



Instituto Privado de Investigación
sobre Cambio Climático

ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO MADRE VIEJA

Guatemala, Centroamérica



Instituto Privado de Investigación
sobre Cambio Climático

ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO MADRE VIEJA

Guatemala, Centroamérica

Autor(es): Sergio Gil Villalba

Impreso: Digitalhouse

Guatemala, 2017

Tiraje: 12 ejemplares

Digital: ISBN 978-9929-8241-7-1

CITA BIBLIOGRÁFICA

ICC (Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático). 2015. Estudio hidrológico de la cuenca del río Madre Vieja. Guatemala. 48 p.

La impresión de esta publicación ha sido financiada a través del proyecto **“Alianza Público-Privada para enfrentar el riesgo a desastres en Guatemala”**, en consorcio con Acción contra el Hambre, TRÓCAIRE, Centro para la Acción de la Responsabilidad Social Empresarial e Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático. Proyecto realizado gracias al auspicio de la Dirección General de Ayuda Humanitaria y Protección Civil de la Unión Europea (ECHO).

Las opiniones expresadas en este documento son de exclusiva responsabilidad del autor y no representan necesariamente la opinión de la Unión Europea. La Comisión Europea de Protección Civil y Ayuda Humanitaria (ECHO) no es responsable por ningún uso que se realice de la información que contenga el presente documento.

Este documento forma parte de los anexos del Plan de Respuesta Departamental ante Emergencias –CODRED– Escuintla.



Financiado por
Unión Europea
Protección Civil y
Ayuda Humanitaria



ÍNDICE

1. Estudio previo de la cuenca	5	5.2.2. Uso de la tierra	26
1.1. Antecedentes	6	5.2.3. Número de curva.....	27
1.2. Geología.....	8	5.3. Caudal.....	29
1.3. Usos del suelo	9	5.3.1. Método de la crecida índice .	29
2. Objetivos	11	5.3.2 Modelos lluvia-escorrentía ...	30
3. Introducción a los modelos.....	12	5.3.2.1 Tiempo de retardo	32
4. Zona de estudio	13	5.3.2.2. Propagación de la crecida .	35
4.1. Morfología	14	6. Resultados	37
4.2. Datos pluviométricos.....	18	7. Limitaciones de los modelos.....	42
4.3. Datos de caudal	18	8. Conclusiones.....	44
5. Metodología	20	9. Recomendaciones	45
5.1. Precipitación	20	10. Glosario	46
5.2. Procesos hidrológicos	25	11. Referencias	47
5.2.1. Geología	25		

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de texturas de suelo de la cuenca del río Madre Vieja. _____	8
Figura 2. Mapa de uso de la tierra de la cuenca del Río Madre Vieja. _____	10
Figura 3. Zona de estudio del río Madre Vieja. _____	13
Figura 4. Perfil longitudinal del cauce principal de la cuenca del río Madre Vieja. _____	15
Figura 6. Estaciones meteorológicas existentes en la zona de estudio. _____	18
Figura 7. Estaciones de aforo en la cuenca del río Madre Vieja. _____	18
Figura 8. Esquema de funcionamiento de los modelos precipitación-escorrentía. _____	19
Figura 9. Ejemplo de los hietogramas generados con el método de desagregación _____	21
Figura 10. Estaciones meteorológicas utilizadas y área de influencia _____	23
Figura 11. Mapa de tipo de suelo según la clasificación del NRCS. _____	25
Figura 13. Mapa de distribución del parámetro número de curva. _____	26
Figura 14. Regiones hidrológicas para la estimación de crecidas en Guatemala. _____	29
Figura 15. División de la cuenca del río Madre Vieja en subcuencas _____	31
Figura 16. Ejemplo de los efectos de la propagación de la crecida en el hidrograma _____	34
Figura 17. Tramos de estudio en el modelo del río Madre Vieja. _____	36
Figura 18. Hidrograma generado en el modelo hidrológico en el Madre Vieja _____	40

Índice de cuadros

Cuadro 1. Atributos de las subcuencas. _____	16
Cuadro 2. Estaciones meteorológicas utilizadas, volumen diario de precipitación por periodo de retorno y corrección mediante el coeficiente de simultaneidad. _____	23
Cuadro 3. Criterios de clasificación del tipo de suelo según el NRCS. _____	24
Cuadro 4. Clasificación de los usos de la tierra según el criterio del NRCS y número de curva correspondiente según el tipo de suelo (A, B, C o D). _____	27
Cuadro 5. Caudales máximos generados con el método de la crecida índice. _____	29
Cuadro 6. Determinación del tiempo de retardo con los métodos de Kirpich y Giandotti para las 19 subcuencas. _____	33
Cuadro 7. Parámetros calculados para la metodología Muskingum-Cunge. _____	36
Cuadro 8. Caudales máximos estimados (en m ³ /s) para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años. _____	40

1. Introducción

Los fenómenos naturales, ya sean de tipo climático, sísmico o vulcanológico, son frecuentes en América Latina. En esta región se producen anualmente pérdidas por este tipo de manifestaciones que se estiman en más de 1,500 millones de dólares y cobran casi 6,000 vidas. (Jovel et al., 1993). Tales efectos son exacerbados por las disparidades estructurales de las sociedades, que exponen a mayores grados de riesgo a contingentes poblacionales en condiciones económicas y sociales ya de por sí precarias. (CEPAL, 1999) A estos episodios se les suman otros efectos como riesgos de salud y sanitarios, riesgo nutricional, riesgo educativo por abandono escolar, riesgo habitacional y psicosocial y desempleo (CEPAL, 2003)

En este contexto, se debe priorizar la búsqueda de herramientas que permitan minimizar los efectos producidos por estos eventos. En el ámbito de la industria agroalimentaria, el sector azucarero ha fundado una institución independiente con el nombre de “Instituto Privado de Investigación en Cambio Climático” (ICC). Ésta tiene el objetivo de crear y promover acciones que desarrollen procesos adecuados de mitigación y adaptación al cambio climático en las comunidades, procesos productivos e infraestructura en la región.

Uno de los objetivos principales del ICC es el de estudiar el comportamiento de los episodios extremos de inundación, entender como les afecta el cambio climático y determinar las medidas que se deben adoptar para mitigar sus efectos. En este sentido se ha iniciado una línea investigación en el campo de la hidrología mediante la aplicación de modelos predictivos. Se trata de una metodología pionera en la región, y su correcta implementación permitiría fortalecer los mecanismos de prevención ante episodios de inundación a partir de la predicción de los episodios de inundación.

El presente estudio desarrolla un modelo hidrológico que permite predecir el caudal del río Achiguate ante diferentes episodios de precipitación. Se trata de un proyecto piloto puesto que nunca antes se ha aplicado esta metodología en la región y, por tanto, se deben evaluar con detenimiento los resultados que se generen. Éste es el primer paso de un proceso, cuyo objetivo

final es el de establecer las diferentes zonas de riesgo por inundación y contribuir a mejorar los sistemas de alerta temprana por inundación.

1.1. Antecedentes

El incremento de episodios extremos de precipitación que producen calamidades por inundación es un hecho. En Guatemala, en los últimos 15 años, se han registrado 4 episodios con especial incidencia a nivel económico, social y ambiental:

- **Huracán Mitch (1998):** Ocurrido entre el (28 de octubre y el 5 de noviembre). Presentó precipitaciones acumuladas de hasta 950mm (estación Puerto San José). Las pérdidas humanas se calcularon en 268 fallecidos, 121 desaparecidos y 750,000 damnificados. Las pérdidas económicas se estimaron en 7,377 millones de Quetzales (INSIVUMEH; CEPAL, 1999).
- **Tormenta tropical Stan (2005):** Ocurrido entre el (1 y 10 de octubre). Presentó valores diarios de precipitación de hasta 267mm (estación Rehotalueu) y precipitaciones acumuladas de hasta 868mm (estación Ciudad Tecun Uman). Las pérdidas humanas se calcularon en 670 fallecidos, 850 desaparecidos y 3.5 millones de damnificados. Las pérdidas económicas se estimaron en 7,473 millones de Quetzales (INSIVUMEH; CEPAL, 2005).
- **Tormenta tropical Agatha (2010):** Ocurrido entre el 25 y 30 de mayo. Presentó valores diarios de precipitación de hasta 426.2mm (estación Montúfar) y precipitaciones acumuladas de hasta 565.6mm (estación Mazatenango). Las pérdidas humanas se calcularon en 96 fallecidos, 62 desaparecidos y 338,500 damnificados. Las pérdidas económicas se estimaron en 7,916 millones de Quetzales (INSIVUMEH; CEPAL, 2010).
- **Depresión 12E (2011):** Ocurrido entre el 10 y 20 de octubre. Presentó valores diarios de precipitación de hasta 308mm (estación Puerto San José) y precipitaciones acumuladas de hasta 808mm (estación Montufar). Las pérdidas humanas se calcularon en 38 fallecidos, 5 desaparecidos y 524,500 damnificados. Las pérdidas económicas se estimaron en 2,697 millones de Quetzales (INSIVUMEH; SE-CONRED).

La magnitud de los episodios descritos, sumada a la vulnerabilidad de la población, sitúa a Guatemala en el tercer puesto a nivel mundial en la clasificación de riesgo a mortalidad múltiple relativa (ONU, 2009).

Del análisis de los datos de estaciones con registros superiores a 30 años se desprende que la precipitación anual, así como la correspondiente a episodios extremos, se mantiene en algunos lugares y tiende a incrementar en otros. Existe una tendencia al incremento de los valores de precipitación desde 1970, concretamente en el centro y este del país, intensificando el riesgo de desastres debidos a precipitaciones intensas (Guerra, 2010).

Hasta la fecha se han realizado algunos estudios que tratan de predecir los efectos de las inundaciones y delimitar las diferentes zonas de riesgo.

- Larios, 1986. Se trata del primer análisis regional de frecuencia de avenidas máximas realizado en la República de Guatemala. Realiza una regionalización, determinando siete regiones hidrológicas en base al régimen de precipitaciones y la orografía. Esta regionalización parte de los datos registrados por 152 estaciones meteorológicas ubicadas en Guatemala y, algunas, en México. Para el análisis de avenidas, se consta de 62 estaciones hidrométricas, de las cuales el 69% con registros superiores a 10 años.
- MAGA-INSIVUMEH, 2002. Estudio realizado en toda Guatemala que evalúa el riesgo de inundación a partir del análisis de las zonas inundadas en el período 1996-2000. Establece, a partir de los datos recopilados, zonas inundables, zonas de humedales y poblaciones con riesgo de inundación. Según la probabilidad de ocurrencia de inundaciones se establecen 4 cuencas prioritarias: Achiguate, Coyolate, María Linda y Motagua. Asimismo, determina que el 60% de los episodios de inundación fueron registrados en la vertiente del Pacífico. A pesar de los interesantes aportes de este estudio, cuatro años de registro parecen insuficientes para representar el riesgo de inundación y predecir episodios futuros.
- UNESCO-RAPCA, 2003. Estudio de la cuenca del río Samalá, en el cual se zonifican las zonas de riesgo por inundación, inestabilidad de laderas y riesgo volcánico. En el estudio participaron INSIVUMEH, CONRED, el IGN y la Universidad de San Carlos de Guatemala. La predicción de caudales se realiza con métodos regionales, y se determinan las zonas inundables cercanas a la población de San Sebastián (Rehutalueu).
- INSIVUMEH, 2004. Análisis regional de crecidas en la República de Guatemala. Divide la superficie del país en ocho regiones hidrológicas y determina, en cada una de ellas, la relación entre superficie de drenaje y frecuencia de caudal. Parte de un estudio

estadístico de 86 estaciones repartidas en todo el país y con registros de caudal instantáneo superiores a ocho años. Se ajustan 7 distribuciones teóricas de frecuencia mediante el método de momentos convencionales y el método de momentos lineales ponderados probabilísticamente. Las que mejor se ajustan son la Log-Normal y la Gumbel. Aun y así, los métodos estadísticos no permiten predecir cuál será la tendencia de los valores máximos de caudal a medio plazo y ocho años de registro pueden ser insuficientes para determinar periodos de retorno elevados.

- CIV, 2009. Estudio de impacto del río Achiguate en la infraestructura y poblaciones aledañas. Determina los valores de caudal a partir del método regional propuesto en (INSIVUMEH, 2004). Genera modelos hidráulicos con HEC-RAS en los puntos de interés. Se trata de un estudio completo, pese a estar basado en metodología regional. Su ámbito de aplicación está reducido a las zonas de mayor interés, especialmente infraestructura vial.

2. Zona de estudio/ubicación

El río Madre Vieja se ubica en la vertiente del Océano Pacífico, en el suroeste de Guatemala. Los volcanes Atitlán y Tolimán se sitúan en la parte alta de esta cuenca, ejerciendo de parteaguas con la cuenca endorreica del lago de Atitlán. Su cauce principal tiene una longitud de 116km, salvando un desnivel de 3,070 m. La cuenca hidrológica abarca una extensión de 880 Km², y forma parte de los departamentos de Escuintla, Suchitepéquez, Sololá y Chimaltenango (MAGA, 2003 y IARNA, 2015).

Debido a la magnitud de los episodios de inundación, los ríos de Guatemala -especialmente en la vertiente sur- han experimentado una serie de cambios tanto en su morfología como en el comportamiento hidráulico (CIV, 2007). En el río Madre Vieja estos cambios se han producido como resultado de modificaciones estructurales antrópicas en el tramo bajo del río, el cual se ha trazado de manera rectilínea a lo largo de su cauce.

2.1. Geología

La cuenca transcurre desde el altiplano y el cinturón volcánico hasta la planicie del Pacífico en la parte baja. La geología de dicha planicie está determinada por el aporte de material del

cinturón volcánico en las partes altas de las cuencas. Los materiales arrojados y depositados por la actividad volcánica comprenden depósitos de arenas, tobas, cenizas, lahares y sedimentos piroclásticos en general, que conforman una extensa planicie al pie de las montañas volcánicas como resultado de los procesos de erosión, transporte y sedimentación. Los materiales que conforman esta parte de la llanura se encuentran con un grado medio de consolidación y presentan permeabilidades elevadas.

Para el estudio de los diferentes tipos de suelo en el presente estudio, se ha utilizado la cartografía generada por PEDN-MAGA¹ (figura 1).

