



Instituto Privado de Investigación  
sobre Cambio Climático

# ESTUDIO HIDRÁULICO DEL RÍO COYOLATE

Para la determinación de zonas susceptibles a inundación

Guatemala, Centroamérica



Instituto Privado de Investigación  
sobre Cambio Climático

# ESTUDIO HIDRÁULICO DEL RÍO COYOLATE

Para la determinación de zonas susceptibles a inundación

Guatemala, Centroamérica

Autor: Sergio Gil Villalba

Impreso: Digitalhouse

Guatemala, 2017

Tiraje: 12 ejemplares

Digital: ISBN 978-9929-8241-5-7

### CITA BIBLIOGRÁFICA

ICC (Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático). 2013. Estudio hidráulico del río Coyolate para la determinación de zonas susceptibles a inundación. Guatemala. 47 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

<p><b>1. Introducción ..... 4</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>1.1 Inundaciones..... 4</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>1.2. Introducción a los modelos ..... 5</b></p> <p><b>2. Objetivos..... 6</b></p> <p><b>3. Zona de estudio ..... 6</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>3.1 Ubicación ..... 6</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>3.2. Geología..... 7</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>3.3. Antecedentes ..... 8</b></p> <p><b>4. Datos iniciales .....10</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>4.1. Topografía.....10</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>4.2. Datos de caudal.....11</b></p> <p><b>5. Metodología .....12</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>5.1. Topografía.....12</b></p> <p style="padding-left: 40px;"><b>5.1.1. Secciones .....12</b></p> <p style="padding-left: 40px;"><b>5.1.2. Modelo de elevaciones.....12</b></p> <p style="padding-left: 40px;"><b>5.1.3 Secciones transversales .....12</b></p> <p style="padding-left: 40px;"><b>5.1.4 Interpolación secciones .....13</b></p>	<p><b>5.2. Modelación ..... 16</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>5.2.1. Fundamentos modelación..... 17</b></p> <p><b>5.3. Validación ..... 20</b></p> <p><b>6. Resultados ..... 23</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>6.1. Secciones..... 23</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>6.2. Modelo de elevaciones ..... 23</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>6.3. Validación en campo..... 24</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>6.4. Vías de intenso desagüe ..... 24</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>6.5. Zonas de empozamiento..... 25</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>6.6. Zonas susceptibles a inundaciones25</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>6.7. Mapas ..... 27</b></p> <p><b>7. Conclusiones..... 35</b></p> <p><b>8. Recomendaciones ..... 36</b></p> <p><b>9. Glosario ..... 37</b></p> <p><b>10. Referencias ..... 38</b></p> <p><b>ANEXO I. MAPAS DE LÍNEAS DE FLUJO.... 41</b></p> <p><b>ANEXO II. Variables en HEC-RAS..... 44</b></p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Mapa geológico de la cuenca del río Coyolate. _____	7
Figura 2. Ejemplo de datos de un tramo del río Coyolate. _____	11
Figura 3. Resultados de diferentes métodos de interpolación de las secciones transversales para un meandro cercano a Santa Odilia. _____	14
Figura 4. Modelo hidráulico en meandro de Santa Odilia. _____	16
Figura 5. Sección transversal del Coyolate a un kilómetro de la desembocadura. _____	18
Figura 6. Número de Froude calculado para los diferentes períodos de retorno por el modelo a lo largo del cauce. _____	19
Figura 7. Perfil de la crecida a lo largo del cauce, para los períodos de retorno de 2 y 100 años. ____	20
Figura 8. Ejemplos de la información generada por actores locales en los mapas proporcionados. __	21
Figura 9. a) Mapa de líneas de flujo en el tramo bajo del Coyolate. b) Mapa de curvas de nivel en el tramo bajo del río Coyolate. _____	22
Figura 10. Ortofotomapa de zonas susceptibles a inundación del río Coyolate. Nótese los depósitos de material causados por desbordes previos. _____	22
Figura 11. Resultados del modelo basado en las secciones iniciales. Se utilizó para identificar los tramos con mayor susceptibilidad a desborde. _____	23

**ÍNDICE DE CUADROS**

Cuadro 1. Indicadores estadísticos para evaluación del desempeño de los diferentes métodos de interpolación. _____	15
Cuadro 2. Diferencias en la predicción de la superficie de inundación a partir del modelo de elevaciones y la fusión de la interpolación de las secciones con el modelo de elevaciones. _____	24

## 1. Introducción

### 1.1 Inundaciones

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 guatemalteca, el sector azucarero ha fundado una institución con el nombre de “Instituto Privado de Investigación sobre 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 estudio del 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 de investigación en el campo de la hidrología mediante la aplicación de modelos predictivos. La correcta implementación de esta tecnología permitirá fortalecer los mecanismos de prevención a partir de la predicción del impacto de los episodios de inundación.

En el presente estudio se determinaron las zonas susceptibles a inundación en los últimos 34 kilómetros del río Coyolate antes de desembocar en el mar para eventos de diferente magnitud. Los 19 kilómetros finales se determinaron por medio de modelos hidráulicos y el resto mediante campañas de campo y topografía.

## 1.2. Introducción a los modelos

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 un conjunto 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 hidráulicos determinan el comportamiento del flujo en el lecho del río en el momento de crecida. Basándose en datos de caudal pueden estimar la altura y velocidad de la crecida, así como la extensión de las zonas inundadas. Existen dos factores críticos para la generación de modelos hidráulicos: los datos de flujo (caudal para un episodio determinado) y la topografía del lecho del río y las zonas inundables (Horrit and Bates, 2001). Los modelos hidráulicos se pueden dividir en:

- **Modelo unidimensional:** Los datos topográficos que se utilizan en el modelo corresponden a secciones transversales tomadas en el río. El flujo siempre se considera perpendicular a dichas secciones (1D). Para cada una de las secciones se calcula la altura y velocidad de la crecida. En el espacio entre dos secciones consecutivas, estos parámetros se estiman con una interpolación de los datos obtenidos, de manera que para realizar un modelo preciso es conveniente que la separación entre secciones sea mínima, especialmente en el caso de cauces irregulares. El software más conocido para la generación de modelos hidráulicos unidimensionales es HEC-RAS<sup>1</sup>.
- **Modelo bidimensional:** La topografía se determina a partir de un modelo del terreno, bien a partir de un raster o una aproximación por elementos finitos (Bates et al., 2000; Feldhaus et al., 1992). El modelo bidimensional calcula el flujo en base a dos componentes, el movimiento aguas abajo y el movimiento lateral en el cauce. Se trata de un modelo especialmente útil cuando los flujos laterales son importantes, esto es en grandes llanuras de inundación o en lugares donde el río se divide formando islas (Ponce V.M. 1989; ACA, 2003). Existen varios software de modelación hidráulica 2D, como MIKE21<sup>2</sup>, Flo-2D, LISFLOOD-FP and TELEMAC-2D (Ponce V.M., 1989; Horrit and Bates, 2002).

---

<sup>1</sup> HEC-RAS: Hydrologic Engineering Center, River Analysis System. (US Army Engineers Corps).

<sup>2</sup> MIKE21 (Danish Hydraulic Institute).

## 2. Objetivos

El objetivo principal es la determinación de zonas susceptibles a inundación en el tramo bajo del río Coyolate mediante la generación de modelos hidráulicos.

Objetivos específicos:

1. Evaluación de diferentes métodos de interpolación en topografía de cauces para observar el desempeño de los mismos.
2. Comparación de las predicciones a partir del modelo de elevación digital disponible y con la incorporación de información topográfica del lecho en forma de secciones transversales.
3. Sondeo de zonas históricamente afectadas por inundaciones con actores locales para validación de los mapas generados por el modelo.
4. Mapeo de zonas inundadas para diferentes períodos de retorno.

## 3. Zona de estudio

### 3.1 Ubicación

El río Coyolate se ubica en la vertiente del Océano Pacífico, en el suroeste de Guatemala. Los volcanes Fuego y Acatenango, situados en la parte alta de la cuenca, aportan grandes cantidades de material que se deposita conformando una extensa llanura de material volcánico. En el tramo inicial la cuenca presenta grandes inclinaciones, salvando una diferencia de altura superior a 2,000 metros hasta llegar a los tramos medio y bajo, sobre la cota de 200msnm, donde las pendientes se tornan mucho más suaves. El cauce principal del Coyolate tiene una longitud de 150km, y la cuenca hidrológica abarca una superficie de 1.616km<sup>2</sup>, formando parte de los departamentos de Chimaltenango, Suchitepéquez y Escuintla (IGN, 1974).

Debido a la magnitud de los episodios de inundación, los ríos de Guatemala -especialmente en la vertiente del Pacífico- han experimentado una serie de cambios tanto en su morfología como en el comportamiento hidráulico (CIV, 2007). En el río Coyolate estos cambios se han producido como resultado de cambios en los patrones climáticos, erosión de los suelos, la falta de una cobertura vegetal apropiada, los continuos aportes de sedimento volcánico y las modificaciones en el lecho del río por la actividad humana (CIV, 2009).

Los cambios en morfología y comportamiento hidráulico del Coyolate han constituido una potencial amenaza a la infraestructura vial, poblados, instalaciones y plantaciones agrícolas (CIV, 2007).

### 3.2 Geología

La geología de la cuenca está determinada por el aporte de material del cinturón volcánico en las partes altas de la cuenca. 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 (figura 1). Los materiales que conforman la llanura se encuentran poco consolidados y presentan permeabilidades elevadas. En el cauce del río se presentan condiciones de resistencia y compactación muy bajas debido a las condiciones de depósito (escorrentías abruptas), las cuales se dan año tras año en la época lluviosa, impidiendo la consolidación de los materiales y generando una morfología irregular e inestable (CIV, 2007; CIV, 2009).

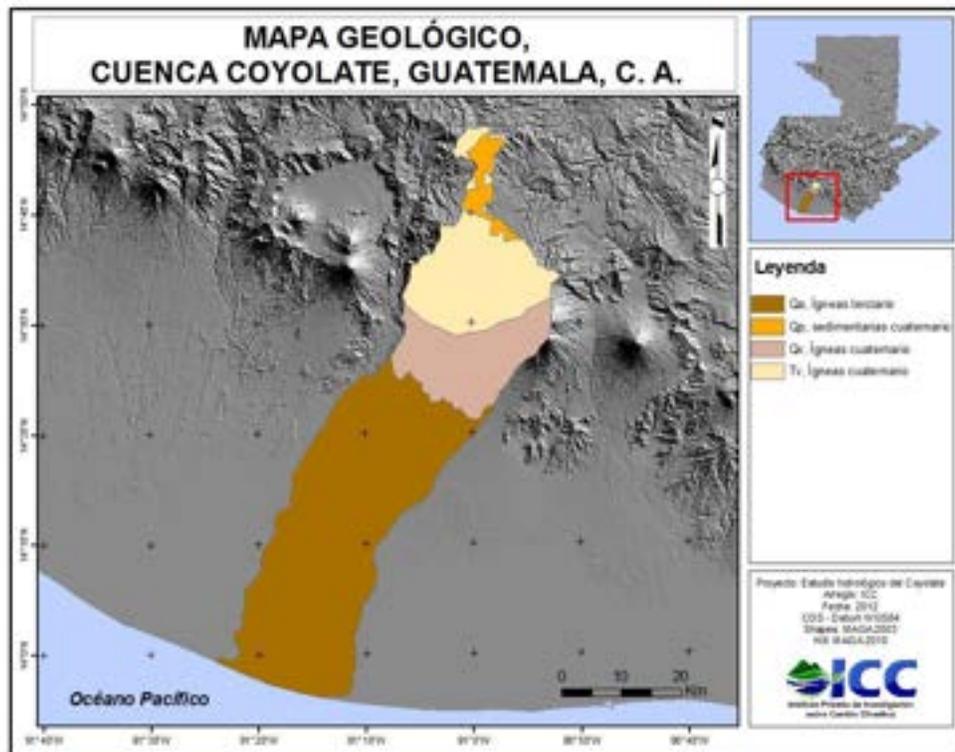


Figura 1. Mapa geológico de la cuenca del río Coyolate.

### 3.3. 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. Estos afectaron de manera importante las cuencas de la vertiente del Pacífico, entre ellas, la de Coyolate:

- **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 Retalhueu) y precipitaciones acumuladas de hasta 868mm (estación Ciudad Tecún Umán). 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 (INSUVUMEH; 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 en Guatemala 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 diferenciadas 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 podrían ser insuficientes para representar el riesgo de inundación y predecir episodios a medio y largo plazo.
- 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 (Retalhuleu).
- 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, 2007. Estudio de la cuenca del Coyolate. 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.

