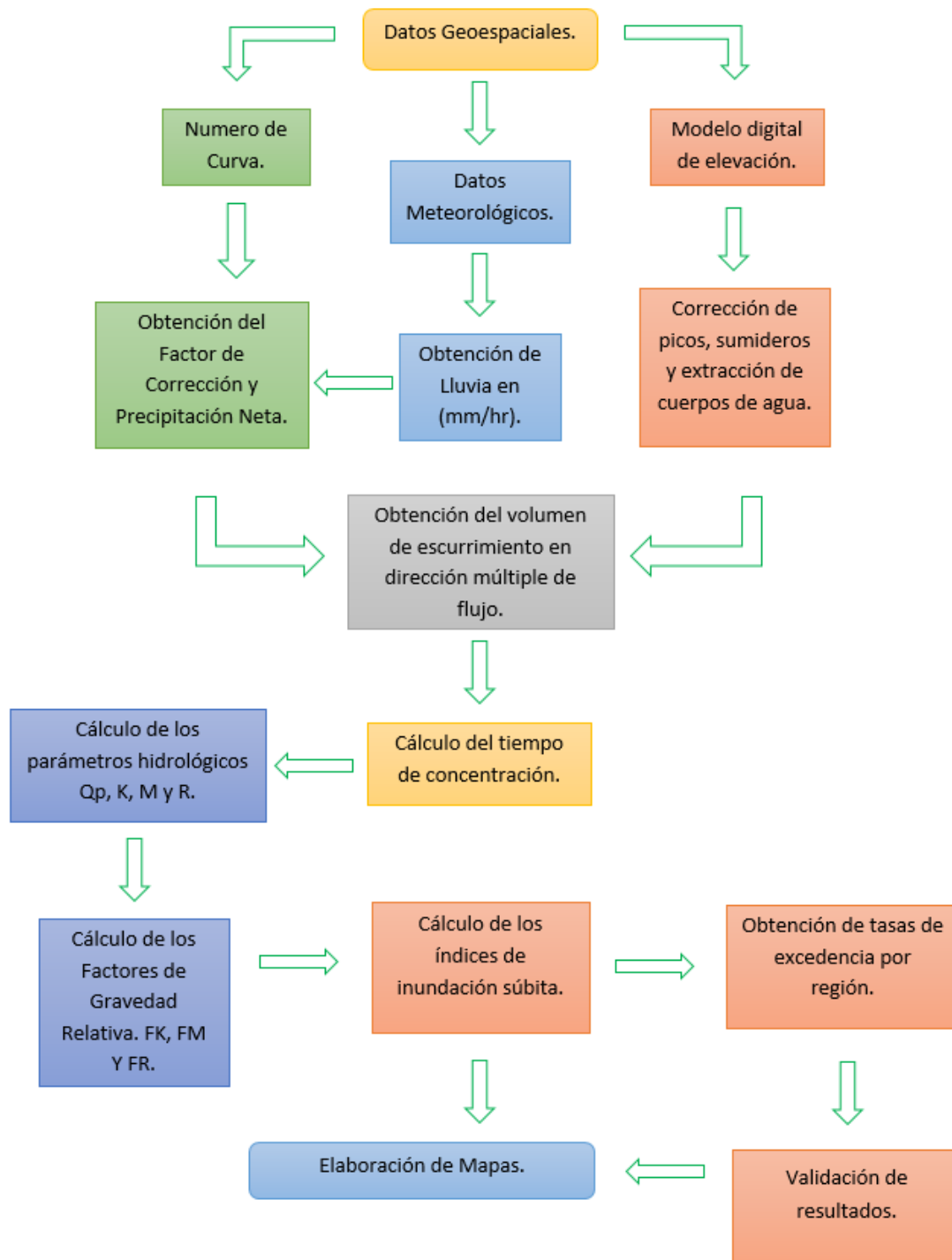


Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología empleada.

3.1. Datos

3.1.1. Modelo digital de elevación

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas de relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.

Estos valores están contenidos en un archivo ráster, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados. El tamaño de celda de los datos ráster determina su resolución, así un tamaño de celda de 30 m representara un área de $900 m^2$, una de 10 m representará un área de $100 m^2$, así entre más bajo sea su tamaño de celda más alta será su resolución, con la cual se puede representar con más detalle las características del fenómeno en estudio.

En la actualidad el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), realiza la representación del relieve generando un modelo simplificado lo más cercano a la realidad, debido a que se cuenta con diferentes métodos y soluciones tecnológicas que permiten proporcionar un número infinito de puntos o de información geográfica para tal fin, mediante el uso de sistemas computarizados con la finalidad de obtener y caracterizar las formas del terreno, el cual es utilizado como una fuente de información digital para el estudio de la superficie del terreno de México.

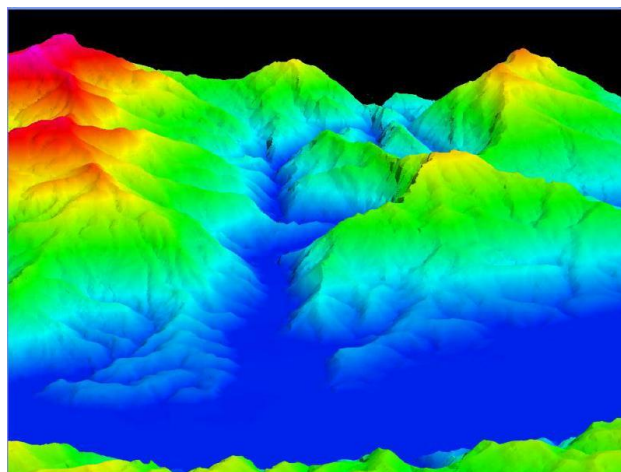


Figura 10. Modelo digital de elevación con vista en perspectiva del estado de Chiapas. (INEGI, 2015)

En general esta información ráster debe ser preparada y pre-procesada para su respectivo análisis, esto es; corregir errores que pueda presentar el modelo, ya que con frecuencia se presentan en lo que son sumideros y picos debido a la resolución de los datos o el redondeo de elevaciones al valor entero más cercano.

Los sumideros al ser rellenados garantizan la representación correcta de cuencas y arroyos ya que, si no es así, una red de drenaje derivada puede ser discontinua. A continuación, en la figura 11, se muestra un diagrama de flujo de cómo funciona la herramienta “Relleno” (*fill*).

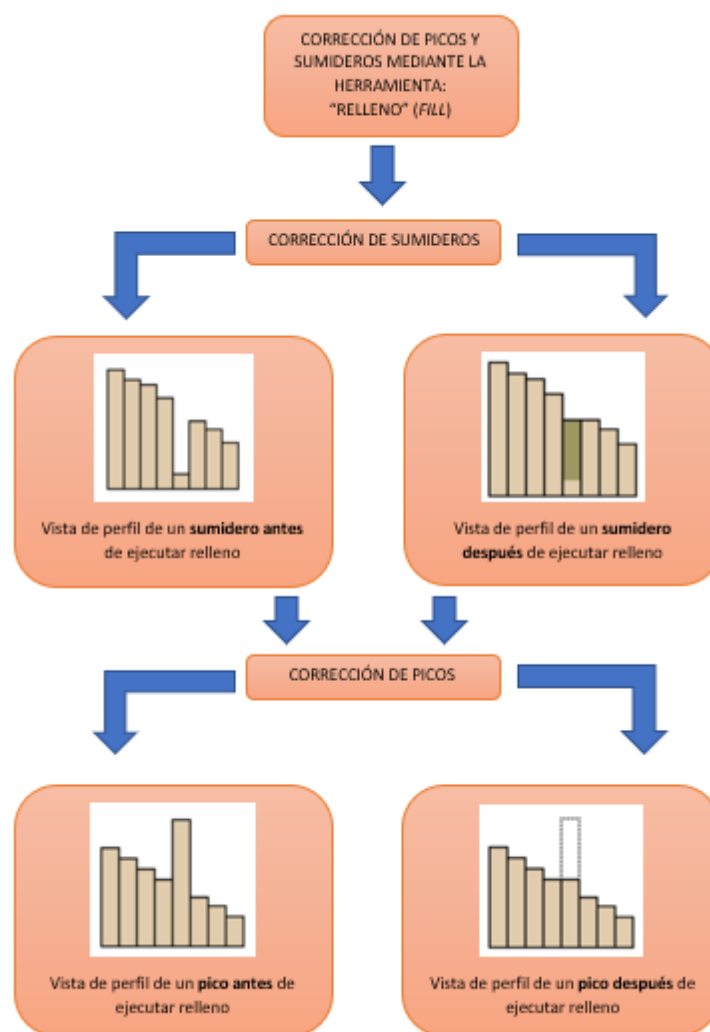


Figura 11. Diagrama de flujo que muestra el funcionamiento de la herramienta llamada “Relleno” (*fill*).

Otro proceso que considerar antes de la aplicación principal, es la extracción de cuerpos de agua del modelo digital, ya que para fines de este trabajo y debido a la metodología aplicada es probable que las zonas aledañas a un cuerpo de agua presenten avenidas súbitas.

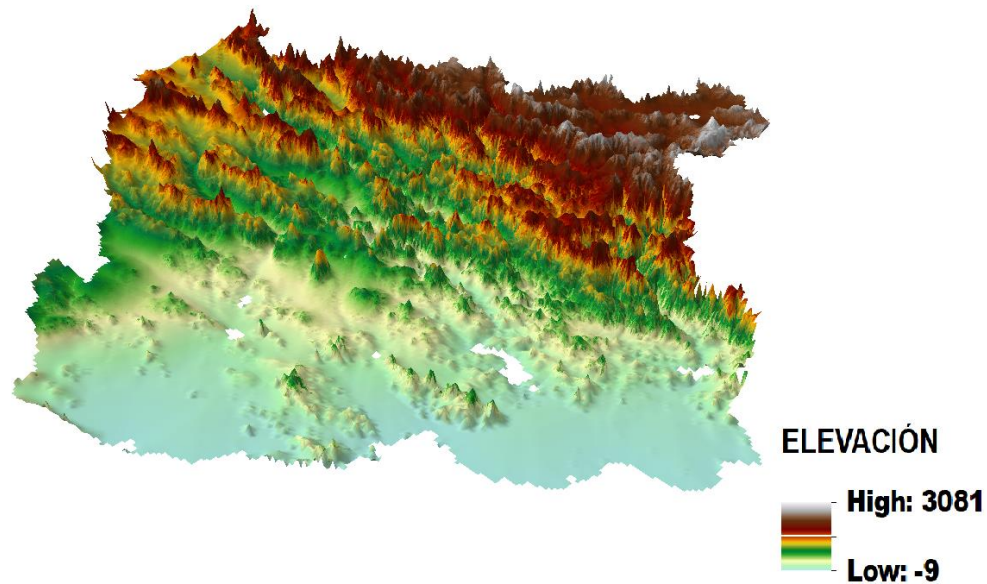


Figura 12. Región Hidrológica Sonora Sur, en donde se pueden apreciar los cuerpos de agua discriminados del modelo digital de elevación, así como la corrección de los posibles sumideros y picos que pueda presentar.

3.1.2. Número de curva

Estimar la altura de precipitación efectiva que se presenta durante una tormenta puede ser llevada a cabo con distintos métodos. Uno de ellos es el Método del Número de Curva (NC), el cual es el método más extendido y utilizado.

El NC es un valor adimensional asociado a un nivel de infiltración empleado en un método desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (USSCS) para calcular la altura de precipitación efectiva, el cual es una alternativa para la estimación del escurrimiento directo, derivado de la precipitación total y de gran utilidad en cuencas no aforadas.

La generación del NC se realiza mediante la aplicación de tablas clasificadas en las cuales se establecen una serie de valores empíricos dependientes del tipo y uso de suelo, así como de la condición hidrológica que se presenta en la zona de estudio.

Determinar el NC de una zona en específico requiere una exhaustiva y debida sustentada investigación, que afortunadamente para fines de este trabajo, esta investigación ya fue realizada y plasmada en la tesis del ahora Ing. Félix Hernández (2013) en conjunto con el Dr. Eduardo Reinoso (Investigador del Instituto de Ingeniería de la UNAM), en la que obtienen el Número de Curva para la República Mexicana mediante el uso de SIG, aplicando la metodología del TR-55, que permite estimar la altura de la precipitación efectiva durante una tormenta, su aplicación es recomendada para cuencas pequeñas por lo que puede ser empleada en la metodología de este trabajo.

El NC que más se ajusta a las condiciones del país, está basado en las distintas capas de información generadas por INEGI. Para designar un valor de NC correspondiente a cada región adecuaron los tipos de suelos presentes en México a los tipos de suelo utilizados por el TR-55 y posteriormente identificaron los usos de suelo dentro del territorio mexicano.

En cuanto a la condición hidrológica contemplaron aquellos factores que intervienen en la infiltración y el escurrimiento, tales como la textura del suelo, cobertura de vegetación y el tratamiento que se le da al suelo, resultando en una condición hidrológica buena, para aquellas zonas con las condiciones favorables a la infiltración y pobres aquellas zonas desfavorables a la infiltración, que implican un mayor escurrimiento superficial. La combinación de estos factores permitió asignar los valores de NC que más se ajustan a las condiciones de México.

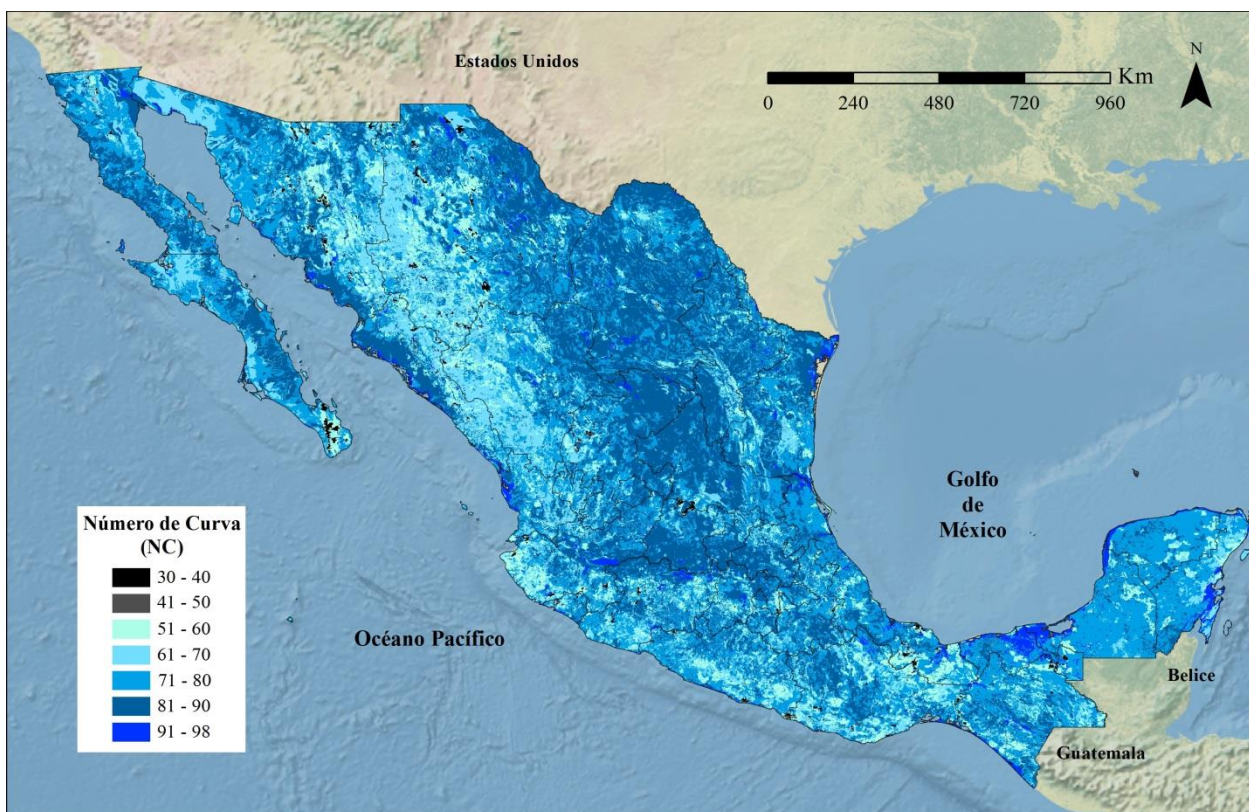


Figura 13. Numero de Curva para la República Mexicana (Hernández, 2013).

El NC toma un valor de 0 a 100, según sea su capacidad de generar escurrimiento superficial, los valores que son cercanos a 0 representan condiciones de permeabilidad muy alta, mientras que los valores cercanos a 100 representan condiciones de impermeabilidad muy alta, es decir que el agua procedente de la lluvia ni se infiltra ni es retenida.

3.1.3. Datos meteorológicos

Con el fin de determinar la precipitación en una zona en específico, este trabajo utilizará datos de lluvia del satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), el cual es una conjugación de exploración espacial entre la NASA y la Agencia Aeroespacial Japonesa (JAXA), diseñada para monitorear y estudiar precipitaciones tropicales y subtropicales.

El producto de análisis de precipitación multisatélite TRMM, es una estimación global cuadrículada de precipitación compilada a partir de microondas pasivos e instrumentos infrarrojos geosincrónicos (Huffman et al. 2007-2010). El sistema de procesamiento de precipitación (PPS) genera un producto estándar 3B42 y un producto 3B42RT casi en tiempo real en formato binario.

La versión GIS de los archivos binarios en tiempo real (3B42RT) se puede descargar utilizando la siguiente URL: <ftp://trmmopen.gsfc.nasa.gov/pub/gis/>. Para cada archivo en tiempo real, el PPS crea un archivo en formato TIFF de acumulación de lluvia en un periodo de 3 horas, 1 día, 3 días y 7 días, y su resolución espacial es de 0.25 grados. Las unidades de las acumulaciones en tiempo real son decimas de milímetro por lo que es importante dividir entre 10 para obtener unidades en (mm/hora).

Las horas disponibles en los nombres de cada archivo son: 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 y 21, las cuales se encuentran en coordinación con el tiempo universal (UTC), anteriormente conocido como hora media de Greenwich. El cálculo de la precipitación en un archivo regular está destinado a ser la mejor estimación posible de la tasa de lluvia en el UTC establecido, usando datos de entrada tomados en periodos centrados de 3 horas indicado en el nombre del archivo. Por ejemplo, el archivo 3B42 para la hora 6 UTC utiliza datos de entrada que cubren de las 04:30 UTC a las 07:30 UTC. Si se requiere la acumulación para un día en específico, el archivo cubre las 3 horas indicadas más las 21 horas de los 7 archivos anteriores, para cubrir un total de 24 horas. Por ejemplo, una acumulación de un día para la hora 6 UTC abarca desde las 07:30 del día anterior a las 07:30 UTC del día indicado en el nombre del archivo.

De acuerdo con el Centro Nacional de Metrología (CENAM) y con la Ley del Sistema de Horario en los Estados Unidos Mexicanos, en México se utilizan los husos horarios con respecto al tiempo universal a UTC-5, UTC-6, UTC-7 y UTC-8 y debido a que la mayoría en su territorio utiliza el UTC-6, este trabajo utilizará las lluvias acumuladas registradas a las 06:00 UTC con la finalidad de obtener la precipitación en México desde las 01:30 del día anterior a la 01:30 del día indicado en el nombre del archivo.

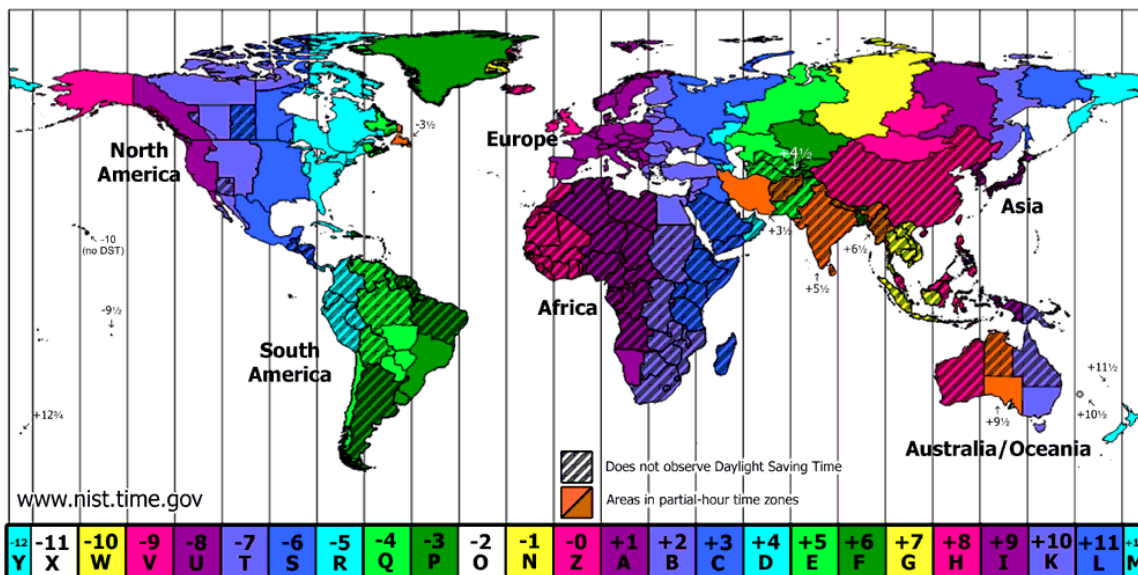


Figura 14. Husos horarios con respecto al tiempo universal. (Roque, 2012).

3.2. Obtención de los parámetros hidrológicos

3.2.1. Cálculo de la precipitación efectiva

Como se describió en la sección 1.3.1 de este trabajo, durante una tormenta no todo lo que llueve escurre, parte de la precipitación total de la tormenta o es retenida superficialmente o se infiltra, posteriormente esta agua acaba evaporándose o llegando a la escorrentía subterránea, es agua perdida para la escorrentía directa las cuales se denominan abstracciones.

La precipitación efectiva en hidrología es toda aquella que contribuye a la escorrentía directa, separarla es parte del objetivo de esta metodología.

El método que vamos a exponer aquí para llevarlo a cabo es el del NC, procedimiento que estableció empíricamente el Servicio de Conservación de Suelos USA (Mockus V., 1964). Este organismo se ha mantenido vigente (NRCS, 2004 y 2009) y lo implementa en el modelo TR-55.