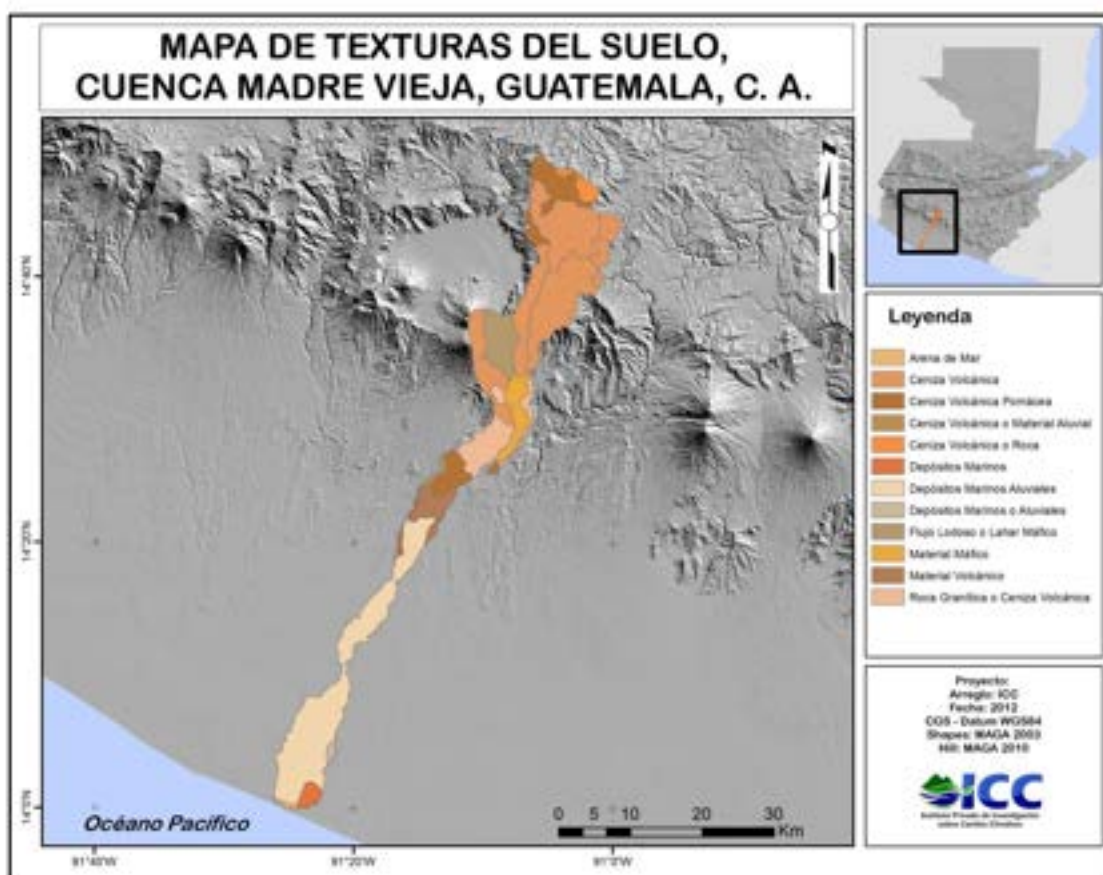


Figura 1. Mapa de texturas de suelo de la cuenca del río Madre Vieja.

¹ Base digital de Guatemala, generada por el Programa de Emergencia por Desastres Naturales (PEDN-MAGA, 2,001), a escala 1:250,000.

2.2. Usos del suelo

La cuenca presenta una fuerte presión de los sistemas productivos agrícolas, ocupando estos un 62.2% del total de la superficie. Por otro lado la cobertura forestal (34.5%) se concentra en la parte alta. Este tipo de cobertura favorece la retención del agua de precipitación, regulando las crecidas y retardando la concentración de caudal en el lecho del río. No obstante, en la parte media de la cuenca, la que presenta un mayor volumen de precipitación, la cobertura forestal es muy pobre, así como en la parte baja. A continuación se detallan los diferentes usos de la tierra en la cuenca.

Un 0.77% de la superficie de la cuenca corresponde a áreas urbanas. Este porcentaje de urbanización se concentra en la parte alta y media de la cuenca y no es significativo, con lo cual se puede esperar que no provoque grandes cambios en la dinámica hidrológica de la cuenca.

A nivel de cultivos, éstos varían a lo largo del transcurso del río, en función de la altitud y la inclinación del terreno. En la parte alta de la cuenca se encuentra cultivo de hortalizas, maíz y café. En la parte media de la cuenca se cultiva principalmente café y algunas zonas de caña de azúcar y palma africana. En la parte baja de la cuenca, donde las pendientes son más suaves, predomina el cultivo de la caña de azúcar, banano, palma africana y, cerca de la costa, se encuentran granos básicos y pastos cultivados así como algunas zonas de mangle. A nivel global, un 62.19% de la cuenca corresponde a usos agrícolas, de los cuales un 20.8% a granos básicos, un 13.1% al cultivo de café, un 11.5% a caña de azúcar, un 6.1% a pastos cultivados, un 4.6% a palma africana y un 3.44% a hule. Según la memoria técnica del mapa de coberturas del suelo (MAGA, 2003), la categoría *agricultura limpia anual* engloba a granos básicos como maíz, frijol y sorgo.

En cuanto a masas forestales, los bosques mixtos y de latifoliadas se ubican en la parte alta de la cuenca. Éstos bosques representan el 28.6% del total de la superficie de la cuenca. Además, las zonas con vegetación arbustiva o matorrales suponen un 5.3% de la superficie de la cuenca y los humedales con manglar un 0.83%, por lo que se podría decir que la cobertura vegetal natural abarca un 34.5% de la superficie de la cuenca.

Para el estudio de los usos del suelo se ha utilizado la cartografía del MAGA² (figura 2).

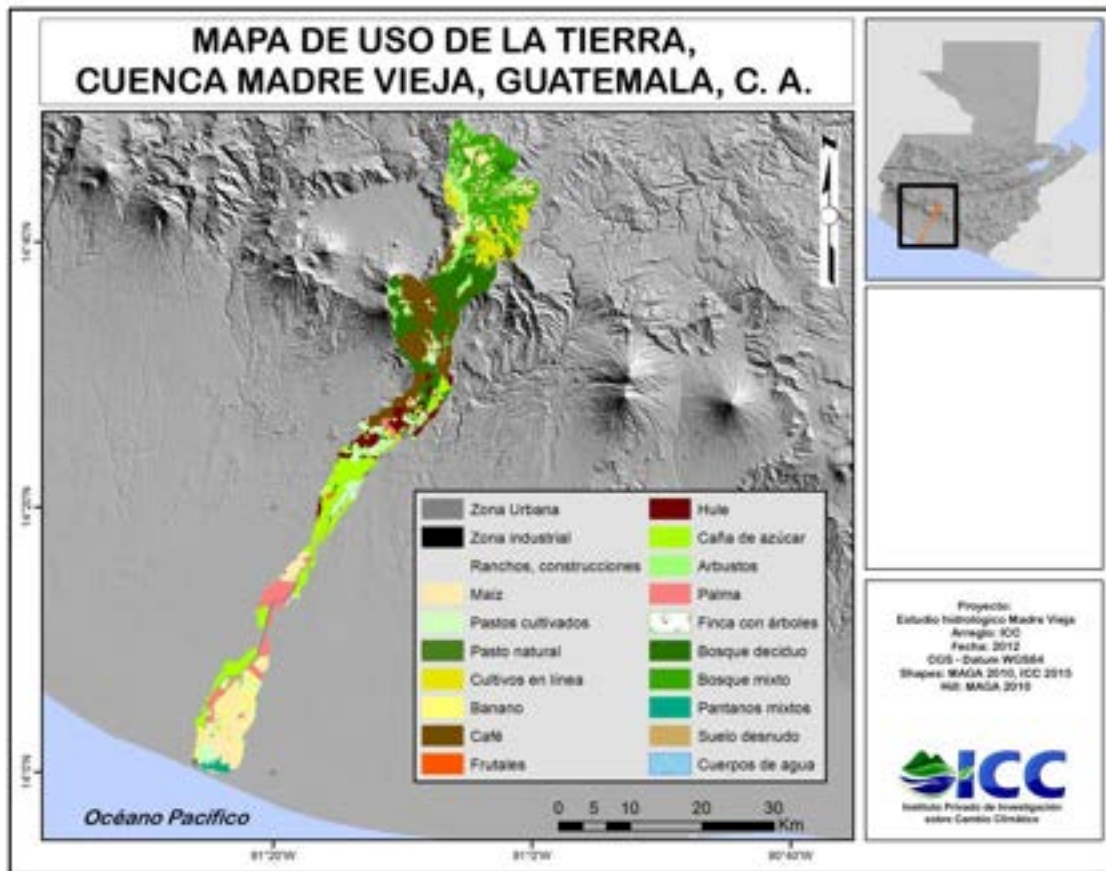


Figura 2. Mapa de uso de la tierra de la cuenca del Río Madre Vieja.

3. Objetivos

Objetivo general

El objetivo principal del presente estudio es la generación de un modelo hidrológico de la cuenca del río Madre Vieja, que proporcione datos de magnitud y frecuencia de caudales y que sirva de insumo para la evaluación de inundaciones y el diseño de estructuras fluviales a partir de modelos hidráulicos.

² Uso de la tierra 2003, MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación). Escala 1:50.000. Guatemala.

Objetivos específicos

- a. Determinar la precipitación umbral, es decir establecer que parte de la precipitación pasa a formar parte de la escorrentía superficial y cual se retiene en otros procesos (vegetación, almacenamiento superficial, evaporación, etc.).
- b. Establecer los parámetros de tiempo de retardo, tiempo de concentración y tiempo de propagación de la crecida a partir de diferentes metodologías basadas en parámetros morfométricos de la cuenca. Estos permitirán determinar cuánto tarda la escorrentía superficial en llegar a formar parte del caudal del río.
- c. Determinar el caudal a partir del método de la crecida índice para contrastar los resultados obtenidos con los del modelo hidrológico lluvia-escorrentía..
- d. Proponer una estimación de los valores de caudal para la cuenca, para los períodos de retorno de 10, 25 y 50 años.
- e. Identificar vacíos de información y elaborar una serie de recomendaciones para mejorar este tipo de modelo en un futuro.

4. Modelos hidrológicos

Durante la elaboración de estudios para la predicción de inundaciones se pueden discernir el uso de dos tipos de modelos: hidrológicos e hidráulicos. Estos modelos tratan de simplificar toda la información de la cuenca en una serie de parámetros que permiten estimar valores como el caudal generado a partir de una precipitación o la zona inundada y la altura de la inundación que generara un determinado caudal.

Los modelos hidrológicos engloban toda la cuenca y permiten establecer el caudal en función del periodo de retorno. Existen diferentes métodos para estimar el caudal máximo de crecida:

- Modelos estocásticos: son modelos inductivos, es decir, solo interpretan la aleatoriedad con la que se producen los procesos naturales, en este caso caudales máximos. Normalmente se trata de modelos regionales, en los cuales se utilizan todos los registros de caudal de una región con características hidrológicas similares (Pandey et al., 1999).
Por ejemplo:

- **Métodos de regresión directa:** Se basan en el desarrollo de ecuaciones de regresión que permiten extender el registro de caudales disponible en las estaciones de aforo (Bobée B. et al., 1995). Normalmente se establece una relación entre caudal y superficie de drenaje, estableciendo un parámetro que permite determinar la similitud o diferencia hidrológica entre diferentes cuencas: el caudal generado por unidad de superficie. Con esta metodología se asume que si la regresión funciona para diferentes cuencas aforadas, generará buenas estimaciones en cuencas no aforadas. No obstante, las características singulares de algunas cuencas no aforadas pueden provocar que esto no se cumpla, mermando la portabilidad de éste método (Boni G. et al., 2007).
- **Método de la crecida índice:** Es otra manera de abordar los análisis regionales de regresión. Permite determinar valores de caudal asociados con diferentes periodos de retorno asumiendo que los valores, en diferentes puntos de una región, siguen los mismos patrones de distribución, estableciendo una misma curva de crecimiento del caudal respecto al periodo de retorno, exceptuando la escala, que será determinada por la crecida índice (Boni G. et al., 2007) Éste modelo ha sido utilizado por el INSIVUMEH (INSIVUMEH, 2004).
- **Modelos determinísticos:** son modelos deductivos, esto es, incorporan parámetros físicos, químicos y biológicos para entender los procesos que tienen lugar en la cuenca.
Por ejemplo:
 - **Método precipitación-escorrentía:** permite simular episodios de inundación a corto plazo. Determina el caudal máximo en función de la precipitación que cae sobre la cuenca y el comportamiento del agua en la misma. En el presente estudio se utiliza este método, basado en un parámetro llamado *número de curva*. Es un modelo más exhaustivo y debe ser calibrado con datos reales de caudal para obtener resultados óptimos (Pasche, E., 2007).
 - **Modelo de balance hídrico:** determina todos los procesos hidrológicos que tienen lugar en la cuenca y su tendencia a largo plazo, incluyendo los flujos subterráneos. Se requieren numerosos años de registro de parámetros de la cuenca para poder generar un modelo de este tipo, pero es especialmente útil para descubrir el comportamiento de la cuenca y el balance de recursos hídricos subterráneos (Pasche, E., 2007).

5. Datos de partida

La cuenca del río Madre Vieja se extiende desde el cinturón volcánico hasta la costa del Pacífico y comprende los volcanes de Atitlán y Tolimán (figura 3).

Los límites de la cuenca se han delimitado a partir del modelo de elevación del terreno (DEM) de resolución 15m x 15m con la ayuda de sistemas de información geográfica. El resultado obtenido es idéntico a las cuencas delimitadas por (MAGA 2003) excepto en el tramo final, donde no se han incluido algunas corrientes pequeñas de agua que drenan directamente al Océano Pacífico y no aportan su caudal al río Madre Vieja de manera directa. De esta manera, de los 880km² que supone la cuenca delimitada por el MAGA, la zona de drenaje determinada para el cauce del río Madre Vieja es de 607km².

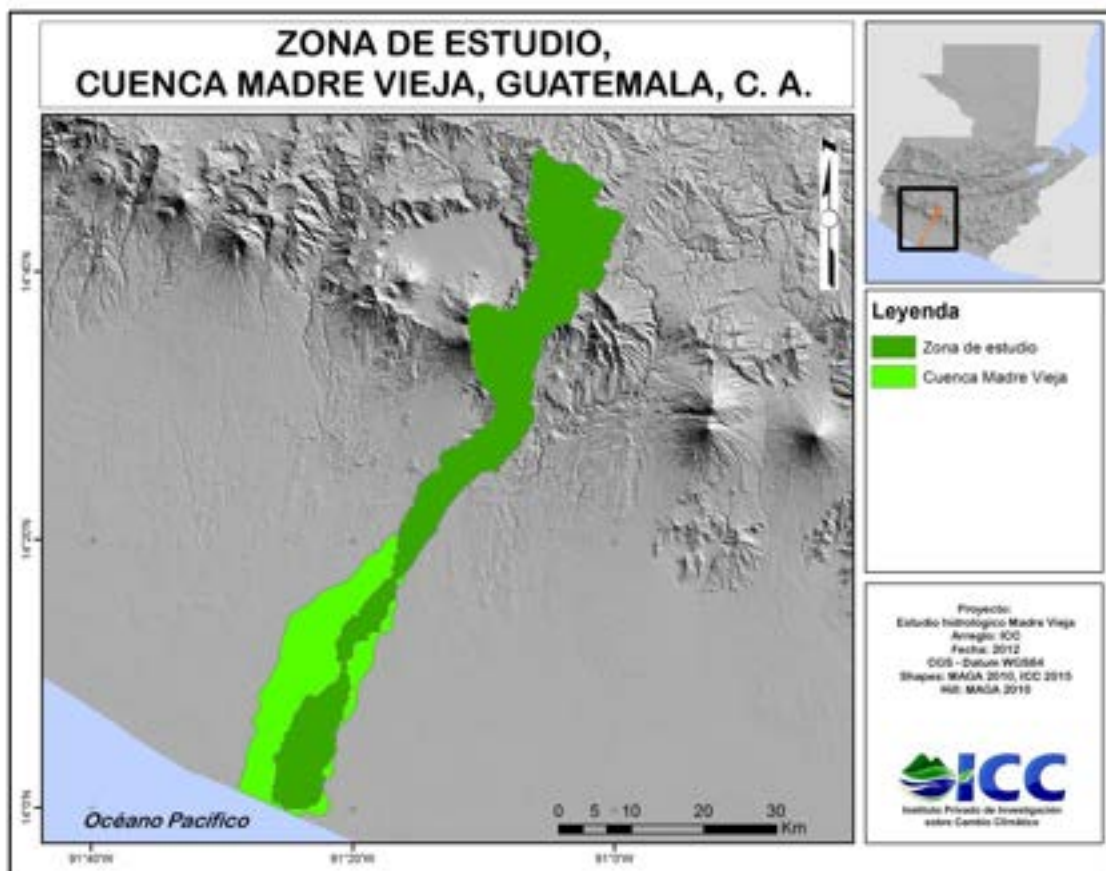


Figura 3. Zona de estudio del río Madre Vieja. Nótese como no coincide con la cuenca delimitada por (MAGA 2003) en el tramo final.