## 4. Datos iniciales

### 4.1. Topografía

Los modelos hidráulicos se fundamentan en una descripción geométrica de la batimetría del río y las zonas aledañas para predecir la superficie afectada por un evento de inundación (Merwade, 2008). Mientras los modelos bidimensionales y tridimensionales funcionan sobre datos continuos de la superficie, los modelos unidimensionales lo hacen sobre datos discretos, en forma de secciones transversales.

Se dispone de dos conjuntos de datos que permiten determinar el relieve de la zona de estudio (figura 2):

- Secciones transversales: Se obtuvieron secciones transversales cada 50 metros para los 19km finales del cauce del Coyolate. Estas secciones fueron tomadas en enero del 2011.
- Modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés): Basado en la fotografía aérea tomada el año 2005 para toda la República de Guatemala. A partir de esta fotografía, en 2010 se creó el modelo de elevaciones con un valor de altura cada 15 metros. La elevación de este conjunto de datos no corresponde con la elevación del terreno o suelo desnudo, sino con los elementos que se ubican sobre este: vegetación, infraestructura, edificaciones, etc.

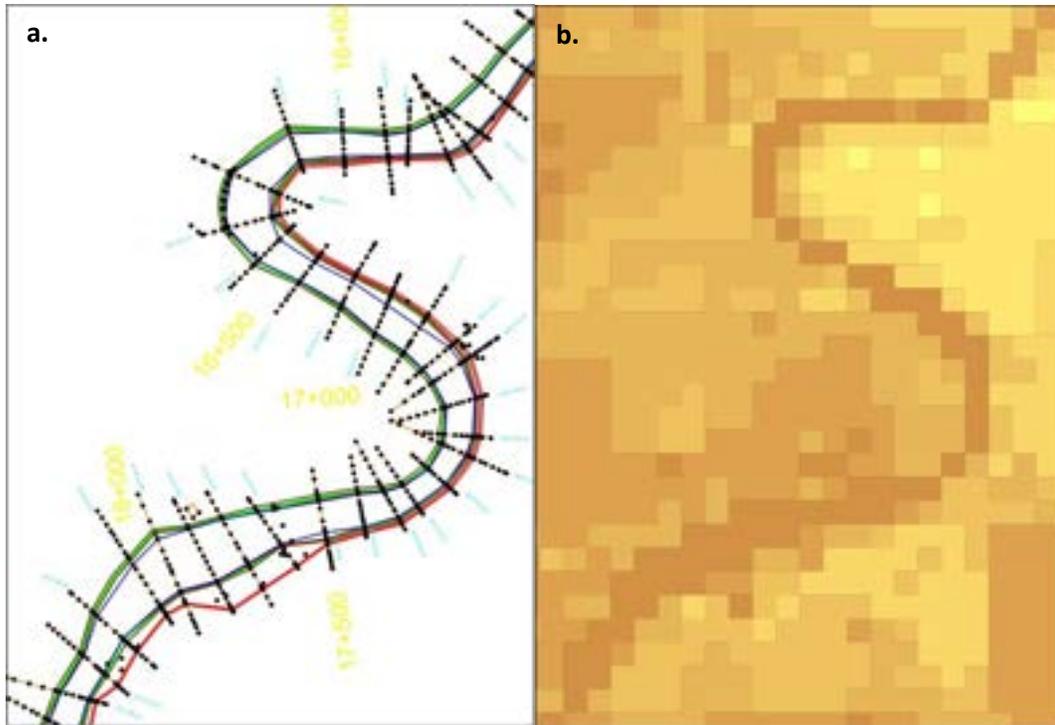


Figura 2. Ejemplo de datos de un tramo del río Coyolate: a) En forma de secciones transversales. b) En forma de modelo de elevaciones.

#### 4.2. Datos de caudal

A falta de la calibración del modelo hidrológico del río Coyolate (Gil, 2011), se van a utilizar en este documento los caudales determinados por el “Análisis regional de crecidas en la República de Guatemala” (INSIVUMEH, 2004), donde se propone la determinación del caudal a partir de la superficie de captación y las características de la región hidrológica donde se ubica la cuenca. Las cuenca del río Coyolate se ubica entre la región I y III, conocidas como Altiplano occidental y Pacífico sur-oriental, respectivamente.

## 5. Metodología

### 5.1. Topografía

#### 5.1.1. Secciones

Las secciones transversales son el fundamento de los modelos hidráulicos unidimensionales como el que se utilizó en el presente análisis. Los datos originales constan de secciones transversales a lo largo de los últimos 17km del río Coyolate, con una distancia de 50 metros entre secciones. Las secciones fueron levantadas en enero de 2011.

#### 5.1.2. Modelo de elevaciones

Se dispuso de un modelo digital de elevaciones (DEM) con una resolución de 15 metros (MAGA, 2006). La bibliografía recomienda resoluciones a partir de 5 metros, para realizar estudios hidráulicos en cauces de ríos (ACA, 2003). No obstante se quiso comprobar la diferencia entre los resultados obtenidos mediante las secciones transversales y el modelo de elevaciones digital. El modelo de elevaciones se generó a partir del procesamiento de las ortofotos tomadas en 2005. Una de las limitantes principales de estos datos topográficos es que no siempre representan la elevación de la superficie natural del terreno, si no que pueden representar elevaciones de la vegetación o de las construcciones o infraestructura.

#### 5.1.3 Secciones transversales superpuestas al DEM

Las secciones transversales disponibles solamente abarcan el cauce menor del río. Se consideró muy probable que la superficie de inundación quedase fuera del marco geográfico de dichas secciones. Para solucionar esta limitación se generó un nuevo set topográfico, fusionando los datos de las secciones transversales, correspondientes al cauce menor, con los datos del DEM para representar las llanuras de inundación. Dicho procedimiento se llevó a cabo en base a la metodología propuesta por Merwade (2008). Se superpusieron los datos de las secciones al set de datos del DEM y se realizó un suavizado del límite entre los dos datos fusionados para evitar cambios abruptos en las cotas de elevación en estas zonas.

Para llevar a cabo el proceso de unión de la información topográfica se estandarizó el formato de los datos, a partir de las secciones transversales se generó una malla tipo raster con una densidad de 15

metros igual que el DEM. Para realizar esta transformación se utilizaron los diferentes métodos de interpolación que se describen en Chaplot, et. al., 2005 y Merwade, et. al., 2008.

#### 5.1.4 Interpolación secciones

Las secciones transversales constituyen una fuente discreta de datos topográficos ya que éstas se componen de una serie de puntos. A partir dichos puntos se ha realizado una serie de interpolaciones para obtener una superficie continua. El objetivo es la integración de estos datos con el DEM, para obtener un conjunto de datos más amplio espacialmente y con mayor precisión en el lecho del río. La unión de los diferentes datos solo se puede hacer si las dos bases de datos son continuas. La interpolación se llevó a cabo mediante diferentes metodologías y se realizó un análisis estadístico para determinar qué método ajustó mejor los datos a los registros originales (figura 3).

Todos los métodos de interpolación utilizados son isotrópicos, es decir, no tienen en cuenta tendencias espaciales en la topografía como la inclinación constantemente decreciente en la dirección del flujo, o la irregularidad del cauce en sentido transversal a la dirección del flujo. No obstante, algunos de los métodos utilizados si incluyen atributos en la interpolación que permiten obtener un cauce siempre decreciente en la dirección del flujo o representar la irregularidad en la topografía del cauce por medio de líneas de quiebre (Breaklines). Los métodos utilizados fueron:

- Inverse Distance Weighting (IDW): Estima los valores de interpolación a partir del promedio de los valores conocidos más cercanos a cada punto interpolado. Cuanto más cercano se encuentra un punto conocido al punto interpolado, mayor peso tiene en la asignación del valor interpolado.
- IDW con líneas de quiebre: Las metodologías determinísticas de interpolación presentan problemas cuando se presentan cambios repentinos de elevación en el terreno (barrancos, cauces de ríos, diques longitudinales, etc.). La inclusión de estas líneas donde un cambio de elevación abrupto es conocido permite obtener mejores resultados de interpolación.
- Spline de tensión: crea una superficie con el relieve más suave posible, tratando que la superficie generada coincida exactamente con todos los puntos iniciales. Incluye valores que pueden estar fuera del rango de datos original.
- Kriging: a diferencia de IDW o Spline, que son métodos determinísticos, se clasifica como método de interpolación geoestadístico, ya que incluye relaciones estadísticas en puntos

correlacionados, asumiendo que la distancia y dirección entre diferentes puntos reflejan una correlación espacial que se puede utilizar para explicar la variación del relieve.

- Vecino Natural (Natural Neighbor): utiliza los puntos más cercanos al punto a interpolar y los pondera en base a la proporción de áreas. Los valores interpolados siempre se encuentran dentro del rango de valores iniciales, pero no infiere tendencias en el relieve, de manera que no representa relieves abruptos correctamente (Sibson, 1981).
- Topo to raster o método ANUDEM (Hutchinson, 1991): se trata de un método de interpolación especialmente diseñado para la creación de modelos digitales de elevación hidrológicamente correctos. Se trata de un método de interpolación por diferencias finitas optimizada que presenta la eficiencia de métodos locales, como el IDW, sin perder la continuidad en la superficie que presentarían métodos globales como Kriging o Spline. Por tanto, este método puede representar las irregularidades transversales a la dirección del flujo (cauces, cárcavas), manteniendo la continuidad en la dirección del flujo (Hutchinson, 1989, 1991).

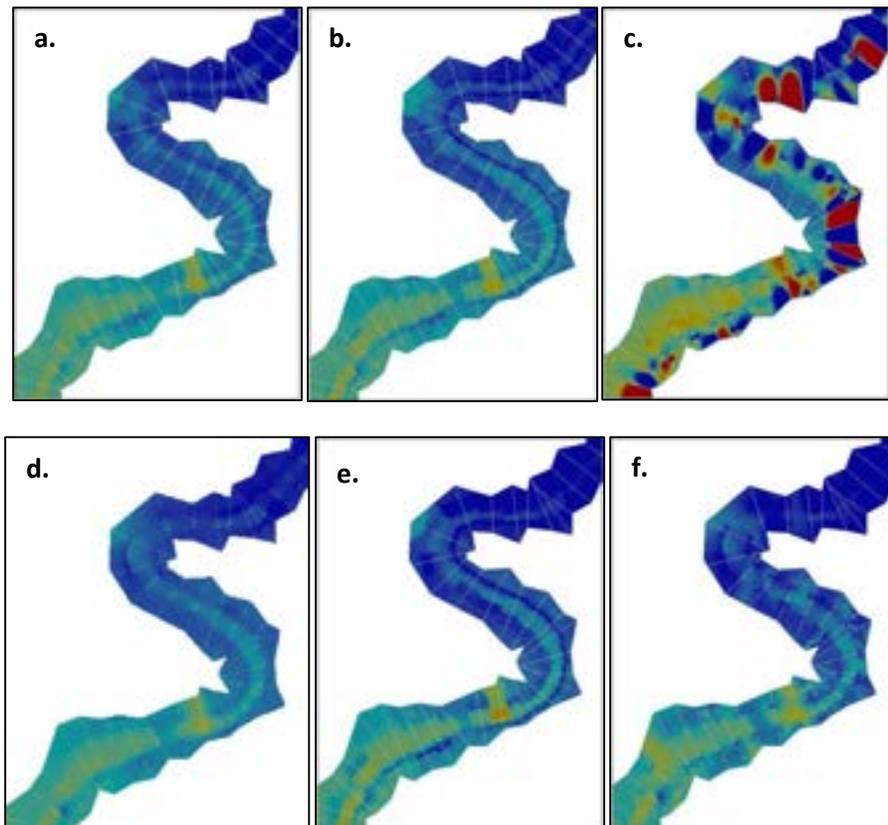


Figura 3. Resultados de diferentes métodos de interpolación de las secciones transversales para un meandro cercano a Santa Odilia. a. IDW. b. IDW con líneas de quiebre. c. Spline de tensión. d. Vecino natural. e. Kriging. f. ANUDEM.

Las metodologías que han presentado mejores ajustes han sido IDW y Kriging. Se ha evaluado el desempeño de dichas metodologías a partir de varios indicadores estadísticos lineales (cuadro 1).

Cuadro 1. Indicadores estadísticos para evaluación del desempeño de los diferentes métodos de interpolación.