La clave para la aplicación del procedimiento es la precipitación inicial que no produce escorrentía directa, la cual se conoce como abstracción inicial o umbral de escorrentía. La abstracción inicial engloba todas las pérdidas antes de ocurrir el escurrimiento, en ella se contempla el agua retenida en depresiones, vegetación, el agua evaporada y el agua que se infiltra. Los estudios más recientes han llevado a formular una expresión empírica que permite el cálculo de la abstracción inicial, resultando en valores de carácter variable que se encuentran relacionados con el tipo de suelo y su cobertura, tal expresión queda de la siguiente manera:

$$I_a = 0.2 S \dots (22)$$

La ecuación anterior se describe en función del potencial máximo de retención (S) del mismo suelo, el cual es considerado del 20%, mismo que se presenta una vez comenzado el escurrimiento y se determina con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \dots (23)$$

Donde: *CN* = Número de Curva dependiente de las características del suelo.

Una vez obtenida la abstracción inicial podemos calcular la precipitación efectiva con la siguiente ecuación:

$$h_{pe} = \frac{(h_{pT} - I_a)^2}{(h_{pT} - I_a) + S} \dots (24)$$

Donde:

h_{pe} = altura de precipitación efectiva (in).

h_{pT} = altura de precipitación total o de diseño (in).

S = potencial máximo de retención después de comenzado el escurrimiento.

I_a = abstracción inicial (in).

Sustituyendo la ecuación (22) en la ecuación (24) puede quedar de la siguiente manera:

$$h_{pe} = \frac{(h_{pT} - 0.2 S)^2}{(h_{pT} + 0.8 S)} \dots (25)$$

Definida la ecuación que permite obtener la altura de precipitación efectiva, podemos apreciar que la solución de dicha ecuación depende del valor de NC, contenido en el potencial máximo de retención, teniendo en cuenta que la altura de precipitación total (h_{pT}) resulta de los eventos de lluvia.

3.2.2. Cálculo del volumen de escurrimiento

Una vez obtenida la precipitación efectiva es necesario saber qué tanto volumen de agua es lo que escurre dentro de cada celda, el cual va a estar dado por el producto entre la altura de precipitación efectiva y el área de cada celda, una vez hecho esto es necesario crear un ráster de flujo acumulado que nos despliegue como resultado una red de arroyos por los cuales el volumen de agua desciende hasta el punto de salida de la región hidrológica.

Existen distintos métodos para realizar la acumulación de flujo, uno de ellos es el algoritmo de una sola dirección (D8), desarrollado por O'Callaghan J.F y Mark D.M (1984). Este algoritmo se basa en crear la trayectoria de flujo en una sola dirección de 8 posibles. De una malla de 3x3 pixeles la celda central es la analizada junto con las 8 celdas vecinas que la rodean, la cual al ser un algoritmo unidireccional drena todo su contenido de agua en dirección a la celda más empinada.

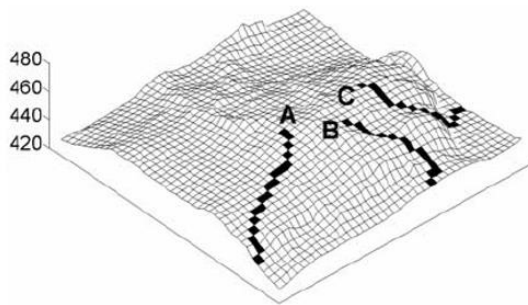
El problema radica en la pendiente más pronunciada que puede caer entre 2 o más celdas creando un flujo que tiende a concentrarse en líneas regularmente rectas.

Otro método es el de dirección de flujo múltiple, MD8 (*Multiple Flow Direction*), el cual distribuye el flujo a todas las celdas de menor elevación (Quinn et al., 1991, 1995), que tiende a producir un análisis espacial más realista que el D8, evitando así una sola concentración en las rutas de flujo. Usando el D8, una mínima diferencia entre las elevaciones de 2 celdas vecinas repercute en una de ellas al recibir todo el flujo acumulado, lo que con el MD8 aminora este efecto debido a que ambas celdas reciben aproximadamente la misma porción del flujo acumulado. Sin embargo, la gran dispersión del flujo provocada por las múltiples direcciones ocasiona en gran medida el cruce entre sí de las distintas vías de flujo.

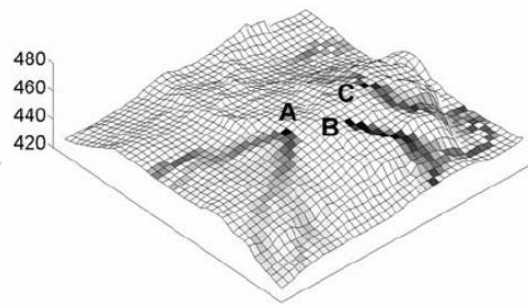
Tarboton D. G. (1997), sugirió usar un algoritmo con una serie de facetas triangulares para eliminar la limitación de una sola dirección del flujo del D8, llamado “*Deterministic Infinity*” (D_{∞}), que describe una infinidad de posibles vías de flujo, a diferencia del D8, permite una sola dirección en una o más celdas con pendiente descendente. Pero para fines de este trabajo se optó por utilizar un método más reciente que combina las ventajas del “*Multiple Flow Direction*” (MD8) propuesto por Quinn et al. (1991) y el uso de las facetas triangulares del “*Deterministic Infinity*” (D_{∞}) descrito por Tarboton llamado: “*Multiple Triangular Flow Direction*”, MD_{∞} .

Desarrollado por Seibert y McGlynn (2007), este algoritmo permite la múltiple dirección de flujo en base a las celdas con una mayor pendiente descendente, es decir si se analiza una celda la cual solo ella aporte agua, esta celda solo aportara un porcentaje de flujo de agua en dirección de cada faceta triangular. Es un algoritmo complejo, en el cual las celdas con una elevación más baja ya no solo reciben parte del flujo de la celda anterior, si no que todas las demás celdas también aportan un porcentaje de flujo haciendo una cadena aún más compleja.

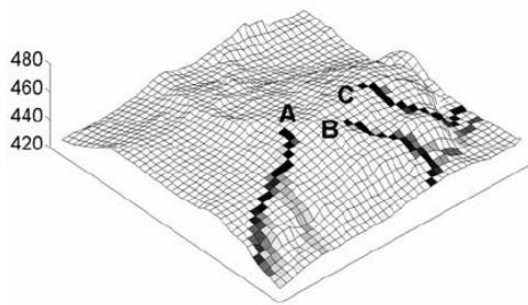
a) Simple dirección D8



b) Múltiple dirección MD8



c) Simple dirección triangular D_{∞}



d) Múltiple dirección triangular MD_{∞}

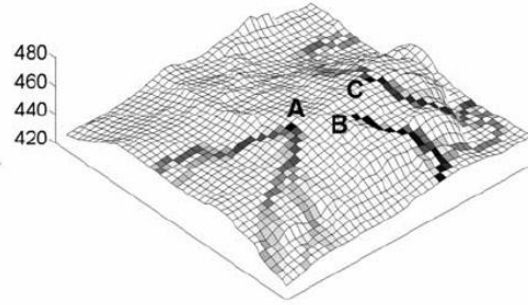


Figura 15. Distribución del flujo acumulado utilizando los 4 algoritmos en un modelo digital de elevación. (Seibert y McGlynn, 2007)

3.2.3. Cálculo del tiempo de concentración

Determinar el tiempo de concentración para una región hidrológica puede ser llevado a cabo mediante distintos métodos, ya sea por tablas o ecuaciones empíricas, para fines de este trabajo se utilizará la ecuación antes mencionada de Kirpich (Ecuación 8).

Definido como el tiempo que tarda el escurrimiento de agua en llegar al punto de salida desde el punto hidrológicamente más alejado de la región, es necesario realizar un acumulado del tiempo acorde a la trayectoria más larga para cada escurrimiento, siguiendo el mismo algoritmo del MD_{∞} como se muestra en la figura 15.

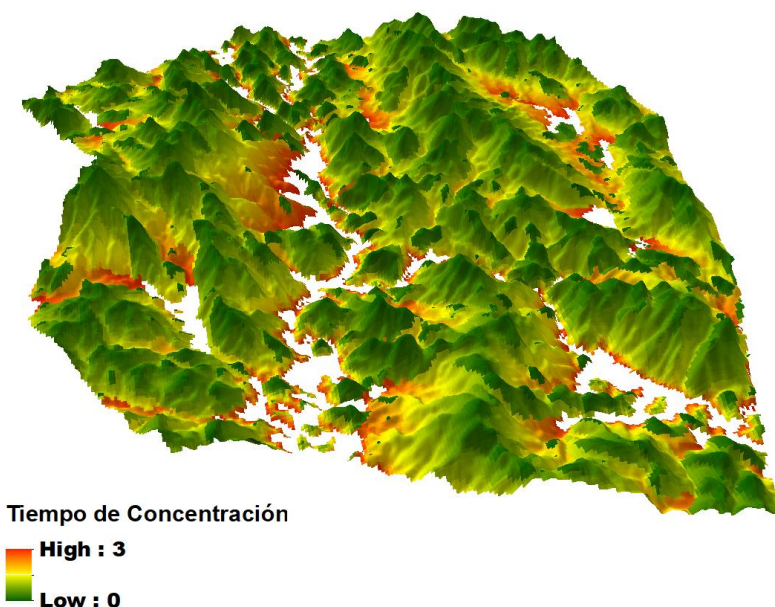


Figura 16. Tiempos de concentración siguiendo el algoritmo MD_{∞} .

Es importante señalar que como bien lo mencionan Salas y Jiménez (2004), las avenidas súbitas obedecen a un tiempo de concentración no mayor a 2 horas, el cual para este caso se tomara en cuenta aquellos tiempos de concentración no mayores a 3 horas con la finalidad de descartar las posibles avenidas lentas. En la figura 16 se muestran los tiempos mayores a 3 horas en blanco, ya que son descartados y que por lo regular son zonas de menor altitud y en un tono de verde a rojo los tiempos menores o iguales a 3 horas.

Capítulo 4. Caso de Aplicación

La zona intertropical de convergencia es un cinturón de baja presión que ciñe el globo terrestre en la región ecuatorial, está formado, como su nombre lo indica, por la convergencia de aire cálido y húmedo de latitudes por encima y por debajo del ecuador donde las masas de aire están forzadas a ascender por el calentamiento y por la misma razón se origina una abundante formación de nubes y fuertes lluvias.

México, situado cerca de la zona intertropical de convergencia y dentro del campo de influencia y trayectoria de los ciclones tropicales, presenta lluvias intensas año con año, que traen consigo grandes ventajas debido a que las presas se llenan, los acuíferos se recargan, facilitando la existencia de agua para la agricultura y el suministro de agua potable, sin embargo, no siempre representan grandes ventajas, ya que por lo regular vienen acompañadas de fuertes vientos, tornados, marejadas ciclónicas en áreas costeras e incluso si son extremadamente fuertes pueden producir inundaciones (CONAGUA, 2010).

Lo fundamental de estos fenómenos extraordinarios, repentinos, aleatorios y muy destructivos, radica en el potencial peligro de inundaciones que México enfrenta en sus extensas franjas, en las planicies de sus grandes ríos que producen inundaciones derivadas de sus desbordamientos debido a los grandes volúmenes precipitados y a la pérdida de capacidad hidráulica en los cauces, en las vertientes hacia el mar y en las posibles trayectorias de huracanes. Las grandes avenidas generadas por ciclones y lluvias convectivas, que regularmente provocan pérdidas económicas e infortunadamente en ocasiones vidas humanas, acurren por lo general al mes de septiembre (CONAGUA, 2010).

Analizar una zona de interés requiere utilizar una cuenca o una región hidrológica con el fin de conocer el comportamiento que tienen sus cauces, conocer hacia donde escurre el agua es muy importante para saber qué zonas pueden presentar avenidas súbitas.

4.1. Regiones hidrológicas

Las cuencas son unidades del terreno, definidas por la división natural de las aguas debido a la conformación del relieve. Con propósitos administrativos de las aguas nacionales, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ha definido 731 cuencas hidrográficas en México, que a su vez constituyen 37 regiones hidrológicas que se muestran en la figura 17.

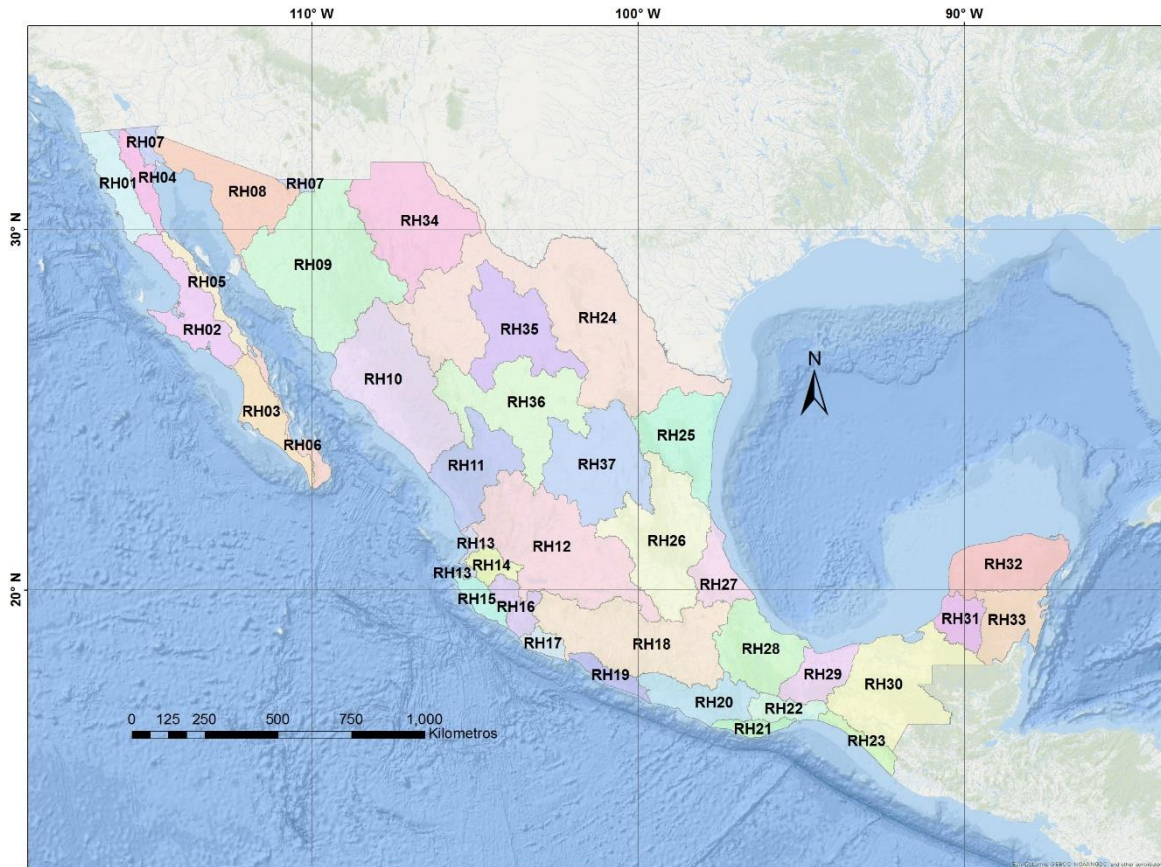


Figura 17. Regiones hidrológicas de la República Mexicana (INEGI,2015).

Desplegar las 37 regiones hidrológicas en un análisis espacial donde se muestren las avenidas súbitas es posible, sin embargo, se tienen regiones hidrológicas que presentan más seguido este tipo de fenómenos a comparación de otras, por lo que el presente trabajo está enfocado en aquellas regiones que en base a diferentes fuentes de información y a su ubicación representan un alto índice de peligro por inundación súbita.

4.2. Zona de estudio

De acuerdo con la base de datos de DESINVENTAR, 2016 (Sistema de inventario de efectos de desastres) los municipios con un mayor número de eventos registrados por avenidas torrenciales o avenidas súbitas en México de 1970 al 2013 se muestran en la figura 18.

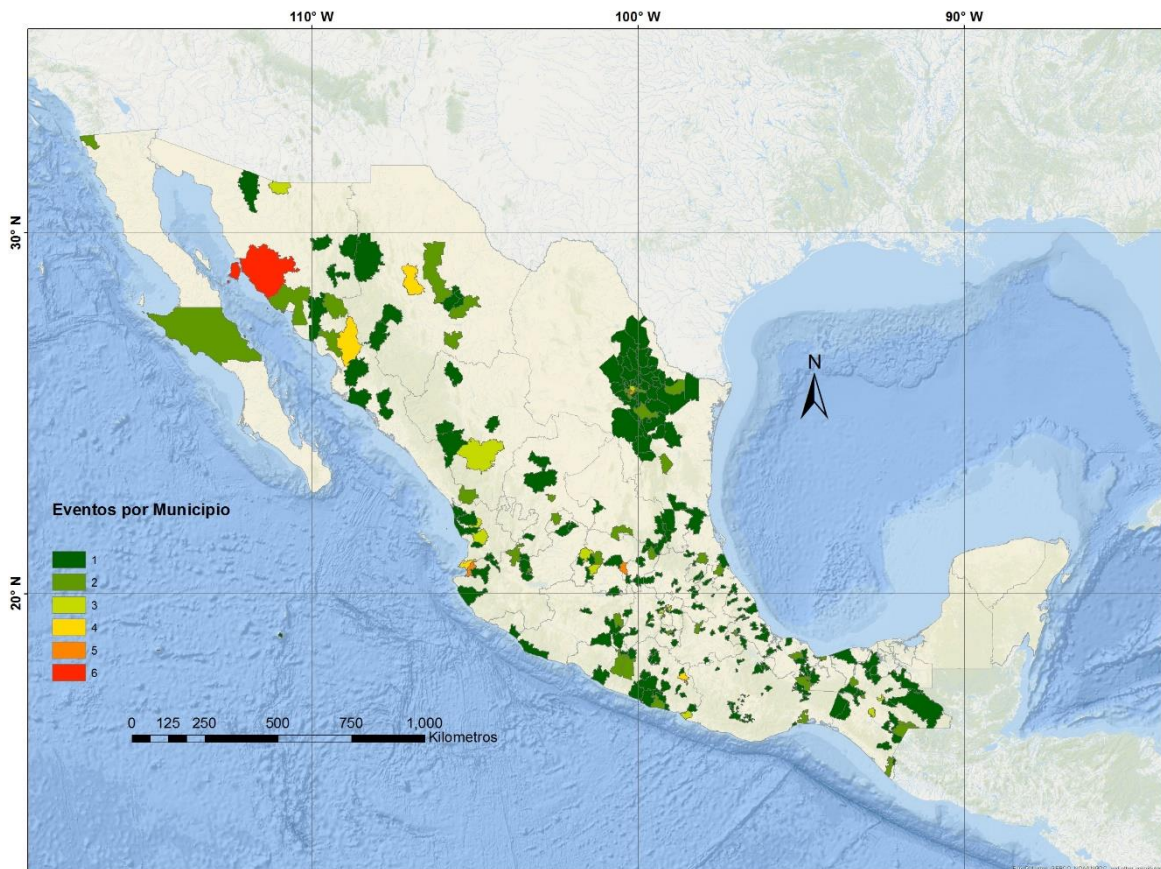


Figura 18. Municipios con un mayor número de eventos por avenidas súbitas de 1970 al 2013. (DESINVENTAR, 2016).

En la siguiente tabla 3, se muestran los 10 municipios con mayor afectación por avenidas súbitas en la república mexicana de 1970 al 2013.

Tabla 3. Municipios con un mayor número de eventos en México por avenidas súbitas registrados por DESINVENTAR.

ESTADO	MUNICIPIO	NO. DE EVENTOS	ESTADO	MUNICIPIO	NO. DE EVENTOS
Sonora	Hermosillo	6	Guerrero	Tlapa de Comonfort	4
Jalisco	Puerto Vallarta	5	Nayarit	Bahía de Banderas	4
Nuevo León	Guadalupe	5	Sonora	Álamos	4
Querétaro	Querétaro	5	Chiapas	Alcalá	3
Chihuahua	Cauhtémoc	4	Durango	Duarango	3

Según la base de datos de DESINVENTAR, el municipio de Hermosillo, Sonora presenta una mayor cantidad de eventos registrados y en la figura 18 se puede apreciar que la zona que comprende el estado de Nuevo León registra por lo menos un evento en varios de sus municipios. Estas zonas se encuentran dentro de las 2 más grandes cordilleras de México, además las lluvias que caen en estos lugares suelen ser cortas pero muy intensas por lo que proporcionan un medio ambiente favorable para las avenidas súbitas.