5.1. Morfología

Los datos morfométricos aportan criterios para determinar las características hidrológicas de una cuenca, así como para realizar análisis comparativos entre diferentes cuencas (CIV, 2007).

Se han calculado los principales parámetros morfométricos de la cuenca del río Madre Vieja, comparándolos con las cuencas vecinas que drenan hacia el océano Pacífico (cuadro 1).

Cuadro 1. Parámetros morfométricos del río Madre vieja y cuencas vecinas.

Cuenca	A (km ²)	P (km)	L (km)	I/Rf	D (km/km ²)	E _{max} (msnm)	E _{min} (msnm)	E (msnm)	Sg (%)
Madre Vieja	607	359	116	22	0.43	3,070	0	1,110	33
Achiguate	1,048	301	125	15	2.5	3,973	0	1,118	24
Coyolate	1,616	261	150	14	2.5	3,973	0	721	10
María Linda	2,269	359	128	7	2.2	3,759	0	851	22

Los parámetros determinados son:

A: Área total de la cuenca (kilómetros cuadrados)

P: Perímetro de la cuenca (kilómetros)

L: Longitud del cauce principal (kilómetros)

I/Rf: Factor de forma (L^2/A)

D: Densidad de drenaje de la cuenca (kilómetros de cauces por kilómetros cuadrados de superficie).

E_{max}: Elevación máxima de la cuenca (msnm)

E_{min}: Elevación mínima de la cuenca (msnm)

E: Elevación promedio de la cuenca (msnm)

Sg: Pendiente media del terreno (porcentaje)

A continuación se detalla qué información se puede extraer de cada uno de los parámetros.

La longitud de las corrientes es una medida de extensión de la cuenca y representa un índice de evacuación de escorrentía. Generalmente son mejor drenadas las cuencas con un mayor número de afluentes, y esto se puede determinar a partir de la densidad de drenaje. El río que tiene mayor densidad de drenaje tiende a presentar picos de caudal mayores (CIV, 2009). No obstante éste parámetro es muy uniforme en las cuencas presentadas en el cuadro 1.

La forma de la cuenca también puede indicar sus características hidrológicas. Cuencas redondas producen flujos de descarga altos en períodos cortos y con hidrogramas de puntas agudas. En

una cuenca alargada, como la cuenca del Madre Vieja, se producen flujos de descarga menores en períodos más largos y con hidrogramas menos prominentes (Ponce, 1989). El factor de forma es la relación entre el cuadrado de la longitud del cauce más largo y el área total de la cuenca. Si diferentes cuencas presentan valores similares, éstas presentarán características de drenaje parecidas (Snyder, 1938). Según este criterio, los valores del cuadro 1 indican que las cuencas de Achiguate y Coyolate presentarán patrones de drenaje similares, la cuenca de María Linda presenta una morfología menos alargada, con un valor significativamente inferior a las anteriores. Por otro lado, la cuenca de Madre Vieja, presenta el valor mayor, lo que indica que representa la cuenca más alargada de las analizadas hasta el momento.

La elevación media de la cuenca permite comprender las diferencias en las distribuciones de temperaturas y lluvia en diversas cuencas, especialmente en regiones donde los patrones de precipitación están relacionados con la elevación del terreno.

El perfil longitudinal del cauce determina en gran medida la velocidad de evacuación de caudal, así como el arrastre y la deposición de sedimentos. A lo largo del cauce del río Madre Vieja se observan inclinaciones moderadas en los 40 kilómetros iniciales del río, correspondientes al descenso del río de la cadena volcánica. Entre los 40 y 80 kilómetros la inclinación se reduce paulatinamente para finalizar con un relieve suave en el tramo final del río (figura 4).

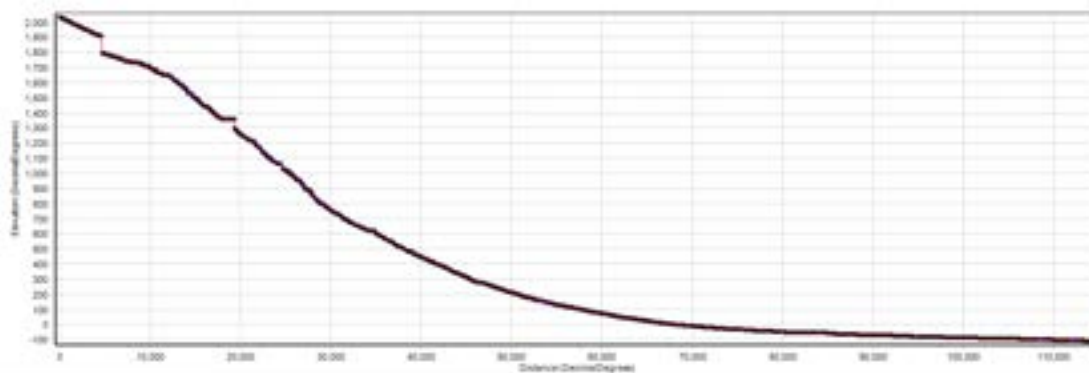


Figura 4. Perfil longitudinal del cauce principal de la cuenca del río Madre Vieja.

La cuenca del Madre Vieja se caracteriza por la ausencia de afluentes importantes, a parte de algunos de magnitud menor como los ríos Chipo y La Vega. Se puede dividir la cuenca en parte alta y baja, en función de la elevación, la inclinación y los usos de la tierra (figura 5). La parte alta presenta fuertes inclinaciones debido a la presencia de volcanes en ésta. La parte baja, en cambio, transcurre por un terreno mucho más suave (cuadro 2).

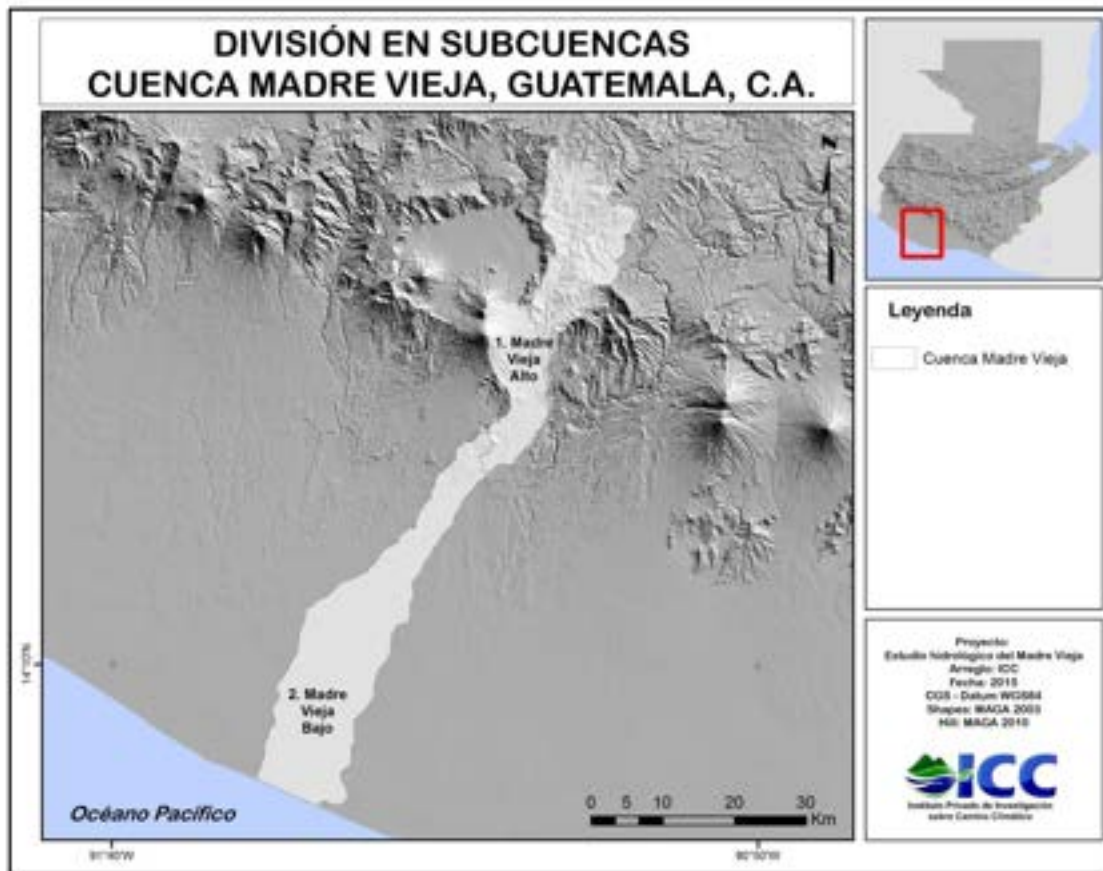


Figura 5. División de la cuenca del río Madre Vieja.

Cuadro 2. Atributos de las subcuencas.

Subcuenca	Madre Vieja alto	Madre Vieja bajo
Superficie (km ²)	385	494
Longitud (km)	54	61
Desnivel cauce(m)	1,788	253

5.2. Datos pluviométricos

La información meteorológica encontrada en la cuenca es muy diversa. En la zona de estudio y sus proximidades se han ubicado más de 16 estaciones, correspondientes al INSIVUMEH³ y a ASAZGUA⁴ (figura 6). Para realizar un estudio hidrológico es necesario que el registro de datos sea lo más extenso posible, idealmente igual o superior a 40 años (Mendoza, 1994). Se han seleccionado las estaciones Santa Cruz Balanyá, El Capitán, Santiago Atitlán, Peña Plata, Camantulul, Tiquisate y San Antonio El Valle. Estos datos han sido reforzados con los registros de las estaciones El Asintal y Puerto San José.

Los datos de partida del estudio son valores de precipitación diaria. Los episodios de lluvia intensa se acostumbra a originar en pocas horas, por eso se utilizan ecuaciones de desagregación de precipitaciones diarias, generadas a partir de los registros de intensidad de lluvia en las estaciones de Camantulul, Puerto San José, El Asintal y Labor Ovalle (ICC 2012, ICC 2015).

5.3. Datos de caudal

Los datos de caudal permiten calibrar y validar los resultados obtenidos por el modelo. Históricamente, en la cuenca del río Madre Vieja han existido estaciones de aforo en siete puntos. De éstos, solamente se dispone de datos de promedio mensual en registros Cinco estaciones, de las cuales solamente una se ubica en el cauce principal y el resto corresponde a pequeñas corrientes (figura 7). Las estaciones de aforo constituyen puntos de referencia que permiten comprobar que el caudal real corresponde con el caudal generado por el modelo. La estación que podría resultar de utilidad para calibrar la parte alta del modelo es la que se ubica en Patulul, en caso de que estuviera registrando datos de manera automática. Un vacío importante de información se encuentra en la desembocadura del río donde una estación de aforo permitiría calibrar el modelo completo así como determinar el balance hídrico de la cuenca.

³ Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

⁴ Asociación de Azucareros de Guatemala

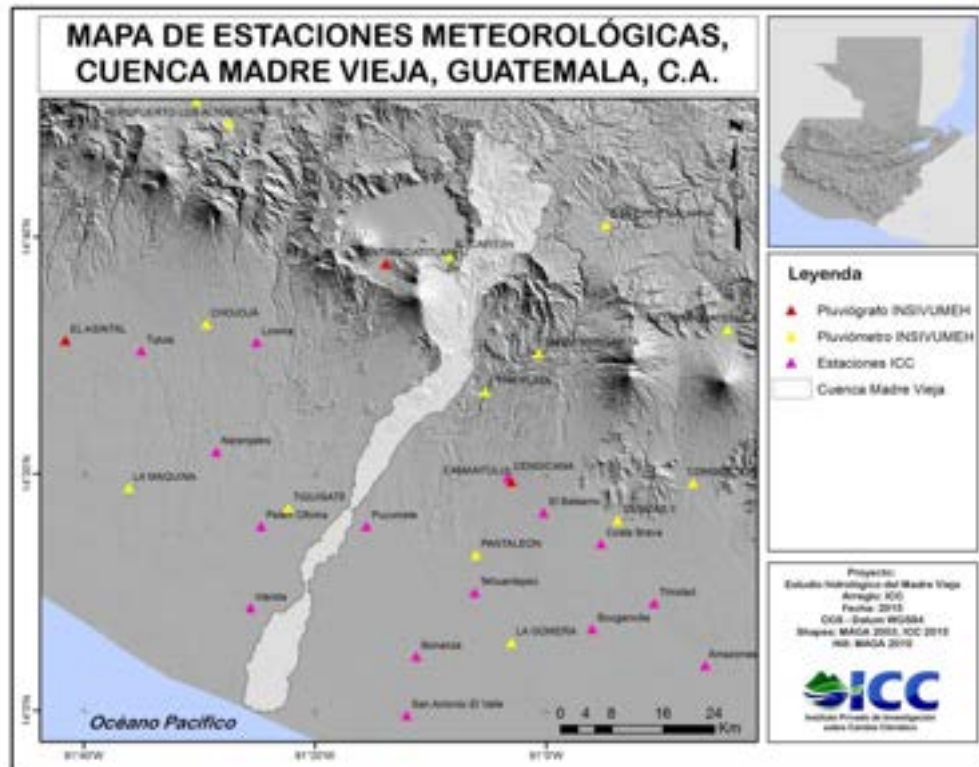


Figura 6. Estaciones meteorológicas existentes en la zona de estudio. Amarillo: Pluviométrica INSIVUMEH. Rojo: Pluviográfica INSIVUMEH. Morado: Automática ICC.