	Rango	Promedio	Desviación estándar	Error promedio	RMSE	Curtosis
Datos originales	-0.97 a 28.83	14.036	6.66	0.00	0.00	-0.98
IDW	-0.96 a 28.72	14.039	6.64	0.16	0.30	-0.98
IDW breaklines	-0.94 a 28.71	14.002	6.63	0.29	0.55	-0.99
Spline de tensión	-606.60 a 760.39	13.891	18.86	1.22	17.72	859.13
Kriging	-0.90 a 28.51	14.048	6.64	0.15	0.24	-0.98
Vecino natural	-0.94 a 28.39	14.028	6.60	0.31	0.52	-0.99
Topo to Raster (ANUDEM)	-0.97 a 28.72	17.074	6.63	0.29	0.49	-0.98

- El rango de predicción muestra la desviación en la predicción de los valores mínimo y máximo de la topografía. Los datos originales se comprenden en un rango de entre -0.97 y 28.83 msnm. Todos los métodos de interpolación se ajustan a este rango con unos márgenes de error muy pequeños a excepción de spline de tensión, que genera una distorsión en los extremos, alcanzando valores de -606.60 hasta 760.39 msnm los cuales no son aceptables para los fines de la interpolación.
- A nivel de promedio y desviación estándar de los datos, los resultados son bastante homogéneos. De nuevo, a excepción del método spline, no se hallan diferencias significativas en las predicciones realizadas.
- Los indicadores estadísticos que permitieron determinar cuál de los métodos se ajusta más a los datos originales fueron el error promedio y el error del valor cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés):

**Error promedio:** Se midió en valor absoluto para evitar que los errores por defecto y por exceso se anulasen mutuamente. Se obtuvo un rango de 0.15 a 1.22. El error más elevado corresponde nuevamente al método Spline, mientras que los métodos Kriging e IDW destacan por proporcionar los errores más bajos.

Error del valor cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés): Matemáticamente es la raíz cuadrada de la media aritmética del cuadrado de los errores. Los resultados que proporcionó fueron muy similares al error promedio, siendo IDW y Kriging los métodos con un mejor desempeño.

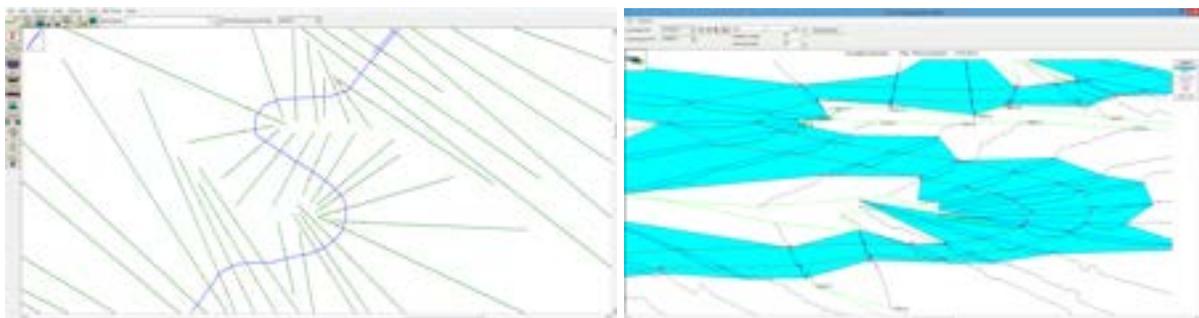
- Curtosis es una medida de la forma que trata de explicar la proporción de la varianza que se explica por la distribución de datos extremos respecto a la media en contraposición con datos de la zona central de distribución.

A partir de los indicadores estadísticos, se determinó Kriging como el método de interpolación que representa de mejor manera la topografía del cauce del río a partir de las secciones transversales disponibles.

Durante la realización de las interpolaciones se planteó la evaluación de la precisión de los métodos extrayendo el 20% de los puntos iniciales para analizar la capacidad de predicción en cada caso. No obstante, este procedimiento se descartó porque en etapas posteriores del estudio hidráulico solamente se necesitaba utilizar los valores interpolados en los puntos originales. El objetivo es observar qué método ajusta mejor los valores en los puntos donde se tienen medidas, y para conocer esto es conveniente utilizar la mayor cantidad de datos iniciales disponible.

## 5.2. Modelación

La modelación hidráulica realizó por medio del software HEC-RAS. Los datos de entrada fueron la topografía y los valores de caudal obtenidos con los métodos citados en los apartados anteriores.



a.

b.

Figura 4. Modelo hidráulico en meandro de Santa Odilia. a) Secciones extendidas a partir de los datos originales del levantamiento topográfico. b) Visión tridimensional del tramo y la altura de inundación correspondiente a un periodo de retorno de 2 años.

**Modelación de las secciones:** las secciones del levantamiento topográfico, se extendieron para representar las superficies adyacentes al río donde se podrían producir inundaciones (figura 4). Se utilizaron valores estándar del coeficiente de rugosidad de Manning para cauces naturales, de 0.03 para el lecho y 0.05 para los márgenes (Arcement and Schneider, 1989).

**Modelación del flujo:** Se han modelado los caudales correspondientes a periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años. El software se ha ejecutado en un régimen de flujo de tipo mixto, de manera que calcula en cada sección el tipo de flujo más probable. Las condiciones de contorno se han establecido midiendo la inclinación del lecho en la primera y última sección de cada tramo estudiado.

### 5.2.1. Fundamentos modelación

A continuación se explican los fundamentos del modelo hidráulico HEC-RAS. La información de partida para generar el modelo es:

**Caudales:** Se han determinado los caudales para diferentes períodos de retorno mediante la metodología de INSIVUMEH, 2004.

**Topografía:** se dispone de secciones iniciales con una separación de 20 a 50 metros entre ellas. Se ha realizado una interpolación de las secciones existentes para obtener una imagen raster con valores de elevación con resolución de 15x15 metros (figura 5), esto permitirá que el modelo disponga de datos del cauce mayor del río y las aproximaciones las zonas susceptibles a inundación sean más acertadas.

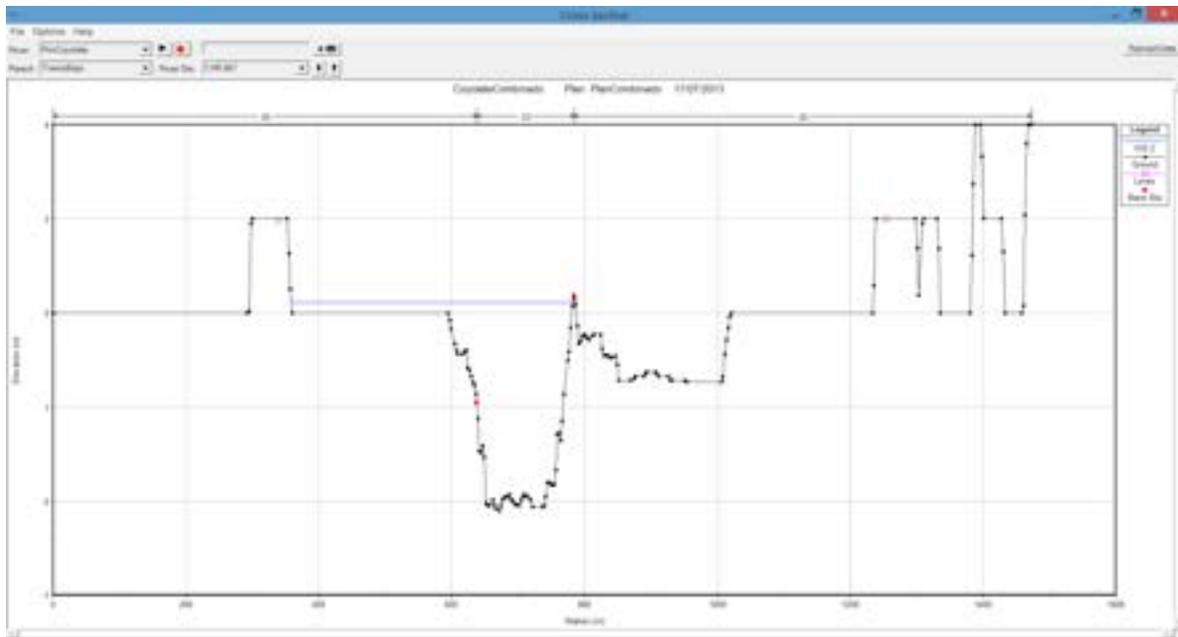


Figura 5. Sección transversal del Coyolate a un kilómetro de la desembocadura. Nótese la diferencia en la densidad de puntos del cauce (secciones transversales) y las llanuras de inundación (DEM 15 metros).

Con estos datos se ha ejecutado el modelo en régimen mixto. Esto significa que en base al relieve del lecho y al caudal, el software ha determinado si el río en este tramo fluye en régimen subcrítico o supercrítico, dependiendo si el número de Froude determinado es superior o inferior a uno (figura 6).

$$Froude\# = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas de gravedad}}$$

El número de Froude mide la relación entre las fuerzas inerciales y las gravitacionales, lo que condiciona las condiciones de flujo en el río. Cuando el número de Froude es inferior a 1 se da régimen subcrítico (las fuerzas gravitacionales son mayores que las inerciales), lo cual genera un flujo no turbulento.



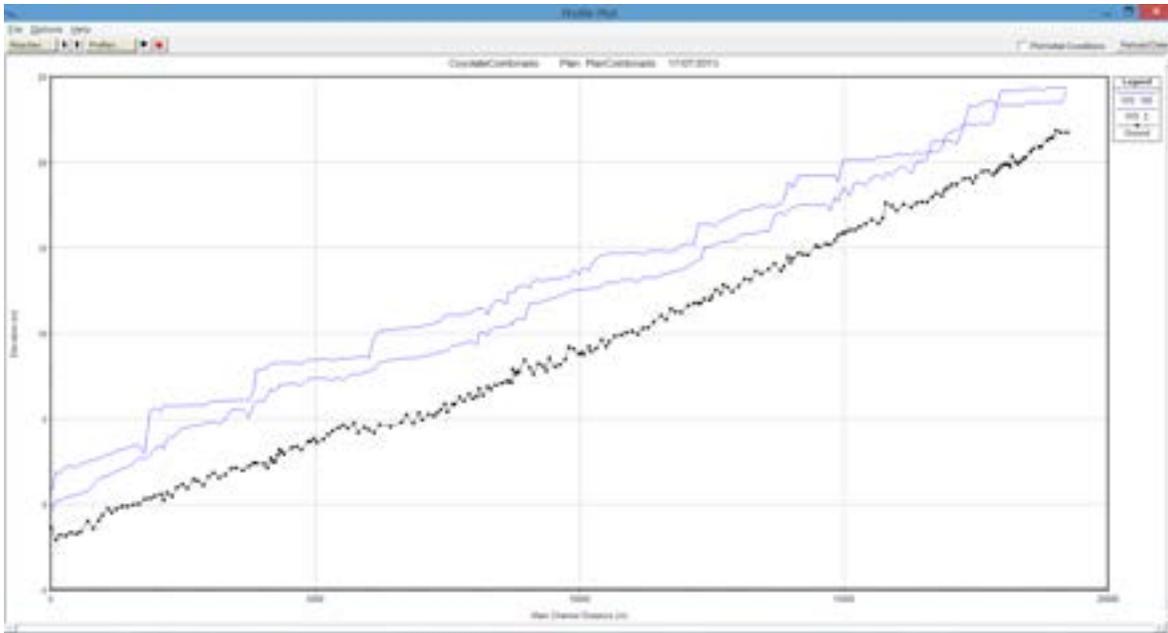


Figura 7. Perfil de la crecida a lo largo del cauce, para los períodos de retorno de 2 y 100 años.

### 5.3. Validación

La reproducción exacta de sistemas naturales complejos mediante modelos es imposible. Los resultados de los modelos se pueden validar buscando la similitud del fenómeno observado y el modelado, pero la confirmación siempre resulta parcial. En conclusión, los modelos solo se pueden evaluar en términos relativos, y su capacidad de predicción siempre podrá ser cuestionada. (Oreskes, et. al. 1994).

No obstante, la validación de los modelos resulta necesaria para medir, aunque sea de manera relativa, su capacidad de predicción. En el caso de los modelos hidráulicos del río Coyolate, se han utilizado los siguientes datos para corregir y validar los resultados de los modelos:

- **Puntos históricos de desborde:** Se programaron una serie de visitas a actores locales para consultar los puntos donde históricamente se ha desbordado el río Coyolate, con periodicidad anual y para eventos extremos, tomando como referencia los eventos de Stan (2005) y Agatha (2010), por ser los más recientes. Los actores locales consultados fueron algunos ingenios azucareros y fincas privadas todas con terrenos adyacentes al cauce del río. Además también se obtuvo información de las comunidades de Santa Ana Mixtán, Santa Odilia y Santa Marta del Mar, todas ellas afectadas en eventos de inundación del Coyolate.