Dichas zonas comprenden por lo menos la región 9, 24 y 25 de la República Mexicana, por lo que el presente trabajo está enfocado en estas 3 regiones hidrológicas las cuales se muestran en conjunto con los municipios afectados en la siguiente figura 19:

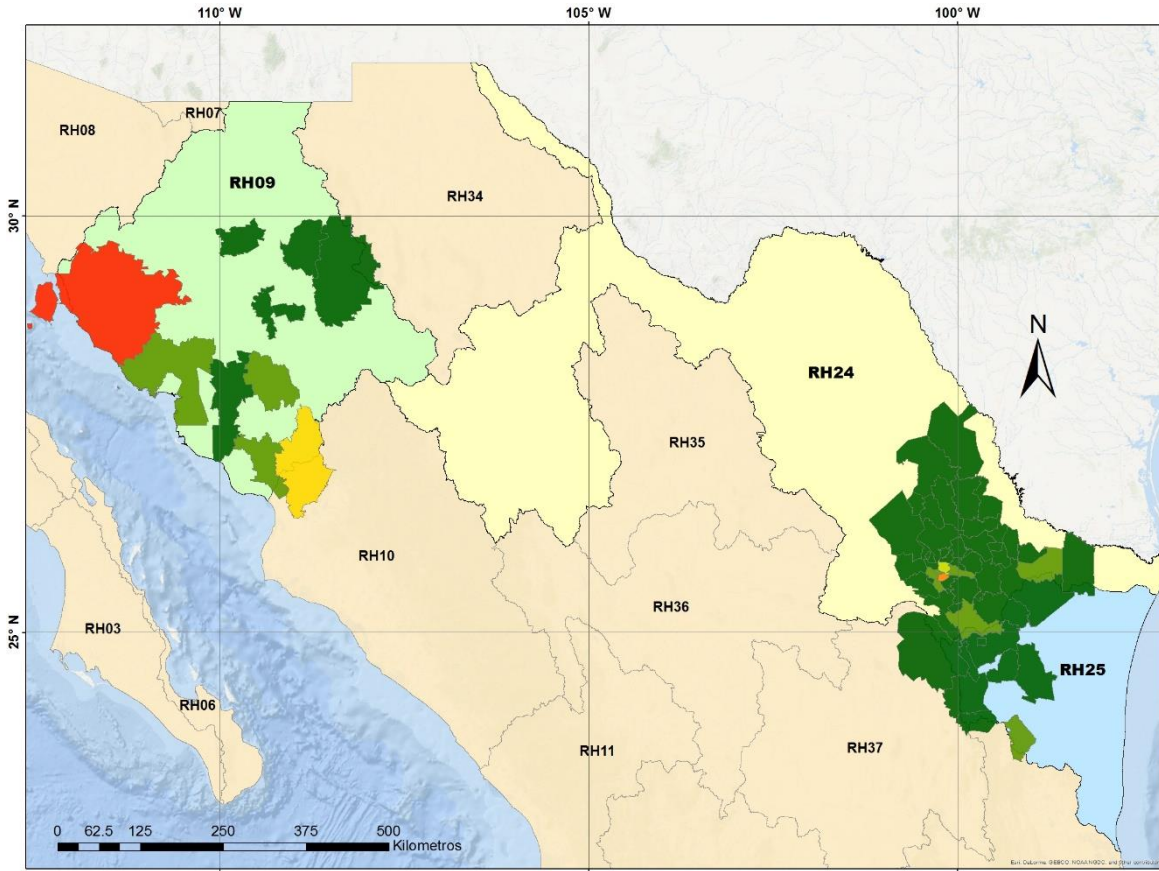


Figura 19. Región hidrológica número 9 Sonora Sur, número 24 Bravo Conchos y numero 25 San Fernando-Soto la Marina de izquierda a derecha, en conjunto con los Municipios afectados por avenidas torrenciales de 1970 al 2013. (DESINVENTAR, 2016).

4.2.1. Región hidrológica número 9, Sonora sur

- **Descripción de la región**

Se ubica en las porciones noreste, este, centro y sur de Sonora, tiene una superficie en territorio mexicano (Sonora y Chihuahua), de 117 363 km^2 . Está conformada por las cuencas Río Mayo, Río Yaqui, Río Matape, Río Sonora y Río Bacoachi y aporta el 76% del volumen total precipitado al año, así como el 82% del escurrimiento total registrado, consolidándose como la región de mayor importancia dentro del estado de Sonora (Vega et al. 2011).

- **Antecedentes**

Los principales desastres que han enfrentado los pobladores de Sonora han sido los de origen hidrometeorológicos, especialmente los generados por lluvias extraordinarias y tormentas tropicales. De acuerdo con el Atlas de Riesgos para el Estado de Sonora un total de 45 ciclones tropicales han impactado este estado, desde 1921 hasta el 2004, 8 de estos se registraron entre los años 1995 y 2004 afectando hasta 28 municipios.

Uno de los huracanes que los últimos años más han dañado al Estado de Sonora es el huracán “Juliette”, el cual toco tierra sonorenses entre los días del 28 de septiembre y el 3 de octubre del 2001, generando lluvias acumuladas de 200 mm hasta 470 mm, cifras superiores a las que se presentaron en el año. Lo anterior provocó daños e inundaciones de distintas magnitudes que, de acuerdo con la información generada por la unidad estatal de protección civil, 344 comunidades resultaron afectadas.

A continuación, en la siguiente Tabla 4 se muestran los eventos registrados por avenidas torrenciales en distintos municipios que comprende la Región 9 Sonora Sur, en base a las distintas fuentes de información recolectadas por DESINVENTAR, 2016.

Tabla 4. Eventos registrados por DESINVENTAR en la región número 9.

Fecha	Sitio	Fuente	Descripción
08/09/2002	SONORA/Hermosillo	El Universal	El caudal del arroyo de Shangai arrastró un vehículo.
12/07/2004	SONORA/Arivechi	El Universal	
22/07/2004	SONORA/Álamos	La Jornada	3 niñas murieron al ser arrastradas por la corriente de un río.
18/07/2006	SONORA/Hermosillo	El Universal	2 personas mueren al ser arrastrados por la corriente de un río.
14/08/2006	SONORA/Moctezuma	El Universal	
07/09/2007	SONORA/Hermosillo	El Universal	Persona arrastrada por la corriente de un río.
11/07/2008	SONORA/Rosario	La Jornada	Camioneta arrastrada por la corriente de un río.
12/08/2008	SONORA/Hermosillo	La Jornada	Hombre arrastrado por la corriente de un río.
19/08/2008	SONORA/Hermosillo	La Jornada	Una patrulla con 2 policías abordó y una persona más, fueron arrastrados por la corriente de un río.
27/08/2008	SONORA/Cajeme	La Jornada	Niño arrastrado por la corriente de un río.
27/08/2008	SONORA/Guaymas	La Jornada	Chofer de tráiler desapareció al ser arrastrado por la corriente de un río.
27/08/2008	SONORA/Rosario	El Universal	Persona arrastrada por la corriente de un río.
10/09/2008	SONORA/Álamos	La Jornada	Persona arrastrada por la corriente de un río.
21/09/2008	SONORA/Álamos	La Jornada	Persona arrastrada por la corriente de un río.
21/09/2008	SONORA/Navojoa	La Jornada	Persona arrastrada por la corriente de un río.
13/10/2008	SONORA/Álamos	La Jornada	Personas arrastradas por la corriente de un río.
20/10/2009	SONORA/Nácori Chico	La Jornada	Un hombre arrastrado por la corriente al cruzar un río crecido a caballo.
11/08/2011	CHIHUAHUA/Madera	La Jornada	Intensas corrientes de agua derrumbaron un puente vehicular.
28/07/2012	SONORA/Hermosillo	La Jornada	2 niños arrastrados por la corriente del arroyo Las Víboras mientras jugaban. Al parecer el nivel del arroyo aumento súbitamente.
23/08/2012	SONORA/Bacanora	La Jornada	Al menos 200 familias quedaron incomunicadas por la destrucción de puentes y tramos de la carretera.

4.2.2. Región hidrológica número 24, Bravo-Conchos

- **Descripción de la región**

Se localiza al Norte del país en la parte central de América del Norte, su cauce principal es el Río Bravo que comprende desde las ciudades del paso Texas y Ciudad Juárez Chihuahua, hasta su desembocadura en el Golfo de México. Conforman parte de las entidades mexicanas de Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León y Tamaulipas, y tiene una superficie de 226 275 km^2 . La región 24, Bravo-Conchos está integrada por 37 cuencas hidrológicas las cuales se agrupan en 7 subregiones hidrológicas: Río conchos, Presa Amistad, Río Medio Bravo, Bravo Conchos, Río Álamo, Río San Juan y Río Bajo Bravo (SEGOB, 2011).

4.2.3. Región hidrológica número 25, San Fernando-Soto la Marina

- **Descripción de la región**

Esta región también se conoce como “Golfo Norte” y corresponde a todos los escurrimientos que desembocan en el golfo de México, las cuales se encuentran entre las cuencas del río Bravo y Panuco, tiene una superficie de 54 961 km^2 y abarca porciones del estado de Nuevo León y Tamaulipas, pero el 80.26% de su superficie corresponde a este último estado. Está conformada por las cuencas Laguna de San Andrés- Laguna de Morales, Río Soto la Marina, Río San Fernando y Laguna Madre (SEMARNAT, 2014).

4.2.4. Antecedentes de la región 24 y 25, Huracán “Alex”

De acuerdo con la base de datos de DESINVENTAR, la mayoría de los municipios que comprenden la región 24 y 25, presentaron avenidas torrenciales el 1° de Julio del 2010, esto debido a que el 30 de junio del 2010 se presentó el fenómeno meteorológico más poderoso y devastador que haya vivido la entidad de Nuevo León y parte del estado de Tamaulipas.

El huracán “Alex”, un ciclón tropical formado en el Mar Caribe causó severos daños en la infraestructura carretera, hidráulica, educativa, de vivienda y de salud. En los primeros 15 días de Julio se realizó una evaluación inicial de los daños, que dio lugar a tres declaratorias de desastre, la primera para 21 municipios, la segunda de 22 y la tercera de 6 más, para un total de 49 municipios afectados de acuerdo con el primer informe de gobierno del estado de Nuevo León en el año 2010.



Figura 20. El paso del Huracán Alex por el Río Santa Catarina bajo el puente del Papa. (TELEDIARIO, 2015).

4.3. Aplicación de la metodología propuesta

Como se mencionó anteriormente es importante preparar toda aquella información ráster antes de su debido proceso, para el caso del modelo digital de elevación de las 3 regiones hidrológicas se utilizó una resolución de 120 m, el cual fue descargado del portal de INEGI: (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>).

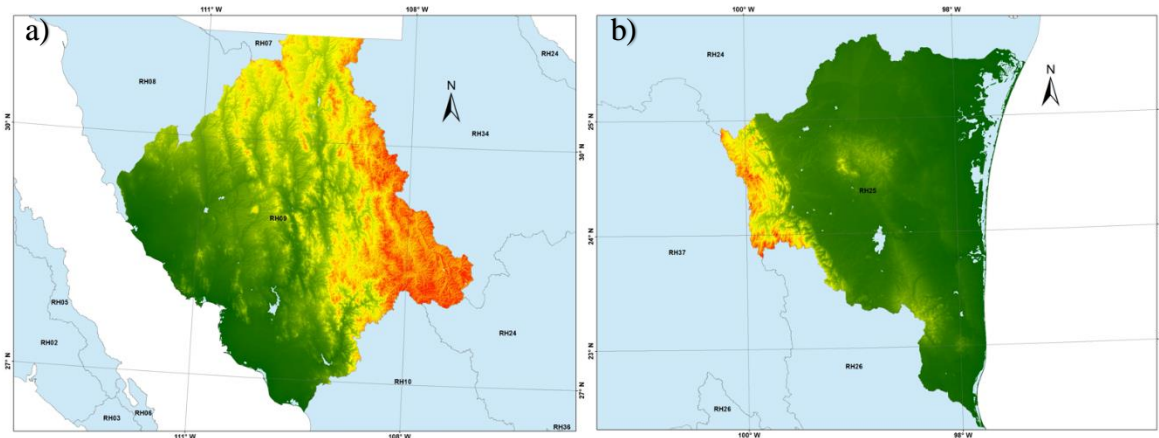


Figura 21. a) Región hidrológica número 9 y b) Región hidrológica 25, sin cuerpos de agua y corregidas.

La debida corrección de posibles sumideros y picos que pueda presentar el modelo digital de elevación puede ser llevada a cabo mediante distintas herramientas, dependiendo del programa SIG, pero para este caso se utilizó la herramienta “Fill Sinks” de SAGA GIS⁵, la cual utiliza un algoritmo propuesto por Wang y Liu (2006), que identifica y rellena depresiones superficiales en modelos digitales de elevación conservando una pendiente descendente a lo largo de la trayectoria de flujo.

En la figura 21 se observan las regiones hidrológicas 9 y 25, con su respectiva corrección de posibles picos y sumideros en conjunto con la extracción de cuerpos de agua.

⁵ SAGA GIS por su acrónimo en inglés (*System for Automated Geoscientific Analyses*) es un software híbrido de información geográfica. Para más información sobre este programa y las herramientas que lo componen puede consultar su página web: <http://www.saga-gis.org/en/index.html>

Para la región hidrológica 24 Bravo Conchos, se optó por utilizar 3 de sus subregiones hidrológicas, esto debido a que la mayoría de los eventos registrados se encuentran por lo regular en la zona que comprenden las 3 subregiones hidrológicas: Río Medio Bravo, Río Álamo y Río San Juan, (ver figura 22).

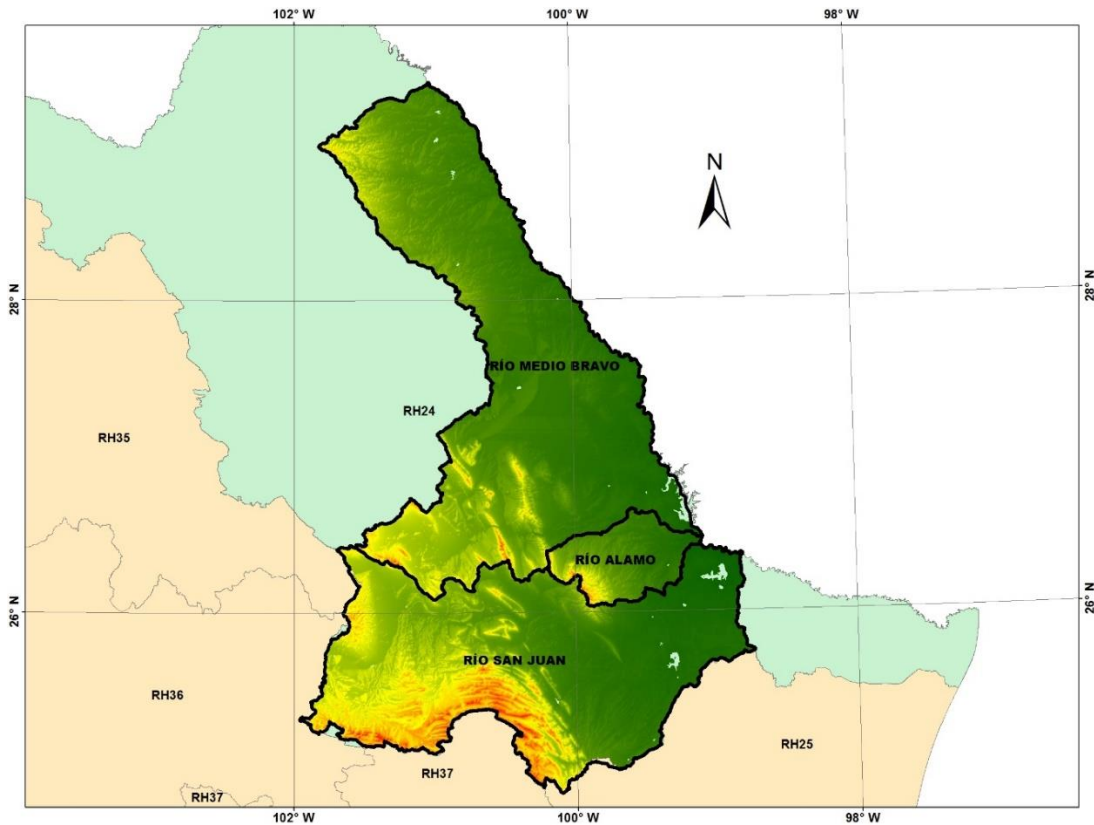


Figura 22. Subregiones Hidrológicas Río Medio Bravo, Río Álamo y Río San Juan sin cuerpos de agua y corregidas.

Antes de obtener nuestros escurrimientos, primero tenemos que calcular la precipitación efectiva por cada región, para esto necesitamos el NC de cada región en formato ráster y a la misma resolución que el modelo digital de elevación. La precipitación es importante dividirla entre 10 para tenerla en mm/hr, y una vez hecho esto, procesar cada malla de lluvia para obtener la precipitación efectiva de cada región hidrológica.

4.3.1. Obtención de la precipitación efectiva

La obtención de la precipitación efectiva se llevó a cabo mediante una rutina hecha en Python para cada malla de lluvia diaria desde el año 2000 hasta el año 2017, el método del NC descrito anteriormente, fue el que se utilizó para el respectivo cálculo de la precipitación efectiva y las imágenes para cada región hidrológica del NC se muestran a continuación en la figura 23.

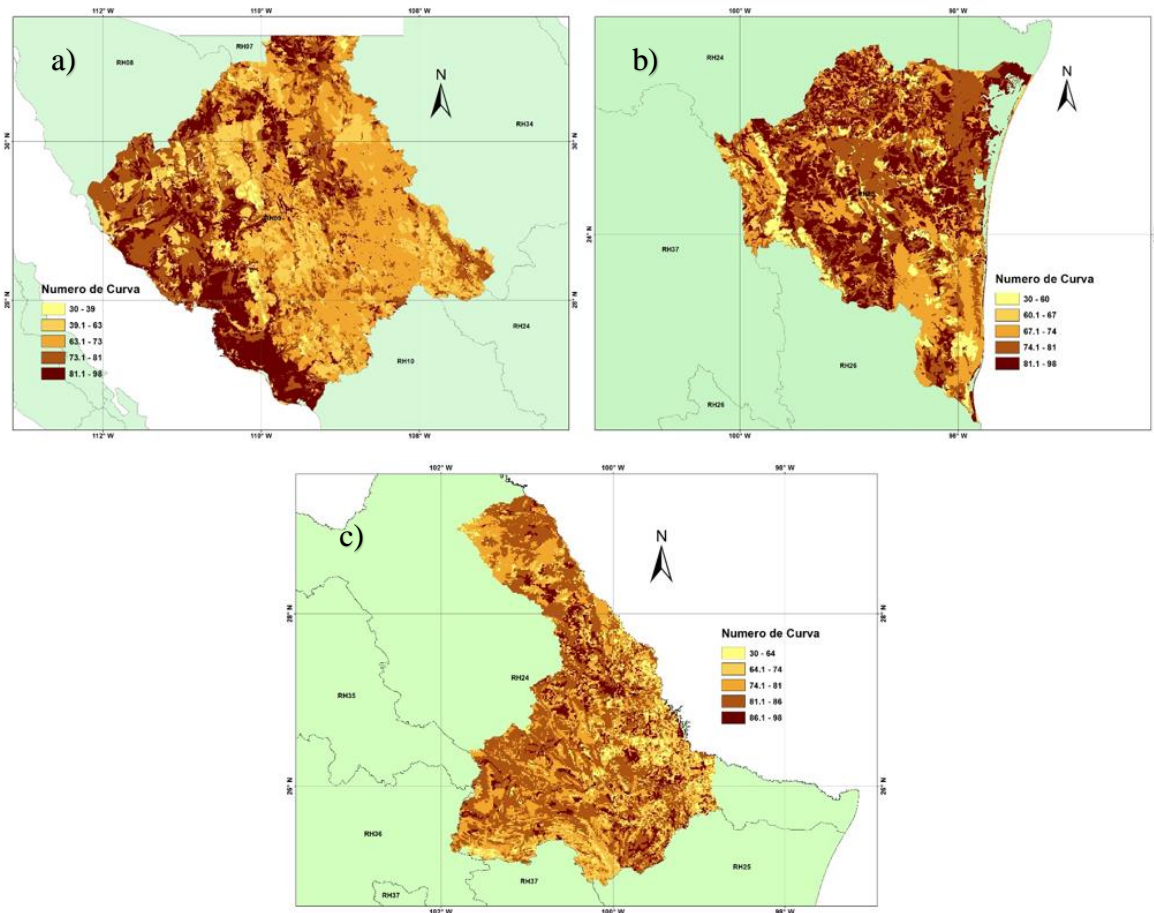


Figura 23. Número de Curva para las regiones hidrológicas a) 9, b) 25 y c) para las 3 subregiones hidrológicas de la región 24.

Es importante resaltar que entre más chico es el NC, mayor infiltración, así puede suceder que a pesar de que haya un fuerte pendiente o una fuerte lluvia puede que la mayoría del agua se infiltre.

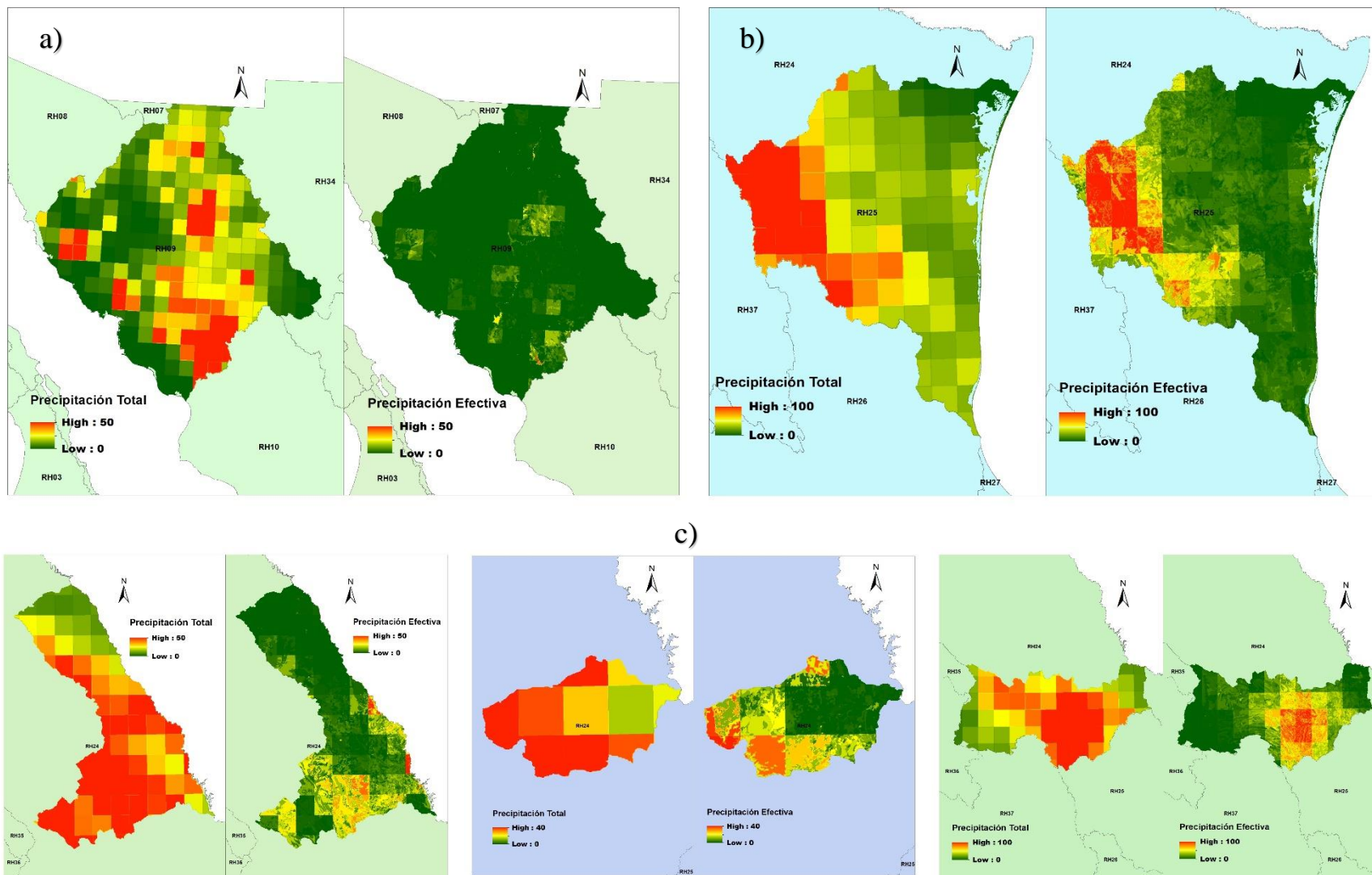


Figura 24. Precipitación total y efectiva para las regiones hidrológicas a) 9, b)25 y c) 3 subregiones hidrológicas de la región 24.