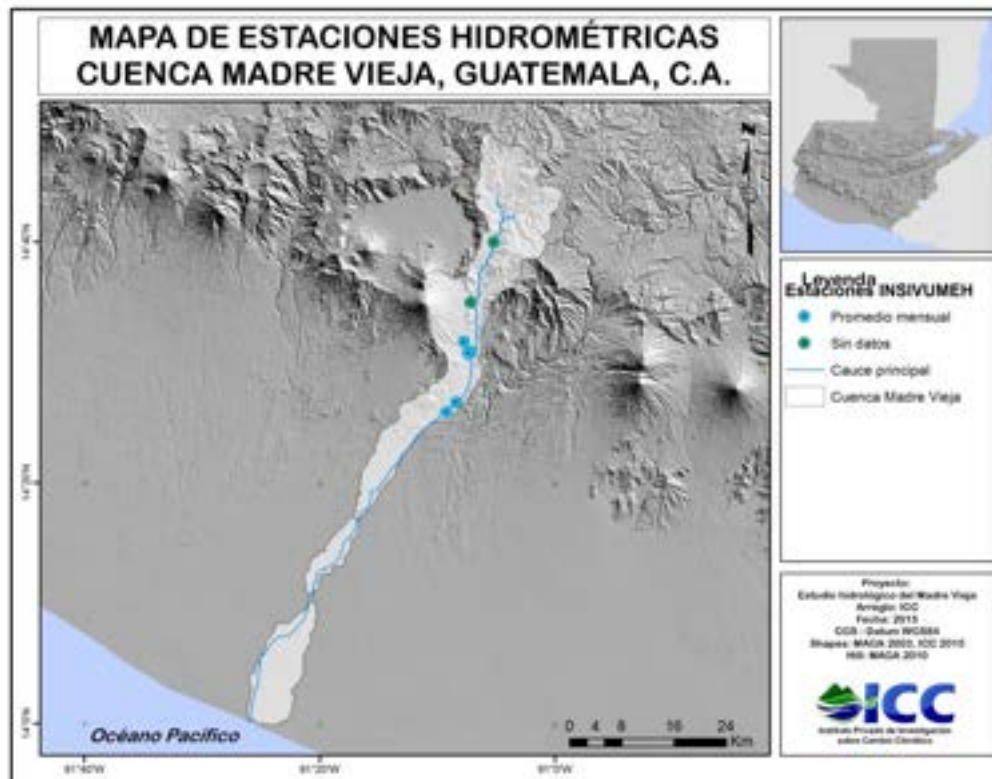


Figura 7. Estaciones de aforo en la cuenca del río Madre Vieja.

6. Metodología

En el modelo hidrológico, el hietograma de precipitación proporciona los datos de entrada, y los hidrogramas generados por dichas precipitaciones son los datos de salida. Es decir, el modelo determina la relación entre una precipitación y el caudal que genera. Para esto se necesita conocer las características hidrológicas del terreno, que serán las que permitirán construir el modelo con una base empírica. Este método se llama precipitación-escorrentía (figura 8).



Figura 8. Esquema de funcionamiento de los modelos precipitación-escorrentía.

6.1. Precipitación

Los datos de precipitación en un estudio de inundación presentan buenos resultados si se presentan en base horaria, aunque los modelos son flexibles en este aspecto. Los registros disponibles presentan datos de lluvia diarios. Se han utilizado ecuaciones de desagregación de precipitaciones diarias (ICC 2012, ICC 2015), para obtener hietogramas con valores horarios (figura 9).

Para determinar el caudal correspondiente a una inundación con un período de retorno determinado, se deben introducir al modelo los datos de precipitación correspondientes a dicho período de retorno, por este motivo es importante disponer de un registro amplio de datos meteorológicos. En el caso del río Madre Vieja, se ha determinado el volumen de precipitación máxima probable correspondiente a los períodos de retorno de 10, 25 y 50 años para cada una de las estaciones meteorológicas estudiadas. La determinación se ha realizado con el método de Gumbel, en el cual se determina el período de retorno en función de las precipitaciones

diarias máximas anuales y el número años de registro de datos (Anexo I). Mediante este método se ha determinado el volumen de precipitación para los períodos de retorno mencionados en las estaciones de El Capitán, Peña Plata, San Antonio El Valle, Santa Cruz Balanyá, Santiago Atitlán y Tiquisate.

Las ecuaciones de desagregación de precipitaciones de 24 horas generadas en las estaciones de Labor Ovalle, Camantulul, El Asintal y Puerto San José (cuadro 3) han permitido dividir valores de precipitación diaria en hietogramas horarios (figura 9).

Cuadro 3. Ecuaciones de desagregación de precipitación diaria desarrolladas para las estaciones meteorológicas de influencia en la zona de estudio.

Estación	Tipo evento	Tiempo de retorno	Ecuación
Camantulul	Corta duración	2, 5, 10 años	$\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{27.97 \cdot T^{0.43} + 0.90d}$
	Larga duración	25, 50 años	$\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{10681.38 \cdot T^{-1.04} + 0.72d}$
Puerto San José	Corta duración	2, 5 años	$\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{79.37 \cdot T^{-0.84} + 0.94d}$
	Larga duración	10, 25, 50 años	$\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{1399.15 \cdot T^{-0.52} + 0.64d}$
Labor Ovalle	Corta duración	2 años	$\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{49.34 \cdot T^{-2.61} + 0.96d}$
	Larga duración	5, 10, 25, 50 años	$\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{192.89 \cdot T^{0.324} + 0.68d}$
El Asintal	Corta duración	2, 5 años	$\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{44.11 \cdot T^{-0.65} + 0.954d}$
	Larga duración	10, 25, 50 años	$\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{4.86 \cdot T^{1.31} + 0.798d}$

Dónde:

d = Longitud de la precipitación que se desea determinar, en minutos

P_d = Volumen de precipitación correspondiente a la duración “ d ”, en milímetros.

P_{24} = Precipitación diaria, en milímetros

T = Período de retorno, en años

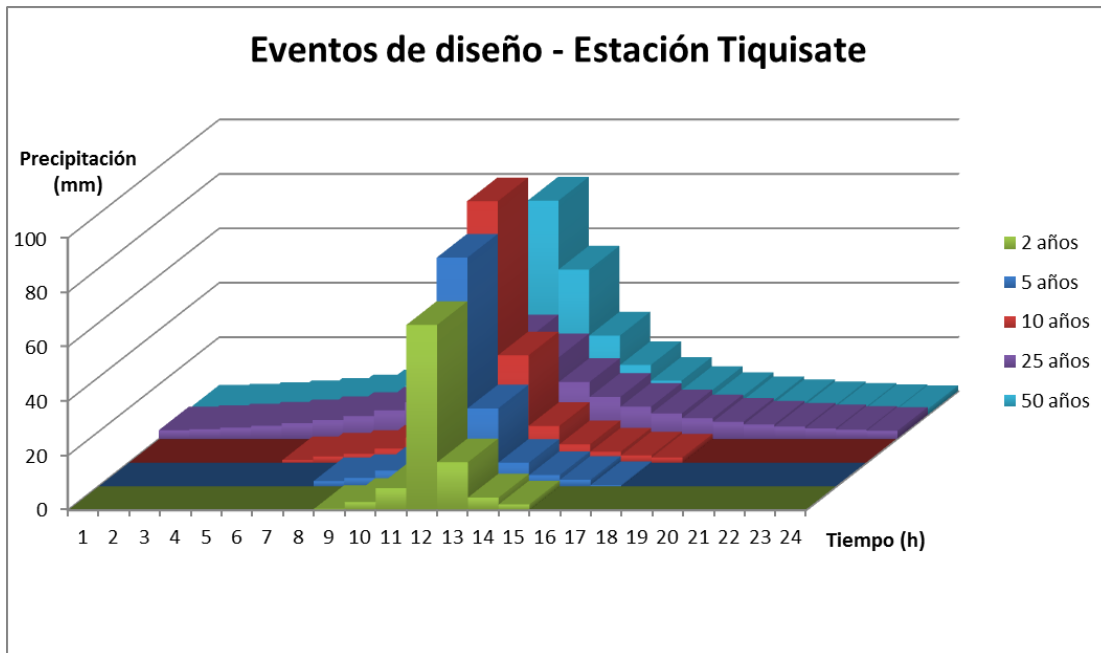


Figura 9. Ejemplo de los hietogramas generados con el método de desagregación para la estación de Tiquisate, con la distribución de la precipitación de la estación de Camantulul.

Se recomienda corregir el valor de precipitación diaria calculado con el ajuste de Gumbel mediante la aplicación del coeficiente de simultaneidad (K_A) (ACA 2003, etc). Este coeficiente, corrige el hecho que la distribución espacial de la precipitación no es constante. De hecho, mientras mayor sea la superficie de estudio, más desigual será la distribución de precipitación en el territorio. Por este motivo la ecuación para el cálculo de K_A depende directamente de la superficie de estudio:

$$K_A = 1 - \frac{\log S}{15}$$

Donde,

K_A = coeficiente de simultaneidad, adimensional.

S = superficie de influencia de la estación, en kilómetros cuadrados.

El valor de precipitación diaria corregida se obtiene mediante el producto de la precipitación diaria inicial y el coeficiente de simultaneidad:

$$P'_d = P_d \cdot K_A$$

Donde,

P_d' = precipitación diaria corregida, en milímetros.

P_d = precipitación diaria, en milímetros.

K_A = coeficiente de simultaneidad, adimensional.

Anteriormente se han propuesto seis estaciones para obtener los datos pluviométricos (figura 10). En las estaciones de INSIVUMEH, Camantulul y Puerto San José se han utilizado las ecuaciones de desagregación generadas a partir de sus propios datos, mientras que en la estación de El Recuerdo se ha utilizado, la distribución calculada en la estación de INSIVUMEH y en la estación de Santillana de Mar se ha utilizado la distribución calculada en Camantulul por motivos de proximidad. El volumen de precipitación diaria se ha calculado mediante la ley de Gumbel y se ha corregido con el coeficiente de simultaneidad (cuadro 2).



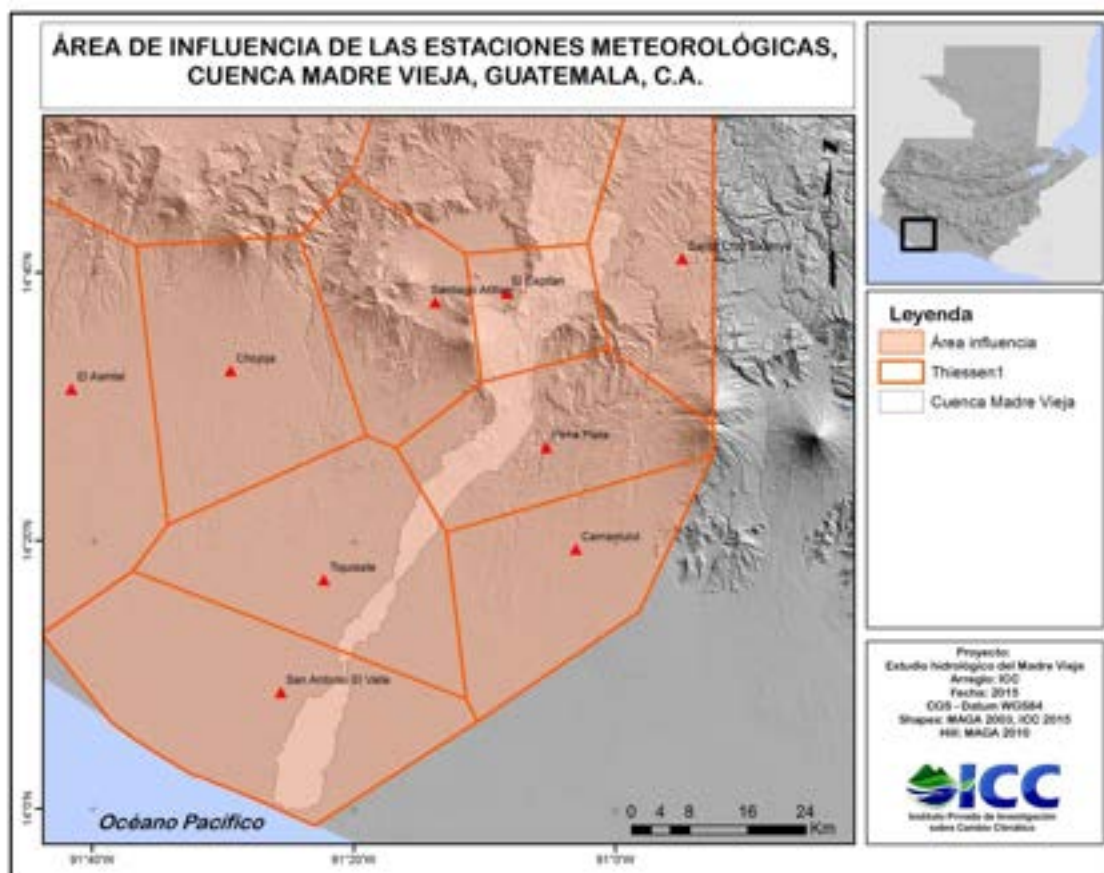


Figura 10. Estaciones meteorológicas utilizadas y área de influencia según el método de Thiessen.

Cuadro 3. Estaciones meteorológicas utilizadas, volumen diario de precipitación por periodo de retorno y corrección mediante el coeficiente de simultaneidad.

Estación	Santa Cruz Balanyá	El Capitán	Santiago Atitlán	Peña Plata	Tiquisate	San Antonio El Valle
Elevación (msnm)						
Distribución Pd/P24	Labor Ovalle	Labor Ovalle	Labor Ovalle	Camantulul	Camantulul	Puerto San José
Pd T10 (mm)	75	190	130	207	193	215
Pd T25 (mm)	89	251	164	258	244	284
Pd T50 (mm)	100	298	190	297	282	336
Superficie (km ²)	60	225	5	121	72	114
Coef. Simultaneidad	0.88	0.84	0.95	0.86	0.88	0.86
Pd' T10 (mm)	65	159	110	173	161	179
Pd' T25 (mm)	77	210	139	215	204	236
Pd' T50 (mm)	87	249	161	248	236	279

6.2. Procesos hidrológicos

El objetivo del modelo es calcular la escorrentía que se generará aguas abajo, y para esto se debe determinar el comportamiento del agua una vez que esta ha alcanzado la superficie de la cuenca, es decir qué cantidad de agua se convierte en infiltración, evapotranspiración y retención superficial (figura 8). No es sencillo determinar empíricamente estos tres parámetros para una cuenca, debido a la heterogénea distribución de éstos a lo largo del territorio y a la dimensión de la cuenca (880km²). Por este motivo, el Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos, ha determinado un método basado en estudios realizados en numerosas cuencas del sur de ese país (SCS, 1972). El método del número de curva permite aunar los parámetros correspondientes a las pérdidas hidrológicas (infiltración, evapotranspiración y retención superficial) en un parámetro adimensional. El parámetro del número de curva es inversamente proporcional a la capacidad de almacenamiento de agua del terreno, y aunque existe una fórmula que permite calcularlo empíricamente, se acostumbra a determinar mediante una serie de tablas publicadas por el NRCS (Natural Resources Conservation Service), en las cuales se puede obtener el número de curva para una determinada superficie en función del tipo de suelo, uso de la tierra e inclinación de la superficie (Ponce, 1989; ACA, 2003; Chow V.T., 1988). Una vez conocido el número de curva de la cuenca, el software de modelación puede estimar el caudal generado a partir de una determinada precipitación.

