



2012

# PROYECTO HIDROELÉCTRICO REVENTAZÓN: ESTUDIOS AMBIENTALES ADICIONALES PARTE C: ESTUDIO DE SEDIMENTOS





## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN .....  | 1  |
| 2. ENFOQUE Y MÉTODOS DEL PROYECTO .....                          | 3  |
| 2.1 Sedimentación en el Embalse .....                            | 5  |
| 2.2 Sedimentación en el Río .....                                | 5  |
| 2.3 Sedimentación en el Estuario .....                           | 7  |
| 3. DATOS DE ENTRADA EN EL MODELO .....                           | 9  |
| 3.1 Caudales del Río .....                                       | 9  |
| 3.2 Nivel del Agua Aguas abajo .....                             | 10 |
| 3.3 Características del Sedimento .....                          | 10 |
| 3.4 Secciones Transversales, Topografía, y Batimetría .....      | 14 |
| 4. ESCENARIOS MODELADOS .....                                    | 17 |
| 5. RESULTADOS DEL MODEL .....                                    | 19 |
| 5.1 El Embalse .....   | 19 |
| 5.2 El Río .....   | 20 |
| 5.3 Efectos del Cambio Climático en los Sedimentos del Río ..... | 27 |
| 5.4 EL ESTUARIO .....  | 27 |
| 6. RECOMENDACIONES .....   | 31 |
| 7. LITERATURA CITADA .....                                       | 33 |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| TABLA 5-1 CARGAS DE SEDIMENTO MEDIDAS Y CALCULADAS .....   | 21 |
| TABLA 5-2 RESULTADOS DEL MODELO PARA EL EVENTO DE DESFOGUE-CARGAS DE SEDIMENTOS DADOS EN MILLONES DE TONELADAS ..... | 23 |
| TABLA 5-3 RESULTADOS DEL MODELO A LARGO PLAZO - CARGAS DE SEDIMENTO EN MILLONES DE TONELADAS .....                   | 25 |
| TABLA 5-4 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO MODELADOS EN LOS SEDIMENTOS DEL RÍO REVENTAZÓN .....                          | 27 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 2-1 PERFIL DEL RÍO REVENTAZÓN INDICANDO LA UBICACIÓN DE LOS TRAMOS DE TRANSICIÓN E INFERIOR/ALUVIAL (FIGURA 7.5.1.12 DEL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DEL P.H. REVENTAZÓN, EXPEDIENTE SETANA NO. 0331-08) ..... | 4  |
| FIGURA 2-2 MAPA DE LOS TRAMOS DE TRANSICIÓN Y EL INFERIOR/ALUVIAL DEL RÍO REVENTAZÓN (FIGURA 7.5.1.13 DEL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL P. H. REVENTAZÓN, EXPEDIENTE SETANA NO. 0331-08) .....                          | 5  |
| FIGURA 3-1 CAUDALES REGISTRADOS EN LA ESTACIÓN PASCUA DURANTE EL PERÍODO 2004-2007 Y USADOS EN EL MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....  | 9  |
| FIGURA 3-2 CONCENTRACIONES DE SEDIMENTOS OBSERVADOS DURANTE LOS DESFOGUES OCURRIDOS EN EL GUAYABO Y HAMBURGO EN SEPTIEMBRE DEL 2006 .....  | 11 |
| FIGURA 3-3 CONCENTRACIONES DE SEDIMENTOS OBSERVADOS DURANTE LOS DESFOGUES OCURRIDOS EN EL GUAYABO, PASCUA Y HAMBURGO EN SEPTIEMBRE DEL 2007 .....  | 12 |
| FIGURA 3-4 DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DEL MATERIAL DE FONDO PARA LOS SITIOS PASCUA, EN MEDIO Y DE TRANSICIÓN MOSTRANDO EL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS GRUESAS  | 13 |
| FIGURA 3-5 DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DEL MATERIAL DE FONDO PARA LOS SITIOS PASCUA, INFERIOR/ALUVIAL MOSTRANDO EL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS FINAS.....   | 13 |
| FIGURA 3-6 CAUDAL VERSUS CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS EN LA ESTACIÓN PASCUA, BASADOS EN DATOS OBSERVADOS (FIGURA 7.5.1.31 DEL EIA) .....  | 14 |
| FIGURA 3-7 UBICACIONES DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES EN EL RÍO USADAS EN EL MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....  | 15 |
| FIGURA 3-8 PERFILES DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DEL RÍO REVENTAZÓN USADAS EN EL MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS (INCLUYE LAS SECCIONES DE TRANSICIÓN Y LA INFERIOR/ALUVIAL) .                                    | 16 |
| FIGURA 5-1 RESULTADOS DEL MODELO PARA EL DESFOGUE OCURRIDO EN OCTUBRE DEL 2005.....  | 22 |
| FIGURA 5-2 RESULTADOS DEL MODELO PARA EL DESFOGUE OCURRIDO EN SEPTIEMBRE DEL 2006.....   | 22 |
| FIGURA 5-3 RESULTADOS DEL MODELO PARA EL DESFOGUE OCURRIDO EN SEPTIEMBRE DEL 2007.....   | 23 |
| FIGURA 5-4 RESULTADOS DEL MODELO DE ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS EN LA ESTACIONES PASCUA (AGUAS ARRIBA) Y HAMBURGO (AGUAS ABAJO) PARA EL 2004 Y 2005 .....  | 25 |
| FIGURA 5-5 ELEVACIONES MODELADAS EN LA SECCIÓN INFERIOR/ALUVIAL (ESTACIÓN 30582) PARA 2004 Y 2005.....   | 26 |
| FIGURA 5-6 ELEVACIONES MODELADAS EN LA SECCIÓN DE TRANSICIÓN (ESTACIÓN 49916) PARA 2004 Y 2005 .....   | 26 |

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 5-7 ESTUARIO REVENTAZÓN (SUPERFICIE PLANA DE 2 MILLONES DE METROS CUADRADOS<br>DELINEADA EN COLOR AMARILLO)..... | 29 |
|---|----|



## AGRADECIMIENTOS

Este reporte fue elaborado por un equipo multidisciplinario de consultores de *Integrated Environments* (2006) Ltd., *Environmental Resources Management* (ERM) y Applied Aquatic Research Ltd. Los profesionales que contribuyeron y participaron en este estudio son los siguientes:

- Miles Scott-Brown
- Juan Quintero
- Roberto Roca
- Tom Boag
- George Krallis
- Ed Buchak

Los autores quisieran agradecer el apoyo y la participación de los miembros del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón del ICE y de su Unidad de Gestión Ambiental y en particular del Ing. Sergio Mata, Ing. Mauricio Morales Morales, Ing. Allan Retana Calvo, Ing. Carlos Roberto Rodríguez Meza, Ing. Luis Roberto Rodríguez Arroyo, Ing. Gustavo Calvo Domingo, M.Sc. Dora Carías Vega, Ing. Erick Campos Vargas, Ing. Johnny Ríos Barboza, Geog. Sandra Alfaro Trejos, Ing. Ezequiel Barrantes Arguedas, Ing. Miguel Vargas Petersen, Ing. Jorge Valverde Barrantes, Ing. Eugenia Gutiérrez Castro, Ing. Jorge Granados Calderón y el Ing. Federico Aviles Chaves.

La elaboración del reporte fue auspiciada por el Banco Interamericano de Desarrollo. Extendemos nuestro agradecimiento al liderazgo manifestado por Emmanuel Boulet, Enrique Rodríguez y Graham Watkins en la formulación y revisión de este reporte.





## 1. INTRODUCCIÓN

Reuniones de trabajo de las partes interesadas con el personal del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) durante una visita al río Reventazón sirvieron para identificar la cantidad y distribución de sedimentos aguas abajo del embalse. Este problema continúa siendo una preocupación en las partes bajas del río Reventazón, en el estuario, y en el Parque Nacional Tortuguero. Los impactos producidos por los sedimentos ocurren durante la temporada de lluvias y durante los períodos programados para el desfogue de los sedimentos acumulados de los embalses Angostura, Cachí y de otros ubicados aguas arriba. Por definición, los efectos producidos por la construcción y operación del embalse generan la alteración del tiempo de la carga de sedimentos y el volumen del embalse, y alcanza aguas abajo a combinarse con un cambio en el transporte de energía liberada por el flujo del agua debido a la alteración de los flujos. En general, los embalses limitan el paso de sedimentos creando “agua hambrienta” aguas abajo. Esto produce cambios en la morfología del canal y la ubicación longitudinal de la erosión, acumulación y transporte de los sedimentos hasta el río y el estuario. Eventualmente, el río equilibrará esta nueva condición. Bajo las circunstancias que se esperan para el manejo de sedimentos, estos serán acumulados en el embalse para luego ser descargados periódicamente, lo que entonces creará una nueva condición base debido a los rápidos cambios en su deposición.

Este estudio está formulado para examinar los alcances del río Reventazón por sedimentación usando modelos de computadora y métodos de análisis de datos. El objetivo es evaluar los problemas producidos por los sedimentos, sus impactos, y presentar medidas para su mitigación y proponer nuevos estudios. Sin un plan específico de manejo de sedimentos para P.H. Reventazón, este estudio representa el peor caso posible en la evaluación del transporte de sedimentos.

El desfogue de sedimentos para, dentro y desde el embalse Reventazón está siendo estudiado por el Dr. George Annandale de Golder Associates. Además, se ha agregado un plan de manejo de los sedimentos que se encuentra en desarrollo y se integrará al plan de operación del embalse. Comunicación personal con el Dr. George Annandale indica que hasta el día de hoy el estudio y los planes de manejo no se encuentran disponibles para su revisión.

El objetivo general de este plan global y adaptativo del manejo de sedimentos será el modificar su descarga para mitigar posibles impactos en el río y el estuario. Por ejemplo, la modificación de operaciones normales y de desfogues de todos los embalses. Nosotros hemos proporcionado una lista de recomendaciones y medidas de mitigación que deberán incluirse en el plan de manejo de sedimentos. Estas serían usadas para reportar en el plan de manejo de sedimentos establecido por ICE para el proyecto.

La evaluación del impacto ambiental de ICE (EIA, 2009) para el P.H. Reventazón incluye un estudio y análisis del transporte de sedimentos en el río durante períodos normales de operación y durante los eventos de desfogue desde los que ocurren en los embalses Cachí y la Angostura, ubicados aguas arriba del P.H. Reventazón. El ICE registra los desfogues y explica razonablemente qué está ocurriendo en los dos embalses y en el río, y qué está cambiando activamente al entorno del río. La EIA y nuestra visita al sitio confirmaron que los sedimentos es un problema significativo en el río Reventazón.

Respecto al transporte de sedimentos en el río aguas abajo de la presa, este deposita la mayoría de sus excedentes de sedimentos en la parte final de la zona de transición y principio de la zona inferior aluvial. (In this report, 'excess sediment' refers to the quantity of sediment in the river that exceeds the sediment carrying capacity of the river.) Se prevé que este mismo comportamiento continúe hasta que el agua disminuya su velocidad de entrada a la parte más plana de la zona aluvial y tenga menos energía para mover los sedimentos, separándolos del agua. El excedente restante de sedimentos será conducido hacia el estuario. Este excedente puede causar un mayor número de inundaciones creando zonas someras, la obstrucción del canal, la migración del mismo y erosión en la ribera del río por el cambio en donde la energía del agua es ejercida, la formación de deltas de arena y grava y otros cambios en la morfología del río. En este estudio también se ha determinado que los cambios en el régimen de flujo debido a los efectos de regularización en la producción de energía y al volumen de almacenamiento del embalse causan cambios en la capacidad del río para transportar sedimentos. Asimismo algunos impactos producidos por el cambio climático fueron evaluados en este estudio.

Respecto al estuario, en el estudio se evaluó la magnitud y una serie de impactos causados por el incremento de carga de sedimentos hacia el estuario. De igual forma hemos proporcionado una lista con información que deberá ser recopilada para construir y utilizar un modelo detallado del estuario que cuantifique estos efectos.