En la figura 24 se puede observar la comparación entre la precipitación total (lado izquierdo) y la precipitación efectiva (lado derecho) de cada una de las regiones en estudio. En un tono que va de rojo a verde se pueden apreciar las precipitaciones que van de mayor a menor magnitud y como se puede ver en la precipitación efectiva de cada región tiende a diluirse el tono rojo por lo que no toda la lluvia va a escurrir. En la región 9, se tomó la lluvia del día 9 de septiembre del 2002 para mostrar el ejemplo, mientras que para la región 25 y las 3 subregiones de la región 24, se tomó la lluvia del 2 de Julio del 2010 fecha por la cual el huracán “Alex” se presentó en estas zonas.

4.3.2. Obtención del volumen de escurrimiento

Generar un flujo acumulado de lluvia o de volumen para este caso, puede ser llevado a cabo mediante distintos programas SIG que cuentan con sus respectivas herramientas para realizarlo; sin embargo, no todos los programas tienen diferentes métodos de acumulación y por lo regular la mayoría de ellos, suele utilizar solo el D8 descrito anteriormente.

Para llevar a cabo esta tarea se utilizó la herramienta “*Flow Accumulation (Top Down)*” del software SAGA GIS, debido a que cuenta con una gran variedad de métodos de acumulación, entre ellos el “*Multiple Triangular Flow Direction*” MD_{∞} (Seibert y McGlynn, 2007), que también nos arroja el volumen de escurrimiento directamente sin tener que multiplicar el área por la precipitación antes.

Es importante tener la precipitación efectiva en metros para que al multiplicarla por al área nos dé el volumen en metros cúbicos, por lo que cada malla de lluvia fue dividida entre 1000 antes de ser acumulada.

El proceso de acumulación para cada malla de lluvia fue llevado a cabo mediante un programa generado en SAGA CMD⁴, por el cual el programa trabaja grandes cantidades de datos para cada una de sus herramientas.

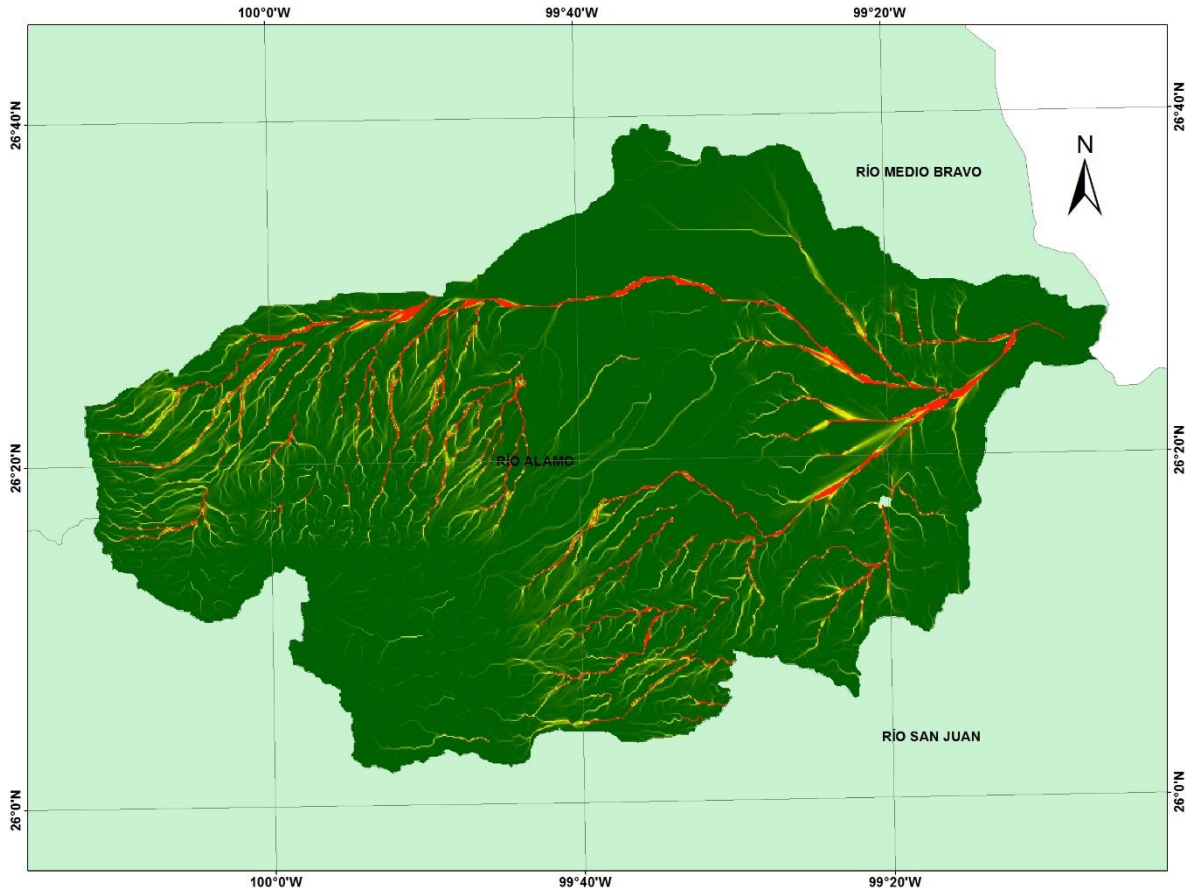


Figura 25. Volumen de escurrimiento de la subregión Río Álamo.

En la figura 25, se muestra el volumen de escurrimiento del 2 de Julio del 2010 para la subregión Río Álamo, que debido a que es la más pequeña de las regiones, puede apreciarse de mejor manera los distintos flujos de escurrimiento que la componen, de los cuales se puede observar que los de mayor magnitud (tono rojo), tienden a concentrarse en las partes más bajas y en los principales cauces de la región.

⁴ SAGA CMD es una interfaz de línea de comando para ejecutar módulos de SAGA. Su propósito es automatizar tareas escribiendo guiones o ejecutar módulos de SAGA desde otra aplicación. Para más información: <https://sourceforge.net/p/saga-gis/wiki/Executing%20Modules%20with%20SAGA%20CMD/>

4.3.3. Obtención del tiempo de concentración

Para obtener el tiempo de concentración fue necesario crear para cada malla de lluvia un ráster de flujo acumulado siguiendo la trayectoria más larga con el mismo método de acumulación que se utilizó para el volumen de escurrimiento, solo que a diferencia de este en lugar de acumular el peso dado de cada malla de lluvia, se acumuló el tiempo de concentración dado por la longitud y la pendiente de cada celda, en base al modelo digital de elevación previamente corregido, siguiendo el método de Kirpich (ver ecuación 8).

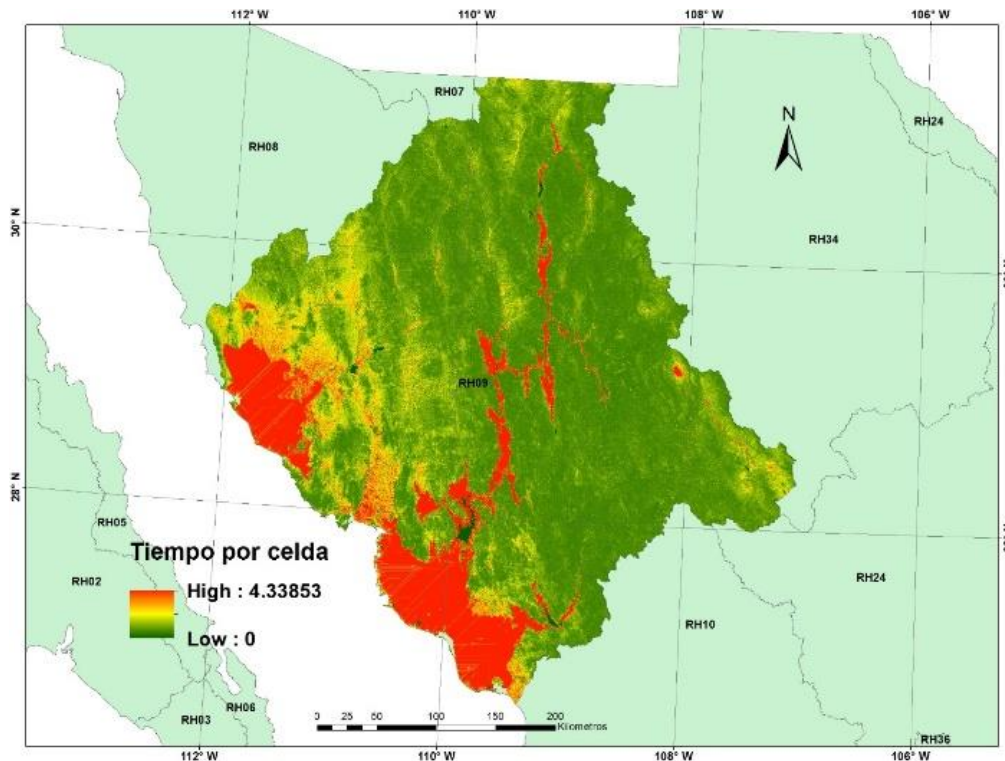


Figura 26. Tiempo de concentración por celda en la región 9.

En la figura 26 tenemos el tiempo calculado por celda para la región 9, el cual se puede apreciar que los tiempos más altos se encuentran en lo que son las zonas más bajas o planas de la región. Esto debido a que las pendientes en estas zonas suelen ser suaves por lo que los tiempos son más largos y lo mismo pasa en las demás regiones (figura 27).

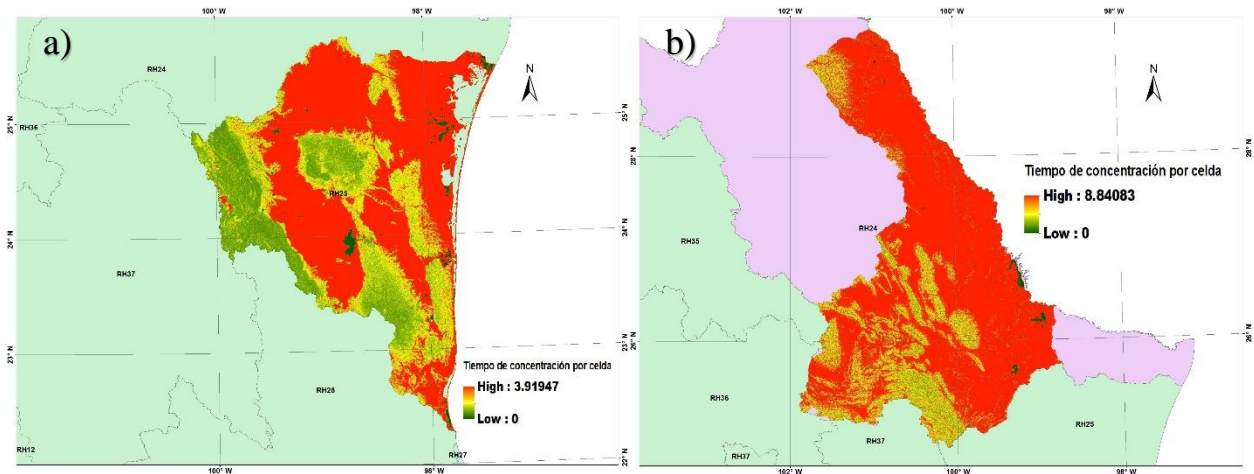


Figura 27. Tiempo de concentración por celda en la región a) 25 y b) subregiones de la región 24.

Ya calculados los tiempos por celda para cada región, se realizó la acumulación siguiendo la trayectoria más larga del flujo acumulado, es importante mencionar que, a diferencia del volumen de escurrimiento el tiempo de concentración no toma en cuenta todas aquellas celdas que le puedan aportar un determinado tiempo, sí no que toma solo aquellas celdas que le aporten los tiempos más grandes conforme a la trayectoria más larga.

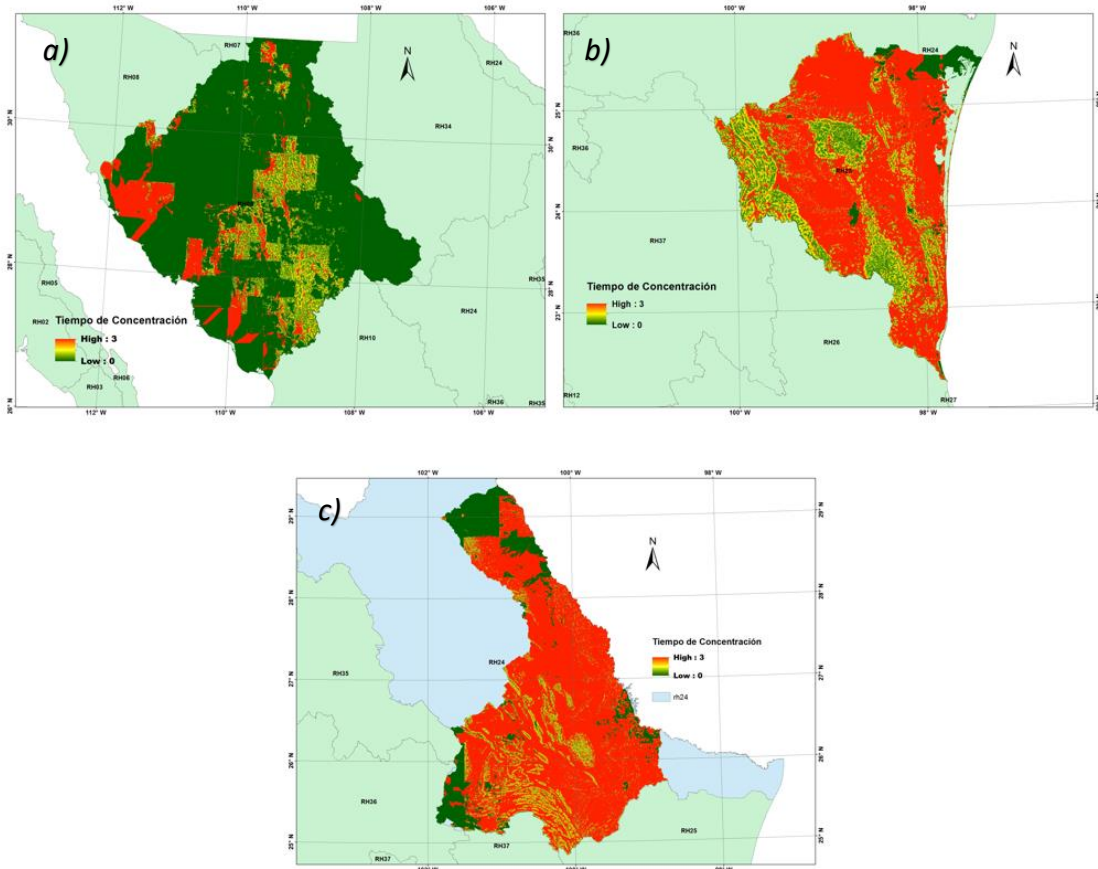


Figura 28. Tiempo de concentración acumulado conforme a la trayectoria más larga en: a) región 9, b) región 25 y c) subregiones de la región 24.

En la figura 28 se muestran las regiones hidrológicas con sus respectivos tiempos de concentración acumulados, en los cuales están marcados en un tono rojo aquellos que van de las 3 horas en adelante y que por consiguiente son aquellos tiempos que se van a descartar al momento de calcular los gastos para cada lluvia. En la región 9 se muestra el tiempo de concentración del día 9 de septiembre del 2002, mientras que para las demás regiones se muestra el tiempo de concentración del día 2 de Julio del 2010.

4.3.4. Obtención del tiempo pico (t_p), volumen mínimo de escurrimiento y Gasto Pico

- Tiempo pico (t_p).

Antes de calcular el tiempo pico para cada malla de lluvia, es importante tener el tiempo de concentración previamente limitado a 3 horas, para esto se realizó un programa en Python donde se condicionaron todos aquellos tiempos de concentración mayores a 3 horas a valores nulos, para que con esto obliguemos a los índices de inundación súbita tener tiempos de concentración no mayores a 3 horas. Realizado el condicional, pasamos a obtener nuestra duración en exceso con las ecuaciones 9 y 10, la cual es necesaria para calcular el tiempo pico.

El tiempo pico es calculado con la ecuación 6, en la cual el tiempo de retraso quedara definido por el producto entre el tiempo de concentración por 0.6 (ecuación 7), por lo que tendremos 2 tiempos picos para cada malla de lluvia de diferente duración en exceso (ecuación 9 y 10), sin embargo, el tiempo pico que nos interesa es el de menor duración, por lo que se tomó el tiempo pico de menor duración para calcular el gasto.

- Volumen mínimo de escurrimiento.

Para establecer un volumen mínimo de escurrimiento se tomó el producto entre al área (área por celda) y una altura mínima de 0.25 m. Esto con la finalidad de descartar posibles volúmenes de escurrimiento bajos que al evaluarse en los índices de inundación podrían arrojar resultados tan altos que pueden confundirse con zonas de inundación súbita. Para esto de igual manera se realizó un condicional en el cual todas aquellas celdas que no cumplieran con el volumen mínimo de escurrimiento ($3681.79 m^3$), se tomaran como valores nulos.

- Obtención del gasto pico (Q_p).

Una vez calculados el tiempo pico y el volumen mínimo de escurrimiento se procedió a calcular el gasto pico para cada malla, este como bien lo marca la ecuación 11, se obtiene dividiendo la precipitación por el área (volumen mínimo de escurrimiento) entre el tiempo pico, el cual multiplicado por 3600 nos va a dar el gasto en metros cúbicos sobre segundos.

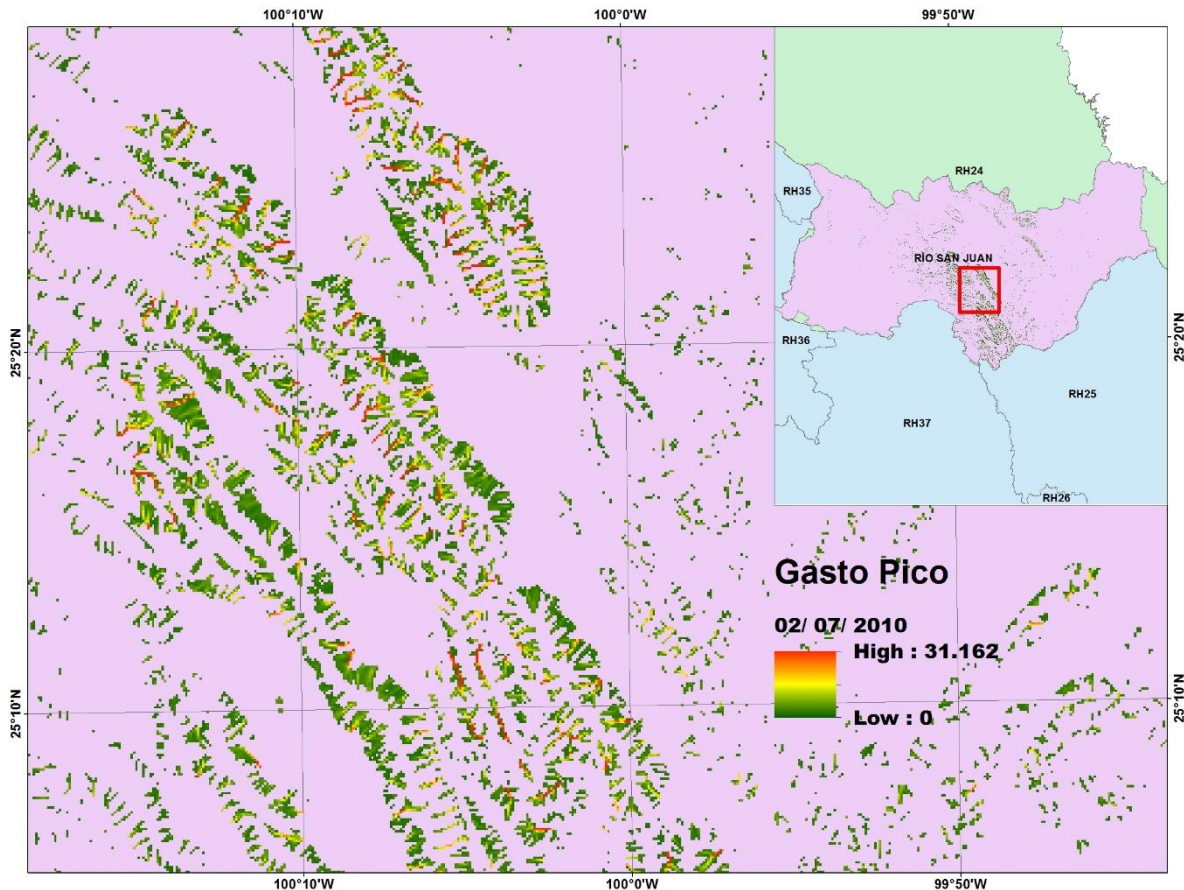


Figura 29. Gasto pico en la subregión Río San Juan el día 2 de Julio del 2010.

En la figura 29 se observa el gasto pico del día 2 de Julio del 2010 en la subregión Río San Juan que va hasta los 31.162 m^3/s y en la cual se pueden empezar apreciar las posibles zonas con peligro de avenidas súbitas debido a los fuertes gastos presentados ese día.