- **Zonas afectadas:** A los actores locales previamente mencionados se les proporcionó una lámina con las ortofotos para que indicasen, no sólo los puntos de desborde, si no las zonas afectadas en eventos de inundación.



Figura 8. Ejemplos de la información generada por actores locales en los mapas proporcionados.

- **Líneas de flujo:** Se contrastaron los datos del modelo con la información obtenida en campo, y se superpuso un mapa de líneas de flujo a las zonas de inundación establecidas, para saber la trayectoria que sigue el agua una vez esta se desborda. Las líneas de flujo utilizadas se obtuvieron mediante el procesamiento del modelo de elevaciones con datos cada 15 metros (figura 9a).
- **Curvas de nivel:** conocidos los puntos de desborde, las principales zonas afectadas y el camino de desagüe principal del agua desbordada, se utilizó un mapa con curvas de nivel cada 2 metros para validar y corregir el alcance probable de la inundación, en función de la topografía. Las curvas de nivel utilizadas también fueron generadas a partir del DEM con resolución de 15 metros (figura 9b).
- **Ortofotos:** Finalmente se contrastaron los resultados obtenidos con las ortofotos, puesto que en estas se pueden observar las betas arenosas depositadas en eventos de inundación recientes, así como en los puntos de desborde (figura 10).

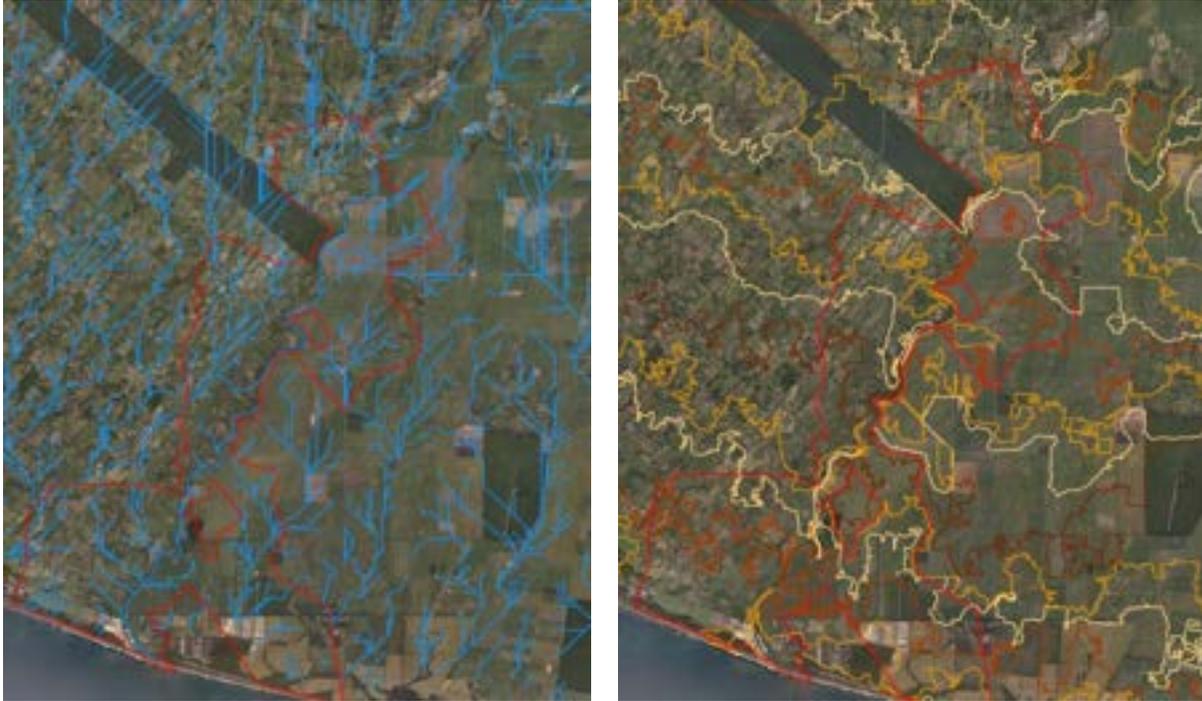


Figura 9. a) Mapa de líneas de flujo en el tramo bajo del Coyolate. b) Mapa de curvas de nivel en el tramo bajo del río Coyolate. Ambos generados a partir del DEM 15x15m. Mapas completos en Anexo I.



Figura 10. Ortofotografía de zonas susceptibles a inundación del río Coyolate. Nótese los depósitos de material originados por desbordes previos.

## 6. Resultados

### 6.1. Secciones

Se generó un modelo utilizando únicamente las secciones transversales originales. Dichas secciones no son suficientemente amplias para representar el cauce mayor del río, sin embargo, generaron información valiosa que permitió determinar los puntos con mayor susceptibilidad a desbordes (figura 11).



Figura 11. Resultados del modelo basado en las secciones iniciales. Se utilizó para identificar los tramos con mayor susceptibilidad a desborde.

El mapa completo de tramos con susceptibilidad a desbordes se encuentra en el apartado 6.7.

### 6.2. Modelo de elevaciones y fusión de la interpolación de las secciones con el modelo de elevaciones

Las secciones transversales extendidas se generaron en el software ArcGIS, a través de la extensión Hec-GeoRAS. Se establecieron diferentes configuraciones en la disposición, frecuencia y longitud de las mismas, y se adoptó como la más adecuada aquella que cuyos resultados se aproximaron con mayor exactitud a las zonas de inundación determinadas con los actores locales.

Se contrastaron los datos obtenidos mediante las dos topografías, obteniendo una diferencia de entre el 12% y el 41% en la superficie afectada (cuadro 2). Se observó que para eventos de menor magnitud, la diferencia en la superficie afectada era mayor puesto que las bordas, actualizadas y mejor representadas en los datos de las secciones influyen mucho en eventos de esta magnitud, mientras que para eventos con magnitudes superiores la borda acostumbra a quedar por debajo del nivel de

crecida. Un factor clave en esta diferencia es el hecho que los datos se tomaron con 6 años de diferencia.

Cuadro 2. Diferencias en la predicción de la superficie de inundación a partir del modelo de elevaciones y la fusión de la interpolación de las secciones con el modelo de elevaciones.

Período de retorno	Area DEM (km <sup>2</sup> )	Area Combinado (km <sup>2</sup> )	Diferencia area inundada (km <sup>2</sup> )	Diferencia resultados
T2	37.70	36.56	14.29	37.91%
T5	43.72	44.98	18.06	41.31%
T10	46.82	50.75	11.95	25.53%
T25	55.31	56.90	7.49	13.55%
T50	58.20	59.45	6.94	11.93%

### 6.3. Validación en campo

A partir de las consultas realizadas a actores locales se ha generado cartografía de las zonas afectadas en los eventos de inundación más recientes. A pesar de que solamente se disponía de datos topográficos para modelar un tramo de 17 kilómetros desde la desembocadura del río Coyolate, la información recaudada ha permitido extender los mapas de zonas susceptibles a inundación a 34 kilómetros de cauce, hasta la comunidad de Cerro Colorado.

En el tramo donde se corrió el modelo los resultados de éste se ajustan de manera bastante correcta a los datos obtenidos en campo, con excepción de uno de los últimos meandros que presenta el río. Según el modelo, en dicho meandro se desborda el río incluso para eventos de crecida anuales (período de retorno de 2 años). Sin embargo la experiencia de la población local nos indicó que no se recuerda ningún evento en el cual el río se desbordase en ese punto. Esto es debido a que el río siempre se desborda aguas arriba, desviando parte de su caudal por otra vía de desagüe. El modelo considera caudal constante y por eso indica la posibilidad de desborde en ese punto.

### 6.4. Vías de intenso drenaje

A partir de los puntos de desborde obtenidos en la modelación hidráulica y en las visitas de campo, se ha determinado el trayecto que seguiría el caudal desbordado, a partir de las líneas de flujo y las curvas de nivel. Con esta información se determinaron las vías de intenso desagüe en caso de desborde. En un episodio de inundación estos serán los recorridos principales del agua y, por tanto, las zonas donde el daño potencial será mayor.

### 6.5. Zonas de riesgo por empozamiento

La topografía de la región presenta un relieve muy suave, incluso con cotas negativas en algunos puntos. El oleaje del Océano Pacífico afecta la dinámica costera, formando paredones de arena en la playa alta. Los paredones son dinámicos y presentan aberturas, conocidas popularmente como bocabarras, que permiten la salida de los ríos al océano. Estas aberturas también son dinámicas, cerrándose y abriéndose en función del aporte de sedimentos y las corrientes marinas, y por esto son objeto de mantenimiento para procurar mantener la capacidad de drenaje del caudal de los ríos hacia el mar. Los paredones alcanzan cotas de hasta 4 msnm, generando un efecto represa y dificultando el drenaje de las zonas previas al paredón, que presentan cotas menores. Para representar los riesgos que conlleva esta compleja dinámica, se han propuesto, como zonas de riesgo por empozamiento, las cotas costeras hasta los 4 msnm.

También se incluye en esta zonificación del riesgo, una porción del territorio donde las cotas son inferiores al territorio circundante, generando las condiciones para empozamiento de agua en caso de crecida o lluvias intensas.

El mapa de zonas de riesgo por empozamiento se encuentra en el apartado 6.7.

### 6.6. Zonas susceptibles a inundaciones

Como resultado de toda la cartografía generada se ha conseguido establecer un mapa general de zonas susceptible a inundación, que es el resultado de la combinación de todos los mapas de riesgo anteriores.

Resulta muy complicado asignar períodos de retorno a las zonas de susceptibles a inundación, puesto que se ha determinado que en la mayoría de casos, los desbordes no se producen porque el nivel del río sobrepase la corona de la borda (que es lo que proyectan los modelos hidráulicos), los desbordes se producen por problemas con la estabilidad de los diques longitudinales o bordas. En primer lugar HEC-RAS no puede incluir aspectos de estabilidad de diques longitudinales en la modelación y, de todos modos, sería imposible asignar un período de retorno a dicha estabilidad, puesto que esta depende del diseño, tareas de mantenimiento, etc.

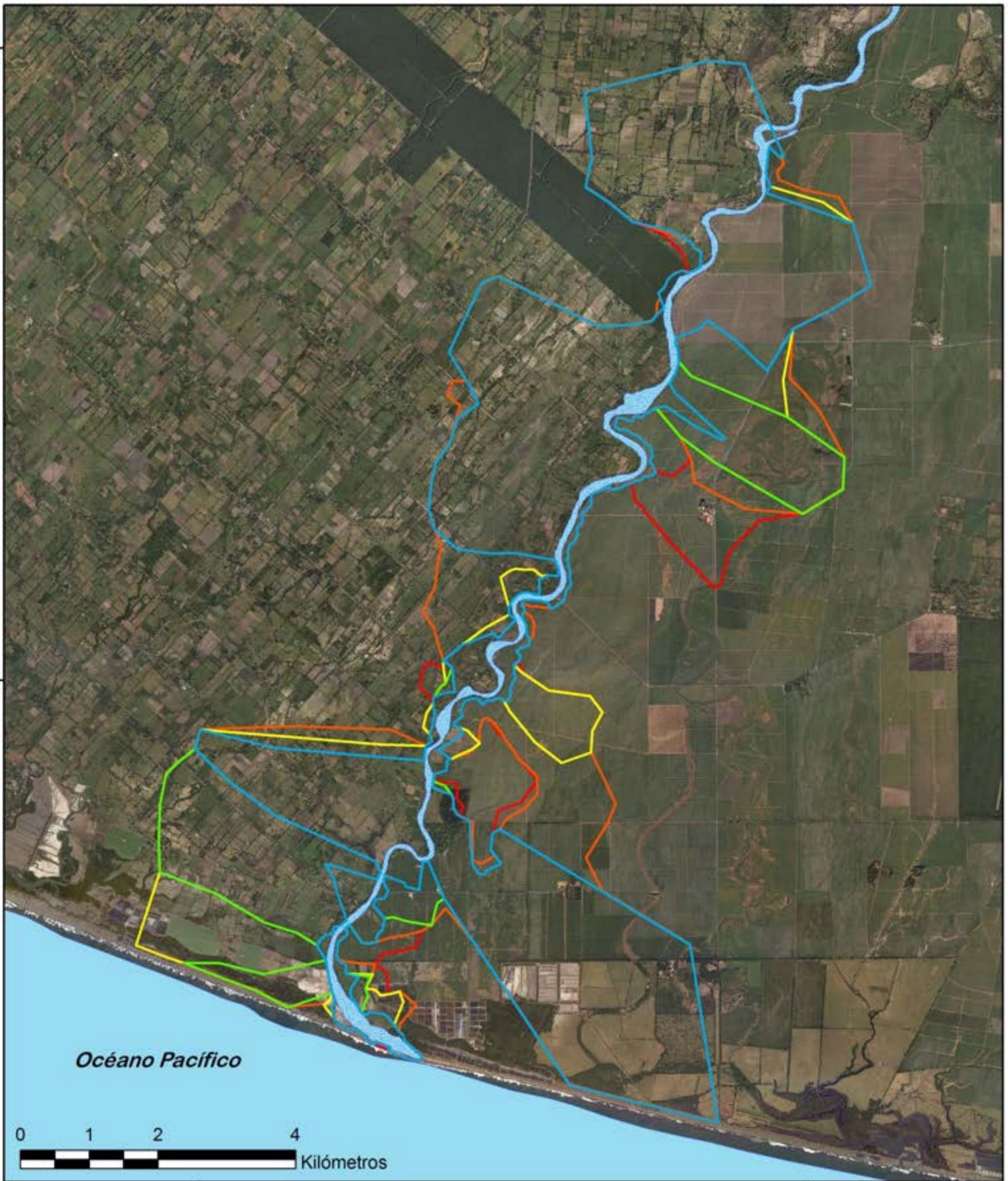
Sin embargo, se ha determinado un mapa general con períodos de retorno en función de la información obtenida de los actores locales:

- Los tramos donde la inundación se ha producido con periodicidad anual, o prácticamente anual, se han determinado como zonas con un período de retorno de 2 años. Se han incluido en esta clasificación las zonas con riesgo por empozamiento.
- Los tramos donde el desborde se ha producido para evento como Stan, Agatha y 12E, se ha determinado un período de retorno de 5 años.
- Los tramos donde el desborde se produjo únicamente para los eventos Stan o Agatha, se han determinado con un período de retorno de 10 años.