6.2.1. Geología

Uno de los parámetros necesarios para el cálculo del número de curva es el tipo de suelo. Éste se clasifica en cuatro categorías, en función de su capacidad de infiltración (cuadro 4).

Cuadro 4. Criterios de clasificación del tipo de suelo según el NRCS.

Grupo	A	B	C	D
Tasa de infiltración	0.80-1.10 cm/h	0.40-0.80cm/h	0.10-0.40 cm/h	0.0,10cm/h
Permeabilidad	Infiltración rápida incluso con humedad elevada	Infiltración moderada con humedad elevada	Infiltración lenta si presentan humedad	Infiltración muy lenta cuando están húmedos
Textura	Arenas, arenas y limos	Franco-arenosas, franco-arcillo-arenosas, o franco-limosas	Franco-argilosas, franco-arcillo-limosas, limosas o arcillo-arenosas	Arcillosos o niveles freáticos permanentemente cercanos a la superficie.

En la cuenca del río Madre Vieja se ha clasificado el tipo de suelo en función de la textura y la tasa de infiltración (Tarjuelo, 2005). La mayoría de la superficie de la cuenca corresponde a suelos permeables o muy permeables, con valores superiores a 1 cm/h. Existe también una presencia significativa de materiales con una permeabilidad más moderada en la parte alta y media de la cuenca, presentando valores que oscilan entre 0.35 y 0.8 cm/h (figura 11).

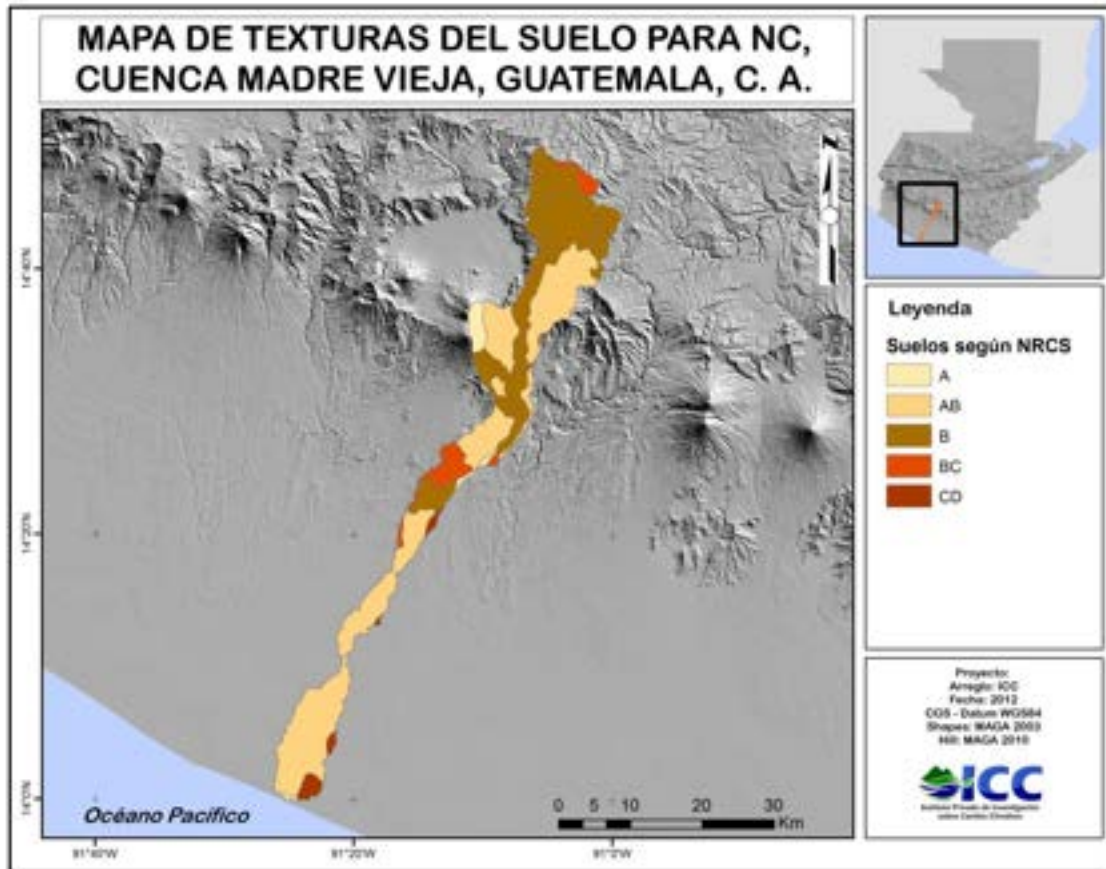


Figura 11. Mapa de tipo de suelo según la clasificación del NRCS.

6.2.2. Uso de la tierra

El uso de la tierra también ha sido clasificado en función de la tipología establecida por el NRCS (figura 2). Esto ha conllevado una simplificación del mapa de uso de la tierra (MAGA, 2003) agrupando, por ejemplo, los usos agrícolas con el mismo sistema de cultivo (como el cultivo en hilera).

6.2.3. Número de curva

Con la cartografía de usos de la tierra y tipo de suelo tipificadas según el criterio del NRCS, el software ArcGIS permite calcular el valor del número de curva para la superficie de la cuenca, a partir de una tabla similar al cuadro 5. De este modo se obtiene un nuevo mapa con la distribución del valor del número de curva en la cuenca (figura 12). El software permite obtener el valor promedio para cada una de las subcuencas.

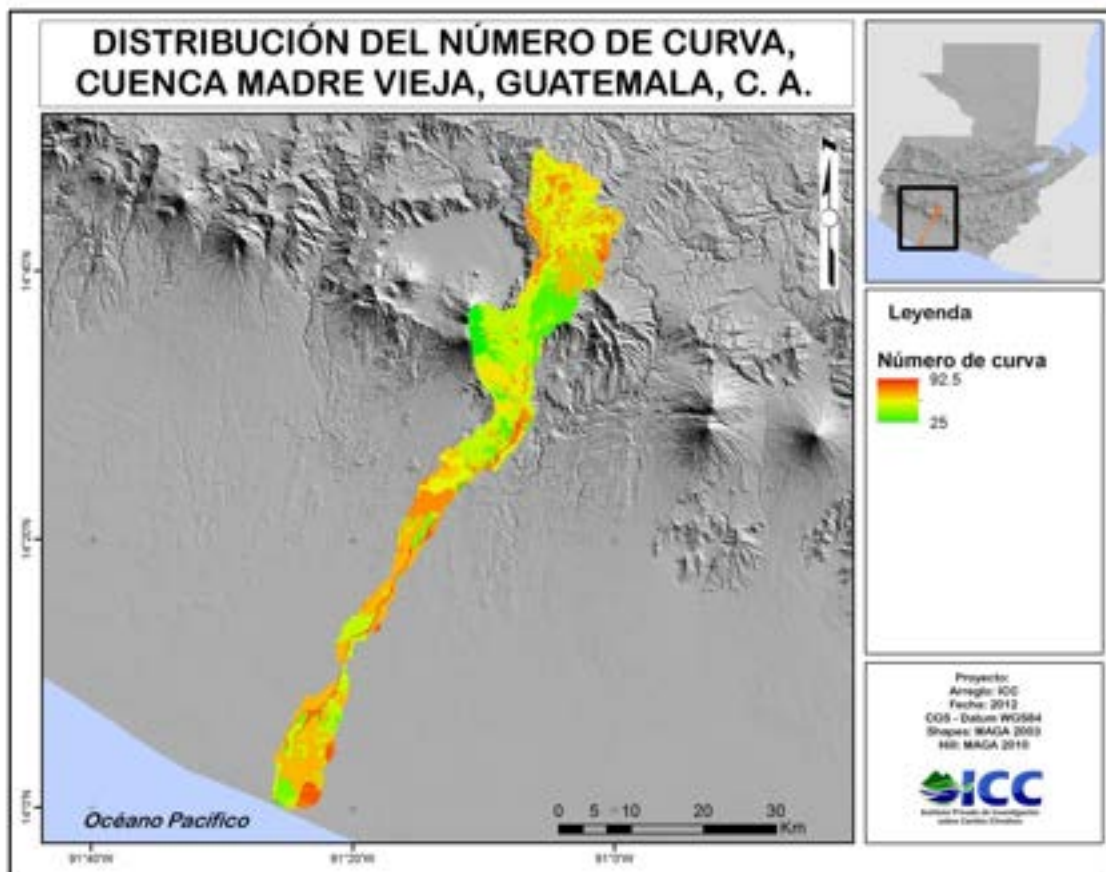


Figura 12. Mapa de distribución del parámetro *número de curva*.

Cuadro 5. Clasificación de los usos de la tierra según el criterio del NRCS y número de curva correspondiente según el tipo de suelo (A, B, C o D).

Clasificación NRCS y ARCSWAT	A	B	C	D
Zona urbana, 65% Impermeable	77	85	90	92
Zona industrial, 72% impermeables	81	88	91	93
Espacios abiertos , condiciones hidrologias buenas	39	61	74	80
Ranchos, construcciones, vias de comunicación y parcelas circundantes	59	74	82	86
Maíz	67	77	83	87
Arroz	62	73	81	84
Pastos cultivados	31	59	72	79
Pasto Natural	49	69	79	84
Cultivos agrícolas en fila	67	78	85	89
Cultivos en linea, condiciones hidrologicas pobres	65	76	84	88
Tomate	67	77	83	87
Cultivos en linea, con cobertura vegetal condiciones hidrologicas buenas	64	75	82	85
Plantación forestal	45	66	77	83
Caña de azucar	67	77	83	87
Arbustos condiciones hidrologicas medias	35	56	70	77
Finca de arboles, condiciones hidrologicas medias	43	65	76	82
Bosque deciduo	45	66	77	83
Bosque latifoliado	25	55	70	77
Bosque Mixto	36	60	73	79
Pantanos mixtos	45	66	77	83
Suelo desnudo	77	86	91	94
Agua	92	92	92	92
Áreas impermeables	98	98	98	98

6.3. Caudal

6.3.1. Método de la crecida índice

La metodología de la crecida índice parte del estudio regional de los datos de caudal. (Boni G. et al., 2007) En un determinado territorio, se establecen regiones hidrológicas a partir de las características morfológicas, climáticas y de uso de la tierra. Se agrupan todos los registros de caudal disponibles para cada una de las regiones hidrológicas, y se elabora una correlación entre el caudal máximo y la superficie de drenaje (Boni G. et al., 2007). En Guatemala, (INSIVUMEH, 2004) propone la división del territorio nacional en un total de ocho regiones hidrológicas (figura 14). Otros autores ya habían propuesto sistemas de división similares del territorio (Larios, 1986).

Para cada una de estas regiones se han establecido ecuaciones de ajuste para determinar el caudal de crecida índice o estándar en una determinada superficie de drenaje. Este caudal de crecida índice se deberá multiplicar por un parámetro de ajuste en función del período de retorno para el cual se quiera determinar el caudal máximo. La cuenca del río Madre Vieja se encuentra entre las regiones hidrológicas I y II (Altiplano Occidental y Pacífico sur-occidental). Se ha estimado el caudal máximo de crecida con éste método para comparar los resultados obtenidos con los resultados generados en el presente estudio (cuadro 6).

El método regional desarrollado por INSIVUMEH parte de 7 distribuciones teóricas de frecuencia. Las que mejor se ajustan para proporcionar resultados correctos son Log-normal y Gumbel, presentados en el cuadro 6. Asimismo también se determinaron los valores de caudal según la curva envolvente.

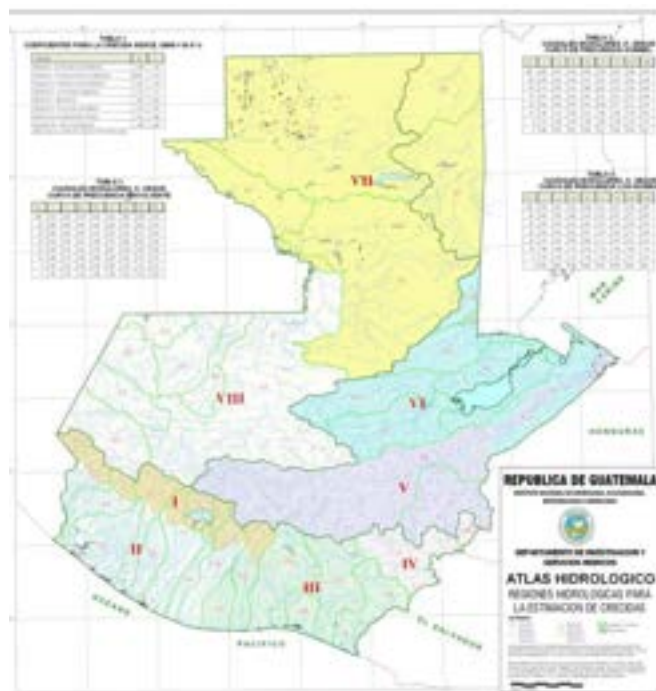


Figura 13. Regiones hidrológicas para la estimación de crecidas en Guatemala. Fuente: INSIVUMEH, 2004.

Cuadro 6. Caudales máximos generados con el método de la crecida índice.

Subcuenca	Madre Vieja Alto	Madre Vieja Bajo	
Superficie drenaje (km ²)	300	307	
Crecida índice (m ³ /s)	29	332	
Caudal T10 (m ³ /s)	66	756	
Caudal T25 (m ³ /s)	86	1029	Gumbel
Caudal T50 (m ³ /s)	101	1203	
Caudal T10 (m ³ /s)	54	678	
Caudal T25 (m ³ /s)	72	912	Log-normal
Caudal T50 (m ³ /s)	87	1099	
Caudal T10 (m ³ /s)	80	976	
Caudal T25 (m ³ /s)	98	1227	Curva envolvente
Caudal T50 (m ³ /s)	112	1407	

6.3.2 Modelos lluvia-escorrentía

Éste tipo de modelo proporciona un valor de caudal a partir de la precipitación y el número de curva. Es necesario calibrar y validar los resultados del modelo con datos reales. El método del

número de curva es semiempírico y, por tanto, los resultados iniciales pueden no ser tan precisos como se requiere (Ponce, 1989).

Para calibrar un modelo se necesita un hietograma correspondiente a un episodio de precipitación conocido. Introduciendo los valores de dicha precipitación, se observa si el hidrograma generado por el modelo se corresponde con el hidrograma real que esta generó. Se aconseja disponer de dos episodios registrados. El primero se utiliza para calibrar el modelo, es decir, comparar el hidrograma real con el generado por el modelo e introducir las correcciones pertinentes para que ambos hidrogramas coincidan. Las correcciones tratarán de ajustar tanto el valor máximo de caudal como el momento en el que éste se produjo, es decir, se ajusta el caudal máximo y el tiempo de concentración. El segundo se utiliza para validar que la calibración haya sido efectiva y comprobar que el modelo ya es predictivo, estableciendo el posible margen de error y la sensibilidad del modelo.