## 2. ENFOQUE Y MÉTODOS DEL PROYECTO

Esta evaluación del transporte de sedimentos en el entorno del río, embalse Reventazón, y estuario se basa en un modelo computacional y cálculos usando datos de campo recolectados del sitio de estudio. La evaluación del embalse utilizando el modelo computacional CE-QUAL-W2 se describe en un reporte por separado. Los tramos del río son modelados usando el modelo SRH-1D del US Bureau of Reclamation (por su nombre en inglés). El estuario fue modelado con el planteamiento de balance de masas que simplifica el rango de distribución de los sedimentos en el estuario. El enfoque del estudio es el uso de modelos e información existente, y corroborar los resultados de la simulación con la información y estudios existentes. A continuación se describen los modelos específicos y enfoques usados en esta evaluación.

El área de estudio para esta evaluación de sedimentos es el tramo del río Reventazón que comprende desde el lugar propuesto para el embalse hasta el estuario. La presa propuesta, la casa de máquinas, y el embalse se localizan en la parte final del tramo del río Reventazón conocida como “tramo medio” y se ilustra en las Figura 2-1 y Figura 2-2. En esta ubicación, el río está en transición desde los valles más abruptos en las regiones montañosas hasta las zonas planas costeras. Debajo de la presa, el río se dirige a toda una zona de transición y en la parte inferior a una zona plana costera aluvial. El río drena sus aguas en el estuario Reventazón antes de ser descargadas hacia el Mar Caribe.

El área de estudio está dividida a lo largo de las siguientes secciones: embalse, río, y estuario. El embalse se evalúa en un reporte por separado junto con la evaluación de su calidad del agua. Las secciones del río para esta evaluación se dividen en las zonas de transición e inferior/aluvial. El estuario se evalúa por separado.

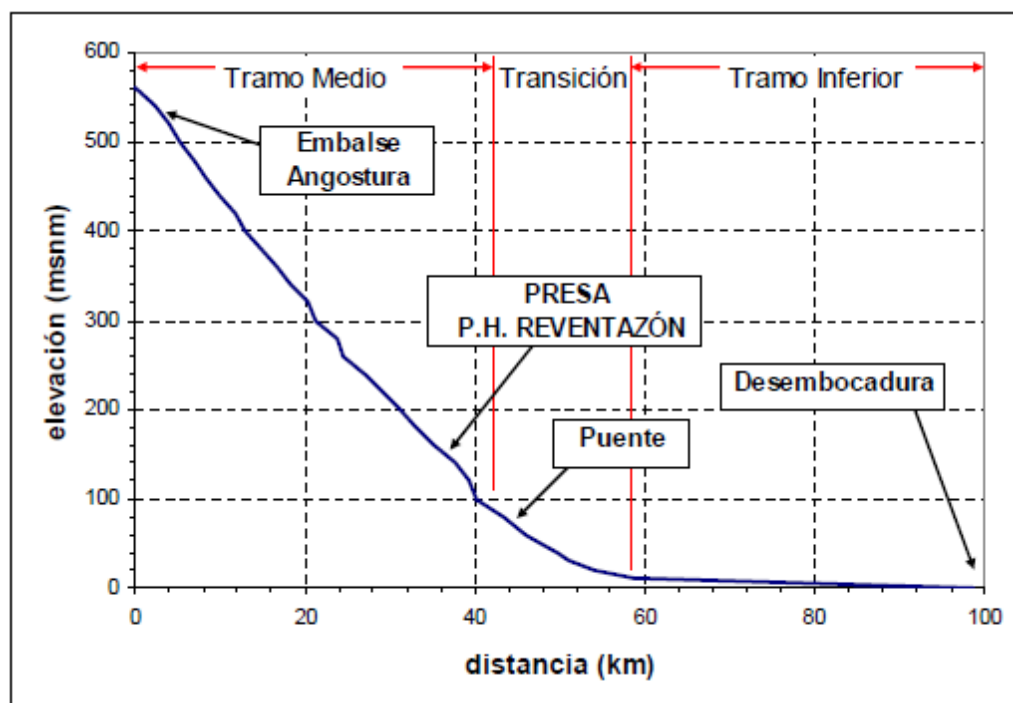


Figura 2-1 Perfil del río Reventazón indicando la ubicación de los tramos de transición e inferior/aluvial (Figura 7.5.1.12 del Estudio de Impacto Ambiental del P.H. Reventazón, Expediente SETANA no. 0331-08)

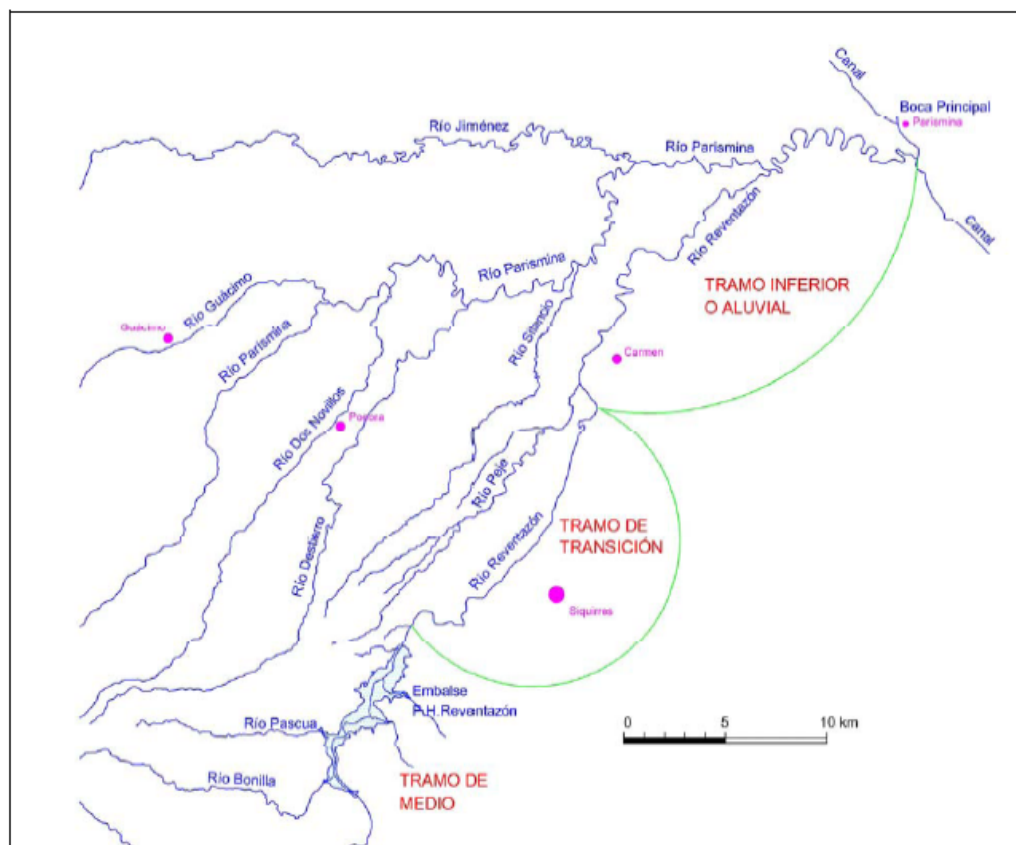


Figura 2-2 Mapa de los tramos de transición y el inferior/aluvial del río Reventazón (Figura 7.5.1.13 del Estudio de Impacto Ambiental P. H. Reventazón, Expediente SETANA no. 0331-08)

## 2.1 Sedimentación en el Embalse

Como se menciona anteriormente, el proceso de sedimentación en el río Reventazón se evalúa por separado en el reporte del modelo de calidad del agua, utilizando el modelo CE-QUAL-W2. Además, el proceso de sedimentación en el embalse está siendo estudiado por el Dr. George Annandale de Golder Associates.

## 2.2 Sedimentación en el Río

SRH-1D (un modelo unidimensional de sedimentación e hidráulica fluvial, versión 2.6), es un modelo creado por el U.S. Bureau of Reclamation (por su nombre en inglés), y fue usado para evaluar los efectos de sedimentación en dos tramos del río: el de transición y el inferior/aluvial. Debido a que este modelo es unidimensional, no puede modelar las características del estero que varíen con el tiempo. Este modelo fue seleccionado por la falta de información necesaria para poder utilizar otro modelo más complejo. Por ejemplo: un modelo bidimensional (2D), tridimensional (3D), o que varíe con el tiempo. Ninguno de estos modelos contaban con la información necesaria para evaluar conceptualmente el cambio en el transporte de sedimentos en el río necesario para reportar el plan de manejo.

El campo de estudio del modelo es el río Reventazón desde la presa Reventazón hasta la confluencia con el río Parismina, extendiéndose hasta la zona del estuario.

SRH-1D es un modelo computacional, unidimensional, con condiciones hidráulicas móviles de frontera y transporte de sedimentos para ríos y canales artificiales. La capacidad de simulación incluye flujos estacionarios y variables, condiciones frontera internas, redes de ríos interconectados, transporte de sedimentos cohesivos y no cohesivos, y flujos de entrada laterales. El modelo utiliza secciones transversales basadas en la información del río.

El modelo simula cambios en ríos y canales originados por el transporte de sedimentos. Asimismo, el modelo puede estimar la concentración de los sedimentos en toda la zona fluvial dado los sedimentos de los afluentes, material de fondo del embalse, hidrología e hidráulica de la zona fluvial.

SRH-1D emplea soluciones unidimensionales para la simulación del flujo. Estas soluciones no se aplican en situaciones en donde se utilizan modelos de 2 ó 3 dimensiones necesarios para representar condiciones particulares hidráulicas. Corrientes secundarias, movimientos transversales, variación transversal y difusión lateral son descartados para este modelo. Por lo tanto, el modelo no puede simular fenómenos tales como meandros, formación de deltas de materiales, formación de remansos (pool-riffle por su nombre en inglés), y muchos cambios en zonas planas. Para propósitos de la evaluación conceptual del transporte de masa en el río y el sistema del estuario, estas características no son importantes, aunque un modelo así podría ser necesario y factible para dar seguimiento al rendimiento y poder predecir cambios detallados en el canal para un manejo flexible. SRH-1D está siendo actualmente recopilado para ejecutarlo dentro del sistema operativo Windows XP, el cual es un medio utilizado para esta aplicación.

SRH-1D puede simular:

- flujos estacionarios y variables para cualquier combinación de flujos sub o supercríticos;
- redes de ríos dendríticos e interconectados;
- cambios graduales del material de fondo pueden ser simulados y se puede dar seguimiento a diferentes capas de material de fondo;
- varias fórmulas están disponibles para diferentes capacidades de transporte de sedimentos;
- transporte de sedimentos cohesivos y no cohesivos;
- erosión de la ribera del río simulados usando ángulos de las condiciones de respuesta;
- la información de la geometría del canal que es similar a HEC-RAS;
- utilizar Excel para generar rápidamente archivos de entrada;
- archivos de salida estructurados en varios archivos de texto.

Las fórmulas de transporte de arena de Yang (Yang, 1979) fueron utilizadas debido a que estas consideran la carga del material de fondo, la carga suspendida, y la carga para sedimento fino (washload por su nombre en inglés). En 1979 Yang propuso una fórmula para el transporte de arena para condiciones de flujo que exceden aquellas requeridas para el movimiento inicial. Los coeficientes en las ecuaciones de Yang fueron determinados utilizando 452 grupos de datos obtenidos de un canal de flujo a nivel laboratorio.

### **2.3 Sedimentación en el Estuario**

El estuario no fue modelado tan detalladamente como en los tramos del embalse o del río, descritos anteriormente, por la falta de disponibilidad de información para establecer un modelo apropiado 2D o 3D, sin embargo un modelo como este no es esencial a este nivel de planeación. El método descrito en los alcances de este trabajo y en el informe inicial es el realizar un balance de masa de los sedimentos en el estuario. Con pocas suposiciones básicas, la magnitud de los impactos del transporte de sedimentos fue hecha y utilizada para evaluar y proponer acciones de mitigación y monitoreo para ayudar en la adaptación de los planes de manejo.