Los mapas correspondientes se presentan en el apartado 6.7.



**ZONAS SUSCEPTIBLES A INUNDACIÓN PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO  
SEGÚN MODELOS HIDRÁULICOS CON SECCIONES + DEM, RÍO COYOLATE, GUATEMALA, C. A.**



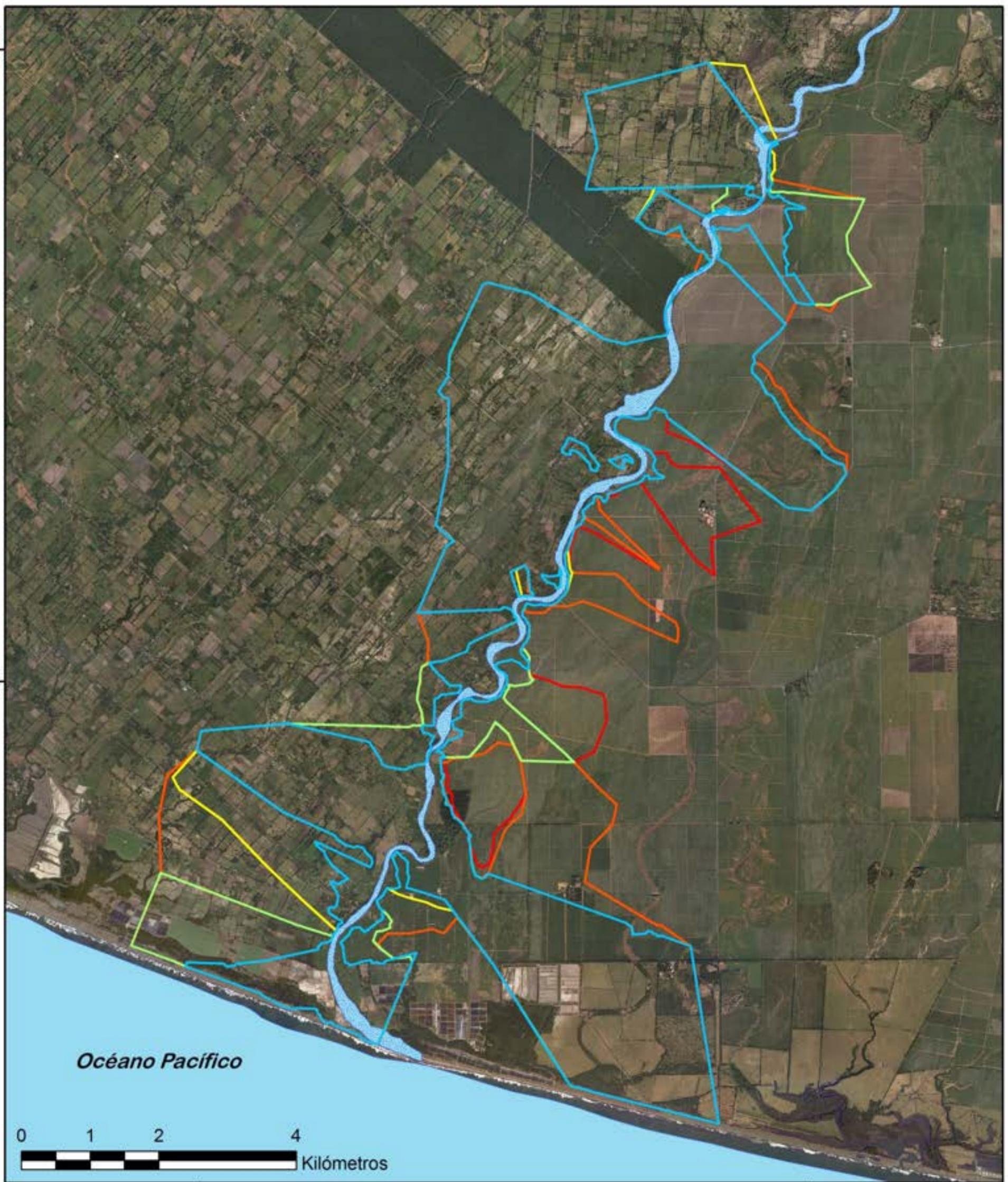
**Leyenda**

- |                                                                                             |                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  2 años  |  25 años            |
|  5 años  |  50 años            |
|  10 años |  Cauce río Coyolate |

Proyecto:  
 Arreglo: ICC  
 Fecha: 2013  
 CGS - Datum WGS84  
 Topografía modelo: DEM  
 Shapes:  
 ICC 2013  
 MAGA 2003  
 Ortofotos: MAGA 2006  
 Hill: MAGA 2010



ZONAS SUSCEPTIBLES A INUNDACIÓN PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO  
SEGÚN MODELOS HIDRÁULICOS CON DEM, RÍO COYOLATE, GUATEMALA, C. A.



Océano Pacífico



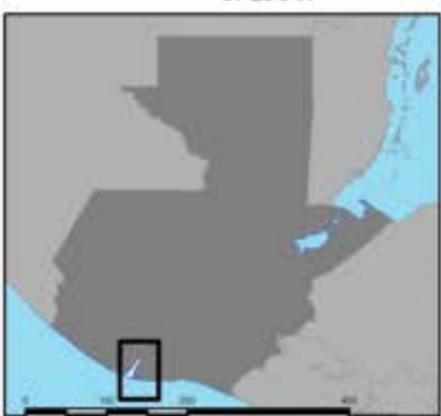
**Leyenda**

- |                                                                                             |                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  2 años  |  25 años            |
|  5 años  |  50 años            |
|  10 años |  Cauce río Coyolate |

Proyecto:  
 Arreglo: ICC  
 Fecha: 2013  
 CGS - Datum WGS84  
 Topografía modelo: DEM  
 Shapes:  
 ICC 2013  
 MAGA 2003  
 Ortofotos: MAGA 2006  
 Hill: MAGA 2010



TRAMOS Y PUNTOS SUSCEPTIBLES A DESBORDE SEGÚN MODELOS HIDRÁULICOS  
Y REGISTRO HISTÓRICO, RÍO COYOLATE, GUATEMALA, C. A.



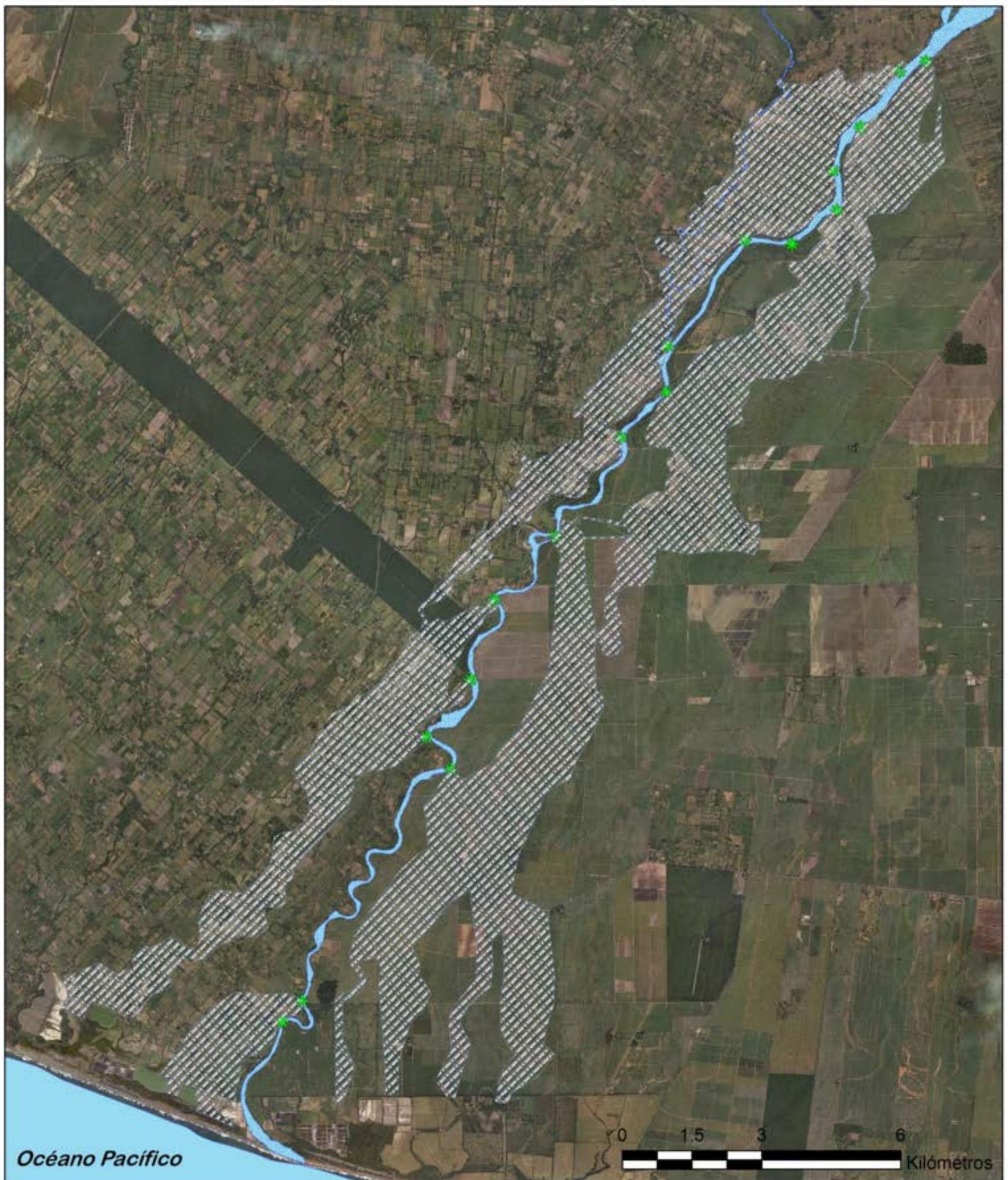
**Leyenda**

-  Puntos históricamente vulnerables
-  Tramos potencialmente vulnerables, según modelación
-  Cauce río Coyolate

Proyecto:  
 Arreglo: ICC  
 Fecha: 2013  
 CGS - Datum WGS84  
 Topografía modelo: DEM  
 Shapes:  
 ICC 2013  
 MAGA 2003  
 Ortofotos: MAGA 2006  
 Hill: MAGA 2010



VÍAS DE INTENSO DESAGÜE A PARTIR DE LOS PUNTOS DE DESBORDE, CURVAS DE NIVEL Y LÍNEAS DE FLUJO, RÍO COYOLATE, GUATEMALA, C. A.