4.3.5. Cálculo de los parámetros K, M y R

Para el cálculo de los parámetros K, M y R, simplemente se utilizaron las ecuaciones descritas en el capítulo de los antecedentes de este trabajo. Teniendo ya el tiempo pico, el volumen mínimo de escurrimiento y el gasto pico, se procedió a aplicar las ecuaciones 14, 16 y 20 respectivamente.

Es importante remarcar que el área al que hacen referencia estas ecuaciones es el área que tenemos por celda (14727.2 m^2) y el volumen pico para el caso de la ecuación 20 de R, se obtiene sustituyendo el tiempo base t_b por el tiempo pico t_p (ecuación 2).

En el cálculo de cada uno de los parámetros se fueron generando los parámetros de mayor intensidad a lo largo de los 18 años, con la finalidad de utilizarlos al momento del cálculo de los factores de gravedad relativa. En la figura 30 se muestran los parámetros K, M Y R de mayor magnitud a una escala de color igual para la subregión Rio Medio Bravo, en el parámetro M para este caso se denota con una mayor intensidad.

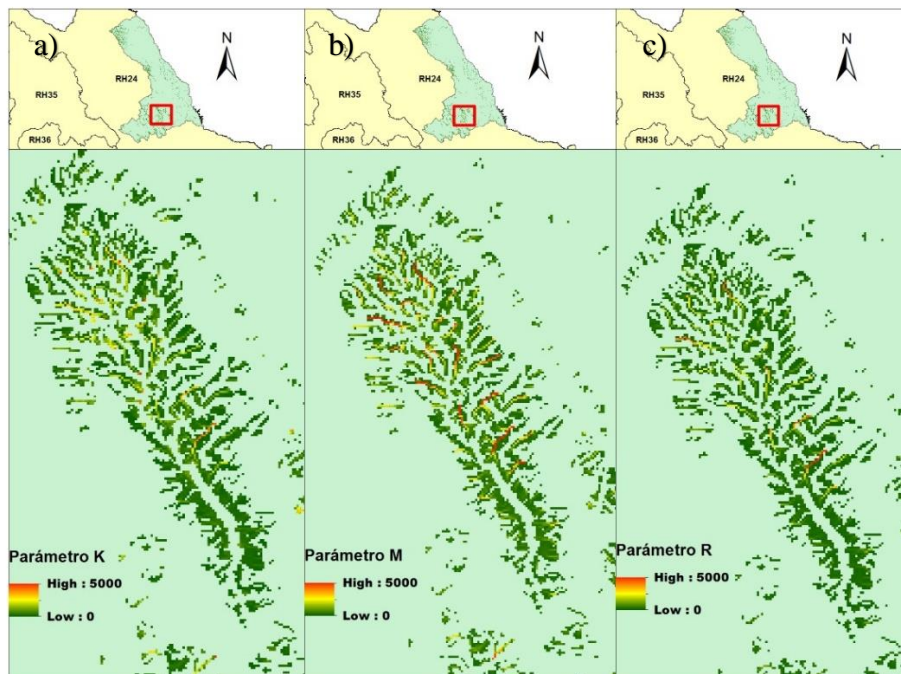


Figura 30. Parámetros a) K, b) M y c) R de mayor magnitud en la subregión Rio Medio Bravo.

4.3.6. Cálculo de los factores de gravedad relativa FK, FM Y FR

Después de realizar el cálculo de los parámetros, se fueron obteniendo los de mayor magnitud, es decir K mayor, M mayor y R mayor en cada una de las regiones y para todos los años. Para el cálculo de los factores de gravedad relativa solo es cuestión de dividir cada parámetro obtenido entre los parámetros de mayor magnitud (ecuación 17), esto además de normalizar cada uno de los parámetros, nos da una idea de que factor de gravedad relativa es el que puede estar pesando más en el índice de inundación súbita, la figura 31 podemos observar los 3 factores de gravedad relativa para el índice 2004/07/13 en la región 9.

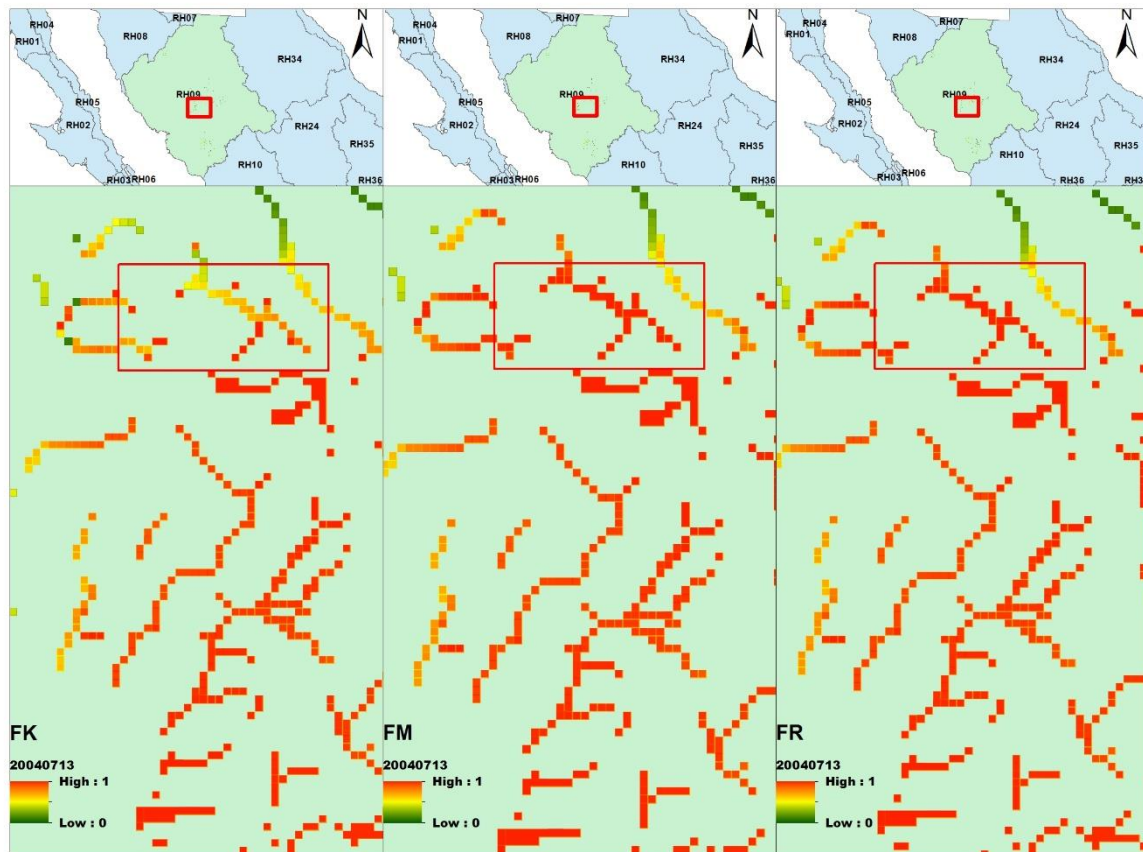


Figura 31. Factores de gravedad relativa del día 13 de Julio del 2004 en la región 9.

La diferencia entre los factores de gravedad relativa puede llegar a ser tan mínima que espacialmente no se alcanzaría a notar, en la figura 31 se puede apenas y apreciar en el recuadro de color rojo que el factor FK tiene una magnitud menor en algunas zonas en comparación con el factor FM y FR que prácticamente son muy parecidos.

4.3.7. Cálculo del índice de inundación súbita

Como se mencionó anteriormente el cálculo del índice de inundación súbita es determinado por el producto de los tres factores de gravedad relativa elevados a una determinada potencia que representa el peso dado para cada factor (ecuación 21), en este caso cada uno de los factores fue elevado a 0.33 dando así el mismo peso a los tres y multiplicándolos por 100 para tenerlos en porcentaje quedando de la siguiente manera:

$$FFI = (FK^{0.33} * FM^{0.33} * FR^{0.33}) * 100 \dots (26)$$

En las siguientes figuras se muestran algunos de los resultados arrojados en los días en que DESINVENTAR registro eventos por avenidas torrenciales en la región numero 9 (ver tabla 4). Y para la región 25 y las subregiones Rio Medio Bravo, Rio Álamo y Rio San Juan, se muestran los resultados arrojados del día 1 de Julio del 2010, fecha en que se presentó el huracán “Alex” en estas zonas.

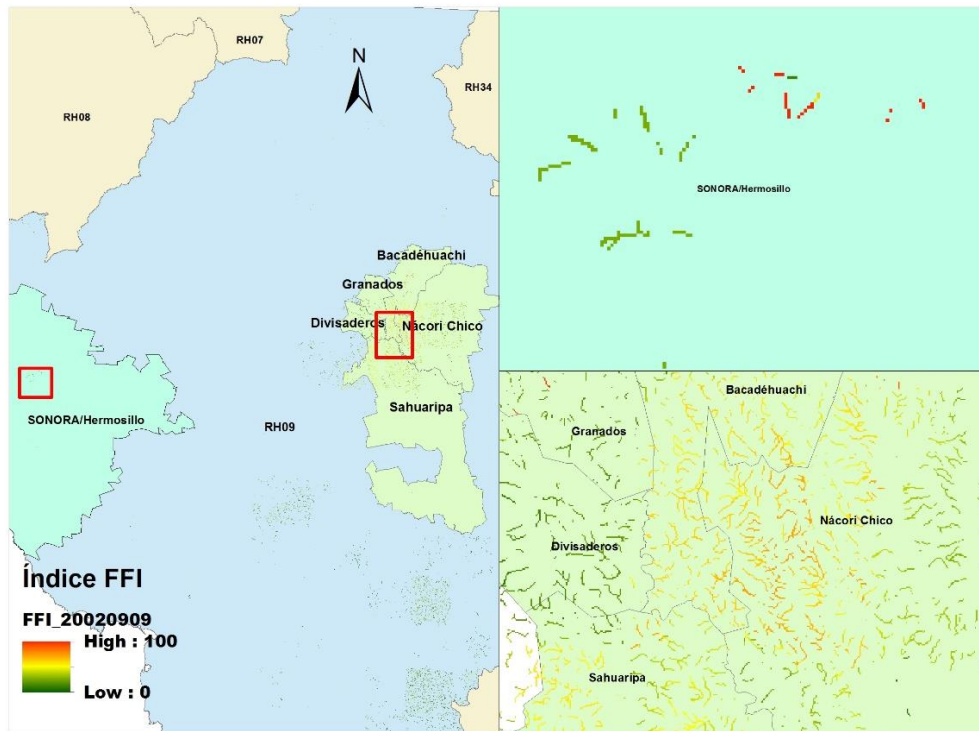


Figura 32. Índice flash flood del día 09/09/2002.

Es importante recordar que es necesario tomar el índice un día después de la fecha registrada por DESINVENTAR, debido a lo antes explicado en el apartado de los datos meteorológicos de este trabajo, por lo que en la figura 32 se muestra el índice resultante del día 9 de septiembre del 2002 y no del 8 de septiembre del 2002, día registrado por DESINVENTAR.

Si bien el evento registrado por DESINVENTAR marca una avenida súbita en el municipio de Hermosillo Sonora en esta fecha (8 de septiembre del 2002), en la figura 32 se puede apreciar que los municipios con una mayor área afectada en ese día fueron: Bacadéhuachi, Nácori Chico y Sahuaripa. Esto puede suceder debido a que en DESINVENTAR solo se tienen registros de aquellas zonas donde hubo afectaciones, mas no de las zonas donde se pudieron presentar avenidas súbitas sin causar daños.

A pesar de que el área afectada en el municipio de Hermosillo Sonora es relativamente pequeña en comparación con el área afectada de los demás municipios, se muestra un fuerte índice de inundación que va del 80 al 100 %, suficiente para decirnos que ahí se presentó una avenida súbita. En la figura 33 se pueden apreciar los índices resultantes en las fechas registradas por DESINVENTAR en la región 9.

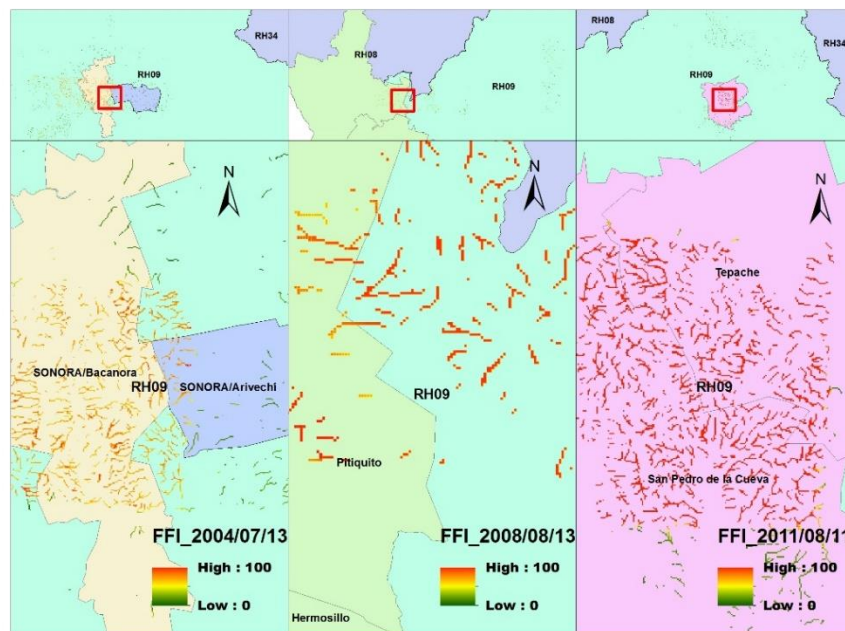


Figura 33. Resultado del FFI en fechas registradas por DESINVENTAR.

Uno de los índices más fuertes fue precisamente el que se presentó el 1 de Julio del 2010 en las zonas de las subregiones Río Medio Bravo, Río Álamo y Río San Juan (ver Figura 34). La mayoría de los índices de fuerte magnitud por lo regular se presentaron en zonas con más altitud y a pesar de que al área afectada no fue la misma en las 3 subregiones, son áreas de gran tamaño que van de los 412, 360 m^2 en la subregión Río Medio Bravo, hasta 490.798 km^2 en la subregión Río San Juan, para esta fecha y con índices del 75% al 100%.

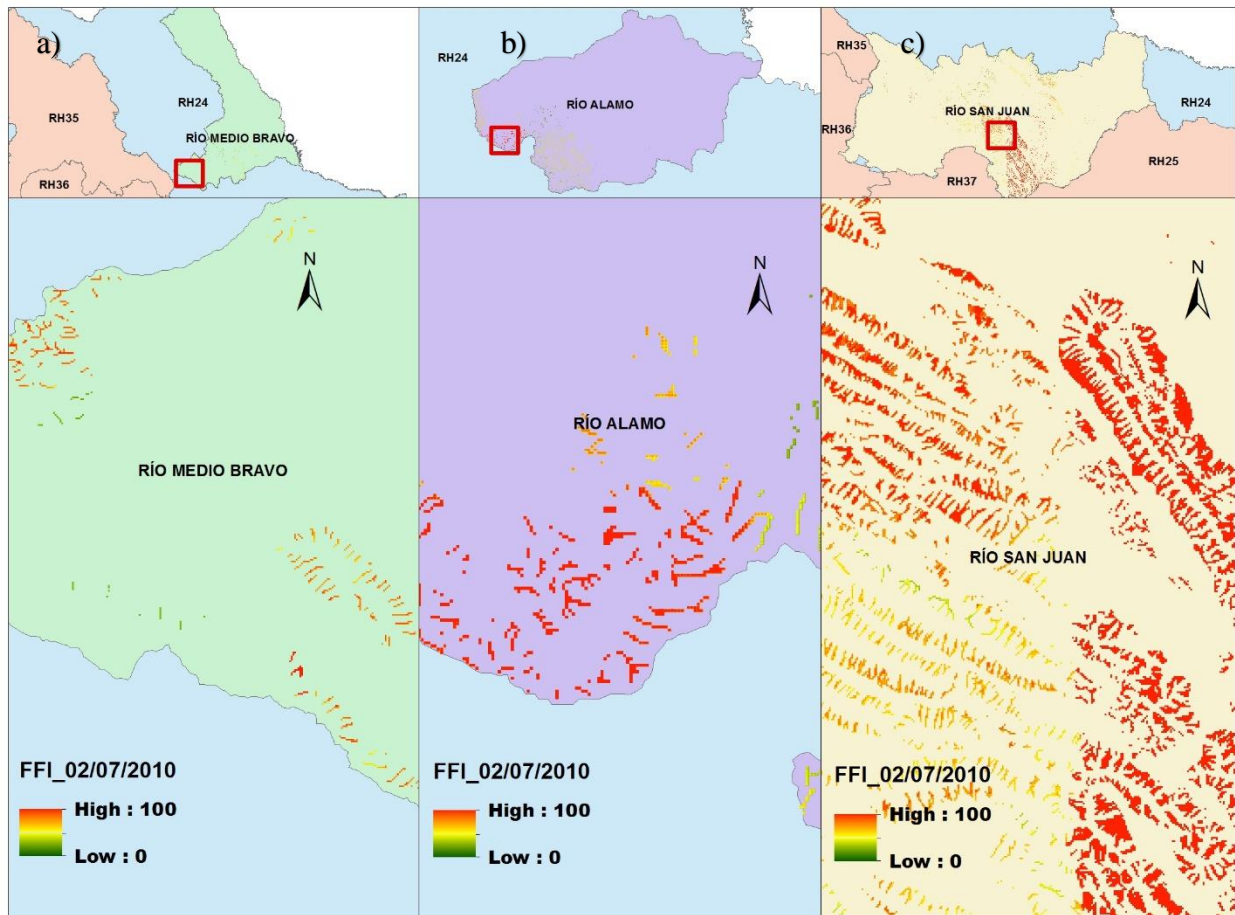


Figura 34. Índices obtenidos en la fecha del 2 de Julio del 2010 para las 3 subregiones de la región 24, a) Río Medio Bravo, b) Río Álamo y c) Río San Juan.

En la región número 25 San Fernando-Soto la Marina, gran parte de los índices más fuertes se concentraron en la parte izquierda (ver Figura 35), siendo la región con una mayor área de afectación (2159.316 km²) el día 1 de Julio del 2010, con índices entre 70% y 100%.

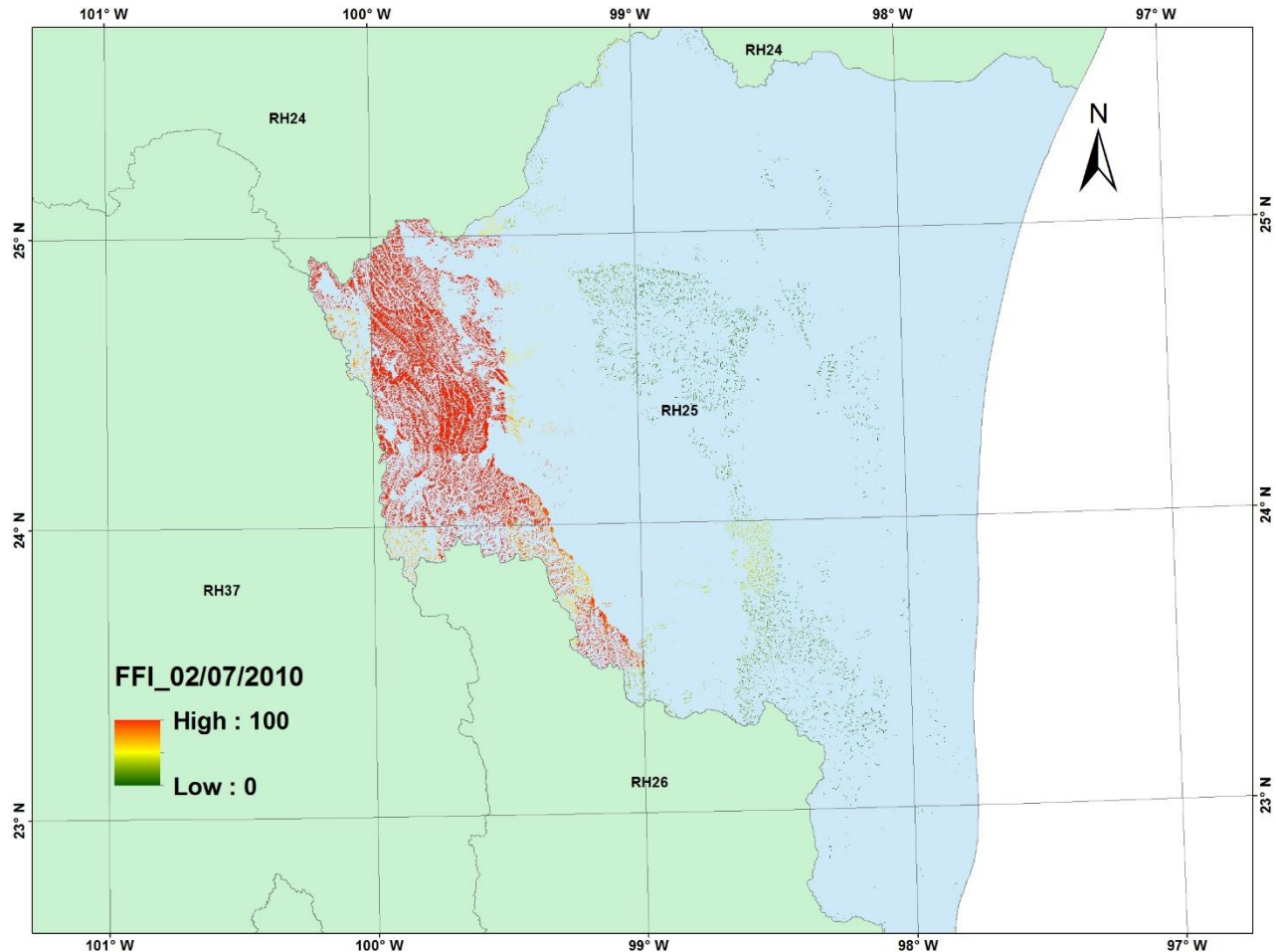


Figura 35. Índices obtenidos en la región 25 para el día 1 de Julio del 2010.