Un propósito importante durante la visita al sitio de estudio fue el valorar la disponibilidad de información para un modelo más complejo del estuario. Como resultado de esta visita, se observó que el estuario consiste de varios brazos (ramas) conectados entre sí con modificaciones constantes en su configuración. Las mayores limitaciones del modelo son la falta de información completa batimétrica, la falta de datos de los caudales del río y las cargas de sedimentos incluyendo otros pequeños afluentes o tributarios hasta el estuario y el intercambio de sedimentos con el Mar Caribe. Por estas razones, el uso de modelos complejos 2D o 3D en este estuario no resulta práctico, viable o útil con la información disponible, por consiguiente se utiliza un balance sencillo de masa.

Para desarrollar un modelo más complejo de transporte de sedimentos para el estuario, es necesario contar con la siguiente información:

- un levantamiento batimétrico del estuario (isobatas),
- caudales de todos los tributarios (arroyos) de agua dulce (incluyendo las zonas pantanosas que rodean al estuario),
- datos de oleaje dentro y fuera del estuario,
- concentraciones de sólidos suspendidos de fuentes lacustres, marinas, y dentro del estuario,
- flujos de entrada y de salida (prisma del oleaje) del Caribe,
- distribución de la granulometría de los sedimentos del material de fondo de todo el estuario, transporte de sedimentos (transporte litoral o del perímetro) a lo largo del desarrollo litoral y del exterior.





### 3. DATOS DE ENTRADA EN EL MODELO

Para establecer y ejecutar los modelos descritos, fue necesario utilizar varios grupos de información de entrada. Estos grupos primeramente consisten de los caudales del río, velocidades de los flujos de sedimentos, características de los sedimentos del material de fondo del río, y la batimetría y secciones transversales del río. Cada uno de estos grupos se describe a continuación:

#### 3.1 Caudales del Río

Los caudales promedio por día del río Reventazón de la estación Pascua (730912) fueron proporcionados por el ICE en un DVD del P.H. Reventazón (ICE, 2011). La estación Pascua está ubicada aguas arriba en la parte final del embalse Reventazón. Estos caudales sirven como flujos de entrada en el extremo aguas arriba de las regiones de estudio. Ningún otro caudal adjunto fue considerado debido a que las cuencas y sus áreas de contribución son pequeñas comparadas con el Reventazón (a excepción del río Parismina). No se cuenta con información de este río ni de arroyos más pequeños, por lo que el río Parismina se estableció como el límite del modelo aguas abajo.

Los datos históricos de los caudales registrados por la estación Pascua se reportan desde 1963 (exceptuando un período corto de 1994-1995). La mediana de los caudales registrados por la estación Pascua es de 151.9 m<sup>3</sup>/s. Los caudales promedio mensuales a lo largo del año (1963 hasta 2004) oscilan desde 80 m<sup>3</sup>/s en marzo hasta 210 m<sup>3</sup>/s en septiembre. Caudales por día registrados en la estación Pascua y los utilizados por el modelo se muestran en la Figura 3-1. Estos caudales son los mismos utilizados para el modelo de calidad del agua (descrito en un reporte por separado).

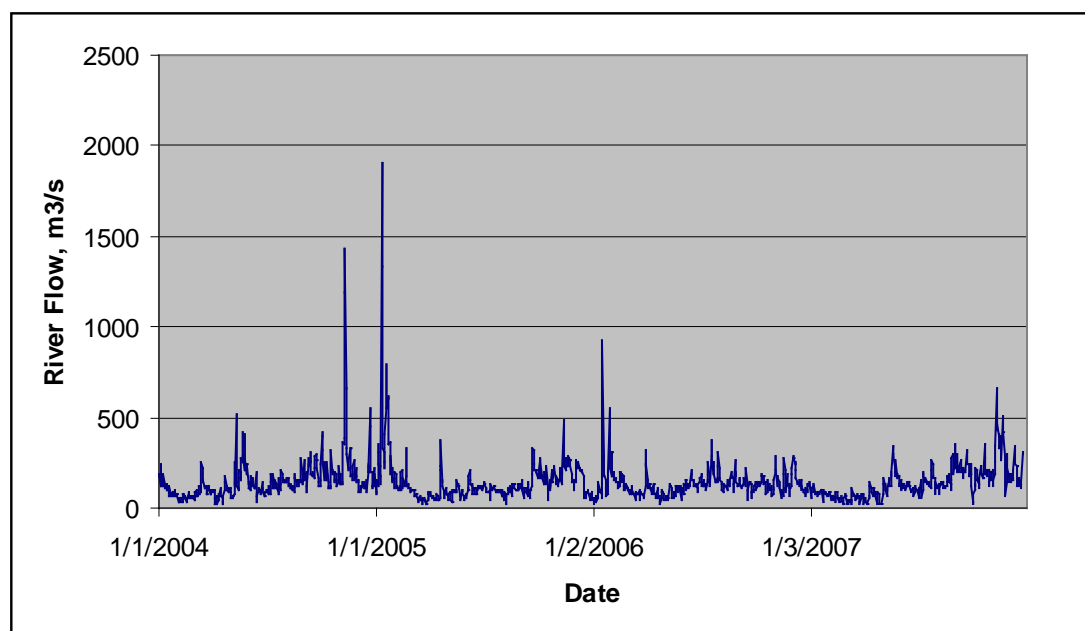


Figura 3-1 Caudales registrados en la estación Pascua durante el período 2004-2007 y usados en el modelo de transporte de sedimentos

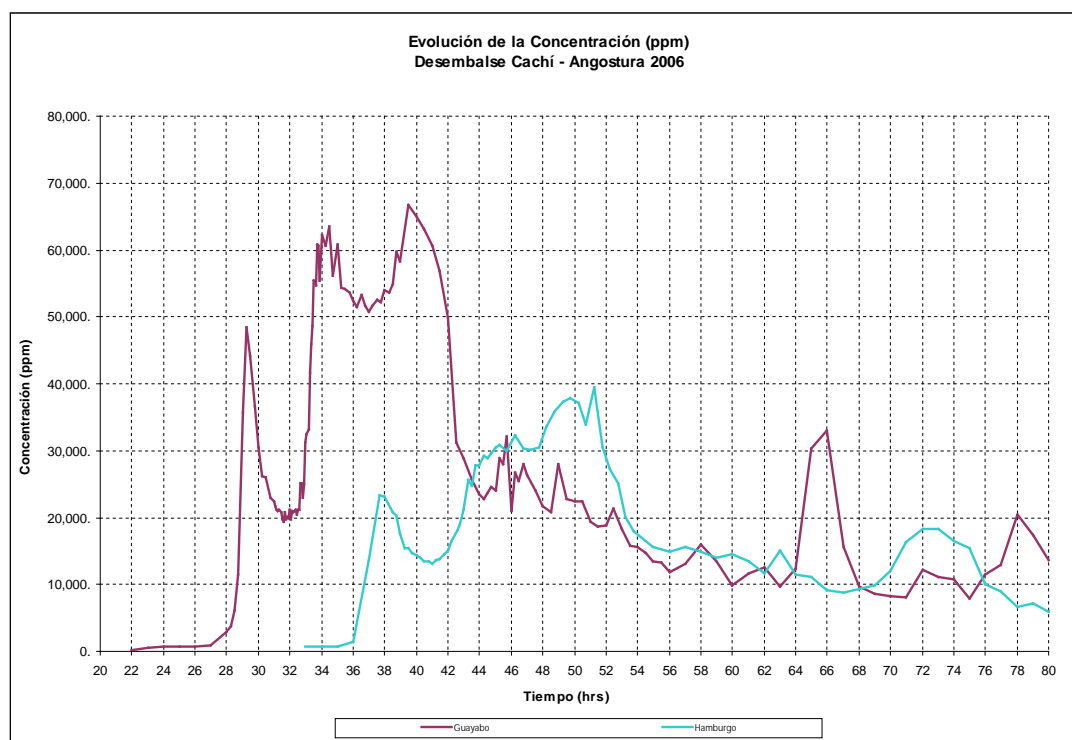
### **3.2 Nivel del Agua Aguas abajo**

El modelo unidimensional para el río utilizado en este análisis requiere una condición frontera aguas abajo para su cálculo. En este caso, la condición frontera aguas abajo es la superficie del nivel del agua en el estuario. Información de oleaje en Puerto Limón, Costa Rica, están disponibles al público (<http://www.tide-forecast.com/locations/Limon-CostaRica/tides/latest>) La información muestra un rango normal relativamente pequeño menor a 1 metro. En los tramos superiores del estuario en donde el campo de estudio del modelo se termina, la condición frontera utilizada es un valor constante de 2.0 metros sin oleaje. Este es un valor cauteloso porque representa condiciones extremas de inundación, y un valor inferior resultaría en una retención baja de sedimentos en el estuario.

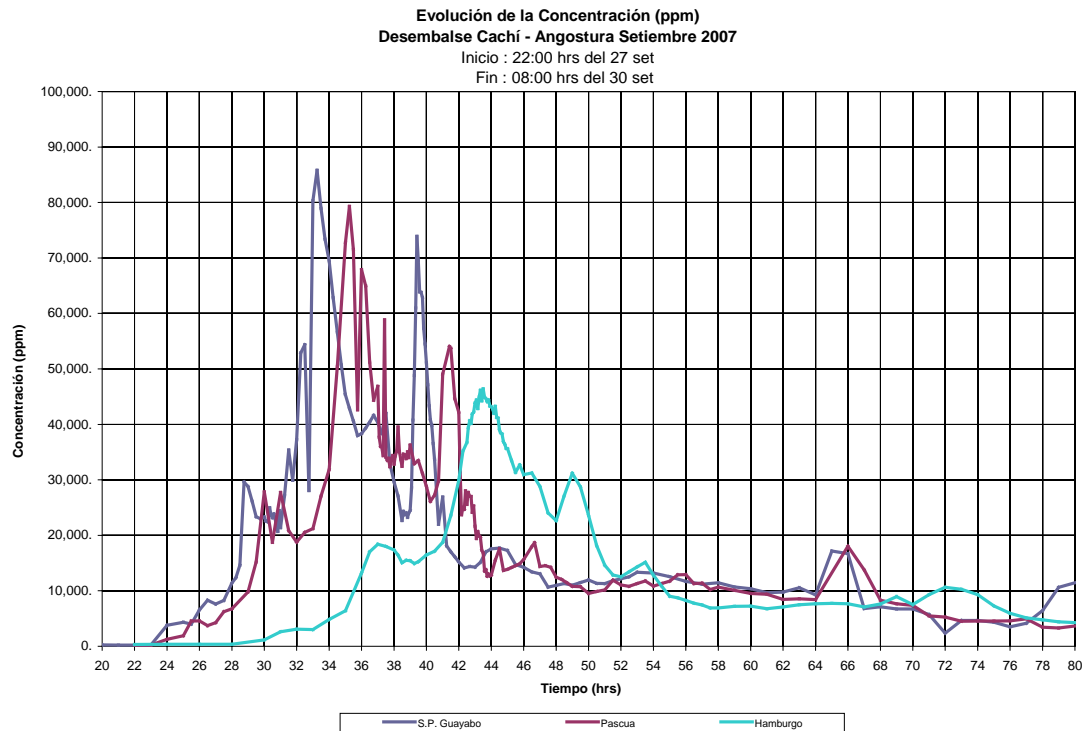
### **3.3 Características del Sedimento**

Los sedimentos en el río Reventazón consisten inicialmente de material endógeno de fondo, material de las orillas del río y del material importado por deslaves, fuentes puntuales, y los transportados por la escorrentía proveniente de la cuenca. Algunos de estos sedimentos son medidos en una escala que pueden ser utilizados por el modelo. Además, cambios en la cuenca tales como deforestación, desmonte de terrenos para la agricultura, sobrepoblación, urbanización, incrementos de zonas pavimentadas, aumento de fuentes puntuales de descargas, incrementos de sedimentos por escorrentía de la lluvia, y la mineralogía de fondo del río alteraran cumulativamente con el tiempo los sedimentos en el río Reventazón. Esta evaluación utiliza concentraciones y cargas de sedimentos reportados en el EIA (ICE, 2009). Estos valores se suponen constantes durante todo el período del modelo y se presume que estos efectos acumulativos podrían ser identificados y controlados con prácticas de manejo de los sedimentos. Nosotros creemos que esta suposición es razonable.