**Leyenda**

-  Vías de intenso desagüe
-  Puntos históricamente vulnerables
-  Cauce río Coyolate

Proyecto:  
Arreglo: ICC  
Fecha: 2013  
CGS - Datum WGS84  
Topografía modelo: DEM  
Shapes:  
ICC 2013  
MAGA 2003  
Ortofotos: MAGA 2006  
Hill: MAGA 2010



# ZONAS DE RIESGO POR EMPOZAMIENTO, RÍO COYOLATE, GUATEMALA, C. A.



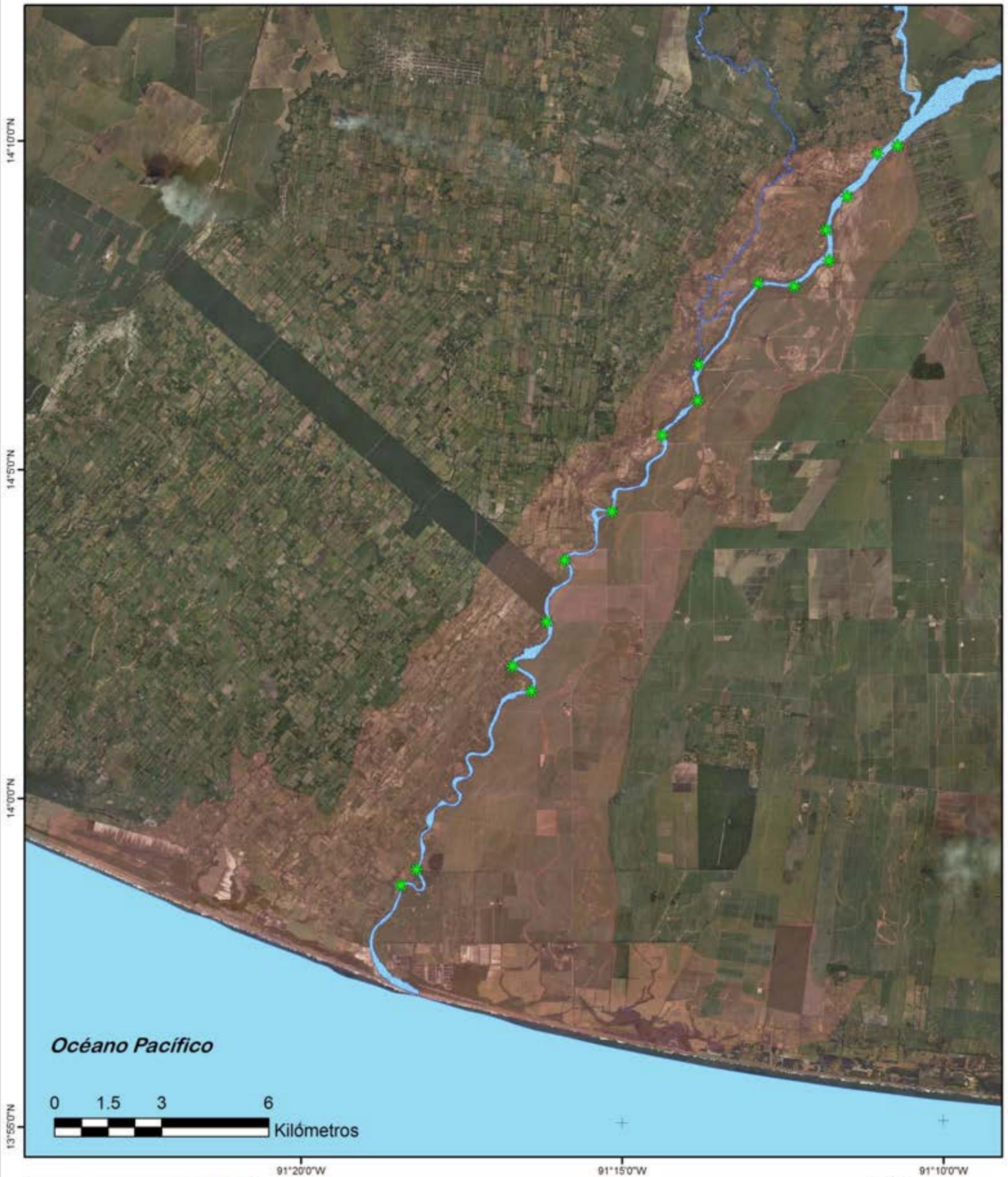
## Leyenda

-  Zonas riesgo por empozamiento
-  Zonas de alto riesgo por empozamiento
-  Cauce río Coyolate

Proyecto:  
Arreglo: ICC  
Fecha: 2013  
CGS - Datum WGS84  
Topografía modelo: DEM  
Shapes:  
ICC 2013  
MAGA 2003  
Ortofotos: MAGA 2006  
Hill: MAGA 2010



ZONAS SUSCEPTIBLES A INUNDACIÓN POR DESBORDE DEL RÍO COYOLATE,  
PRIMERA APROXIMACIÓN, GUATEMALA, C. A.



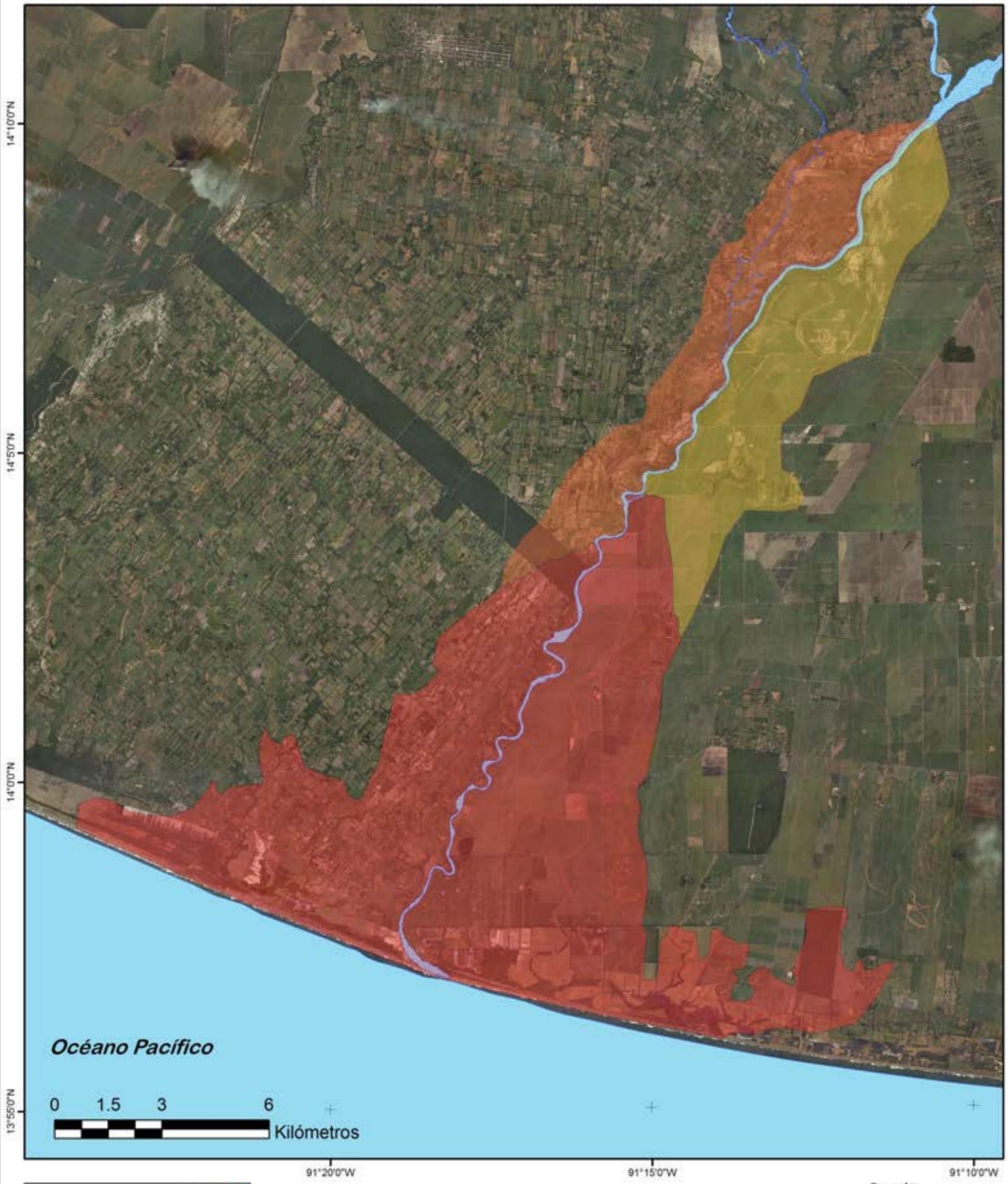
**Leyenda**

-  Puntos históricamente vulnerables
-  Zona de riesgo
-  Cauce río Coyolate

Proyecto:  
 Arreglo: ICC  
 Fecha: 2013  
 CGS - Datum WGS84  
 Topografía modelo: DEM  
 Shapes:  
 ICC 2013  
 MAGA 2003  
 Ortofotos: MAGA 2006  
 Hill: MAGA 2010



ZONAS SUSCEPTIBLES A INUNDACIÓN PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO, PRIMERA APROXIMACIÓN, RÍO COYOLATE, GUATEMALA, C. A.



**Leyenda**

Periodo de retorno	
	2 años
	5 años
	10 años
	Cauce río Coyolate

Proyecto:  
 Arreglo: ICC  
 Fecha: 2013  
 CGS - Datum WGS84  
 Topografía modelo: DEM  
 Shapes:  
 ICC 2013  
 MAGA 2003  
 Ortofotos: MAGA 2006  
 Hill: MAGA 2010



## 7. Conclusiones

1. Kriging e IDW demostraron ser las mejores metodologías para interpolar la batimetría del cauce en la sección transversal de un río a partir de puntos de las mismas secciones transversales.
2. Para episodios de inundación con períodos de retorno superiores a 10 años no existe gran diferencia en las zonas de inundación determinadas con el DEM con resolución de 15 metros y la fusión entre el DEM y secciones transversales del cauce (sobre el 10% de diferencia). No obstante, la diferencia es considerablemente mayor para episodios con períodos de retorno menores, (hasta 41% de diferencia), con lo cual se recomienda el uso de secciones transversales superpuestas al DEM para evaluar los puntos susceptibles a inundaciones frecuentes.
3. Los modelos unidimensionales como el que utiliza HEC-RAS, no son los más adecuados para cauces como el tramo objeto de este estudio por los siguientes motivos:
  - a. Topografía plana: las secciones no pueden ser suficientemente amplias, se requieren secciones demasiado extensas para cubrir la llanura de inundación.
  - b. Dificultad para asignar la altura de la inundación debido a la gran extensión de las secciones transversales
  - c. Caudal en una sola dirección: debido a la amplitud del cauce en algunos lugares y la extensión de la lámina de flujo en los puntos de desborde se necesita un modelo que contemple en su método numérico los flujos laterales.
  - d. Caudal constante: El modelo utilizado asume que el caudal es el mismo en cada una de las secciones, sin tener en cuenta los desvíos de caudal en los puntos de desborde. Por este motivo se pueden sobreestimar las zonas de desborde en el tramo final del río.
4. La información obtenida por actores locales indica que el modelo generado en el tramo bajo determina en la mayoría de casos la zona de riesgo por desborde. No obstante, el modelo es limitado en la predicción de la superficie afectada por dicha inundación. Esto podría ser compensado al utilizar un modelo de elevación con más detalle y modelos bidimensionales.
5. El uso de las curvas de nivel y líneas de flujo, ha permitido determinar la superficie con mayor susceptibilidad inundación, a pesar de que la precisión de estos límites está determinada por el DEM con resolución de 15 metros a partir del cual se determinaron curvas de nivel y líneas de flujo. No obstante, las ortofotos han resultado un buen complemento para la delimitación

de las zonas de riesgo, así como el conocimiento de la existencia de diques y canales de drenaje.

6. **Tiempos de retorno vs estabilidad de bordas:** No se ha determinado con precisión la zonificación de la susceptibilidad a inundaciones para diferentes períodos de retorno debido a que el impacto de las inundaciones no siempre está asociado a el desborde del nivel del río por encima de la borda si no a la estabilidad de la misma. El modelo de HEC-RAS no puede incluir aspectos de estabilidad de bordas, con lo cual únicamente se establece zona inundada cuando el nivel del río rebasa la altura de la corona del dique longitudinal. Ante la falta de medios para asociar el período de retorno con la estabilidad de la borda se ha determinado la zona de riesgo por inundación con período de retorno de 2 años en aquellos puntos donde se producen desbordes con frecuencia anual, con período de retorno de 5 años en los desbordes producidos por la depresión tropical 12E y con período de retorno de 10 años en los puntos donde se produjeron desbordes en eventos como Agatha o Stan.