Como se observa en la figura 21 correspondiente a la región 25, se puede constatar que esta zona tiene una mayor elevación, además los números de curva rondaron en su mayoría entre 70 y 98 para esta zona, que significa que casi no hubo infiltración de agua (ver figura 24) por lo que puede ser considerada una zona con un alto peligro de avenidas súbitas.

4.4. Obtención de tasas de excedencia

Para determinar las zonas potenciales de avenidas súbitas es necesario saber que tan recurrente es el evento en un lugar, una manera de llevar a cabo esta tarea es mediante la obtención de tasas de excedencia que nos permiten darnos una idea de que tanto se ha repetido el fenómeno en determinados lugares durante los 18 años.

En el caso de este trabajo se realizó un conteo de todos aquellos índices que estuviesen arriba o igual al 80%, para después dividirlo entre los 18 años que se están trabajando y así obtener una tasa de excedencia histórica.

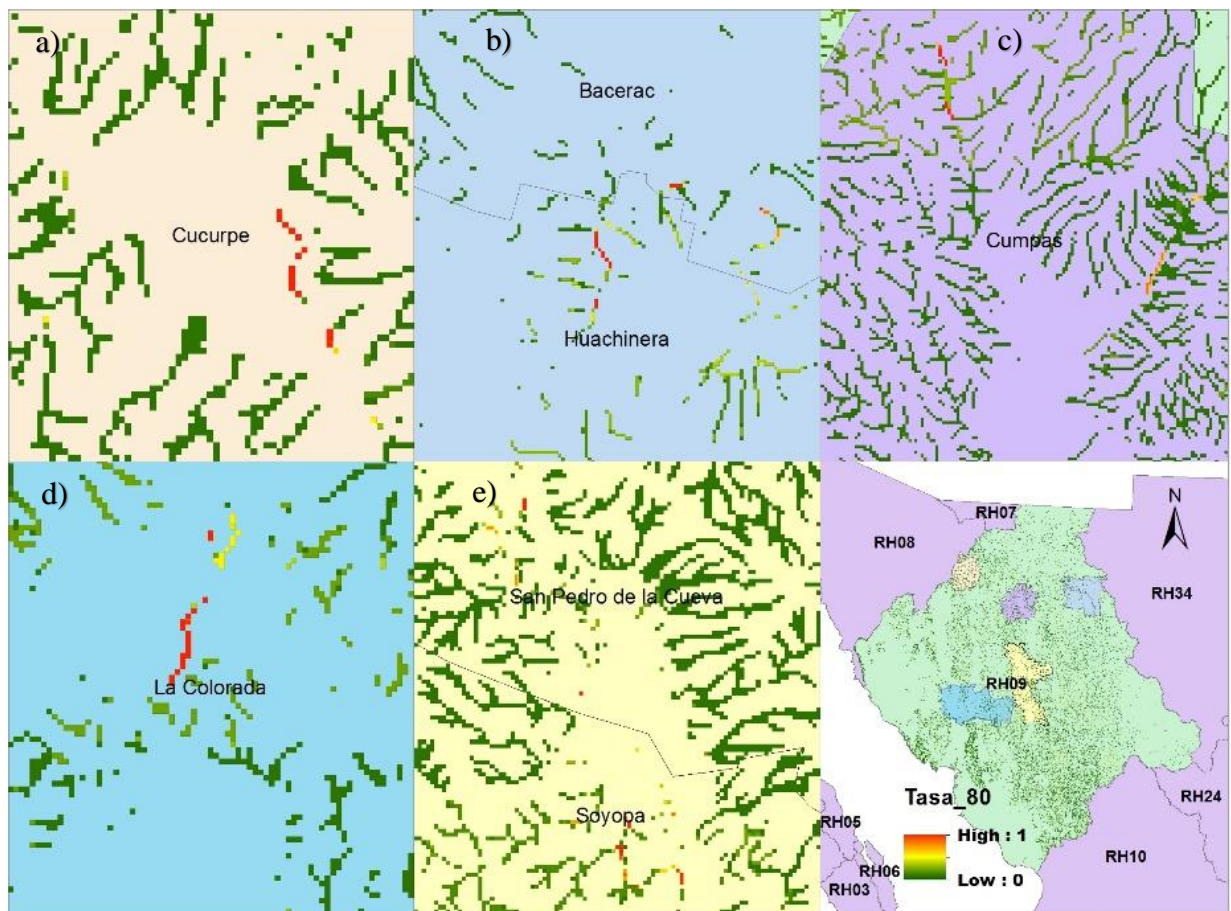


Figura 36. Municipios con una mayor tasa de excedencia en la región número 9.

En la Figura 36 se muestran algunas de las zonas donde se obtuvieron tasas mayores o iguales a 1 en la región número 9, es decir aquellas zonas donde se obtuvieron índices por arriba o iguales al 80% por lo menos una vez cada año (ver Tabla 5).

Tabla 5. Municipios con una mayor tasa de excedencia en la región 9 y posible área de peligro.

Letra	Municipios	Tasa Máxima Obtenida	Posible Área de Peligro.
a)	Cucurpe	1	191453.6 m ²
b)	Huachinera y Bacerac	1.27	250362.4 m ²
c)	Cumpas	1.27	176726.4 m ²
d)	La Colorada	1.11	235635.2 m ²
e)	Sosoya y San Pedro de la Cueva	1.94	206180.8 m ²

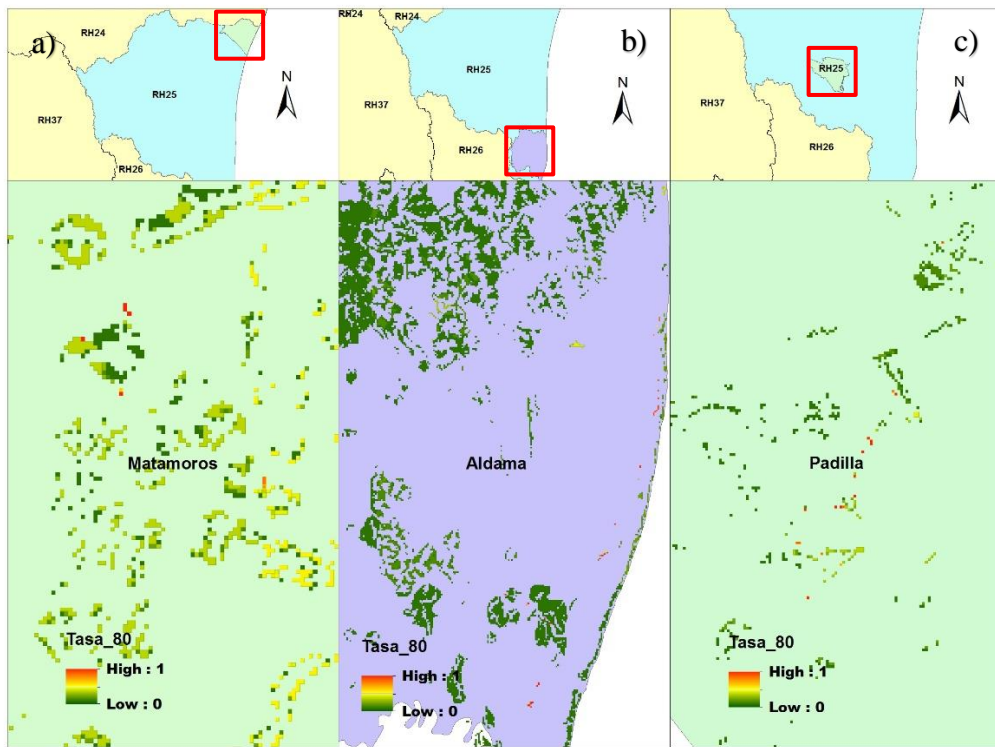


Figura 37. Municipios con una mayor tasa de excedencia en la región número 25.

Tabla 6. Municipios con una mayor tasa de excedencia en la región 25 y posible área de peligro.

Letra	Municipios	Tasa Máxima Obtenida	Posible Área de Peligro.
a)	Matamoros	1.27	88363.2 m ²
b)	Aldama	1	736360 m ²
c)	Padilla	1.27	73636 m ²

En lo que respecta a las tres subregiones Río Medio Bravo, Río Álamo y Río San Juan se obtuvieron muy pocas tasas arriba o iguales a 0.5 con áreas muy pequeñas, por lo que se optó por utilizar una tasa de 0.3 para representar aquellas zonas donde se obtuvieron índices arriba del 80%, es decir por lo menos 6 eventos en los 18 años (ver Figura 38).

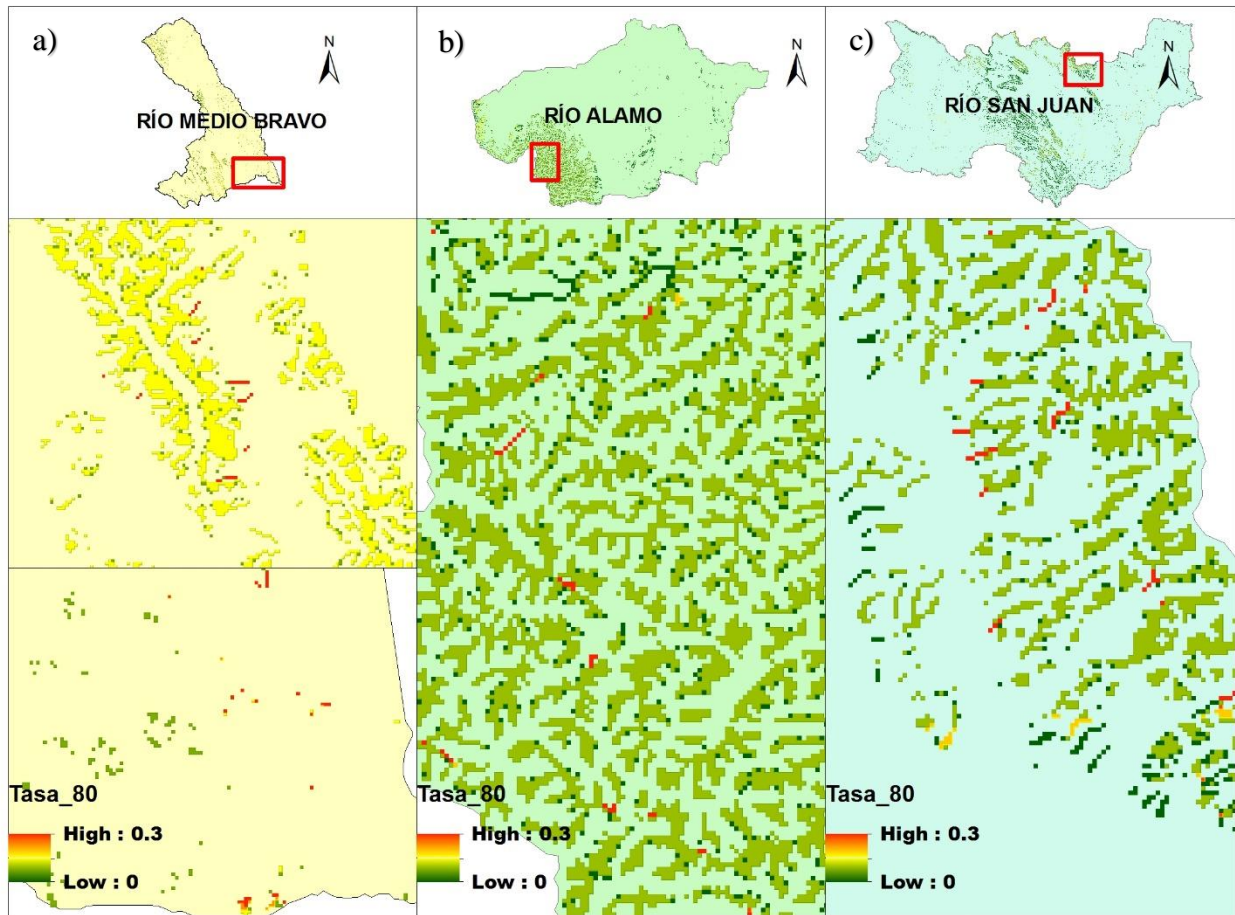


Figura 38. Zonas donde se obtuvieron tasas por arriba o igual a 0.3 en las tres subregiones.

Tabla 7. Mayor tasa de excedencia de las 3 subregiones y posible área de peligro.

Letra	Subregión	Tasa Máxima Obtenida	Posible Área de Peligro.
a)	Río Medio Bravo	0.38	191453.6 m ²
b)	Río Álamo	0.33	515452 m ²
c)	Río San Juan	0.83	132544.8 m ²

4.5. Validación de resultados

De acuerdo con la base de datos de DESINVENTAR en la región número 9 tenemos un total de 20 eventos registrados, en la región 25 once eventos y entre las 3 subregiones 60 eventos. A continuación, en las siguientes tablas y graficas se muestra una comparativa entre los eventos registrados por DESINVENTAR y los eventos obtenidos mediante la metodología de este trabajo utilizando las lluvias del TRMM por municipio y año.

- **Región número 9, Sonora Sur.**

Tabla 8. Eventos y tasas por municipio en la región 9.

Municipio	Eventos por Municipio en DESINVENTAR.	Eventos por Municipio en TRMM.	Tasa por DESINVENTAR.	TASA por TRMM.
CHIHUAHUA/Madera	1	2	0.091	0.111
SONORA/Alamos	4	4	0.364	0.222
SONORA/Arivechi	1	1	0.091	0.056
SONORA/Bacanora	1	2	0.091	0.111
SONORA/Cajeme	1	2	0.091	0.111
SONORA/Guaymas	1	2	0.091	0.111
SONORA/Hermosillo	6	8	0.545	0.444
SONORA/Moctezuma	1	1	0.091	0.056
SONORA/Nácori Chico	1	1	0.091	0.056
SONORA/Navjoa	1	1	0.091	0.056
SONORA/Rosario	2	1	0.182	0.056
TOTAL	20	25	1.818	1.389

En la Tabla 8 se muestran las tasas obtenidas de los eventos registrados por DESINVENTAR para un periodo de 11 años (2002-2012), lapso entre el primer y último evento. La tasa obtenida por TRMM fue para 18 años, lapso en el que se trabajó (2000-2017).

Los números marcados de color rojo son aquellos eventos que mediante la metodología de este trabajo no se alcanzaron a detectar, como se puede observar en el caso de Sonora/Rosario (ver Tabla 8) en el que DESINVENTAR tiene 2 eventos registrados y TRMM solo 1.

En la figura 39, se muestra una gráfica de dispersión entre las tasas de los eventos registrados y las tasas de los eventos obtenidos por TRMM, en la que se puede ver una ligera carga hacia los eventos registrados por DESINVENTAR, debido a que el lapso es más corto (2002-2012), por lo que hay una mayor tasa de excedencia con DESINVENTAR.

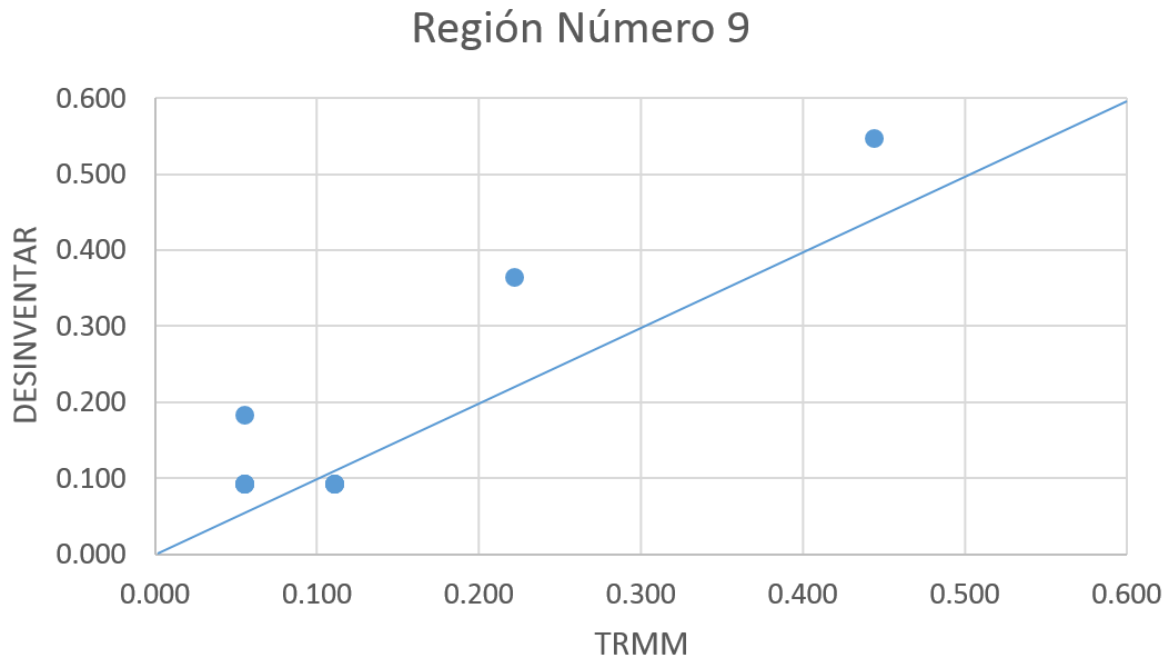


Figura 39. Gráfica de dispersión entre las tasas obtenidas por DESINVENTAR Y TRMM de los municipios en la región número 9.

En la Tabla 9 y en la figura 40 se muestran los eventos registrados por año, de los que se puede apreciar que por TRMM en algunos años se tienen más eventos.

Tabla 9. Comparativa de eventos por año en la región 9.

Número correspondiente al año	Años	Eventos por Año en DESINVENTAR.	Eventos por Año en TRMM.
1	2002	1	1
2	2003	0	0
3	2004	2	3
4	2005	0	0
5	2006	2	3
6	2007	1	1
7	2008	10	10
8	2009	1	1
9	2010	0	0
10	2011	1	2
11	2012	2	4
	TOTAL	20	25

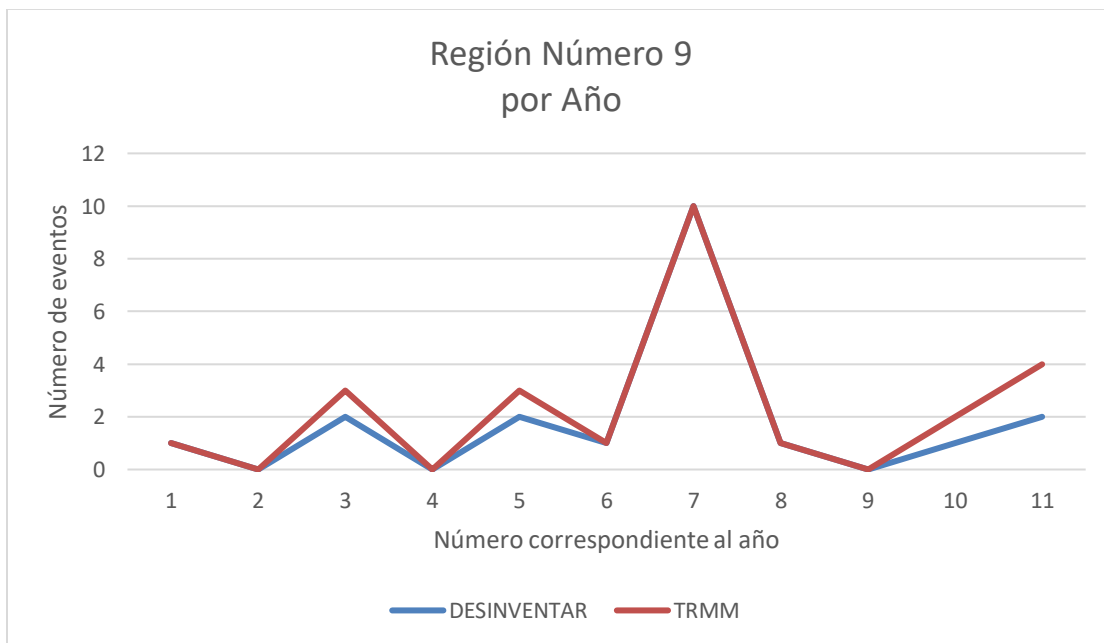


Figura 40. Gráfico de líneas para los años en los que se registraron eventos en la región 9.

En la Tabla 10 y en la gráfica de la figura 41 se muestran los eventos registrados por municipio y año, se puede observar que al igual que en las tablas anteriores tenemos en algunos casos más eventos obtenidos mediante esta metodología, esto se puede deber a que en DESINVENTAR solo se tienen registros de aquellos eventos que causaron algún tipo de daño y en color rojo se muestran los municipios y años en los que DESINVENTAR tiene un evento de más registrado.

Tabla 10. *Eventos registrados por municipio y año en la región 9.*

Número correspondiente al año	Municipio	Años	Eventos por DESINVENTAR.	Eventos por TRMM.
1	CHIHUAHUA/Madera	2011	1	2
2	SONORA/Álamos	2004	1	2
3		2008	3	2
4	SONORA/Arivechi	2004	1	1
5	SONORA/Bacanora	2012	1	2
6	SONORA/Cajeme	2008	1	2
7	SONORA/Guaymas	2008	1	2
8	SONORA/Hermosillo	2002	1	1
9		2006	1	2
10		2007	1	1
11		2008	2	2
12		2012	1	2
13	SONORA/Moctezuma	2006	1	1
14	SONORA/Nácori Chico	2009	1	1
15	SONORA/Navojoa	2008	1	1
16	SONORA/Rosario	2008	2	1
	TOTAL		20	25

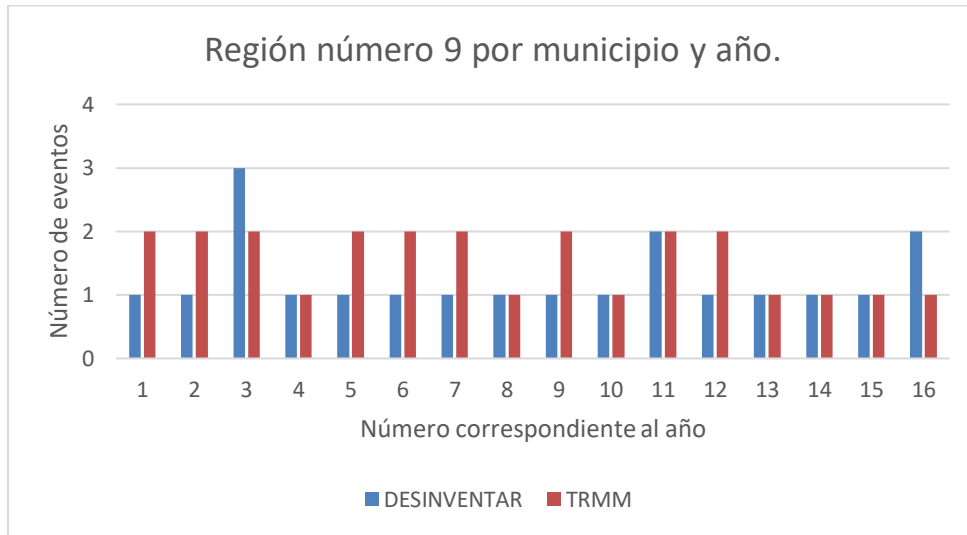


Figura 41. Gráfica de barras para los eventos por municipio y año en la región 9.