La carga de sedimentos en el río Reventazón utilizada en esta evaluación incluye información de los siguientes sitios: Pascua y otros dos sitios conocidos como el Guayabo y Hamburgo (EIA, 2009; ICE, 2009). Esta información incluye sedimentos en suspensión y de material endógeno de fondo. Información de los desfuegos del embalse ocurridos en el 2005, 2006 y 2007 se encuentran disponibles en hojas de cálculo dentro de un DVD y fueron proporcionadas por el ICE (ICE, 2011). También, esta información incluye los caudales del río y las concentraciones de sedimentos por hora para cada uno de los tres sitios (Figura 3-2y Figura 3-3). Como era de esperarse, los diagramas de caudales y sedimentos son diferentes para cada uno de estos puntos debido al tiempo de retraso entre ellos. Los sedimentos en el Guayabo (el sitio más lejano aguas arriba) tienden a disminuir a lo largo de su recorrido hacia el punto conocido como Pascua. Las cargas más altas de sedimentos del Guayabo y Pascua disminuirán con el tiempo hasta llegar al sitio conocido como Hamburgo debido a que gran cantidad de estos sedimentos quedan atrapados en el tramo intermedio, en la ribera y fondo del río.



**Figura 3-2 Concentraciones de sedimentos observados durante los desfuegos ocurridos en el Guayabo y Hamburgo en septiembre del 2006**



**Figura 3-3 Concentraciones de sedimentos observados durante los desfuegos ocurridos en el Guayabo, Pascua y Hamburgo en septiembre del 2007**

Las características de los sedimentos de fondo del río utilizados en este modelo son descritas con las curvas granulométricas creadas con información recolectada del sitio Pascua (para la zona de transición) y de Hamburgo (para la zona inferior/aluvial). Como era de esperarse, las muestras de los dos sitios difieren encontrando sedimentos más gruesos aguas arriba en Pascua y un material más fino aguas abajo en Hamburgo. La distribución del tamaño de las partículas del material de fondo se muestra en la FIGURA 3-4 y 3-5. Los valores de la foto corregida del sitio Pascua se usaron en la mitad superior del campo de estudio del modelo y los valores recolectados en el sitio Hamburgo se usaron en la mitad inferior. La distribución del tamaño de las partículas del material de fondo no fue interpolada en los tramos intermedios, por lo que no hay un cambio abrupto en el punto medio de los dos tramos.

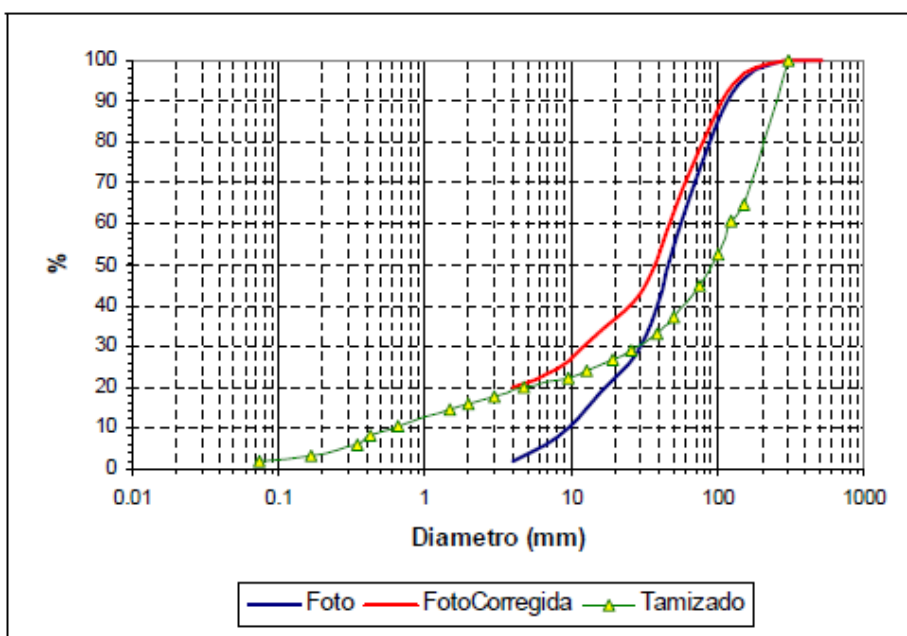


Figura 3-4 Distribución del tamaño de las partículas del material de fondo para los sitios Pascua, en medio y de transición mostrando el tamaño de las partículas gruesas

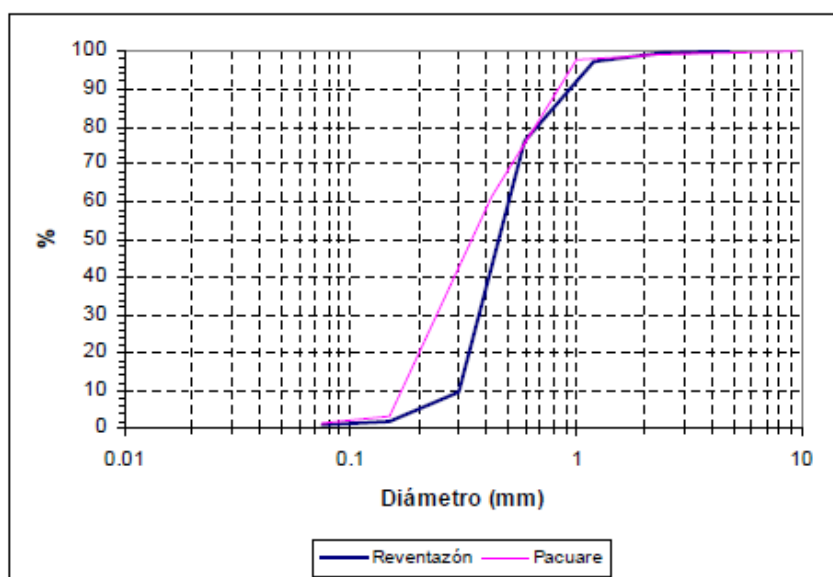
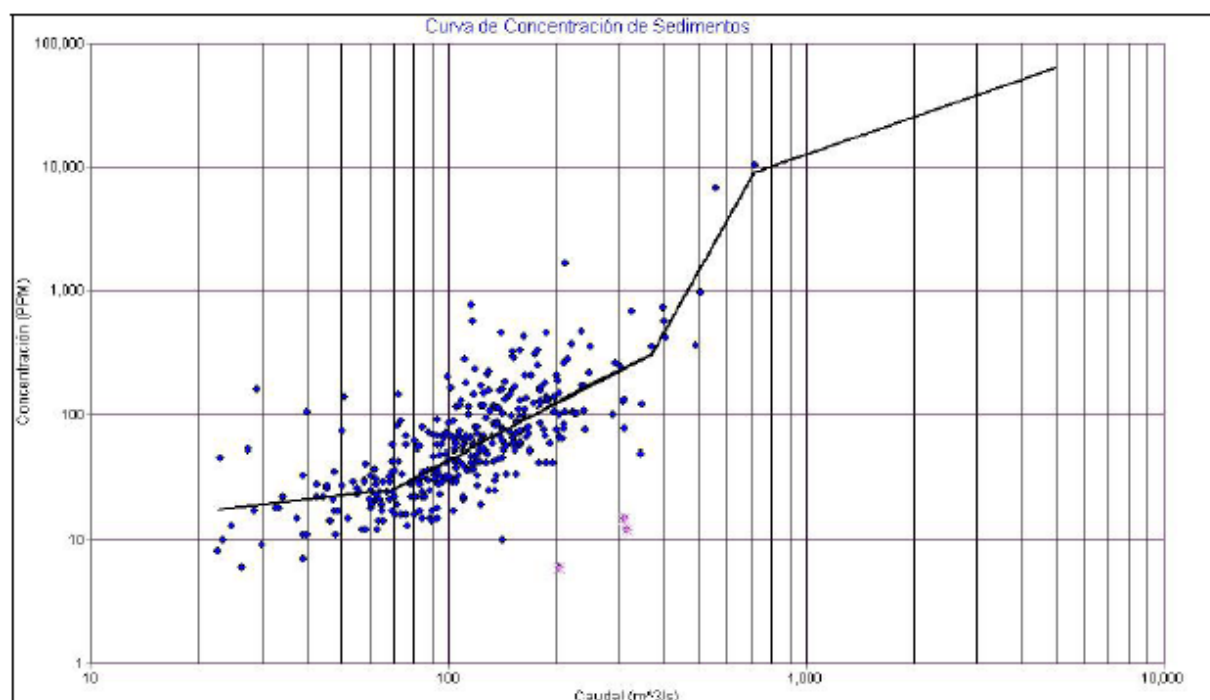


Figura 3-5 Distribución del tamaño de las partículas del material de fondo para los sitios Pascua, inferior/aluvial mostrando el tamaño de las partículas finas

La distribución del tamaño de las partículas de la carga de sedimentos suspendidos y del material de fondo que se mueven a lo largo del río no están disponibles. Como se reportó en el EIA (ICE, 2009) el tamaño de los sedimentos en el Guayabo y Pascua (en el extremo aguas arriba del modelo) son aproximadamente de 90% material fino y 10% material grueso (> 1 mm tamiz-malla/diámetro). Esta distribución fue utilizada para todas las simulaciones en el extremo aguas arriba del modelo. El modelo deposita partículas más grandes, y en el extremo aguas abajo del modelo, los sedimentos son

clasificados por este en aproximadamente 95% de material fino y 5% de material grueso. Estos resultados son respaldados con información reportada en el EIA (ICE, 2009).

Información adicional del EIA (ICE, 2009) incluye una relación de la concentración de sedimentos con los caudales del río, que se ilustran en la Figura 3-6. Esta relación fue usada para configurar el modelo en el extremo aguas arriba para establecer una velocidad de transporte de sedimento dependiendo los caudales del río. Este grupo de datos específicos y la relación son para la estación Pascua.



**Figura 3-6 Caudal versus concentración de sedimentos en la estación Pascua, basados en datos observados (Figura 7.5.1.31 del EIA)**

Las ecuaciones de la relación entre caudales (Q) y la concentración de sedimentos (en ppm) transportados fueron calculados por el ICE (EIA, 2009) y los resultados se presentan a continuación:

|                       |                              |
|-----------------------|------------------------------|
| Para $10 < Q < 70$    | $PPM = 6.2853 Q^{0.32815}$   |
| Para $70 < Q < 350$   | $PPM = 0.044987 Q^{1.4922}$  |
| Para $350 < Q < 717$  | $PPM = 2.0892E-11 Q^{5.126}$ |
| Para $717 < Q < 5000$ | $PPM = 12.633 Q$             |

### 3.4 Secciones Transversales, Topografía, y Batimetría

Las piezas finales de los archivos de entrada para el modelo son las descripciones físicas del río, del embalse, y del estuario. Las secciones transversales fueron tomadas de los mapas topográficos digitales existentes, disponibles en archivos AutoCAD: “presa y embalse.dwg” y “topografía hasta estuario.dwg”

facilitados por el ICE en un DVD. Para este estudio, 31 secciones transversales fueron divididas de los archivos CAD usando intervalos de aproximadamente 1 km desde el lugar propuesto para la presa hasta el estuario. La información no incluye elevaciones topográficas tomadas por debajo de la superficie del agua, por lo que las profundidades del agua fueron calculadas basadas en las profundidades y velocidades de flujo reportadas en el EIA. Las ubicaciones de las secciones transversales se muestran en la Figura 3-7 (vista frontal) y **Error! Reference source not found.** (perfiles).