## 8. Recomendaciones

A partir de la experiencia en la generación del estudio para la primera aproximación a las zonas susceptibles de inundación por el desborde del río Coyolate, se postulan las siguientes recomendaciones para obtener mejores resultados en futuros estudios:

1. Se recomienda el uso de los métodos de interpolación de Kriging e IDW para representar la topografía del lecho del río a partir de secciones transversales, por ser las que mejor se ajustan a los parámetros estadísticos estudiados.
2. Se propone el uso de modelos bidimensionales para futuros estudios de zonas susceptibles a inundación en los tramos bajos de las cuencas de la vertiente del Pacífico, puesto que son capaces de representar el tipo de inundaciones que tienen lugar en esta región, con topografías muy suaves y zonas de inundación muy extensas, generando desviaciones importantes del cauce principal de los ríos.
3. Se requiere topografía de alto detalle, para obtener resultados con una mejor precisión. Puesto que la resolución del DEM actual no es suficiente para generar este tipo de estudios con una fiabilidad elevada y se ha observado que la incorporación de la topografía del cauce no aporta, en este caso, grandes diferencias en la delimitación de la extensión de la crecida

para eventos con períodos de retorno superiores a 10 años. Esta nueva topografía sería los datos de entrada ideales para la generación de modelos bidimensionales.

4. Se requiere el mapeo de zonas inundadas a partir de fotografía aérea posterior a eventos de crecida, para inventariar las zonas afectadas por eventos de diferentes magnitud y poder calibrar los nuevos estudios que se generen con mayor precisión.
5. Existe la necesidad de instalar una red funcional de estaciones de aforo automáticas en las cuencas que se quieran estudiar, puesto que los datos de caudal son un requisito para la modelación hidráulica y mientras mayor sea la calidad de los datos de entrada, mejores serán los resultados de los futuros estudios.
6. Se sugiere la generación de alianzas para obtener apoyo en actores locales que permitan conocer el estado del río, confirmar los puntos críticos de desborde y actualizar la topografía en el caso de modificaciones en el lecho o los sistemas de protección, diques o espigones.

## 9. Glosario

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

**Cauce:** Canal natural por el cual transcurre el río.

**Coficiente de rugosidad de Manning:** Coficiente 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.

**Lecho:** Canal natural por el cual transcurre el río.

**Líneas de quiebre:** Franjas de territorio donde se produce un cambio abrupto de la elevación del terreno, por ejemplo en cauces de río, acantilados, etc.

**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 (2%) de ocurrir en un año determinado.

## 10. Referencias

ACA, 2003. Recomanacions tècniques per als estudis d'inundabilitat d'àmbit local. Agència Catalana de l'Aigua. Generalitat de Catalunya. Barcelona.

Arcement G. J. and Schneider V. R., 1989. Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. United States Geological Survey Water-supply Paper 2339.

BATES P.D., De Roo, A. P. G., 2000. A simple raster-based model for flood inundation simulation. Journal of hydrology 236, 54-77.

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.

Chaplot, V., Darboux, F., Bourennane, H., Leguédou, S., Silvera N., Phachomphon, K., 2005. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. Geomorphology 77 (2006) 126-141.

CIV, 2007. Estudio de la cuenca del Coyolate. Unidad de Manejo de Ríos y Canales. 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.

Feldhaus R., Höttges J., Brockhaus T., Rouvé G., 1992. Finite element simulation of flow and pollution transport applied to a part of the river Rhine.

Gil, S. 2011. Estudio hidrológico del Río Coyolate. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.

Guerra, A., 2010. Climate-related disaster risk in mountain areas: the Guatemalan highlands at the start of the 21<sup>st</sup> Century. School of Geography and the Environment. Oxford, University of Oxford.

Horrit M. S., Bates P. D., 2001. Predicting floodplain inundation; rastered-based modelling versus the finite-element approach. *Hydrol. Process.* 15 (5), 825-842.

Horrit M.S., Bates P. D., 2002. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation.

Hutchinson, M.F. 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology* 106: 211-232.

Hutchinson, M. F. and Dowling, T. I. 1991. A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia. *Hydrological Processes* 5: 45-58.

IGN, 1974. Estudio integral de los Recursos Hidráulicos del Departamento de Escuintla. Instituto Geográfico Nacional de Guatemala.

INSIVUMEH, 2004. Análisis regional de crecidas para la República de Guatemala.

Jovel R. y R. Zapata (1993), Macroeconomic effects of natural disasters in Latin America and the Caribbean, ponencia presentada a la 40<sup>a</sup> 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.

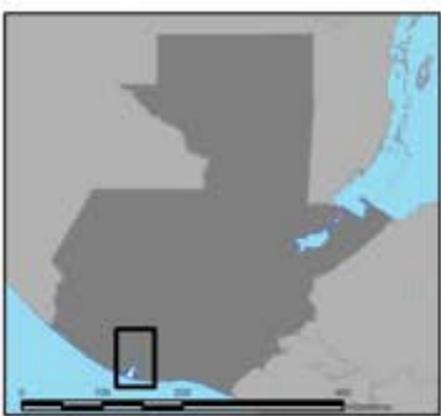
MAGA-INSIVUMEH, 2002. Estimación de amenazas inducidas por fenómenos hidrometeorológicos en la República de Guatemala. Programa de Emergencia por Desastres Naturales, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. INSIVUMEH. Programa Mundial de Alimentos. Guatemala.

- Merwade, V., Cook, A., Coonrod, J. 2008. GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping. *Environmental Modeling & Software* 23 (2008) 1300-1311.
- ONU 2009. Informe de evaluación global sobre la reducción del riesgo de desastres. Naciones Unidas, Ginebra, Suiza.
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K., Belitz, K. 1994. Verification, validation and confirmation of numerical models in earth sciences. *Science, New Series, Volume 263, Issue 5147 Feb. 4, 1994*, 641-646.
- PONCE V. M., 1989. Ponce, V. M. Engineering hydrology. Principles and practices. New Jersey. Ed. Prentice Hall.
- Sibson, R., "A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation," Chapter 2 in *Interpolating multivariate data*, John Wiley & Sons, New York, 1981, pp. 21-36.
- 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.

---

**ANEXO I. MAPAS DE LÍNEAS DE FLUJO Y CURVAS DE  
NIVEL**

# LÍNEAS DE FLUJO EN EL TRAMO DE ESTUDIO, RÍO COYOLATE, GUATEMALA, C. A.



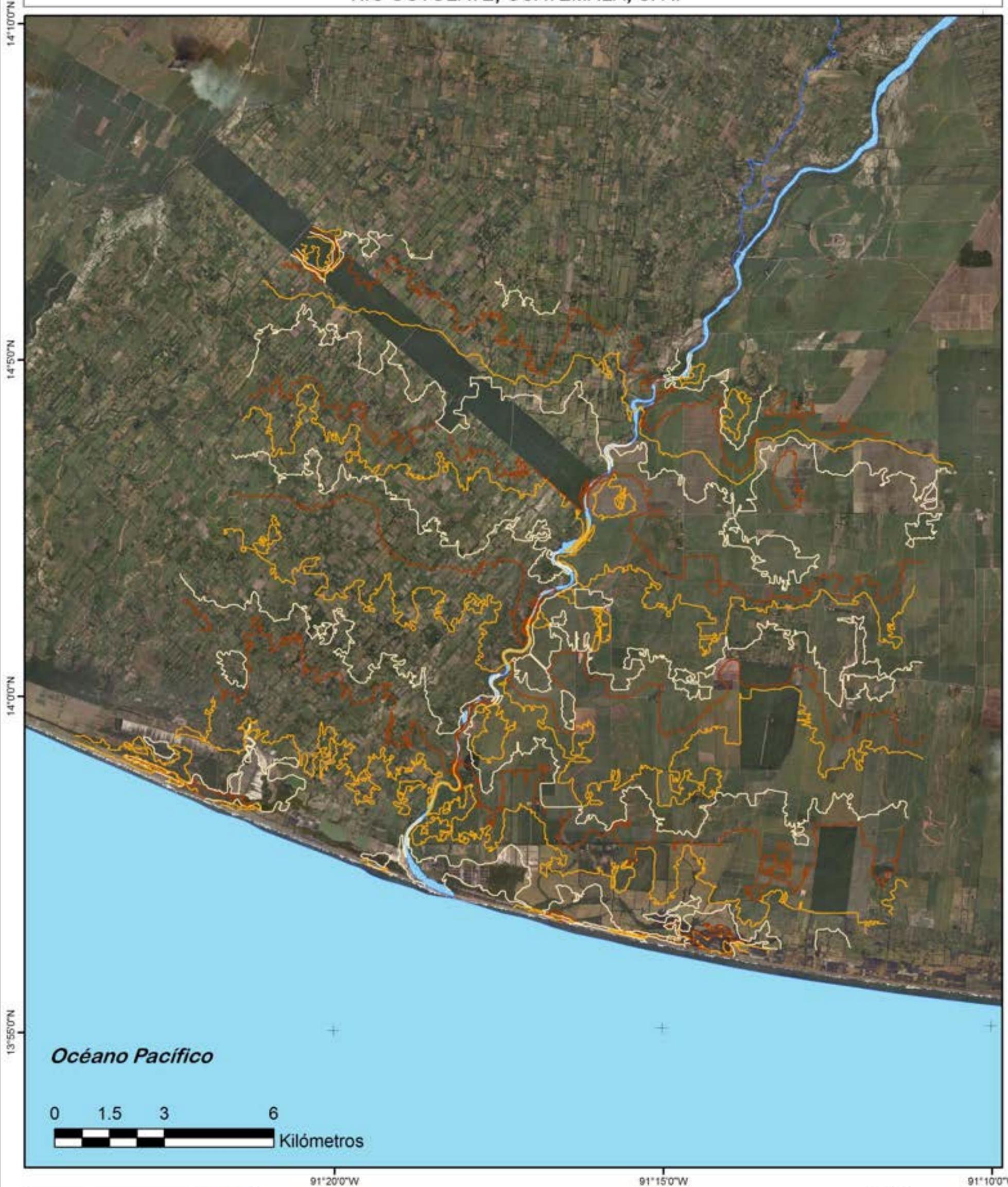
## Leyenda

-  Dirección del flujo
-  Cauce río Coyolate

Proyecto:  
Arreglo: ICC  
Fecha: 2013  
CGS - Datum WGS84  
Topografía modelo: DEM  
Shapes:  
ICC 2013  
MAGA 2003  
Ortofotos: MAGA 2006  
Hill: MAGA 2010



**CURVAS DE NIVEL EN EL TRAMO DE ESTUDIO,  
RÍO COYOLATE, GUATEMALA, C. A.**

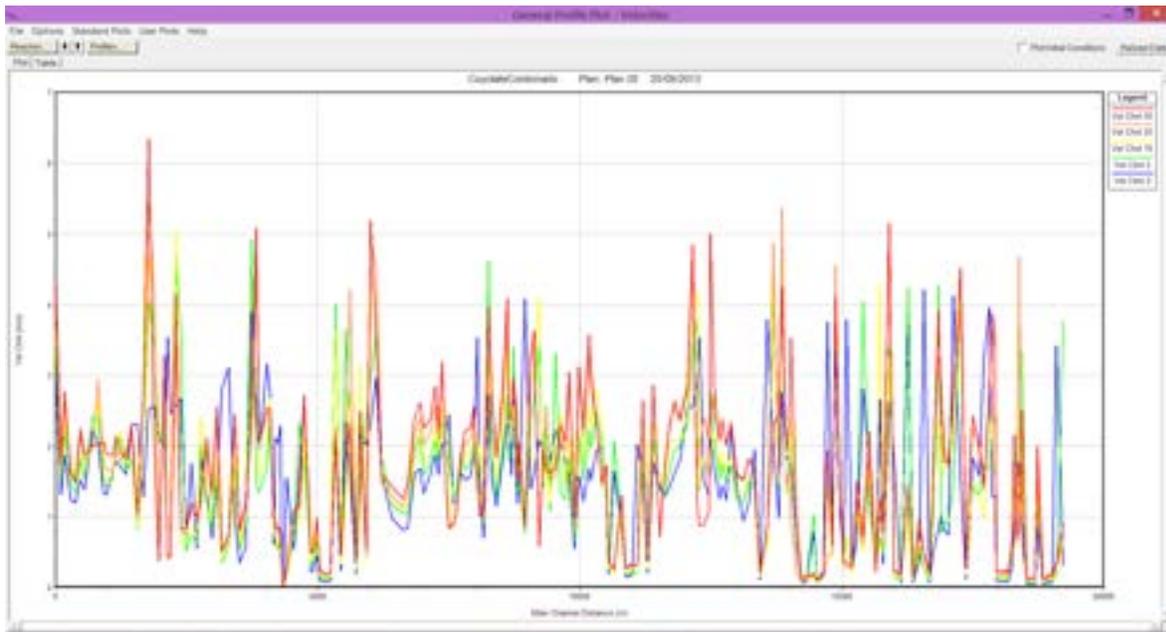


Proyecto:  
Arreglo: ICC  
Fecha: 2013  
CGS - Datum WGS84  
Topografía modelo: DEM  
Shapes:  
ICC 2013  
MAGA 2003  
Ortofotos: MAGA 2006  
Hill: MAGA 2010