Cuando no sea posible conseguir hidrogramas en el punto de drenaje del modelo, se podrá calibrar por un lado el valor de caudal máximo, conociendo el caudal máximo asociado a una determinada precipitación, y por otro lado el tiempo de concentración, midiendo el tiempo que tarda en propagarse el nivel máximo de la crecida aguas abajo.

Para la realización del estudio, la cuenca del río Madre Vieja se ha dividido en un total de 18 subcuencas (figura 15). La nomenclatura de estas subcuencas se compone de un número múltiplo de diez para cada subcuenca precedido por la letra W, procedente del inglés *Watershed*.

Resulta conveniente que los puntos de drenaje de las subcuencas coincidan con estaciones de aforo. Los registros de caudal en estas estaciones permitirían calibrar las estimaciones del modelo. No obstante, los registros de caudal proporcionados por las estaciones de aforo Guacalate y Alotenango no reúnen las condiciones necesarias para poder calibrar el caudal en el punto donde se ubican, puesto que se trata de registros diarios.

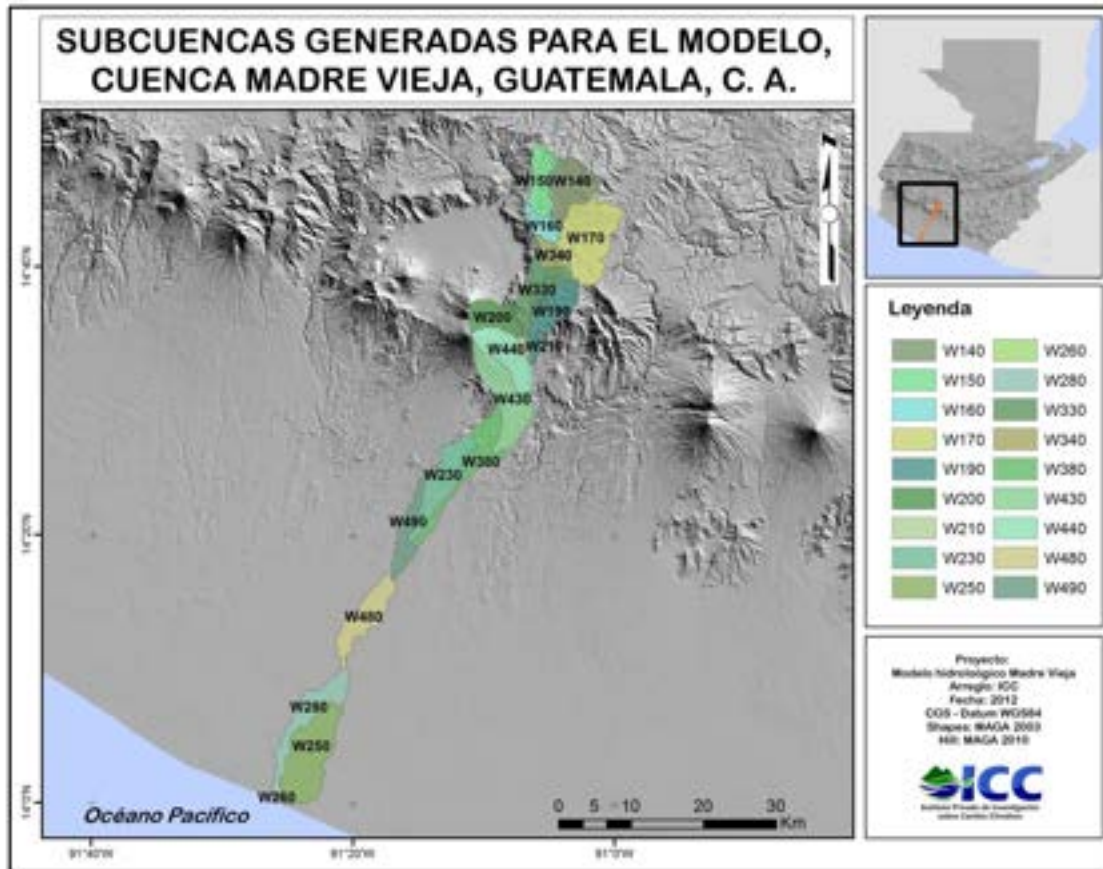


Figura 14. División de la cuenca del río Madre Vieja en subcuencas para la generación del modelo hidrológico.

6.3.2.1 Tiempo de retardo

El tiempo de retardo representa el tiempo que transcurre entre el momento de máxima precipitación y el momento de caudal máximo en el punto de drenaje. Es un parámetro que se puede determinar a partir de registros de lluvia y caudal, pero en caso de no disponer de estos, se puede estimar como el 60% del tiempo de concentración (ACA, 2003; Chow, V.T., 1988; Ponce, 1989).

El tiempo de concentración representa el tiempo que transcurre entre la finalización de la precipitación y el punto de inflexión del hidrograma. Para calcular este parámetro de manera empírica también se necesitan registros instantáneos de precipitación y de caudal. En el caso de la cuenca del río Madre Vieja no se dispone de registros de caudal de este tipo todavía. No obstante, el tiempo de concentración se puede estimar a partir de diferentes métodos teóricos

que se basan en parámetros morfométricos de la cuenca. En el presente estudio se han utilizados dos métodos teóricos para determinar el T_c :

- **Fórmula de California o Kirpich:** El tiempo de concentración depende de la longitud del cauce y el desnivel del mismo. Su aplicación es recomendada en cauces montañosos o con inclinaciones elevadas,

$$T_c = 0.95 \left(\frac{L^3}{H_{\text{máx}}} \right)^{0.385}$$

Dónde:

T_c = Tiempo de concentración, en horas

L = Longitud del recorrido más largo del agua en la subcuenca, en kilómetros

$H_{\text{máx}}$ = Desnivel máximo de la cuenca, en metros

- **Fórmula de Giandotti:** incorpora la superficie de la cuenca y la diferencia de altura entre el centro de gravedad de la cuenca y el punto de salida:

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_g}}$$

Dónde:

T_c = Tiempo de concentración de la cuenca, en horas

L = Longitud del cauce principal, en kilómetros

H_g = Desnivel entre el centro de gravedad y el punto de salida de la cuenca, en metros

A = Área de la cuenca, en kilómetros cuadrados.

La diferencia entre estas dos fórmulas reside en el valor de desnivel que se tiene en cuenta para efectuar el cálculo. La fórmula de California tiene en cuenta el desnivel máximo del tramo de estudio, desde su punto más alto hasta el punto final. La fórmula de Giandotti, en cambio, utiliza el desnivel entre la altitud del río en el centro de gravedad de la subcuenca y el punto final del tramo de estudio del río. La combinación de los dos métodos permite determinar mejor el tiempo de concentración en subcuencas donde se producen variaciones importantes en la pendiente. El tiempo de retardo que se ha utilizado en la modelación es el promedio de los resultados de ambos métodos (cuadro 7).

Cuadro 7. Determinación del tiempo de retardo con los métodos de Kirpich y Giandotti para las 7 subcuencas.

California	W140	W150	W160	W170	W190	W200	W210	W230	W250
L (Km)	13.901	13.993	8.843	18.444	16.901	13.94	5.005	22.494	19.705
Hmax (m)	1173	926	632	1004	1889	2578	671	653	47
Tc	1.31	1.44	0.98	1.92	1.36	0.97	0.50	2.86	6.75
Tlag	0.78	0.87	0.59	1.15	0.82	0.58	0.30	1.71	4.05
California	W260	W280	W330	W340	W380	W430	W440	W480	W490
L (Km)	0.488	24.87	18.212	8.096	27.457	23.615	17.364	18.904	19.367
Hmax (m)	6	41	1577	904	958	3138	2928	65	209
Tc	0.21	9.31	1.59	0.77	3.10	1.65	1.19	5.68	3.72
Tlag	0.12	5.58	0.96	0.46	1.86	0.99	0.71	3.41	2.23
Giandotti	W140	W150	W160	W170	W190	W200	W210	W230	W250
L (Km)	9.994	6.712	3.966	5.441	9.76	8.49	2.696	13.875	9.664
Hg (m)	282	255	359	247	726	781	325	147	12
A (km ²)	38.99	27.10	14.23	70.01	35.33	27.21	3.97	44.51	69.23
Tc (h)	2.98	2.42	1.39	3.31	1.78	1.50	0.83	4.90	17.24
Tlag (h)	1.79	1.45	0.83	1.99	1.07	0.90	0.50	2.94	10.34
Giandotti	W260	W280	W330	W340	W380	W430	W440	W480	W490
L (Km)	0.171	13.556	9.549	2.24	16.109	11.396	7.711	9.089	9.412
Hg (m)	4	20	589	179	232	610	534	24	51
A (km ²)	0.06	41.15	33.90	12.81	37.74	52.79	36.16	37.33	24.56
Tc (h)	0.76	12.86	1.94	1.65	4.00	2.34	1.93	9.71	5.94
Tlag (h)	0.46	7.71	1.16	0.99	2.40	1.40	1.16	5.83	3.56
Subcuenca	W140	W150	W160	W170	W190	W200	W210	W230	W250
Tlag promedio (h)	1.34	1.28	0.79	1.71	1.43	1.28	0.49	2.78	9.19
Subcuenca	W260	W280	W330	W340	W380	W430	W440	W480	W490
Tlag promedio (h)	0.28	6.19	1.36	0.79	2.62	1.79	1.43	4.54	3.12

6.3.2.2. Propagación de la crecida

Se trata del tiempo que tarda la crecida en circular a través de una subcuenca situada aguas abajo. Es decir, si la zona de estudio se divide en diferentes subcuencas, el hidrograma de la crecida que se genere en el punto de drenaje de la subcuenca más elevada se deberá propagar aguas abajo por el lecho del río de la subcuenca siguiente. Esta circulación del flujo produce dos efectos: retardo en el caudal máximo del hidrograma debido al tiempo que tarda el río en atravesar el tramo de río de la nueva subcuenca; atenuación del caudal máximo causado por los procesos de dispersión y almacenamiento que tienen lugar en el canal (figura 16).

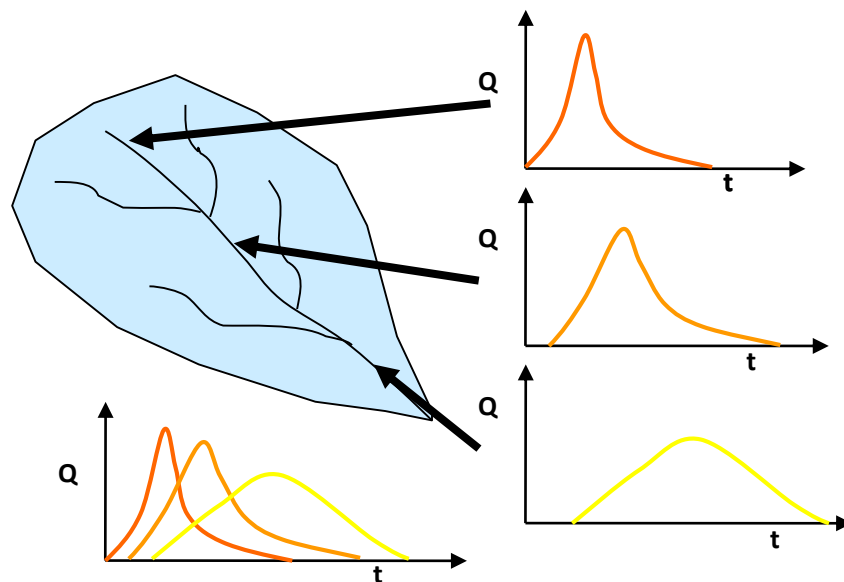


Figura 15. Ejemplo de los efectos de la propagación de la crecida en el hidrograma aguas abajo. Se observa tanto el retardo como la atenuación del máximo.

Existen diversos mecanismos para calcular la propagación de la crecida:

- T_{lag} : Únicamente representa el retardo en la propagación de la crecida, no atenúa el máximo del hidrograma. Se basa en cálculos empíricos del tiempo de propagación, Por lo que únicamente se puede aplicar en tramos donde se dispone de registros de este dato. Este método no tiene en cuenta la atenuación del pico del hidrograma.
- Muskingum: Se basa en el análisis de hidrogramas reales y parte de dos parámetros, uno representa el retardo en la propagación de la crecida y el otro la atenuación de caudal máximo. Se trata de un método muy utilizado y que proporciona excelentes resultados, pero para su utilización se requieren hidrogramas registrados para diferentes episodios de precipitación.

- **Munskingum-Cunge:** Se trata de una modificación del método de Muskingum basada en parámetros físicos de la cuenca. Elimina la necesidad de utilizar hidrogramas históricos, pudiendo aplicar el método en cuencas sin estaciones de aforo.

En el caso del río Madre Vieja, al no disponer de hidrogramas reales se ha utilizado el método de Muskingum-Cunge. Este requiere los siguientes datos para su uso:

- Longitud del tramo por donde se propaga la crecida (metros)
- Pendiente del cauce por donde se propaga la crecida (metros/metros)
- Coeficiente de rugosidad de Manning promedio del cauce (adimensional)
- Forma del lecho del río (en este estudio se han simplificado los cauces a formas rectangulares).
- Ancho del cauce (metros)

Estos datos se han estimado para cada uno de los tramos donde se propagan las crecidas (figura 17) en el modelo del río Madre Vieja, a partir de fotografías aéreas (cuadro 8).