La batimetría del embalse fue dividida igualmente usando los datos topográficos proporcionados por el ICE, los cuales se describen en el reporte del modelo de calidad del agua. La información batimétrica del estuario no está disponible, más allá de la mostrada en la Figura 3-7. Elevaciones del fondo del estuario no pudieron ser calculadas correctamente basándose en la pequeña cobertura de la superficie, la constante variabilidad de las condiciones del estuario, y los incidentes históricos de dragado en ciertas partes del estuario.

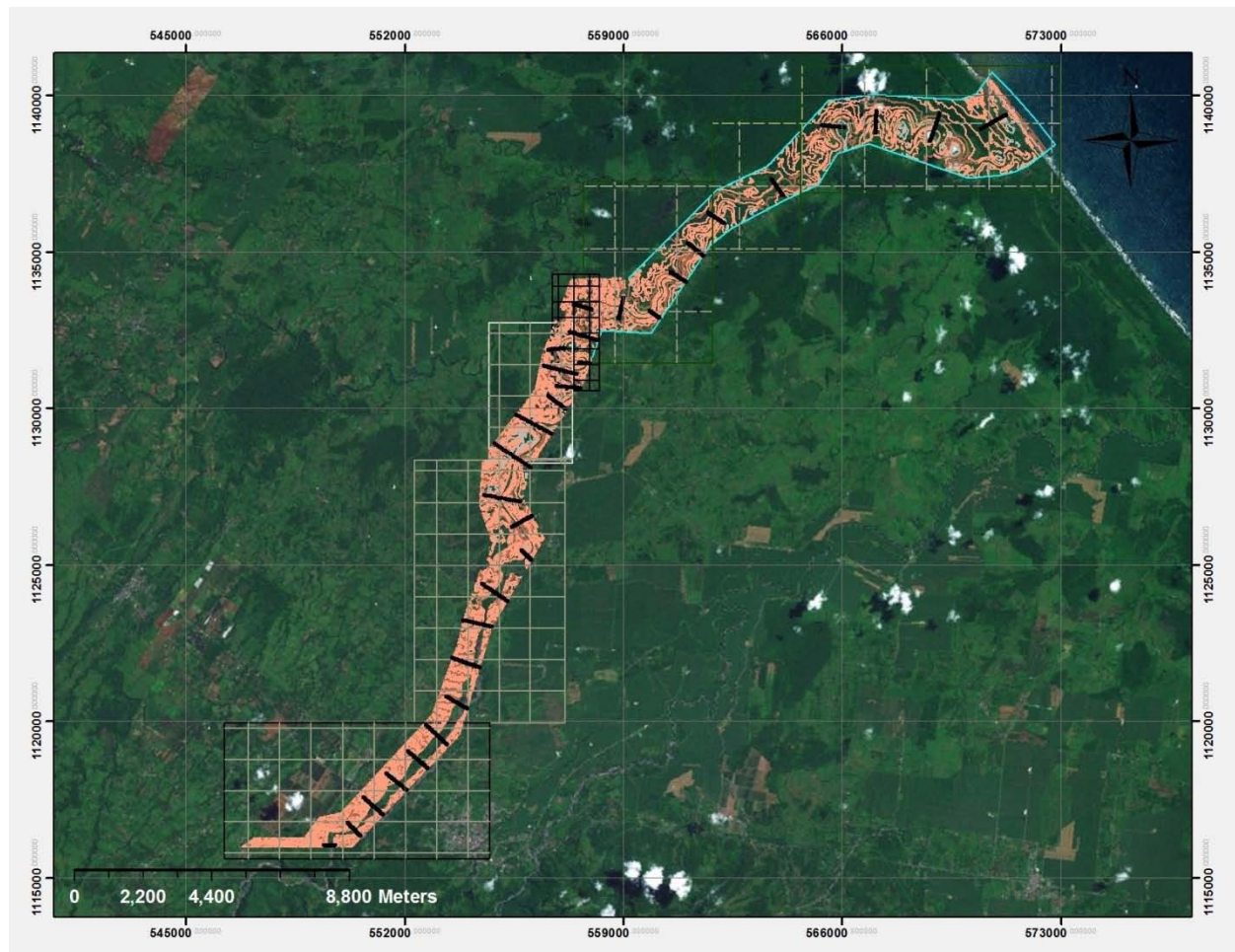


Figura 3-7 Ubicaciones de las secciones transversales en el río usadas en el modelo de transporte de sedimentos

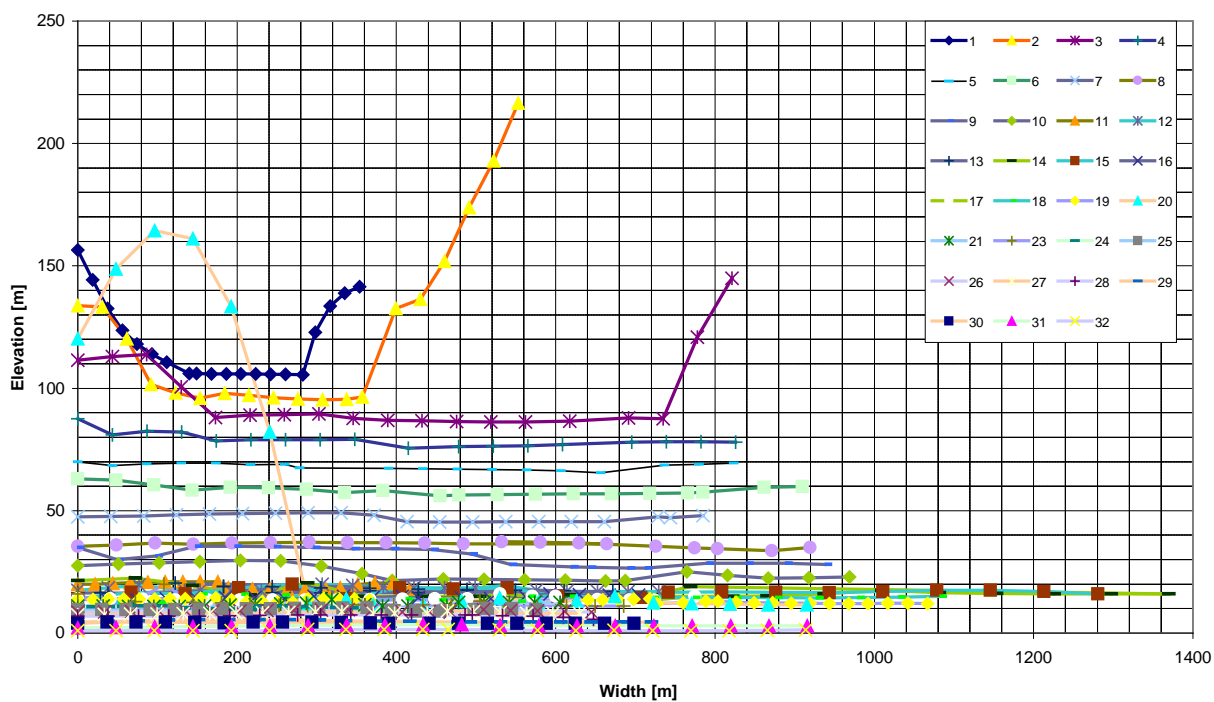


Figura 3-8 Perfiles de las secciones transversales del río Reventazón usadas en el modelo de transporte de sedimentos (incluye las secciones de transición y la inferior/aluvial)



## 4. ESCENARIOS MODELADOS

Dos escenarios diferentes fueron simulados: el desfogue del embalse a corto plazo y otro multianual a largo plazo. Los desfogues de los embalses Cachí y Angostura de octubre del 2005, septiembre del 2006, y septiembre del 2007 fueron simulados para comparar los resultados del modelo con los valores observados. Estos eventos fueron de aproximadamente 4 años cada uno. Tanto los caudales del río y las concentraciones del sedimento fueron medidas cada hora y en intervalos más frecuentes, que proporcionaron suficiente información para el modelo y para su comparación con datos observados. Estos eventos fueron modelados sin incluir el embalse Reventazón para evaluar el transporte de sedimentos en el tramo de transición, como actualmente ocurre. El modelo SRH-1D no incluye el componente de un embalse.

El segundo análisis a largo plazo consistió en un período de simulación de dos años, 2004-2005. Este al igual que las simulaciones a corto plazo, no incluye los efectos de la presa Reventazón (condición base). Datos de los caudales por día del río se encontraban disponibles mientras que las cargas de sedimentos no. Por falta de datos observados de sedimentos, esta simulación utilizó las relaciones de flujos con las concentraciones del sedimento descritas en la sección 3. Una simulación análoga se ejecutó utilizando caudales promedio de los años 2004 y 2005. Esta simulación fue usada para evaluar los efectos del transporte de sedimentos causados por la regularización de los regímenes naturales del flujo para uno que optimice la generación de energía por el almacenamiento de agua en el embalse el cual reduce los flujos máximos, y aumenta los flujos mínimos sobre las condiciones base.

Se ejecutaron dos simulaciones más basadas en el escenario del 2004-2005 para evaluar condiciones provocadas por el cambio climático. Para estas simulaciones, los caudales del río se incrementaron un 5% y se disminuyeron un 15% para los 2 años simulados. Estos cambios son los mismos descritos en las pruebas de sensibilidad de la calidad del agua al cambio climático, los cuales se basan en los valores reportados en el IPCC (2009) proyectados para el año 2050 en Centroamérica.

En todos los escenarios, el modelo fue capaz de evaluar cambios en la carga de sedimentos que entran y salen de las secciones del río.



## 5. RESULTADOS DEL MODEL

Los modelos y escenarios descritos arriba fueron preparados y ejecutados exitosamente para el río Reventazón. Estos son las condiciones para el peor caso posible y no incluyen modificación o optimización para la descarga de sedimentos en el PH Reventazón. Los resultados del modelo coincidieron con los datos observados con respecto al ancho, profundidades, velocidades, concentraciones de sedimentos, y cargas de sedimentos, que fueron proporcionados por el ICE en el EIA un DVD. Los tramos del río fueron evaluados para el depósito, transporte, y cargas de sedimentos utilizando el modelo SRH-1D (2.6). La información requerida para llevar a cabo estos trabajos de modelación y cuantificar los efectos fue suficiente y adecuada. También, los resultados del embalse y el estuario se resumen en esta sección.

### 5.1 El Embalse

Los resultados del modelo CE-QUAL-W2 para el embalse (descritos en un reporte por separado) reportaron que los sólidos suspendidos totales descargados del embalse Reventazón son 42% más bajos que los valores de entrada. Este resultado está basado primeramente en el tiempo que tardan en viajar los sólidos a lo largo del embalse y el supuesto de que los sedimentos se depositan a una velocidad promedio de 1 m/s. Las elevaciones de las estructuras de descarga, nombradas toma de aguas y descarga de fondo, son también importantes en este cálculo. Cargas específicas del sedimento y el tamaño de las partículas del sedimento no fueron consideradas en este cálculo. Como se describió anteriormente, una evaluación más exhaustiva del modelo está siendo desarrollado por el Dr. George Annandale de Golder Associates.

Las concentraciones de los sedimentos suspendidos modelados y el flujo ecológico mínimo descargado del embalse puede ser usado para evaluar la magnitud de los impactos de la presa en la sección del río entre la presa y la casa de máquinas, conocido como el tramo bypass. El proyecto está diseñado para permitir un flujo ecológico mínimo de 15 m<sup>3</sup>/s de la estructura más baja de la presa. Esto es aproximadamente el 10% del flujo promedio anual normalmente llevado en este tramo del río. La disminución del flujo coincide con la baja de la carga de sedimentos y un cambio en la distribución del tamaño de partícula de los sedimentos que entran y se depositan en esta sección. Las partículas más gruesas serán retenidas dentro del embalse, permitiendo primeramente que las partículas más finas sean llevadas dentro y a través de este tramo bypass.

Durante la temporada de lluvias e inundaciones cuando el vertedero está descargando el excedente de agua en el tramo bypass, el material depositado más fino de los sedimentos podría resuspenderse y ser llevado aguas abajo. El tramo bypass desarrollara eventualmente una nueva condición de equilibrio después de varios años de operación, sin existir cambios mayores en operación o descargas periódicas de sedimentos. Si el embalse Reventazón es drenado y desfogado anualmente, como lo es en otros embalses ubicados aguas arriba, el tramo bypass estará en constante estado de flujo.