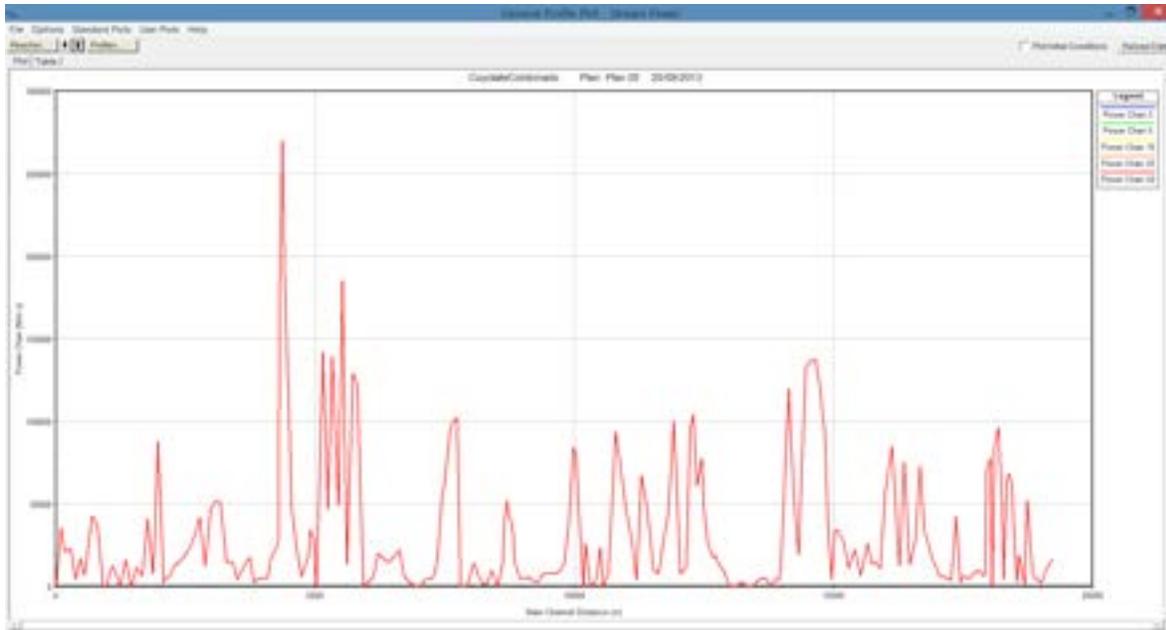




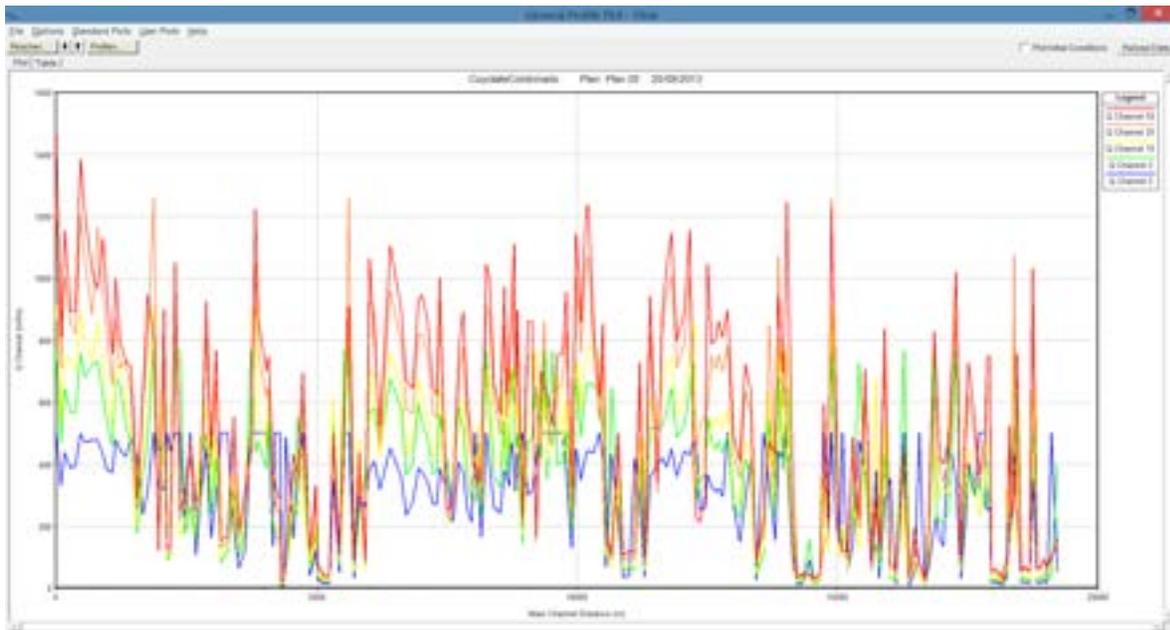
**Velocidad en el cauce principal:**



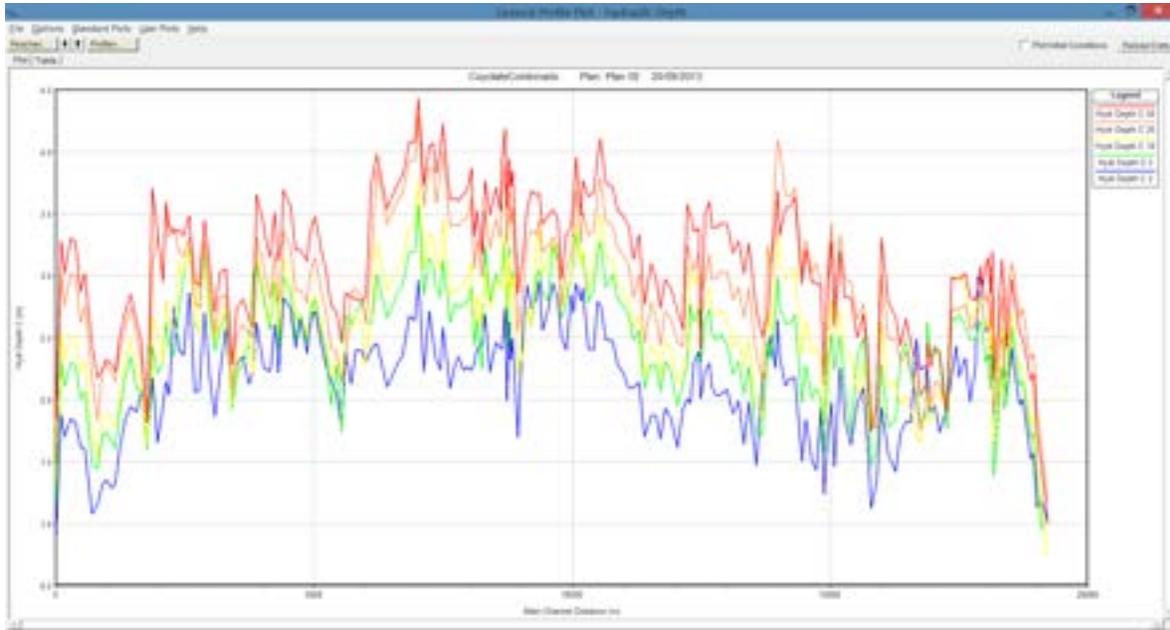
**Fuerza del flujo en el cauce (N/m s)**



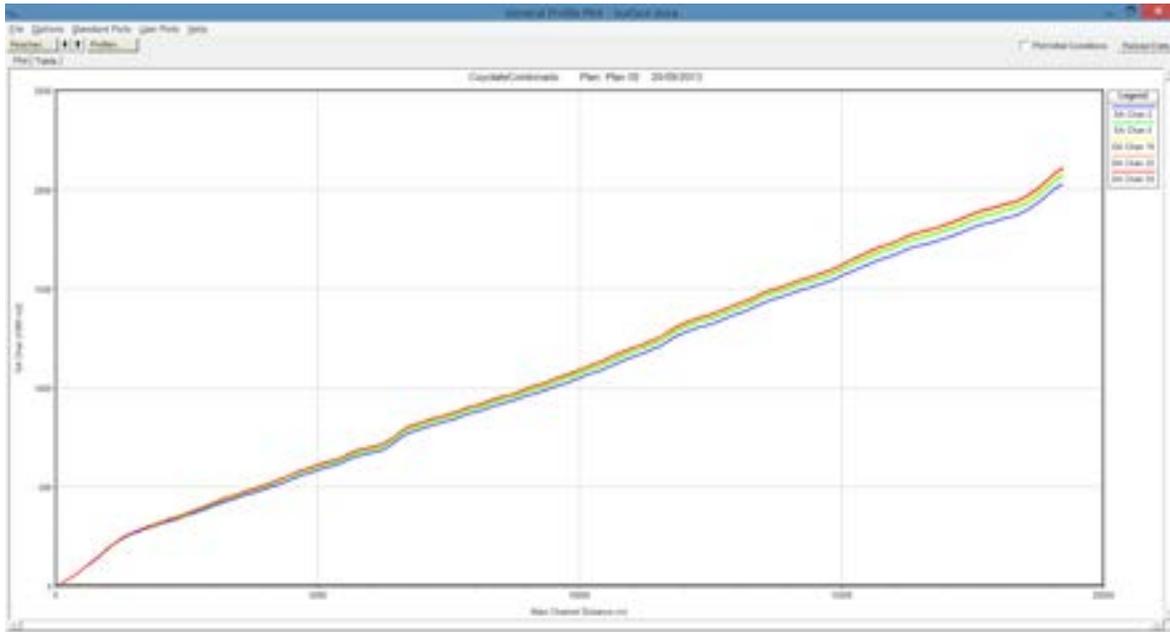
**Caudal en el cauce principal (será menor en los puntos en donde el río se desborda):**



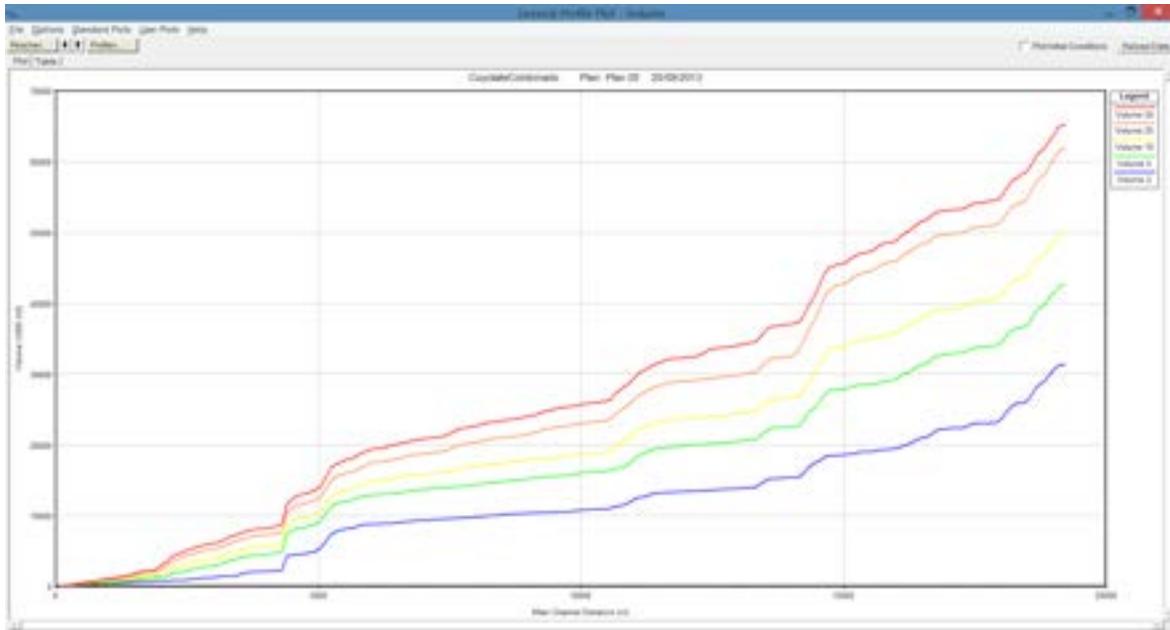
**Calado en el canal principal**



**Superficie acumulada para el cauce principal desde el punto más bajo del cauce:**



**Volumen acumulado para el cauce principal desde el punto más bajo del cauce:**





**Instituto Privado de Investigación  
sobre Cambio Climático**