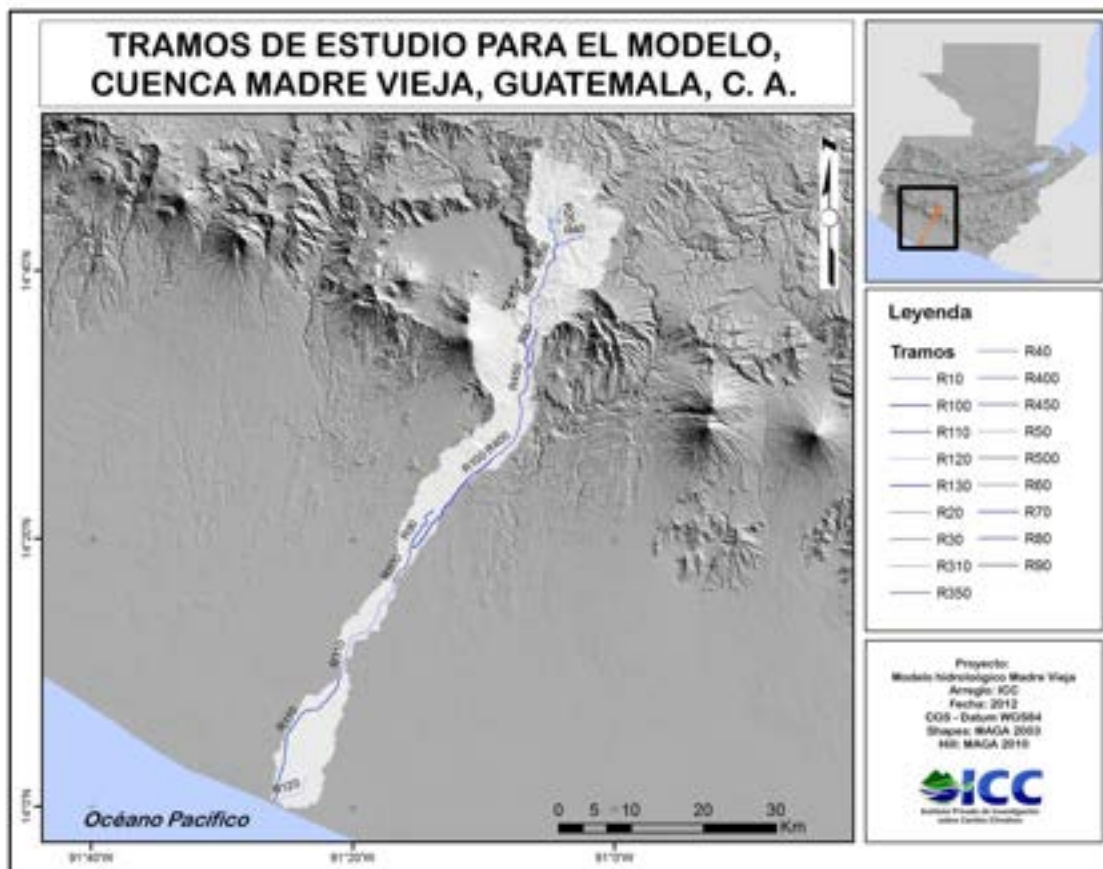


Figura 16. Tramos de estudio en el modelo del río Madre Vieja. Nótese que el método de Muskingum-Cunge únicamente se ha aplicado en los tramos donde la crecida se propaga aguas abajo. En la nomenclatura utilizada, la letra “R” indica cada uno de los tramos (Reaches en inglés) que conforman el río. Cada uno de éstos se ha numerado durante la generación del modelo.

Cuadro 8. Parámetros calculados para la metodología Muskingum-Cunge.

Tramo	Forma	Longitud (m)	Inclinación (m/m)	Ancho promedio (m)	Manning promedio
R60	Rectangular	13,619	0.04964	23	0.045
R70	Rectangular	4,523	0.04113	21	0.048
R100	Rectangular	18,835	0.01168	38	0.048
R110	Rectangular	22,884	0.00153	29	0.03
R130	Rectangular	5,119	0.01660	98	0.045
R310	Rectangular	16,357	0.00238	153	0.03
R350	Rectangular	4,583	0.04015	15	0.045
R400	Rectangular	11,339	0.02452	34	0.035
R450	Rectangular	5,667	0.02982	38	0.035
R500	Rectangular	6,787	0.00442	237	0.048

7. Resultados

El modelo hidrológico se ha generado con el software HEC-HMS 3.5, a partir de los datos expuestos en la sección anterior. El caudal se ha calculado en base a episodios de precipitaciones de diseño con periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años. Se han determinado los hietogramas correspondientes a las estaciones meteorológicas de El Capitán, Santiago Atitlán, Santa Cruz Balanyá, Peña Plata, Tiquisate y San Antonio El Valle para estos períodos de retorno, utilizando la metodología de Mendoza modificada propuesta en (ICC, 2012). Los hietogramas de diseño se han introducido junto con los parámetros hidrológicos de la cuenca: número de curva, superficie, longitud del cauce, tiempo de concentración y de propagación de la crecida.

A partir del número de curva, se ha determinado la precipitación umbral en cada una de las subcuencas, es decir, la cantidad de lluvia que se distribuye en procesos como evaporación, infiltración, intercepción o almacenamiento superficial. De este modo se determina la cantidad de lluvia que va a parar a los cauces de los ríos. Se han analizado los resultados del modelo obteniendo los valores mostrados en el cuadro 9.

Cuadro 9. Lluvia neta y pérdidas a partir de la lluvia inicial.

Subcuenca	W140	W150	W160	W170	W190	W200	W210	W230	W250	
Área (km2)	38.99	27.10	14.23	70.01	35.33	27.21	3.97	44.51	69.23	
Área (tanto por uno)	0.06	0.04	0.02	0.12	0.06	0.04	0.01	0.07	0.11	
T10	Lluvia bruta (mm)	155.60	197.41	197.41	136.49	197.41	192.02	197.41	207.01	214.99
	Lluvia neta (mm)	64.09	87.28	103.39	50.21	44.18	49.38	66.10	105.92	123.93
	Pérdidas (mm)	91.50	110.13	97.02	86.28	153.23	142.64	131.31	101.09	91.06
	% lluvia neta (mmneta/mmbruta)	0.41	0.44	0.52	0.37	0.22	0.26	0.33	0.51	0.58
	Lluvia neta/lluvia bruta ²	0.0026	0.0022	0.0027	0.0027	0.0011	0.0013	0.0017	0.0025	0.0027
T25	Lluvia bruta (mm)	183.28	236.76	236.76	158.83	236.76	230.20	236.76	257.99	284.00
	Lluvia neta (mm)	85.38	118.58	137.00	66.37	66.78	72.71	93.72	149.21	184.87
	Pérdidas (mm)	97.90	118.18	99.76	92.46	169.98	157.48	143.04	108.78	99.13
	% lluvia neta (mmneta/mmbruta)	0.47	0.50	0.58	0.42	0.28	0.32	0.40	0.58	0.65
	Lluvia neta/lluvia bruta ²	0.0025	0.0021	0.0024	0.0026	0.0012	0.0014	0.0017	0.0022	0.0023
T50	Lluvia bruta (mm)	197.89	257.85	257.85	170.48	257.85	250.37	257.85	297.00	336.01
	Lluvia neta (mm)	97.08	136.04	155.53	75.19	79.98	86.03	109.41	183.65	232.48
	Pérdidas (mm)	100.81	121.81	102.32	95.29	177.87	164.34	148.44	113.35	103.53
	% lluvia neta (mmneta/mmbruta)	0.49	0.53	0.60	0.44	0.31	0.34	0.42	0.62	0.69
	Lluvia neta/lluvia bruta ²	0.0025	0.0020	0.0023	0.0026	0.0012	0.0014	0.0016	0.0021	0.0021

Subcuenca	W280	W330	W340	W380	W430	W440	W480	W490	
Área (km2)	41.15	33.90	12.81	37.74	52.79	36.16	37.33	24.56	
Área (tanto por uno)	0.07	0.06	0.02	0.06	0.09	0.06	0.06	0.04	
T10	Lluvia bruta (mm)	214.99	197.41	197.41	207.01	202.39	198.75	207.81	207.01
	Lluvia neta (mm)	115.55	69.89	101.74	97.60	87.19	64.14	110.82	125.41
	Pérdidas (mm)	99.44	127.52	95.67	109.41	115.21	134.61	96.99	81.60
	% lluvia neta (mmneta/mmbruta)	0.54	0.35	0.52	0.47	0.43	0.32	0.53	0.61
	Lluvia neta/lluvia bruta ²	0.0025	0.0018	0.0026	0.0023	0.0021	0.0016	0.0026	0.0029
T25	Lluvia bruta (mm)	284.00	236.76	236.76	257.99	250.46	241.06	260.59	257.99
	Lluvia neta (mm)	175.38	98.19	135.01	139.08	125.03	93.29	156.20	171.43
	Pérdidas (mm)	108.62	138.57	101.75	118.91	125.44	147.77	104.39	86.56
	% lluvia neta (mmneta/mmbruta)	0.62	0.41	0.57	0.54	0.50	0.39	0.60	0.66
	Lluvia neta/lluvia bruta ²	0.0022	0.0018	0.0024	0.0021	0.0020	0.0016	0.0023	0.0026
T50	Lluvia bruta (mm)	336.01	257.85	257.85	297.00	285.43	266.94	300.90	297.00
	Lluvia neta (mm)	222.37	114.21	153.39	172.37	154.03	112.36	192.16	207.56
	Pérdidas (mm)	113.64	143.64	104.46	124.63	131.40	154.59	108.74	89.44

% lluvia neta (mmneta/mmbruta)	0.44	0.59	0.58	0.54	0.42	0.64	0.70	0.44
Lluvia neta/lluvia bruta ²	0.0017	0.0023	0.0020	0.0019	0.0016	0.0021	0.0024	0.0017

Parámetros:

Lluvia bruta (mm) volumen de lluvia total caída sobre una zona determinada.

Lluvia neta (mm) fracción de la lluvia bruta que pasa a formar escorrentía superficial en forma de ríos, arroyos u otras corrientes de agua.

Pérdidas (mm) fracción de la lluvia bruta que se distribuye en procesos como evaporación, infiltración, interceptación o almacenamiento superficial.

Porcentaje de lluvia neta (mm lluvia neta/mm lluvia bruta) porcentaje de lluvia que se convierte en escorrentía directa.

Lluvia neta/lluvia bruta²

Se pueden observar tendencias importantes en el porcentaje de lluvia inicial que se convierte en lluvia neta, por ejemplo, en una misma subcuenca el porcentaje de lluvia neta incrementa cuando incrementa el periodo de retorno. Esto significa que cuanto mayor es el volumen de precipitación mayor será la proporción de agua que generará escorrentía superficial. Esta relación tiene sentido puesto que las pérdidas hidrológicas no pueden incrementar indefinidamente (el suelo, por ejemplo, tiene una capacidad limitada de absorción de agua de lluvia). Cuando el volumen de precipitación excede el valor máximo de pérdidas hidrológicas, la proporción de lluvia neta incrementa rápidamente.

La escorrentía determinada con los resultados anteriores se caracteriza por su distribución y recorrido en la cuenca. Esto se puede determinar a partir de parámetros como el tiempo de concentración, el tiempo de retardo y el tiempo de propagación de la crecida. En los cuadros 10 y 11 se resumen los diferentes valores calculados para las subcuencas de la cuenca Madre Vieja:

Cuadro 10. Tiempo de concentración y retardo para cada una de las subcuencas. El tiempo de concentración se ha determinado mediante el promedio de los métodos de Kirpich y Giandotti. El tiempo de retardo se ha calculado como el 60% del tiempo de concentración.

	W140	W150	W160	W170	W190	W200	W210	W230	W250
Tiempo de concentración (h)	1.34	1.28	0.79	1.71	1.43	1.28	0.49	2.78	9.19
Tiempo de retardo (h)	0.80	0.77	0.47	1.03	0.86	0.77	0.29	1.67	5.51

	W260	W280	W330	W340	W380	W430	W440	W480	W490
Tiempo de concentración (h)	0.28	6.19	1.36	0.79	2.62	1.79	1.43	4.54	3.12
Tiempo de retardo (h)	0.17	3.71	0.82	0.47	1.57	1.07	0.86	2.72	1.87

La subcuenca con mayor tiempo de retardo es W280. Esto se debe a que sea la segunda subcuenca con mayor longitud del cauce (22.8km) y, además, ocupe la zona con el relieve más suave de la cuenca, con un desnivel en el cauce de 37m. El tiempo de retardo depende, principalmente de estos valores, por eso resulta coherente que ésta sea la subcuenca con un valor mayor.

A pesar del valor añadido que supone la combinación de dos ecuaciones, sigue siendo necesaria la validación de los valores obtenidos con registros reales para dar mayor fiabilidad al modelo.

Cuadro 11. Tiempo de propagación de la crecida por los tramos R30, R50 y R70. Se ha calculado mediante la fórmula de Muskingum-Cunge. Los valores de Manning asignados han sido de 0.05.

Tramo	Subcuenca	Longitud tramo (m)	Inclinación tramo (m/m)	Amplitud promedio del cauce (m)	Tiempo de propagación
R60	W330	13,619	0.04964	23	15 min
R70	W210	4,523	0.04113	21	15 min
R100	W380	18,835	0.01168	38	45 min
R110	W280	22,884	0.00153	29	1h 15 min
R130	W260	5,119	0.01660	98	15 min
R310	W480	16,357	0.00238	153	45 min
R350	W340	4,583	0.04015	15	15 min
R400	W430	11,339	0.02452	34	15 min
R450	W440	5,667	0.02982	38	15 min
R500	W490	6,787	0.00442	237	30 min

Los datos determinados de tiempo de concentración y propagación de la crecida pueden servir para realizar estimaciones en la generación de inundaciones. Sin embargo, a pesar de que el método Muskingum-Cunge determina un tiempo de propagación de la crecida para una longitud determinada, no es conveniente establecer datos de velocidad del flujo a partir de estas estimaciones. La velocidad está fuertemente relacionada con la topografía del cauce y con el caudal de crecida, y se debe estimar a partir de modelos hidráulicos.

A partir de los resultados expuestos, el software HEC-HMS 3.5 ha generado hidrogramas de crecida para los diferentes períodos de retorno (figura 18). El tiempo que transcurre entre el valor de precipitación máxima y el valor de caudal máximo al final de la cuenca es de 5 horas y 30 minutos. Se han determinado los caudales máximos para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años (Cuadro 12).

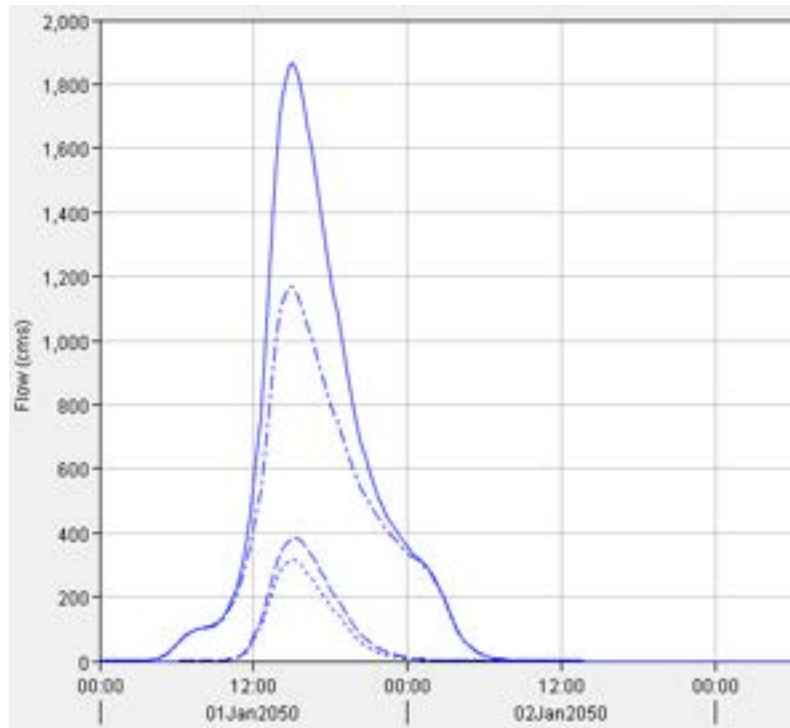


Figura 17. Hidrograma generado en el modelo hidrológico en el Madre Vieja a su paso por el municipio de Cocales, para un período de retorno de 50 años. Nótese que este hidrograma es la suma de todos los hidrogramas procedentes de las subcuencas situadas río arriba (hidrogramas discontinuos).