## 5.2 El Río

La presa y el embalse Reventazón se ubican en la porción del río Reventazón considerada para ser el tramo medio. Directamente aguas debajo de este tramo está el tramo de transición seguido del tramo inferior o inferior/aluvial. Cada uno de estos tramos presenta diferentes características geomorfológicas e hidráulicas basadas en la topografía y la pendiente de las secciones del río.

La porción superior de la zona de transición tiene una pendiente promedio de 1.3% que disminuye rápidamente a 0.6% sobre una distancia de aproximadamente 20 km en la parte final de la zona de transición. La sección inferior/aluvial empieza con una pendiente de 0.6% que baja a casi 0% en el estuario, aproximadamente 40 km aguas abajo. La pendiente promedio de la sección inferior/aluvial es de 0.036%.

Estos cambios de pendiente indican como el sedimento se comportara en cada sección. El sedimento que entra a la zona de transición es llevado por el río con una amplia energía de la corriente (velocidad x área x pendiente x densidad) debido a la inclinación de la sección. Así como la pendiente disminuye, el tramo pierde energía y libera casi dos terceras partes de carga de sedimentos suspendidos, de acuerdo a las observaciones y resultados del modelo. Lo que queda en suspensión es llevado hasta la confluencia de río Parismina y el estuario. Ahí, una nueva reducción en la energía de la corriente ocurre, pero esta vez en forma de una velocidad más baja. Los flujos dentro del estuario se ramifican en múltiples trayectorias y son menos capaces de llevar sus cargas de sedimento.

El ICE calcula que el programa de desfogue del embalse en Cachí and Angostura liberara 1 millón de toneladas de sedimento en el río durante los eventos de desfogue, mientras que durante el resto del año, las condiciones del río descargarán 3 millones de toneladas, para un total promedio de 4 millones por año. Basado en una base de datos mundial (Syvitski, et al. 2005) de información de transporte de sedimentos, cargas típicas de sedimento para ríos con aproximadamente un caudal promedio de 150 m<sup>3</sup>/s y de climas tropicales varía entre 1 y 8 millones de toneladas por año. El río Reventazón está dentro de este rango.

De acuerdo con el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) para el P.H. Reventazón (ICE, 2009), el tonelaje estimado, que se espera sea depositado en el embalse Reventazón, es de 4 millones de toneladas. Asimismo, el EIA proyecta que la capacidad anual de transporte de sedimento en la sección más baja del río (cerca de la estación Hamburgo) es de aproximadamente 2 millones de toneladas por año (4 millones depositados menos 2 millones transportados) de sedimento en el embalse y el tramo ubicado entre la presa y Hamburgo.

Medidas realizadas por el ICE de los desfogues de octubre del 2005 que mostraron que arriba de 0.744 millones de toneladas de sedimento pasan hacia Pascua pero únicamente 0.496 millones de toneladas de sedimento pasan hacia Hamburgo. Esto indica que 67% de sedimentos pasa y un 33% se queda atrás. En el 2006, las observaciones muestran una disminución en el paso de sedimentos desde el Guayabo hasta Hamburgo, concretamente 0.631 millones de toneladas siendo 0.585 millones de toneladas para Hamburgo para un 93% que pasa y un 7% que es retenido. En el 2007, los valores muestran 0.742

millones de toneladas en Pascua y 0.605 millones de toneladas en Hamburgo: un 81.5% que atraviesa, mientras un 18.5% que es retenido en los tramos intermedios. Los valores medidos y observados para la carga de sedimento en el sitio de la presa (o Pascua) y en Hamburgo se resumen en la Tabla 5-1 y fueron mostrados en la Figura 5-2 y Figura 5-3. De los tres eventos de desfogue, el ocurrido en 2006 experimento los caudales más altos y el de 2005 tuvo los más bajos. Esto podría explicar porque en el 2006 se tuvo la más baja retención de sedimento en las secciones de transición e inferior/aluvial y en el 2005 se tuvo las más altas.

**Tabla 5-1 Cargas de sedimento medidas y calculadas**

| <b>Evento</b>              | <b>Carga de sedimentos dentro de la sección de transición en el Guayabo o Pascua<br/><br/>(millones de toneladas)</b> | <b>Carga de sedimentos de salida de la sección inferior/aluvial en Hamburgo<br/><br/>(millones de toneladas)</b> | <b>Porcentaje de retención en los tramos de transición e inferior/aluvial</b> |
|----------------------------|---|--|---|
| Anual calculado (ICE 2010) | 4   | 2  | 50%   |
| Oct 2005 desfogue          | 0.744   | 0.496  | 33%   |
| Sept 2006 desfogue         | 0.631   | 0.585  | 7%  |
| Sept 2007 desfogue         | 0.742   | 0.605  | 18%   |

Los desfogues ocurridos en octubre 2005, septiembre 2006, y septiembre 2007 fueron simulados para comparar los resultados del modelo con los datos observados. Estos eventos fueron de aproximadamente 4 días de duración cada uno. Tanto los caudales del río y las concentraciones de sedimento fueron medidas cada hora y con intervalos de tiempo más frecuentes. Las gráficas de los resultados del modelo se muestran en la Figura 5-1 hasta la Figura 5-3. Estas graficas muestran las estaciones a lo largo del río en el eje horizontal colocando el estuario en la estación 0 (aguas abajo en la izquierda) y la presa en la derecha (aguas arriba). El eje vertical derecho muestra la carga de sedimento acumulado para cada una de las estaciones y cada evento de desfogue. El eje vertical izquierdo muestra el volumen y ubicación de los sedimentos depositados.

Para los tres eventos de desfogue, la carga de sedimento que está pasando disminuye en la dirección aguas abajo hasta llegar a la estación 45000 (la parte final de la sección de transición), en donde al parecer este alcanza un equilibrio entre el sedimento de entrada y de salida. La carga de sedimento disminuye (se deposita) en la estación 50000 (aguas arriba). El aumento alrededor de la estación 45000 está asociado con el cambio brusco en la composición del sedimento de fondo (entre las secciones de transición e inferior/aluvial), que es un mecanismo para establecer el modelo.

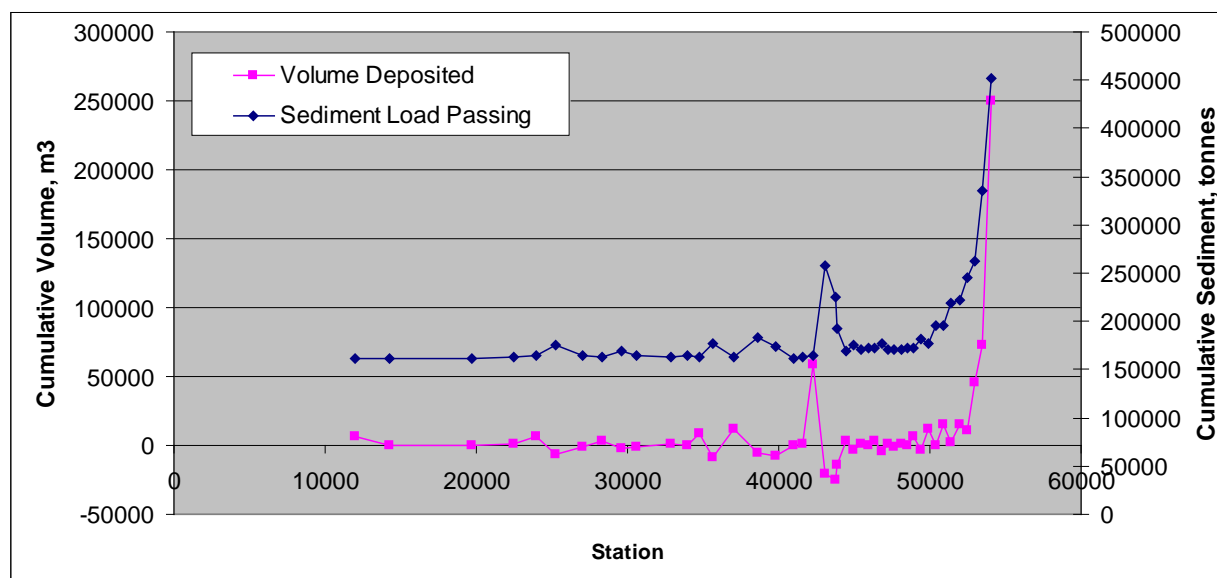


Figura 5-1 Resultados del modelo para el desfogue ocurrido en octubre del 2005

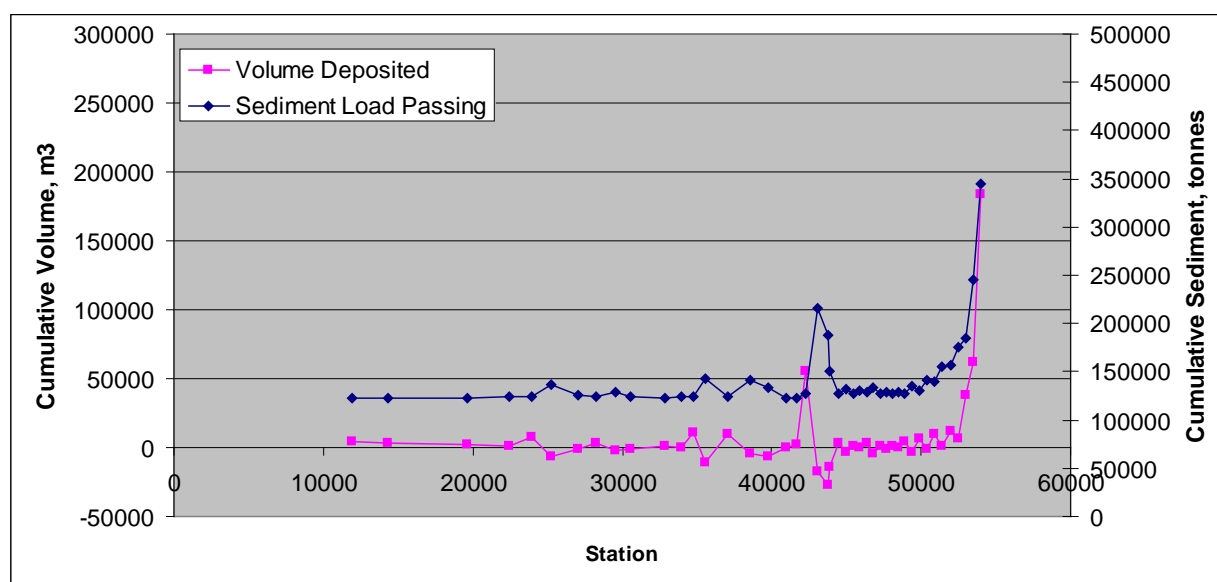
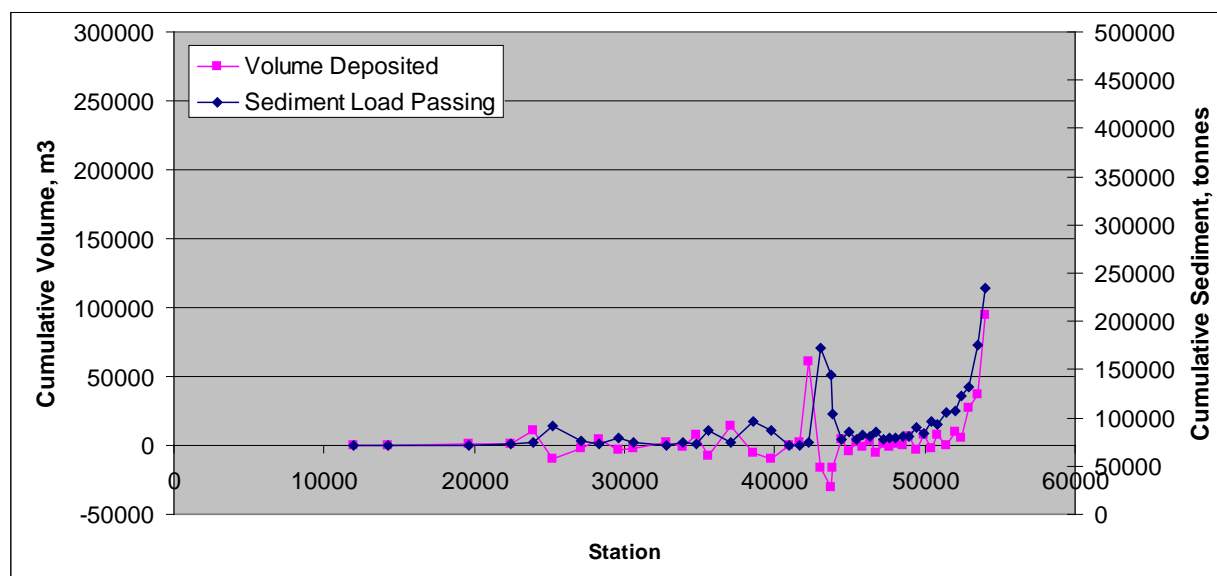


Figura 5-2 Resultados del modelo para el desfogue ocurrido en septiembre del 2006



**Figura 5-3 Resultados del modelo para el desfogue ocurrido en septiembre del 2007**

Los resultados del modelo para tres eventos de desfogue se presentan en la Tabla 5-2. Estos resultados muestran que el tiempo de retención en las secciones de transición e inferior/aluvial es de aproximadamente 65%. La mayoría de este sedimento es retenido y depositado en la parte final de la sección de transición, en donde la pendiente se nivela.