En la Tabla 11 y en la figura 42 se pueden observar los eventos resultantes para la región 25 y la comparativa con los eventos registrados por DESINVENTAR, así como sus tasas de excedencia y la gráfica correspondiente.

- **Región número 25, San Fernando-Soto la Marina.**

Tabla 11. Eventos y tasas por municipio en la región 25.

Municipio	Eventos por Municipio en DESINVENTAR.	Eventos por Municipio en TRMM.	Tasa por DESINVENTAR.	Tasa por TRMM.
NUEVO LEÓN/Aramberri	1	4	0.167	0.222
NUEVO LEÓN/China	1	2	0.167	0.111
NUEVO LEÓN/Gral. Terán	1	1	0.167	0.056
NUEVO LEÓN/Gral. Zaragoza	1	4	0.167	0.222
NUEVO LEÓN/Hualahuis	1	1	0.167	0.056
NUEVO LEÓN/Iturbide	1	1	0.167	0.056
NUEVO LEÓN/Linares	1	2	0.167	0.111
TAMAULIPAS/San Carlos	1	2	0.167	0.111
TAMAULIPAS/Victoria	2	2	0.333	0.111
TAMAULIPAS/Villagrán	1	3	0.167	0.167
TOTAL	11	22	1.833	1.222

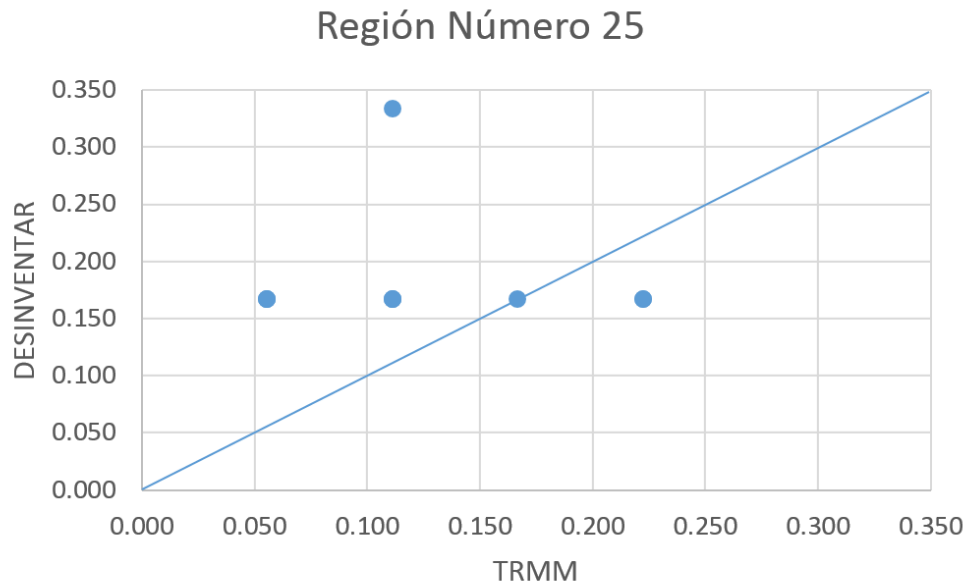


Figura 42. Gráfica de dispersión entre las tasas obtenidas por DESINVENTAR Y TRMM de los municipios de la región número 25.

En la Tabla 12 y en la figura 43 se muestra una comparativa entre los eventos registrados por DESINVENTAR y TRMM en la región 25 por año, en la que prácticamente se obtuvo el doble de eventos en el año 2010.

Tabla 12. Comparativa de eventos por Año en la región 25.

Número correspondiente al año	Años	Eventos por Año en DESINVENTAR.	Eventos por Año en TRMM
1	2005	1	2
2	2006	0	0
3	2007	1	3
4	2008	2	2
5	2009	0	0
6	2010	7	15
	TOTAL	11	22

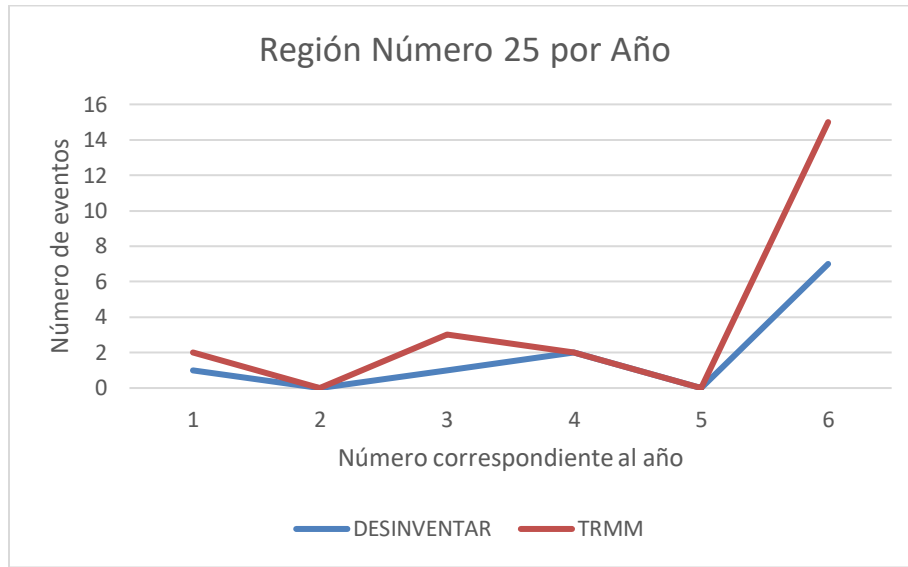


Figura 43. Gráfico de líneas para los años en los que se registraron eventos en la región 25.

En la Tabla 13 y en la figura 44 se pueden observar los eventos resultantes por el TRMM y por DESINVENTAR por año y municipio en la región 25, como se puede apreciar es mayor el número de eventos registrados por el TRMM, debido a que como antes se explicó DESINVENTAR no tiene registros de eventos que no causaran algún tipo de daño por infraestructura o pérdidas humanas.

Tabla 13. Eventos registrados por municipio y año en la región 25.

Número correspondiente al año	Municipio	Años	Eventos por DESINVENTAR.	Eventos por TRMM.
1	NUEVO LEÓN/Aramberri	2010	1	4
2	NUEVO LEÓN/China	2010	1	2
3	NUEVO LEÓN/Gral. Terán	2010	1	1
4	NUEVO LEÓN/Gral. Zaragoza	2010	1	4
5	NUEVO LEÓN/Hualahuisés	2010	1	1
6	NUEVO LEÓN/Iturbide	2010	1	1
7	NUEVO LEÓN/Linares	2010	1	2
8	TAMAULIPAS/San Carlos	2005	1	2
9	TAMAULIPAS/Victoria	2008	2	2
10	TAMAULIPAS/Villagrán	2007	1	3
	TOTAL		11	22

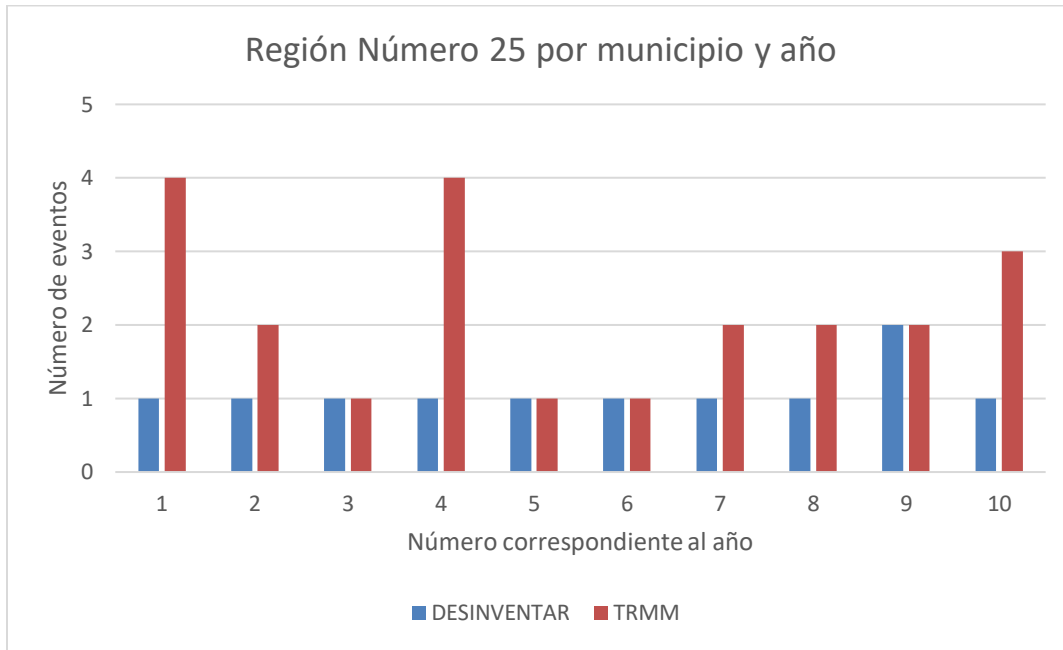


Figura 44. Gráfica de barras para los eventos por municipio y año en la región 25.

En la tabla 14 y en la figura 45 se muestra la comparativa entre el número de eventos registrados por TRMM y DESINVENTAR para los municipios de las tres subregiones de la región 24, así como sus tasas de excedencia y la gráfica correspondiente.

- **Subregiones Rio Medio Bravo, Rio Álamo y Rio San Juan**

Tabla 14. Eventos y tasas por municipio en las tres subregiones

Región	Municipio	Eventos por Municipio en DESINVENTAR.	Eventos por Municipio en TRMM.	Tasa por DESINVENTAR.	TASA por TRMM.
SRH01	NUEVO LEÓN/Anáhuac	1	1	0.143	0.056
SRH01	NUEVO LEÓN/Bustamante	1	1	0.143	0.056
SRH01	NUEVO LEÓN/Lampazos de Naranjo	1	1	0.143	0.056
SRH01	NUEVO LEÓN/Mina	1	1	0.143	0.056
SRH01	NUEVO LEÓN/Parás	1	1	0.143	0.056
SRH01	NUEVO LEÓN/Sabinas Hidalgo	1	1	0.143	0.056
SRH01	NUEVO LEÓN/Vallecillo	1	1	0.143	0.056
SRH01	NUEVO LEÓN/Villaldama	1	1	0.143	0.056
SRH02	NUEVO LEÓN/Agualeguas	1	1	0.143	0.056
SRH02	NUEVO LEÓN/Cerralvo	1	1	0.143	0.056
SRH02	NUEVO LEÓN/Gral. Treviño	1	1	0.143	0.056
SRH02	NUEVO LEÓN/Parás	1	1	0.143	0.056

SRH02	NUEVO LEÓN/Sabinas Hidalgo	1	1	0.143	0.056
SRH02	NUEVO LEÓN/Salinas Victoria	1	1	0.143	0.056
SRH02	NUEVO LEÓN/Vallecillo	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/Abasolo	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/Aguaqueguas	1	3	0.143	0.167
SRH03	NUEVO LEÓN/Allende	1	2	0.143	0.111
SRH03	NUEVO LEÓN/Apodaca	3	3	0.429	0.167
SRH03	NUEVO LEÓN/Cadereyta Jiménez	1	2	0.143	0.111
SRH03	NUEVO LEÓN/Carmen	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/Cerralvo	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/China	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/Ciénega de Flores	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/Dr. Coss	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/Dr. González	1	2	0.143	0.111
SRH03	NUEVO LEÓN/García	1	2	0.143	0.111
SRH03	NUEVO LEÓN/Gral. Bravo	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/Gral. Escobedo	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/Gral. Terán	1	2	0.143	0.111
SRH03	NUEVO LEÓN/Gral. Treviño	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/Gral. Zuazua	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/Guadalupe	5	6	0.714	0.333
SRH03	NUEVO LEÓN/Hidalgo	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/Higueras	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/Juárez	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/Los Aldamas	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/Los Herreras	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/Los Ramones	1	2	0.143	0.111
SRH03	NUEVO LEÓN/Marín	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/Melchor Ocampo	1	0	0.143	0.000
SRH03	NUEVO LEÓN/Mina	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/Montemorelos	2	3	0.286	0.167
SRH03	NUEVO LEÓN/Monterrey	2	4	0.286	0.222
SRH03	NUEVO LEÓN/Pesquería	2	3	0.286	0.167
SRH03	NUEVO LEÓN/Salinas Victoria	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/San Nicolás de los Garza	2	2	0.286	0.111
SRH03	NUEVO LEÓN/San Pedro Garza García	1	1	0.143	0.056
SRH03	NUEVO LEÓN/Santa Catarina	1	3	0.143	0.167
SRH03	NUEVO LEÓN/Santiago	1	2	0.143	0.111
	TOTAL	60	75	8.571	4.167

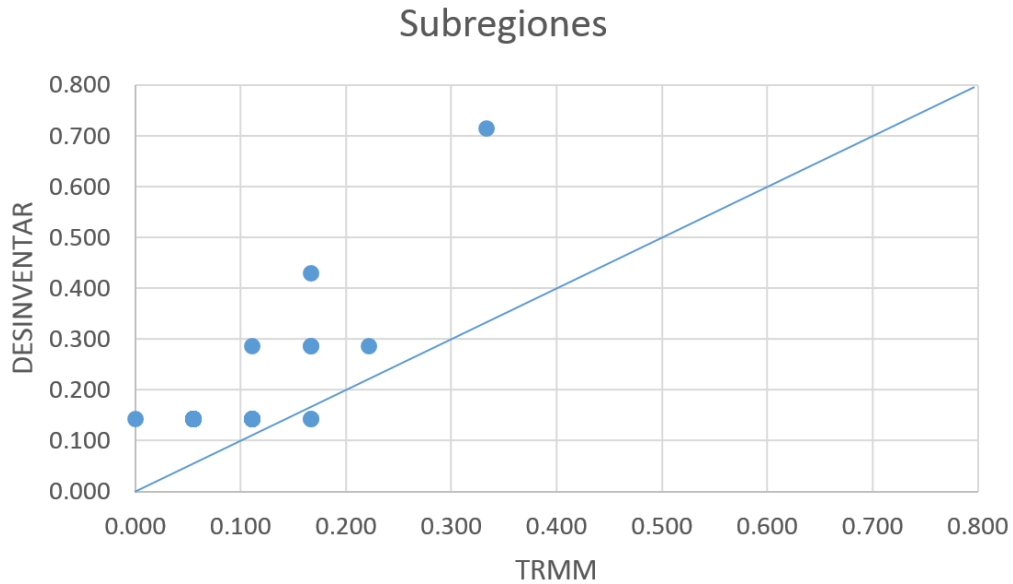


Figura 45. Gráfica de dispersión entre las tasas obtenidas por DESINVENTAR Y TRMM de los municipios de las tres subregiones de la región 24.

De igual manera se puede apreciar una ligera carga en la gráfica de dispersión hacia los eventos registrados por DESINVENTAR, R qué cómo se mencionó anteriormente, su lapso es más corto por lo que las tasas de excedencia suelen ser mayores que las detectadas con esta metodología.

En la Tabla 15 y en la figura 46 se muestra la comparativa entre los eventos registrados por DESINVENTAR y los eventos obtenidos por TRMM por año.

Tabla 15. Comparativa de eventos por año en las tres subregiones.

Número correspondiente al año	Región	Años	Eventos por Año en DESINVENTAR.	Eventos por Año en TRMM.
1	SRH01	2010	8	8
2	SRH02	2010	7	7
3	SRH03	2005	2	2
4	SRH03	2006	0	0
5	SRH03	2007	2	2
6	SRH03	2008	5	5
7	SRH03	2009	0	0
8	SRH03	2010	35	50
9	SRH03	2011	1	1
		TOTAL	60	75

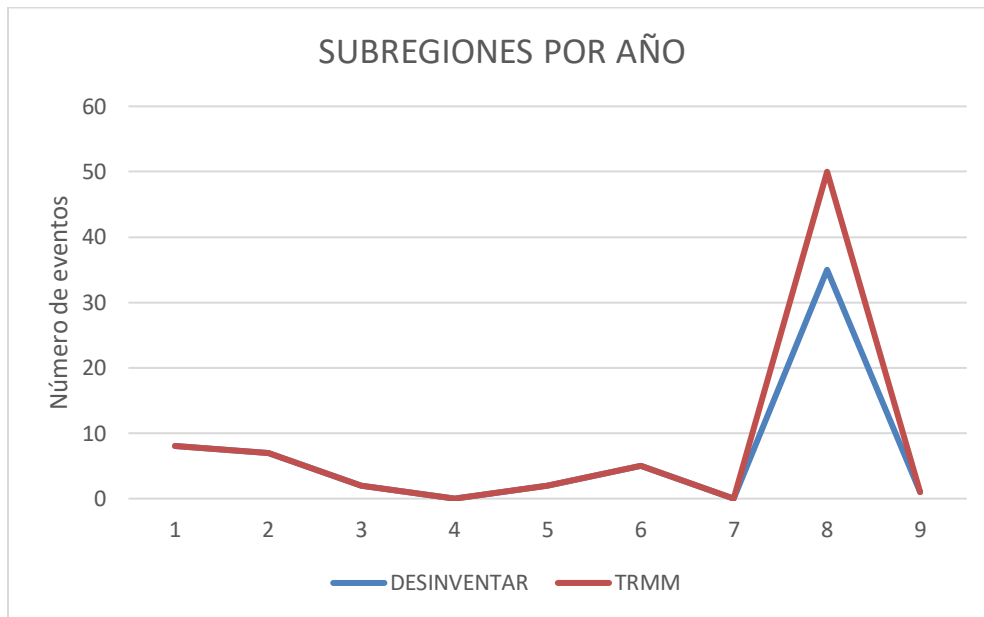


Figura 46. Gráfico de líneas para los años en los que se registraron eventos en las tres subregiones.

A diferencia de la gráfica de dispersión por municipio se puede apreciar que en esta grafica los resultados suelen ser más similares, por lo que por año esta metodología está detectando los eventos registrados por DESINVENTAR.

En la tabla 16 y en la figura 47 se observa la comparativa entre los eventos registrados por DESINVENTAR y TRMM por año y municipio en las que de igual manera se puede apreciar que con la metodología aplicada se están detectando la mayoría de los eventos.

Tabla 16. Eventos registrados por municipio y año en las tres subregiones.