Cuadro 12. Caudales máximos estimados (en m^3/s) para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años.

	T2	T5	T10	T25	T50
Madre Vieja Alto (Cocales)	595	1,138	1,354	1,350	1,865
Madre Vieja Bajo (Desembocadura)	676	1,453	1,736	1,950	2,707

Se han contrastado estos resultados con los valores obtenidos con el método de la crecida índice, se observa que los valores obtenidos con el método desarrollado por INSIVUMEH son significativamente menores que los valores estimados mediante la modelación hidrológica (cuadro 13). No obstante, sin la disponibilidad de registros de caudal continuos, no se puede determinar la precisión de los métodos utilizados. Debido al tamaño de los sedimentos

observados en el cauce del río en las visitas de campo realizadas, es probable que los valores de INSIVUMEH subestimen el caudal máximo, especialmente, en la cuenca alta. Además, los valores calculados para periodos de retorno de 2 años, en la cuenca alta son similares a los caudales aforados durante la época seca del presente año, lo que hace pensar que los caudales máximos están subestimados. No obstante, esto no implica que los valores generados por el modelo hidrológico sean más precisos, lo cual requiere de información histórica para poder ser validado.

Cuadro 13. Comparación resultados del método regional con el modelo lluvia-escorrentía. Los valores del método regional corresponden al método de curva envolvente.

Subcuenca	Método regional			Método lluvia-escorrentía			Variación máxima
	T10	T25	T50	T10	T25	T50	
Madre Vieja Alto (Cocales)	80	98	112	1,354	1,350	1,865	
Madre Vieja Bajo (Desembocadura)	976	1,227	1,407	1,736	1,950	2,707	

Los hidrogramas generados por el modelo se pueden consultar en el Anexo III.

No se pueden interpretar los valores generados por el modelo, sin tener en cuenta las limitaciones de éste. A continuación se detallan dichas limitaciones:

- La escasez de datos de intensidad de precipitación es una fuerte limitante, teniendo en cuenta la superficie que se está modelando. Sería conveniente empezar a realizar estudios de intensidad de precipitación de las estaciones administradas por el ICC, así como planificar la instalación de nuevas estaciones en las partes altas de las cuencas.
- Falta de registros fiables para calcular el tiempo de retardo. Para determinar este parámetro se necesitan registros recientes de precipitación y caudal que permitan relacionar la precipitación máxima con el caudal máximo asociado y determinar el tiempo que transcurre entre ambos.
- Falta de registros fiables del tiempo de propagación de la crecida. Sería necesario disponer de registros continuos de caudal en diferentes puntos a lo largo del río.
- Falta de registros continuos de caudal asociados a episodios de precipitación recientes para calibrar y validar el modelo. El margen de error del modelo será igual que la resolución temporal de los datos de calibración, por eso se recomiendan intervalos de entre 15 y 60 minutos.

Resumiendo, se necesitan datos para contrastar los resultados del modelo con registros reales. El primer paso es determinar el intervalo de confianza de los resultados del modelo. Posteriormente, una vez se calibre y valide el modelo, éste será plenamente funcional, generando resultados fiables.

8. Conclusiones

En el presente proyecto se ha desarrollado un modelo hidrológico lluvia-escorrentía para obtener estimaciones de caudal en la cuenca del río Madre Vieja, la cual no presenta registros históricos de caudal. A diferencia de los métodos regionales utilizados hasta ahora en la región, el modelo generado incorpora características hidrológicas de la cuenca: Estima cómo se distribuye el agua de lluvia en la cuenca, determinando cuanta pasará a formar parte de la escorrentía a partir del método del número de curva (cuadro 9). Posteriormente, se estima el comportamiento de dicha escorrentía a partir de los parámetros de tiempo de concentración, y tiempo de propagación de la crecida, valores que se han calculado a partir de ecuaciones teóricas debido a la poca disponibilidad de registros de caudal en la cuenca (cuadros 10 y 11).

Los valores de caudal determinados por el modelo lluvia-escorrentía se han comparado con los resultados del modelo regional de la crecida índice (cuadro 13). La comparación muestra grandes diferencias en la mayoría de subcuencas, donde el modelo hidrológico estima crecidas de mayor magnitud a las estimadas por el método regional. Esto puede reflejar que el método regional no tiene en cuenta las peculiaridades de las cuencas de sus regiones hidrológicas preestablecidas. Por otro lado, es probable que a pesar de haber aplicado el coeficiente de uniformidad, la precipitación máxima calculada como entrada al modelo se haya sobreestimado.

No obstante, se requieren registros reales de caudal para determinar la precisión del modelo. Estos registros también se deberán utilizar para calibrar y validar el modelo. Mediante este proceso no sólo se mejora la capacidad predictiva del modelo sino que también se ajustan los diferentes parámetros que lo componen (tiempo de concentración, número de curva, etc.).

En futuros estudios del río Madre Vieja se recomienda utilizar los valores de caudal generados por el modelo lluvia-escorrentía (cuadro 13) en detrimento del método regional, para partir del peor escenario posible ante una crecida asociada a un evento extremo:

T10: 1,736m³/s; T25: 1,950m³/s; T50: 2,707m³/s.

Sin embargo, se debe remarcar de nuevo que se trata de un modelo en período experimental de manera que los resultados se deben tratar con cautela hasta que se éste sea calibrado.

9. Recomendaciones

A continuación se detallan una serie de recomendaciones referentes a los datos necesarios para optimizar el modelo, se resaltan en **negrita** los aspectos críticos. La mayoría corresponden con vacíos de información, necesaria para la calibración del modelo:

- **Modelo de Elevación Digital:** Para generar el modelo hidrológico de la cuenca no es necesario disponer de un DEM (por sus siglas en inglés) de gran resolución, basta con uno de 15m x 15m.
- **Registros de precipitación:** Los registros diarios establecen una buena base para estimar la precipitación asociada a un determinado periodo de retorno. No obstante, se necesitan datos con mayor resolución temporal, entre 10 y 60 minutos para determinar el tiempo de concentración y para calibrar el modelo con precisión. La red de estaciones administradas por el ICC supone un excelente complemento a los registros de INSIVUMEH. A pesar de esto, sería necesaria la colocación de un mayor número de estaciones en las zonas altas de las cuencas.
- **Registros de caudal:** Los registros de caudal a lo largo del curso del río, es de gran importancia para valorar la fiabilidad y precisión de los caudales estimados por los modelos. Es importante establecer una red de registro de caudales. Para esto se recomienda establecer los puntos de interés para obtener medidas de caudal (que permita, por ejemplo, determinar qué cantidad de agua aporta un determinado afluente al cauce principal o el caudal de salida al océano al final del río). Los puntos de medida se deben ubicar en secciones lo más estables posibles (por ejemplo en puentes que encaucen el río). Aquí se podrá instalar un sensor del nivel del agua que, mediante una curva de calibración, permitirá determinar el caudal. La frecuencia en la toma de datos es importante y debe realizarse en periodos cortos de tiempo. Se recomienda registrar valores de caudal en intervalos de tiempo de entre 15 y 60 minutos. Estos valores no solo permitirán determinar el valor de caudal en cada momento, sino el tiempo de transito de la crecida en diferentes episodios de inundación, calculando el tiempo transcurrido entre los caudales máximos. La fiabilidad del tiempo estimado dependerá de la resolución temporal en la toma de datos.
- A partir de los registros de precipitación y caudal que se especifican anteriormente, se debe proceder a la calibración y validación del modelo. Así como a realizar un análisis de sensibilidad del modelo a los diferentes parámetros.
- **Tiempo de propagación de la crecida:** A pesar de que es un parámetro importante del modelo, se puede calcular mediante la fórmula teórica de Kirpich y Giandotti, siempre que se posea de un hidrograma para calibrar el modelo posteriormente.

10. Glosario

En este apartado se definen algunos conceptos utilizados en este documento que pueden resultar ambiguos y generar confusión.

Cauce: Canal natural por el cual transcurre el río.

Coefficiente de rugosidad de Manning: Coeficiente adimensional que determina la dificultad del agua para atravesar un terreno, ya sea en el cauce del río o en los márgenes de éste. La determinación de este parámetro es empírica y cualitativa.

Cuenca: Porción de territorio en la que la precipitación incidente pasa a formar parte del río principal a través de escorrentía superficial. También se denomina cuenca hidrográfica.

Curva de gastos: Gráfico que muestra la relación entre la altura de la lámina de agua y el caudal en el río.

Hidrograma: Gráfico que muestra el valor del caudal en función del tiempo.

Hietograma: Gráfico que muestra el valor de precipitación en función de tiempo.

Lecho: Canal natural por el cual transcurre el río.

Modelo hidráulico: Proyecta el caudal obtenido por el modelo hidrológico dentro del lecho del río y modela su comportamiento. Estima la altura y alcance de la crecida.

Modelo hidrológico: Permite determinar el caudal correspondiente a un determinado episodio de precipitación.

Período de retorno: Inverso de la probabilidad de que un fenómeno suceda. Una precipitación con un período de retorno de 50 años tiene una probabilidad de 1/50 de ocurrir en un año determinado.

Precipitación de diseño: Precipitación teórica, generalmente correspondiente a la precipitación máxima probable para un determinado período de retorno. Esta precipitación de diseño es el resultado del estudio estadístico de los registros de lluvia existentes.

Tiempo de concentración: Es el tiempo que transcurre entre el valor de precipitación máxima y el caudal máximo.

Velocidad de propagación: Determina el tiempo que tarda la crecida en propagarse de un punto a otro.

11. Referencias

- ACA, 2003. Recomanacions tècniques per als estudis d'inundabilitat d'àmbit local. Agència Catalana de l'Aigua. Generalitat de Catalunya. Barcelona.
- Bobée B, Rasmussen PF, Recent advances in flood frequency analysis. U.S. national report to IUGG, 1991-1994, Rev. Geophys., 1995; 33(Suppl.):1111-6.
- Boni B., Ferraris L., Giannoni F., Roth G., Rudari R., 2007. Flood probability for un-gauged watershed by means of a simple distributed hydrologic model. Advances in Water Resources, 2007, Vol.30(10), pp.2135-2144.
- CEPAL, 1999. Guatemala: Evaluación de los daños ocasionados por el huracán Mitch, 1998. Guatemala, Comisión Económica Para América Latina y el Caribe. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Sistema de Naciones Unidas.
- CEPAL, 2003. Manual para la evaluación del impacto socioeconómico y ambiental de los desastres. Comisión Económica Para América Latina y el Caribe. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Sistema de Naciones Unidas.
- CEPAL, 2005. Efectos en Guatemala de las lluvias torrenciales y la tormenta tropical Stan, octubre de 2005. Guatemala, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Sistema de Naciones Unidas.
- CEPAL, 2010. Evaluación de daños y pérdidas sectoriales y estimación de necesidades ocasionados por el paso de la tormenta tropical Agatha y la erupción del volcán Pacaya. Guatemala, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Sistema de Naciones Unidas.
- CHOW V. T., 1988. Chow, V. T.; Maidment, D. R.; Mays, L. W. 1988. Applied Hydrology, McGraw-Hill International editions
- CIV, 2007. Estudio del diseño de las obras para mitigar el impacto del Canal de Chiquimulilla sobre la infraestructura vial de la ruta CA-09 y poblaciones aledañas. Unidad de Manejo de Ríos y Canales. Dirección General de Caminos. Ministerio de comunicaciones, infraestructura y vivienda. Guatemala.
- CIV, 2009. Estudio y diseño de las obras para mitigar el impacto del río Achiguate sobre la infraestructura vial de la ruta CA-02 occidente (puente Achiguate), ruta RD-38-ESC (puente La Barrita), CA-09-SUR y poblaciones aledañas al cauce. Unidad de manejo de ríos y canales, Dirección General de Caminos. Ministerio de Comunicaciones, infraestructura y vivienda. Guatemala.

- Guerra, A., 2010. Climate-related disaster risk in mountain areas: the Guatemalan highlands at the start of the 21st Century. School of Geography and the Environment. Oxford, University of Oxford.
- Gil, 2012. Estudio de intensidad de precipitación en las cuencas de los ríos Coyolate, Achiguate, Acomé, María Linda, Los Esclavos y Paso Hondo. Instituto Privado de Investigación sobre cambio Climático. Guatemala.
- INSIVUMEH, 2004. Estudio regional de crecidas de la República de Guatemala. INSIVUMEH. Ministerio de Infraestructura y Vivienda. Guatemala.
- Jovel, R. y R. Zapata (1993), Macroeconomic effects of natural disasters in Latin America and the Caribbean, ponencia presentada a la 40^a Reunión Norteamericana de la Asociación Internacional de Ciencia Regional, Houston, 11-14 de noviembre.
- Larios R., 1986. Análisis regional de frecuencia de avenidas máximas. Universidad Mariano Gálvez de Guatemala. Guatemala.
- MAGA-INSIVUMEH, 2002. Estimación de amenazas inducidas por fenómenos hidrometeorológicos en la República de Guatemala. Colaboradores: PMA (Programa Mundial de Alimentos) y CONRED.
- MAGA-INSIVUMEH, 2002. Estimación de amenazas inducidas por fenómenos hidrometeorológicos en la República de Guatemala. Programa de Emergencia por Desastres Naturales, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. INSIVUMEH. Programa Mundial de Alimentos. Guatemala.
- Mendoza, J. C., 1994. Determinación de las relaciones temporales entre precipitación de 24 horas y precipitaciones horarias. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia.
- ONU 2009. Informe de evaluación global sobre la reducción del riesgo de desastres. Naciones Unidas, Ginebra, Suiza.
- Pandey G.R., Nguyen V., 1999. A comparative study of regression based methods in regional flood frequency analysis. Journal of Hydrology, 1999, Vol.225(1), pp.92-101.
- Pasche, E. 2007. Surface hydrology. University of Technology Hamburg-Harburg (TUHH). Hamburgo, Alemania.
- Ponce, V. M., 1989. Ponce, V. M. Engineering hydrology. Principles and practices. New Jersey. Ed. Prentice Hall.
- Salguero, M.R., 2002. Estudio hidrogeológico con fines de riego, de la cuenca del río Acomé, Escuintla, Guatemala.
- SCS, 1972. Section 4: hydrology. National Engineering Handbook. Soil Conservation Service. United States Department of Agriculture.

Snyder, F. F., 1938, Synthetic unit graphs, Trans. ACU, vol. 19, pp. 447-454.

Tarjuelo, 2005. El Riego por aspersión y su tecnología. Ediciones Mundi-Prensa.

UNESCO-RAPCA, 2003. Zonificación de amenazas naturales en la cuenca del río Samalá y análisis de vulnerabilidad y riesgo en la población de San Sebastián Rehutalueu, Guatemala, Centro América. Programa de Acción Regional para Centro América, UNESCO.



**Instituto Privado de Investigación
sobre Cambio Climático**