**Tabla 5-2 Resultados del modelo para el evento de desfogue-cargas de sedimentos dados en millones de toneladas**

| Escenario          | Carga de sedimento dentro del tramo transición en la presa (millones de toneladas) | Carga de sedimento que sale del tramo inferior/aluvial en Hamburgo (millones de toneladas) | Porcentaje retenido en los tramos de transición e inferior/aluvial |
|--------------------|--|--|--|
| Oct 2005 Desfogue  | 0.451  | 0.161  | 64%  |
| Sept 2006 Desfogue | 0.344  | 0.122  | 65%  |
| Sept 2007 Desfogue | 0.235  | 0.0712   | 70%  |

Para los análisis a más largo plazo, las simulaciones de dos años fueron preparadas utilizando caudales y concentraciones de sedimento observados por día basados en la regresión lineal de las observaciones (mostradas en la sección 3.3). Para el 2004, 5.04 millones de toneladas entraron al tramo de la presa, 1.93 millones de toneladas llegaron al estuario, 3.11 millones de toneladas o un 61.7% es retenido en este tramo. Para el 2005, 8.31 millones de toneladas de sedimento llegaron al sitio de la presa y 2.59 millones al estuario, depositando 5.72 millones de toneladas en este tramo (68.8%). Estos resultados,

presentados en la Tabla 3, son similares a los valores obtenidos del desfogue a corto plazo (todos cercanos a un valor de retención de dos tercios).

La Figura 5-4 muestra los dos años (17600 horas) rastreados de las cargas de sedimentos aguas arriba y aguas abajo. Nótese que los volúmenes más altos de transporte de sedimento ocurren durante eventos claramente definidos. Estos se relacionan con caudales altos asociados con eventos de altas precipitaciones e inundaciones. Los desfogues del embalse de 2004 y 2005 no se incluyen en estos resultados pero aparecen en estas simulaciones como incrementos de caudales (cuando se abren las compuertas de los embalses Cachí y Angostura) sin acumulación de sedimento asociada a estos incrementos. Para las simulaciones a largo plazo, las cargas de sedimento se basan en las relaciones entre caudales y concentración de sedimento mostradas en la Figura 5-6, y no en los valores observados los cuales estaban únicamente disponibles para los eventos de desfogue y no para el resto del año.

La Figura 5-5 y Figura 5-6 muestran cambios en el fondo del río debido al depósito en dos sitios seleccionados, las estaciones 30582 y 49916, que están ubicadas en la parte final del tramo de transición y en la parte inicial del tramo inferior/aluvial. Las gráficas muestran los niveles de agua, la elevación “thalweg” (ver el glosario), y el promedio de las elevaciones de fondo para la simulación de dos años. Los niveles del agua varían con los caudales, y las elevaciones promedio del fondo y thalweg muestran aumentos y disminuciones con el depósito y erosión de la carga de sedimentos. Cargas en las elevaciones de fondo del río, en el orden de 2 metros (más o menos), son pronosticadas por el modelo.

Una simulación más fue ejecutada para examinar la sensibilidad del transporte de sedimentos producidos por cambios en los caudales. Los cambios de régimen de flujo en el río debido a los efectos de regularización en la producción de energía y capacidad de almacenamiento del embalse podrían causar cambios en la capacidad del río para transportar sedimento. La operación de la presa y la producción de energía reducirán los flujos altos e incrementarán los flujos bajos. La extrema normalización de los flujos históricos más altos sería usada para reemplazar los picos y depresiones diarios de los flujos con un valor constante promedio. Una simulación de esta condición resultó en una reducción considerable de la capacidad de transporte de sedimento en el río, mostrada en la Tabla 5-3 Resultados del modelo a largo plazo - cargas de sedimento en millones de toneladas. Con un flujo promedio constante de  $147.7 \text{ m}^3/\text{s}$  (del promedio de 2004-2005), el río libera menos del 10% de lo que flujo variable diario puede liberar. Los flujos de crecidas son responsables de la mayoría del transporte de sedimento, tal y como se muestra en este análisis y la correlación no-lineal entre el caudal y el transporte de sedimento en la Figura 5-6.



Tabla 5-3 Resultados del modelo a largo plazo - cargas de sedimento en millones de toneladas

| Escenario  | Carga de sedimento dentro del tramo de transición en la presa (millones de toneladas) | Carga de sedimento que sale del tramo bajo/aluvial en Hamburgo (millones de toneladas) | Porcentaje retenido en los tramos de transición e inferior/aluvial |
|--|---|--|--|
| 2004 Anual   | 5.04  | 1.93   | 61.7%  |
| 2005 Anual   | 8.31  | 2.59   | 68%  |
| Acumulado en 2004-2005 con flujos variables actuales                               | 13.35   | 4.52   | 66%  |
| Acumulado en 2004-2005 con flujo promedio constante Caudal 147.7 m <sup>3</sup> /s | 1.25  | 0.31   | 75%  |
| Pronostico del ICE   | 4   | 2  | 50%  |
| Base de datos mundial  | 1 a 8   |  | N/A  |

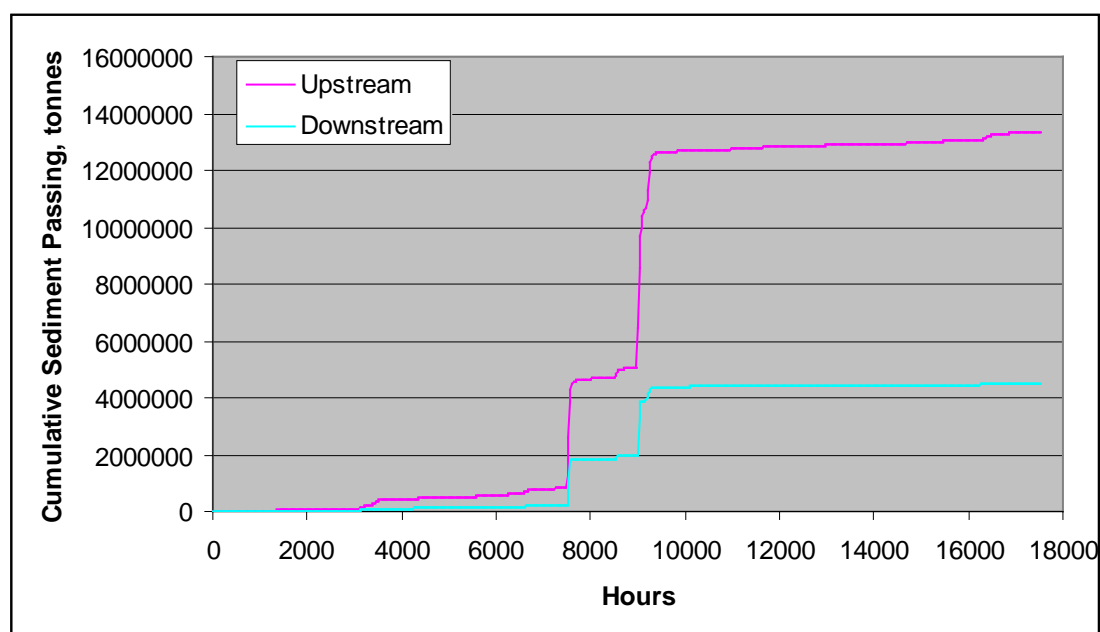


Figura 5-4 Resultados del modelo de acumulación de sedimentos en la estaciones Pascua (aguas arriba) y Hamburgo (aguas abajo) para el 2004 y 2005

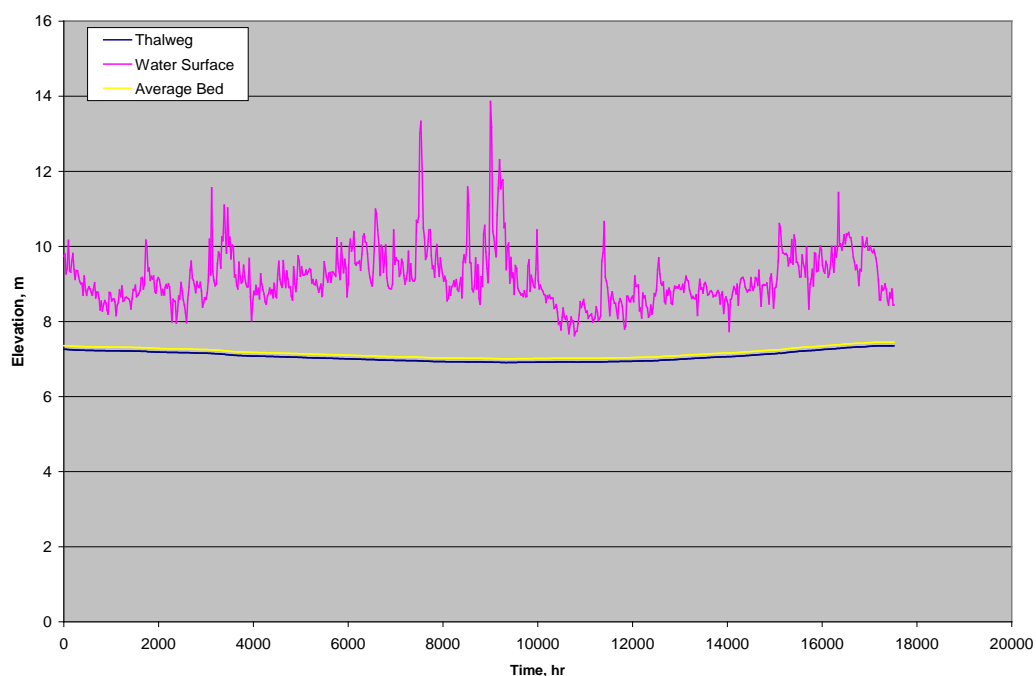


Figura 5-5 Elevaciones modeladas en la sección inferior/aluvial (estación 30582) para 2004 y 2005