Número correspondiente al año	Región	Municipio	Años	Eventos por DESINVENTAR	Eventos por TRMM
1	SRH01	NUEVO LEÓN/Anáhuac	2010	1	1
2	SRH01	NUEVO LEÓN/Bustamante	2010	1	1
3	SRH01	NUEVO LEÓN/Lampazos de Naranjo	2010	1	1
4	SRH01	NUEVO LEÓN/Mina	2010	1	1
5	SRH01	NUEVO LEÓN/Parás	2010	1	1
6	SRH01	NUEVO LEÓN/Sabinas Hidalgo	2010	1	1
7	SRH01	NUEVO LEÓN/Vallecillo	2010	1	1
8	SRH01	NUEVO LEÓN/Villaldama	2010	1	1
9	SRH02	NUEVO LEÓN/Agualeguas	2010	1	1
10	SRH02	NUEVO LEÓN/Cerralvo	2010	1	1
11	SRH02	NUEVO LEÓN/Gral. Treviño	2010	1	1

12	SRH02	NUEVO LEÓN/Parás	2010	1	1
13	SRH02	NUEVO LEÓN/Sabinas Hidalgo	2010	1	1
14	SRH02	NUEVO LEÓN/Salinas Victoria	2010	1	1
15	SRH02	NUEVO LEÓN/Vallecillo	2010	1	1
16	SRH03	NUEVO LEÓN/Abasolo	2010	1	1
17	SRH03	NUEVO LEÓN/Agualeguas	2010	1	3
18	SRH03	NUEVO LEÓN/Allende	2010	1	2
19	SRH03	NUEVO LEÓN/Apodaca	2008	1	1
20	SRH03		2010	1	1
21	SRH03		2011	1	1
22	SRH03	NUEVO LEÓN/Cadereyta Jiménez	2010	1	2
23	SRH03	NUEVO LEÓN/Carmen	2010	1	1
24	SRH03	NUEVO LEÓN/Cerralvo	2010	1	1
25	SRH03	NUEVO LEÓN/China	2010	1	1
26	SRH03	NUEVO LEÓN/Ciénega de Flores	2010	1	1
27	SRH03	NUEVO LEÓN/Dr. Coss	2010	1	1
28	SRH03	NUEVO LEÓN/Dr. González	2010	1	2
29	SRH03	NUEVO LEÓN/García	2010	1	2
30	SRH03	NUEVO LEÓN/Gral. Bravo	2010	1	1
31	SRH03	NUEVO LEÓN/Gral. Escobedo	2010	1	1
32	SRH03	NUEVO LEÓN/Gral. Terán	2010	1	2
33	SRH03	NUEVO LEÓN/Gral. Treviño	2010	1	1
34	SRH03	NUEVO LEÓN/Gral. Zuazua	2010	1	1
35	SRH03	NUEVO LEÓN/Guadalupe	2005	2	2
36	SRH03		2008	2	2
37	SRH03		2010	1	2
38	SRH03	NUEVO LEÓN/Hidalgo	2010	1	1
39	SRH03	NUEVO LEÓN/Higueras	2010	1	1
40	SRH03	NUEVO LEÓN/Juárez	2010	1	1
41	SRH03	NUEVO LEÓN/Los Aldamas	2010	1	1
42	SRH03	NUEVO LEÓN/Los Herreras	2010	1	1
43	SRH03	NUEVO LEÓN/Los Ramones	2010	1	2
44	SRH03	NUEVO LEÓN/Marín	2010	1	1
45	SRH03	NUEVO LEÓN/Melchor Ocampo	2010	1	0
46	SRH03	NUEVO LEÓN/Mina	2010	1	1
47	SRH03	NUEVO LEÓN/Montemorelos	2008	1	1
48	SRH03		2010	1	2
49	SRH03	NUEVO LEÓN/Monterrey	2007	1	1
50	SRH03		2010	1	3
51	SRH03	NUEVO LEÓN/Pesquería	2008	1	1
52	SRH03		2010	1	2
53	SRH03	NUEVO LEÓN/Salinas Victoria	2010	1	1
54	SRH03	NUEVO LEÓN/San Nicolás de los Garza	2007	1	1
55	SRH03		2010	1	1
56	SRH03	NUEVO LEÓN/San Pedro Garza García	2010	1	1
57	SRH03	NUEVO LEÓN/Santa Catarina	2010	1	3
58	SRH03	NUEVO LEÓN/Santiago	2010	1	2
		TOTAL		60	75

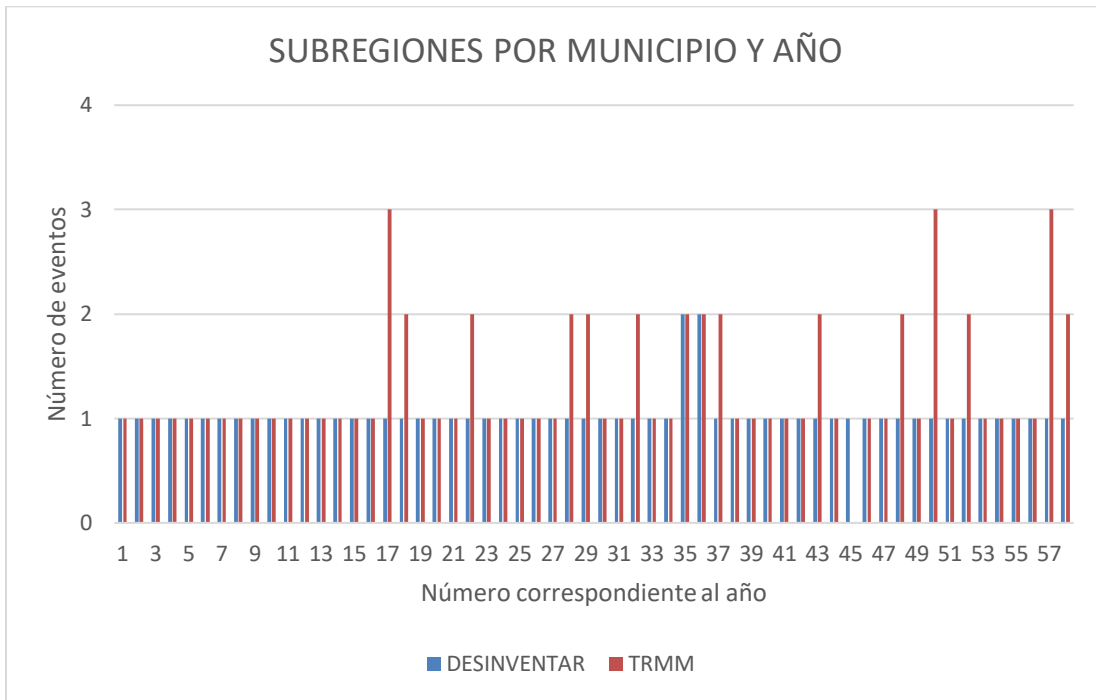


Figura 47. Gráfica de barras para los eventos por municipio y año en la región 24.

Como se puede observar en la mayoría de los casos desde la región 9, la región 25 y las 3 subregiones de la región 24, tenemos un mayor número de eventos obtenidos mediante esta metodología, como ya se mencionó anteriormente la base de datos de DESINVENTAR solo cuenta con registros de aquellos eventos que causaron algún tipo de daño por lo que esta puede ser la razón principal por la que la cual se estén detectando una mayor cantidad de eventos, además el lapso de tiempo que se está manejando para validar es más corto que el de la Metodología y no es porque en DESINVENTAR no se tengan más años con los cuales comparar, si no que en años atrás no hay registros por avenidas súbitas por lo que la base de datos para validar no está del todo completa

Capítulo 5. Conclusiones

Las avenidas súbitas son fenómenos hidrometeorológicos a los que se les ha dado poco énfasis en México, por lo cual no hay mucha información sobre este tipo de fenómenos, salvo que la información haya repercutido en daños a la infraestructura o en pérdidas humanas. Debido a esto es difícil tener una mayor precisión de la metodología empleada en este trabajo, sin embargo, se puede apreciar que en las tablas y graficas comparativas correspondientes a cada región de la sección 4.5, la mayoría de los eventos registrados por DESINVENTAR fueron detectados. En donde se detectaron más de los eventos registrados es debido a que en la base de datos solo se cuenta con registros de aquellos eventos donde se causó algún tipo de daño, por lo que los demás eventos pueden estar ocurriendo en lugares donde no haya infraestructura alguna como: barrancas, colinas, abanicos aluviales etc.

Es importante mencionar que aquellos eventos no detectados, no es porque no hayan ocurrido, si no que la metodología empleada en este trabajo está utilizando lluvias a cada 24 horas, y por lo general estos eventos suelen ocurrir con lluvias más convectivas, es decir de mucha intensidad, poca duración y en áreas más pequeñas, por lo que no se estarían alcanzando a detectar este tipo de lluvias, lo que implicaría trabajar con mallas de lluvias a un lapso más corto de tiempo.

Otro factor el cual se puede mejorar es la resolución tanto del modelo digital de elevación como de las mallas de lluvia, al utilizar mallas de lluvia a un lapso más corto de tiempo, lo ideal sería contar con una mejor resolución de estas y así poder detectar aquellas lluvias que aún que hayan ocurrido en zonas muy pequeñas, sean lo suficientemente fuertes como para provocar una avenida súbita. Y en lo que se refiere al modelo digital de elevación una mejor resolución vertical sería lo ideal, esto con la finalidad de tener una mejor precisión a la hora de obtener los escurrimientos, con lo que una mínima diferencia decantaría las posibles direcciones de flujo sin tener que generar continuidad de flujos en zonas planas.

Finalmente, la metodológica empleada cumple con el objetivo de este trabajo, ya que probó ser efectiva en la detección de las posibles zonas con peligro de inundación súbita mediante el análisis espacial que permita validar los resultados, es posible mejorar esta metodología teniendo regiones previamente aforadas, cuyos datos sean regulares y de largo plazo, con la finalidad de obtener intensidad de lluvia que nos diga que tanto llueve en determinado tiempo y con lo que incluso podríamos hacer una comparación de resultados entre el índice implementado por B-S Kim y H-S Kim, 2013 y el índice de Kim y Choi, 2015 utilizado en este trabajo.

La detección de las posibles zonas con peligro de avenidas súbitas para algunas regiones de la República Mexicana mediante esta metodología puede llevarse a cabo para cualquier otra zona siempre y cuando se cuente con la información necesaria. Es importante mencionar que si bien se pueden conocer aquellos lugares con peligro de inundaciones súbitas mediante un análisis espacial es tarea de las autoridades correspondientes llevar a cabo otras posibles medidas de prevención con la finalidad de seguir reduciendo los daños.

Anexos

A continuación, se muestran las rutinas en Python para calcular el volumen de escurrimiento, los parámetros K,M Y R, los factores de gravedad relativa FK,FM Y FR, los índices de inundación súbita y por ultimo las tasas de excedencia.

a) Cálculo del volumen de escurrimiento mediante al archivo por lotes de Saga Gis.

```
set PATH=%PATH%;C:\SAGA

set FECHA=2017

set Region=RH25

set WORK=C:\Av_subitas\Regiones\%Region%\PN_MET\%FECHA%

set SAVE=C:\Av_subitas\Regiones\%Region%\Vol_Esc\%FECHA%

FOR /F %i IN ('dir /b %WORK%\*.img') DO (

saga_cmd grid_calculus 1 ^
-GRIDS="%WORK%\%~ni.img" ^
-RESULT="C:\Av_subitas\Regiones\%Region%\Vol_Esc\%FECHA%\Result.sgrd" ^
-FORMULA="(g1/1000)"

saga_cmd ta_hydrology 0 ^
-ELEVATION="C:\Av_subitas\Regiones\%Region%\Region\rh25_fill.grd" ^
-WEIGHTS="C:\Av_subitas\Regiones\%Region%\Vol_Esc\%FECHA%\Result.sgrd" ^
-FLOW="C:\Av_subitas\Regiones\%Region%\Vol_Esc\%FECHA%\Acc.sgrd" ^
-FLOW_UNIT=1 ^
-METHOD=5

saga_cmd io_grid 2 ^
-GRID="C:\Av_subitas\Regiones\%Region%\Vol_Esc\%FECHA%\Acc.sgrd" ^
-FILE="%SAVE%\ESC_VC_%~ni.grd"
)

PAUSE
```

b) Cálculo de parámetros K,M y R y KM, MM y RM

```

import arcpy
from arcpy import env
from arcpy.sa import *

Region = "RH25"

CEM = Raster("C:/Av_subitas/Regiones/" + Region + "/" + "Region/rh25_fill.grd")
CEM2 = SetNull(CEM==-99999,CEM)
dx = CEM2.meanCellWidth
dy = CEM2.meanCellHeight
Area = (dx*dy)*(CEM2/CEM2)
Area.save("C:/Av_subitas/Regiones/" + Region + "/" + "Region/Area.img")
Volmin = Area * 0.25
Volmin.save("C:/Av_subitas/Regiones/" + Region + "/" + "Region/Volmin.img")

D = open("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\\" + "Vol_Esc\Vol_Esc.txt",'r')
for Dr in D:
    F = Dr.replace("\n","")
    P = open (F,'r')
    Km = 0
    Mm = 0
    Rm = 0
    for Pr in P:
        i = Pr.replace(".grd\n",".img")
        j = i.split("\\")
        # Llamando Volumen
        Vol = Raster(Pr)
        lim = Con(Vol<Volmin,0,Vol)
        #Llamando Tiempos
        x = Pr.replace(".grd\n","_Tc.grd")
        y = x.split("\\")
        Tc = Raster("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\\" + "TC\\" + y[-
1])
        Tc2 = Con(Tc>3,0,Tc)
        Tp4 = ((Tc2)**0.5) + 0.6*Tc2
        Tp5 = (Tc2/2) + 0.6*Tc2
        Tp6 = Con(Tp4<Tp5,Tp4,Tp5)
        #Calculo de Gasto
        Qp = lim/(Tp6*3600)
        Mean = Qp.mean
        if Mean>0:
            M = (Qp/Area)*1000*3600
            M2 = Con(IsNull(M),0,M)
            M2.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\\" + "PMTS\\" + j[-
2] + "\\\" + "M_" + j[-1])

```

```

a = Con(M2>Mm,M2,Mm)
Mm = a
#Calculo de K
K = ((Qp/Area)/Tp6)*1000*3600
K2 = Con(IsNull(K),0,K)
K2.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\" + "PMTS\\" + j[-
2] + "\\" + "K_" + j[-1])
b = Con(K2>Km,K2,Km)
Km = b
#Calculo del Volumen Pico y R
Vp = ((Tp6/2)*Qp)*3600
R = ((Vp/Area)/Tp6)*1000
R2 = Con(IsNull(R),0,R)
R2.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\" + "PMTS\\" + j[-
2] + "\\" + "R_" + j[-1])
c = Con(R2>Rm,R2,Rm)
Rm = c
P.close()

Km.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\" + "PMTS\\" + j[-2] + "\\"
+ "Km_" + j[-2] + ".img")
Mm.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\" + "PMTS\\" + j[-2] + "\\"
+ "Mm_" + j[-2] + ".img")
Rm.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\" + "PMTS\\" + j[-2] + "\\"
+ "Rm_" + j[-2] + ".img")

D.close()

```

- **KM, MM Y RM**

```
# Mayor Evento Para K
P = open("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\" + "PMTS\Km.txt",'r')
Km = 0
for Pr in P:
    x = Pr.replace("\n","")
    K = Raster(x)
    a = Con(K>Km,K,Km)
    Km = a
P.close()
```

```
Km.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\" + "PMTS\Km.img")
```

```
# Mayor Evento Para M
P = open("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\" + "PMTS\Mm.txt",'r')
Mm = 0
for Pr in P:
    x = Pr.replace("\n","")
    M = Raster(x)
    b = Con(M>Mm,M,Mm)
    Mm = b
P.close()
```

```
Mm.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\" + "PMTS\Mm.img")
```

```
# Mayor Evento Para R
P = open("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\" + "PMTS\Rm.txt",'r')
Rm = 0
for Pr in P:
    x = Pr.replace("\n","")
    R = Raster(x)
    c = Con(R>Rm,R,Rm)
    Rm = c
P.close()
```

```
Rm.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\" + "PMTS\Rm.img")
```

c) Cálculo de los índices de inundación súbita.

```

import arcpy
from arcpy import env
from arcpy.sa import *

Region = "RH25"

Km = Raster("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\" + "PMTS\Km.img")
Mm = Raster("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\" + "PMTS\Mm.img")
Rm = Raster("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\" + "PMTS\Rm.img")

P = open("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\" + "PMTS\PMTS.txt",'r')
for Pr in P:
    w = Pr.replace("\n","")
    z = w.split("\\")
    # Factores Relativos para K
    K = Raster("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\PMTS\\" + z[-2] +
    "\\ " + "K_" + z[-1])
    Fk = K/Km
    # Factores relativos para M
    M = Raster("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\PMTS\\" + z[-2] +
    "\\ " + "M_" + z[-1])
    Fm = M/Mm
    # Factores Relativos para R
    R = Raster("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\PMTS\\" + z[-2] +
    "\\ " + "R_" + z[-1])
    Fr = R/Rm
    # Indice de Inundacion Repentina
    MFFI = ((Fk**0.33) * (Fm**0.33) * (Fr**0.33))*100
    MFFI.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\" + "INDEX\\" +
    z[-2] + "\\ " + "MFFI_" + z[-1])
P.close()

```


d) Cálculo de las tasas de excedencia

```

import arcpy
from arcpy import env
from arcpy.sa import *

Region = "RH25"

P = open("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\INDEX\Index.txt", 'r')
K = 0
L = 0
M = 0
N = 0
O = 0
R = 0
for Pr in P:
    Q = Pr.replace("\n", "")
    S = open(Q, 'r')
    F = 0
    G = 0
    H = 0
    I = 0
    J = 0
    for Sr in S:
        X = Sr.replace("\n", "")
        Z = X.split("\\")
        FFI = Raster(X)
        A = Con(FFI>0,1,0)
        B = Con(FFI>=20,1,0)
        C = Con(FFI>=40,1,0)
        D = Con(FFI>=60,1,0)
        E = Con(FFI>=80,1,0)
        F = F + A
        G = G + B
        H = H + C
        I = I + D
        J = J + E
    S.close()

    F.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\Tasas\Tasas_00\\" + Z[-2] + "_00.img")
    K = K + F

```

```

        G.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\ " +
"Tasas\Tasas_20\\" + Z[-2] + "_20.img")
        L = L + G
        H.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\ " +
"Tasas\Tasas_40\\" + Z[-2] + "_40.img")
        M = M + H
        I.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\ " +
"Tasas\Tasas_60\\" + Z[-2] + "_60.img")
        N = N + I
        J.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\ " +
"Tasas\Tasas_80\\" + Z[-2] + "_80.img")
        O = O + J

        R = R + 1

P.close()

Prom00 = K/float(R)
Prom20 = L/float(R)
Prom40 = M/float(R)
Prom60 = N/float(R)
Prom80 = O/float(R)

Prom00.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\ " +
"Tasas\Tasas_00\Tasa_00.img")
Prom20.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\ " +
"Tasas\Tasas_20\Tasa_20.img")
Prom40.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\ " +
"Tasas\Tasas_40\Tasa_40.img")
Prom60.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\ " +
"Tasas\Tasas_60\Tasa_60.img")
Prom80.save("C:\Av_subitas\Regiones\\" + Region + "\\ " +
"Tasas\Tasas_80\Tasa_80.img")

```

REFERENCIAS

Atlas de Riesgos para el Estado de Sonora. Disponible en: http://www.anr.gob.mx/atlasestatales/SONORA_resumen.pdf

Benito G., Houdson P. F., (2010): “*Flood hazards: the context of fluvial geomorphology.*” Cambridge University. pp. 111-128.

Bhaskar, N.R.; French, B.M.; Kyiamah, G.K. (2000). “*Characterization of flash floods in Eastern Kentucky*”. pp. 327-331.

Breña P. A., Jacobo V. M., (2006). “Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial.” Universidad Autónoma Metropolitana. p.119, 213.

B-S. Kim y H-S. Kim. (2013). “*Evaluation of Flash Flood Severity in Korea using the Modified Flash Flood Index*”, Departament of Urban Environmental Prevention Engineering, School of Disaster Prevention, Kangwon National University, Samcheck, Korea & Department of Civil Engineering, University, Incheon, Korea., Journal of Flood Risk Management, pp. 344-356.

CENAPRED (2006). Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Fenómenos Hidrometeorológicos. Disponible en: www.cenapred.gob.mx

CONAGUA (2010). “Zonas Inundables en México”, pp. 29-42. Accedido el 8 de marzo del 2018 desde: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105618/4_CAPITULO_2.pdf

Hernández F. J. y Reinoso E. A. (2014). “Obtención del Numero de Curva (NC) para la República Mexicana mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica, aplicando la metodología del TR-55.”, Universidad Nacional Autónoma de México. 98 p.

INEGI, (2014). Sistemas de Información Geográfica. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/>

SEMARNAT, (2014). Inventario Estatal Forestal y de Suelos, TAMAULIPAS 2014. 51-53.

IPCC/OMM/PNUMA, (2007). Panel Intergubernamental sobre el cambio climático, Cuarto Informe.

Kim, E.S. y Choi, H.I., (2011). “*Assessment of Vulnerability to Extreme Flash Floods in Design Storms*” pp. 2907-2922.

Kim, E.S. y Choi, H.I., (2012). “*Estimation of the Relative Severity of Floods in Small Ungauged Catchments for Preliminary Observations on Flash Flood Preparedness: A Case Study in Korea*” pp. 1507-1522.

Kim, E.S. y Choi, H.I., (2015). “*A method of flood severity assessment for predicting local flood hazards in small ungauged catchments*” pp. 2017-2018.

Maderey Rascón L. E. (2005). “Principios de Hidrogeografía. Estudio del ciclo Hidrológico.” Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México, p.11.

Melina Remy and Karen Rowan, (2010). “*The science of Flash Floods*”. LIVESCIENCE.

Mockus, V. (1964). “*Estimation of direct runoff storm rainfall.*” SCS, National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, 30 p.

MOPU (1990). Instrucción de carreteras 5.2-IC Drenaje superficial (BOE de 23 de mayo de 1990).

NRCS (2004). – National Engineering Handbook. Part 630: Hydrology, chapter 10 National Resources Conservation Service. Disponible en: <http://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/NEHhydrology/ch10.pdf>

NRCS (2009). - Small Watershed Hydrology. WinTR-55 User Guide. Disponible en: <http://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/WinTR55/WinTR55UserGuide.pdf>

O’Callaghan, J.F., and D.M. Mark (1984). “*The extraction of drainage networks from digital elevation data, Compute.*” Vision Graphics Image Process. 28, 328-344.

OMM/UNESCO (2012). Glosario hidrológico internacional, WMO/OMM/BMO, No. 385.

Pérez G. (2017). “El ciclo Hidrológico” accedido el 12 de marzo del 2018 desde, www.ciclohidrologico.com

Primer Informe de Gobierno del Estado de Nuevo León, 2010. Disponible en: http://www.nl.gob.mx/sites/default/files/libro_primer_informe_nl_2010.pdf

Quinn, P. F., K. J. Beven, y P. Chevallier, and O. Planchon (1991). “*The prediction of hillslope flow paths for distributed modelling using digital terrain models, Hydrology Processes*”, 5, 59-89.

Quinn, P. F., K.J. Beven, y R. Lamb (1995), The In (a/tanb) index: “*How to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework, Hydrology. Processes*”, 9, 161-182.

Roque S. Carlos (2012). Enroque de Ciencia. Disponible en: <https://enroquedeciencia.blogspot.mx/2012/07/que-es-el-tiempo-universal-coordinado-y.html>

SEGOB, Diario Oficial de la Federación 2011. Disponible en: <http://www.dof.gob.mx/>

Shahab Fazal, (2008), “GIS Basics”, New Age International Publishers.

Salas, M.A. y Jiménez, M.E., (2004). Inundaciones, Serie de Fascículos, CENAPRED, Secretaría de Gobernación. 53 p.

Sánchez S.J., (2011). Hidrología Superficial (II): Hidrogramas. Dpto. Geología-Univ. Salamanca (España). 8 p.

Seibert J., McGlynn B.L. (2007). “*A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models.*” 8 p.

Jiménez M.E., Matías R.L., Fuentes M.O. y Prieto R.G. (2003). Ciclones Tropicales, Serie de Fascículos, CENAPRED, Secretaria de Gobernación. 52 p.

Tarboton D. G. (1997). “*A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models*”, *Water Resour. Res.*, 33 (2), 309-319.

Tarbuck, E. J., Lutgens, F.K., y Tasa, D., (2013). Ciencias de la Tierra, Pearson, Madrid, 446-475.

TELEDARIO (2015). “Alex el huracán que golpeó hace 5 años a Monterrey”. Disponible en: <http://www.multimedios.com/telediario/local/alex-huracan-anos-golpeo-monterrey.html>

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

Uribe A.E., Montes L.M., García C. E., (2010). Mapa Nacional de Índice de Inundación. Tecnología y Ciencias del Agua. pp. 73-85.

Vega G.E., Cirett G.S., De la Parra V.M. y Zavala J.R. Hidrogeología de Sonora, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 267-298.

Wang, L. y H. Liu (2006) “*An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling*”. International Journal of Geographical Information Science, Vol. 20, No. 2: 193-213.

Zogg J., y Deitsch K., (2013). “*The flash Flood Potential Index at WFO Des Moines, Iowa*”, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service. 31p.