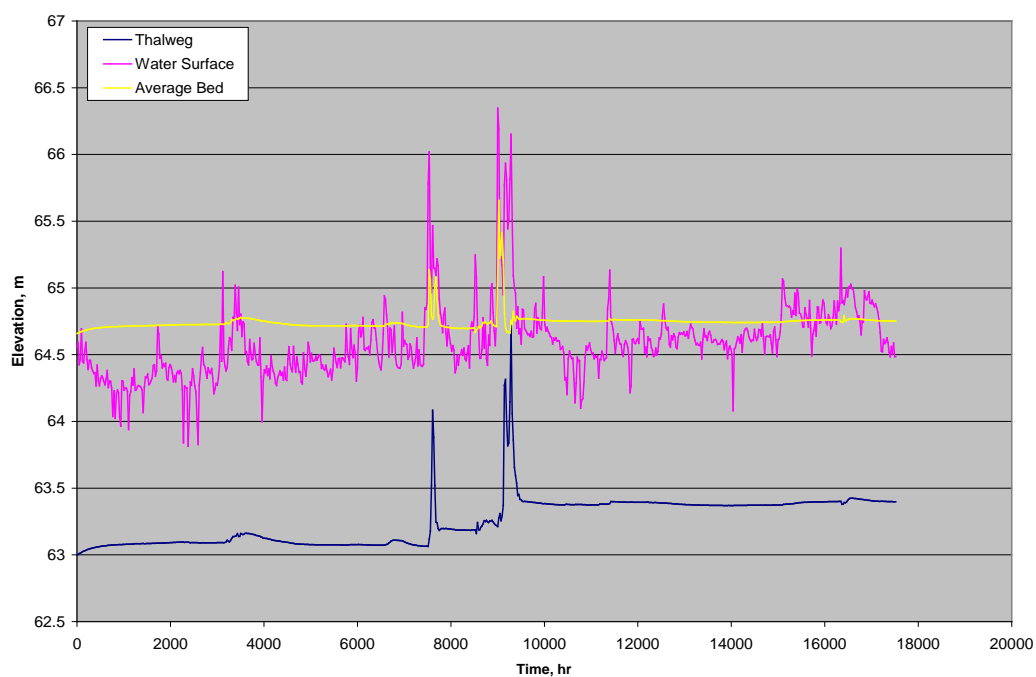


Figura 5-6 Elevaciones modeladas en la sección de transición (estación 49916) para 2004 y 2005

### 5.3 Efectos del Cambio Climático en los Sedimentos del Río

Posibles efectos en los valores de transporte de sedimentos podrían ocurrir dado los cambios potenciales que podrían sufrir los caudales del río producidos por el cambio climático. Esta hipótesis fue evaluada usando el modelo de transporte de sedimento para el río Reventazón. Basados en el rango de cambios pronosticados en precipitación para Centroamérica para el año 2050 (IPCC4, 2009), los caudales del río Reventazón se incrementaron un 5% y se disminuyeron un 15% en general, para todos los caudales observados en la estación Pascua. Estos dos escenarios fueron ejecutados para dos años, 2004 y 2005. Manteniendo el resto de los factores constantes, los cambios en los caudales del río producen cambios en los valores de transporte de sedimento. Como se muestra en la Tabla 5-4, incrementos en los caudales generan cambios en el transporte de sedimento en una forma no-lineal debido a la correlación entre caudales y la capacidad de movimiento del sedimento (ver sección 3 para la gráfica no-lineal de sedimentos contra caudales).

Un incremento de 5% en el caudal (para todo un año) sirve para producir un aumento de 10% en la carga de sedimento en todo el río. El porcentaje de sedimentos retenidos en los tramos de transición e inferior/aluvial no es alterado, así que un incremento en la carga total de sedimento en la presa concuerda con un incremento en la retención y depósito de sedimentos en el tramo intermedio y un aumento (+11%) de estos a la entrada del estuario.

Una disminución de un 15% en los caudales (para todo un año) sirve para reducir un 27% la carga de sedimentos en el sitio de la presa y disminuir un 31% la carga de sedimento en la parte final del tramo bajo entrando al estuario.

**Tabla 5-4 Efectos del cambio climático modelados en los sedimentos del río Reventazón**

| Años                       | Carga de sedimento dentro del tramo de transición en la presa (millones de toneladas en 2 años) | Carga de sedimento que sale del tramo inferior/aluvial en Hamburgo (millones de toneladas en 2 años) | Porcentaje retenido en los tramos de transición e inferior/aluvial (millones de toneladas) |
|----------------------------|---|--|--|
| 2004-2005 Caudal observado | 13.35   | 4.52   | 66%  |
| 2004-2005 Más 5% caudal    | 14.67 (+10%)  | 5.03 (+11%)  | 66%  |
| 2004-2005 Menos 15% Caudal | 9.81 (-27%)   | 3.13 (-31%)  | 68%  |

### 5.4 EL ESTUARIO

En esta evaluación, la parte del río ubicada debajo de la confluencia con el río Parismina es considerada la sección del estuario. Para que los sedimentos lleguen a este punto, y al Parque Tortuguero, utilizan muchas vías para entrar al estuario y poder continuar su camino hacia el mar. Evaluaciones previas

hechas por el ICE pronostican que una cantidad de aproximadamente 2 millones de toneladas por año de sedimento llegara al estuario tan solo del río Reventazón. Los otros ríos que desembocan en el estuario, particularmente el río Parismina, podrían transportar cantidades similares de sedimentos. Sin mayor información de la cantidad total de sedimentos que entran al estuario, el cálculo propuesto para el balance de sedimentos no resulta viable.

Dada la suposición de que el estuario actualmente experimenta un aumento neto de 2 millones de toneladas por año de sedimentos producidos por todas las fuentes, incluyendo los ríos Reventazón y Parismina, la magnitud del impacto puede ser calculado. El aumento neto es una cantidad más grande que la requerida para mantener el equilibrio o balance de los sedimentos en el estuario. La porción de sedimentos que entran y se depositan en el estuario depende por ultimo del tamaño de partículas de los sedimentos que llegan al estuario y de las velocidades de la corriente. Ninguna de estas cantidades está disponible hasta el día de hoy, ni tampoco la cantidad de sedimentos transportados entre el estuario y el mar. Por lo tanto, únicamente un cálculo simplificado de los cambios en las profundidades promedio del sedimento fue realizado.

El estuario, desde la entrada a Jaloba y Caño California en el norte de Parismina y el canal hasta el sur, ocupa un área de aproximadamente 2 millones de metros cuadrados, como esta delineada en color amarillo en la Figura 5-7. Dada esta superficie y una densidad total del sedimento entre 8000 y 1500 kg/m<sup>3</sup>, la profundidad promedio del sedimento depositado podría variar entre 0.67 metros y 1.25 metros en todo el estuario. Los sedimentos se depositarán en lugares con velocidades lentas del agua y en zonas pantanosas dentro del estuario. Menos sedimento será depositado en el canal en donde ocurren altas velocidades.

Pruebas basadas en anécdotas de la visita al sitio y el análisis de impactos en el EIA confirman que este rango de sedimentación ha ocurrido. También, las campañas recientes de dragado en el estuario y apertura/cierre de dos ensenadas respaldan el concepto de que el estuario está constantemente ajustándose a los cambios de carga de sedimentos desde la combinación de fuentes provenientes de zonas montañosas y marítimas.



Figura 5-7 Estuario Reventazón (superficie plana de 2 millones de metros cuadrados delineada en color amarillo)



## 6. RECOMENDACIONES

La recomendación más importante generada de esta evaluación es que el ICE desarrolla un plan adaptable e integral del manejo de sedimentos. El plan está hecho para ser lo suficientemente flexible para adaptarse a los cambios en el río y los cambios en la carga de sedimentos. El plan está hecho además para ser lo suficientemente integral para coleccionar y evaluar información, y calibrar modelos, controlar desfuegos del embalse para minimizar impactos observados y pronosticados incluyendo cambios en el canal del río y en el estuario. El plan debe incluir:

- planes y procedimientos para el control de los desfuegos del embalse;
- respuestas de mitigación para el sedimento liberado, acorde a la hidrodinámica fluvial de los diversos tramos del río;
- recolección intensa de información, además de la existente del programa ribereño del ICE, para incluir la distribución del tamaño de las partículas del sedimento en todo el tramo y el estuario, distribución del tamaño de partículas del sedimento suspendido en todo el tramo y estuario, caudales simultáneos, documentar el ancho del río y los cambios en la elevación de fondo en coordinación con otras instituciones involucradas;
- modelos 2D o 3 D hidrodinámicos y de transporte de sedimentos del estuario-requieren información de levantamientos batimétricos;
- evaluación de las medidas propuestas de mitigación con modelos 2D o 3D;
- evaluación de los cambios en el uso del suelo y volúmenes de sedimentos que llegan en los ríos desde las zonas altas de las cuencas, de los programas de desfogue del embalse y otras fuentes puntuales, y de los cambios estructurales de fondo del río;
- calendarización de las actividades de desfogue del embalse que tendrán lugar durante las temporadas de lluvias cuando los caudales más altos pueden naturalmente mover los sedimentos en todo el sistema del río y salir hacia el mar.

El plan adaptable e integral del manejo de sedimentos deberá incluir una lista de posibles medidas de mitigación tales como:

- preparar un plan adaptable del manejo de sedimentos, con componentes que incluyan el uso de modelos y monitoreo;
- desfogar los embalses durante los períodos de lluvias y caudales altos;
- dragar los canales principales del estuario y ensenadas antes del desfogue de los embalses ubicados en las zonas altas;

- estabilizar y reforzar la ribera del río con vegetación, rocas o alguna otro proyecto estructural de estabilización; establecer zonas de amortiguamiento a lo largo de la ribera para reducir el desmonte de plantaciones y el pastoreo de ganado;
- evaluar técnicas estructurales alternativas como libramientos (bypassing), enjuague, salidas de densidades de corriente, dragado, excavaciones secas, hidrosuccion, desfuegos por depresión, y desfuegos por presión;
- considerar remover el sedimento desde el embalse y sistema del río usando libramientos (o bypass), dragado, o técnicas mineras, etc., para reducir la cantidad de sedimentos transportados hacia el tramo inferior/aluvial y el estuario. Almacenar el sedimento en terrenos para darle alguno otro uso;
- difundir un plan del manejo de sedimentos en la cuenca que este coordinado con los planes de manejo de sedimentos en el río y embalse.

Para desarrollar un modelo complejo de transporte de sedimentos del estuario, se recomienda realizar una campaña de recolección de datos de campo, respaldada con una revisión bibliográfica que incluya lo siguiente:

- levantamientos batimétricos del estuario;
- caudales de todos los tributarios de agua dulce (incluyendo las áreas pantanosas que rodean el estuario);
- información de mareas (oleaje) dentro y fuera del estuario;
- concentraciones de los sedimentos suspendidos de las fuentes terrestres, marinas y dentro del estuario;
- flujos de entrada y salida (prisma de la marea) del Caribe;
- distribución del tamaño de las partículas (granulometría) de fondo en todo el estuario; transporte de sedimento (transporte litoral del perímetro) a lo largo del desarrollo litoral y del exterior.



## 7. LITERATURA CITADA

Costa Rica tides. <http://www.tide-forecast.com/locations/Limon-CostaRica/tides/latest>

Graf, W. H. 1971. Hydraulics of Sediment Transport. McGraw Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering. New York.

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), 2009. Estudio de Impacto Ambiental P. H. Reventazón, Expediente SETANA No. 0331-08.

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), 2011. DVD. Reventazón Proyecto Hidroeléctrico, Consultoría Estudios Adicionales BID, Julio 2011.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007.

[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg2/en/ch13s13-3.html#13-3-1](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/ch13s13-3.html#13-3-1)

Leopold, L.B., M.G. Wolman, and J.P. Miller, 1964. Fluvial Processes in geomorphology. W.H. Freeman and Company, San Francisco.

Syvitski, James P. M., Vörösmarty, Charles J., Kettner, Albert J., Green, Pamela, 2005. Impact of Humans on the Flux of Terrestrial Sediment to the Global Coastal Ocean. Science, Vol. 308, p. 376-380.

US Bureau of Reclamation, 2010. Technical Report SRH-2010-25. Users Manual for SRH-1D 2.6. Sedimentation and River Hydraulics – One Dimension, Version 2.6.

Yang, C.T., 1979. Unit Stream Power Equations for Total Load, Journal of Hydrology, Vol. 40, 123-128.

Yang, C.T., 1996. Sediment Transport: Theory and Practice, Mc GrawHill Companies, Inc., New York.