



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL - HIDRÁULICA

**HIDRODINÁMICA Y COMPORTAMIENTO DEL SEDIMENTO EN UNA BIFURCACIÓN DE
UN RÍO**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JAZMIN ANAHI TELLEZ DIAZ

TUTOR PRINCIPAL:
DR. MOISÉS BEREZOWSKY VERDUZCO, INSTITUTO DE INGENIERÍA
COMITÉ TUTOR
DR. DOMÍNGUEZ MORA RAMÓN, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. FUENTES MARILES OSCAR, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. GRACIA SÁNCHEZ JESÚS, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. JIMÉNEZ CASTAÑEDA AMADO ABEL, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. OCTUBRE 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. DOMÍNGUEZ MORA RAMÓN

Secretario: DR. FUENTES MARILES OSCAR

Vocal: DR. MOISÉS BEREZOWSKY VERDUZCO

1 er. Suplente: DR. GRACIA SÁNCHEZ JESÚS

2 d o. Suplente: DR. JIMÉNEZ CASTAÑEDA AMADO ABEL

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. MOISÉS BEREZOWSKY VERDUZCO



FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por la vida que me permites disfrutar.

A mis padres

Porque gracias a su apoyo y consejos,
he superado cada obstáculo en mi vida.

A mis hermanos

Por ofrecerme su apoyo y comprensión.

A Ernesto

Por inundarme de alegría con su compañía.

Al Dr. Moisés Berezowsky

Quien con su apoyo y asesoría,
se ha ganado mi lealtad y admiración.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Por la ayuda económica brindada
a lo largo del programa de maestría.

Al Instituto de Ingeniería

Por brindarme el espacio y facilidades
para realizar esta investigación.

INDICE

RESUMEN	1
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	2
1.1 Zona de estudio.....	2
1.2 Objetivos.....	6
1.3 Estructura de la tesis.....	7
CAPÍTULO 2 DATOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.....	8
2.1 Información disponible	8
2.2 Modelo digital de elevaciones.....	8
2.3 Registros hidrológicos.....	8
2.4 Granulometría	10
2.5 Transporte de sedimentos	11
CAPÍTULO 3 MODELO UNIDIMENSIONAL.....	13
3.1 Modelo matemático unidimensional Hec-Ras.....	13
3.1.1 Características generales	13
3.1.2 Modelo hidrodinámico.....	13
3.1.3 Modelo sedimentológico	14
3.2 Modelo de flujo permanente.	14
3.2.1 Geometría	14
3.2.2 Condiciones de frontera	14
3.2.3 Coeficiente de rugosidad.....	15
3.2.4 Resultados del modelo de flujo permanente.....	15
3.3 Modelo sedimentológico.....	17
3.3.1 Condiciones iniciales y archivo de sedimentos.....	17
3.3.2 Archivo de flujo casi no permanente.....	17
3.4 Resultados del modelo unidimensional	17
CAPÍTULO 4 MODELO BIDIMENSIONAL.....	19
4.1 Modelo Telemac	19
4.2 Modelo hidrodinámico	20
4.2.1 Elección de paso de tiempo.....	20
4.2.2 Rugosidad.....	20
4.2.3 Condiciones de frontera	21

4.3	Modelo Morfodinámico	21
4.3.1	Condición de frontera aguas arriba	21
4.3.2	Función de transporte.....	21
4.4	Escenario 1 (topografía de 1997).....	21
4.4.1	Resultados del modelo hidrodinámico	22
4.4.2	Resultados del modelo morfodinámico	23
4.5	Escenario 2 (topografía de 2004).....	29
4.5.1	Resultados del modelo hidrodinámico	30
4.5.2	Resultados del modelo morfodinámico	31
4.6	Escenario 3 (Estructura de control “El Macayo”).....	36
4.6.1	Resultados del modelo hidrodinámico	36
4.6.2	Resultados del modelo morfodinámico	37
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....		45
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA		46
LISTA DE FIGURAS.....		47

RESUMEN

Se presenta el trabajo desarrollado para estudiar el funcionamiento hidráulico y el transporte de sedimentos en la zona donde está la bifurcación del río Mezcalapa en los ríos Samaria y Carrizal; la bifurcación se localiza en el estado de Tabasco, aproximadamente a 30 km de la Ciudad de Villahermosa.

Los registros de la distribución del caudal en la bifurcación permiten notar que desde 1999 fue aumentando la capacidad de conducción del río Carrizal, mientras que la del río Samaria fue disminuyendo; este cambio junto con otros factores, dieron lugar a que durante el paso de avenidas extraordinarias, el río Carrizal se desbordara en el tramo que pasa por la Ciudad de Villahermosa, y la inundara, con los consecuentes problemas sociales, económicos y políticos.

En la zona se han construido diversas obras de ingeniería, cuyo objetivo es controlar el gasto que transita por el río Carrizal; así, esta investigación tiene como finalidad estudiar los efectos en la evolución del fondo y orillas en la bifurcación consecuencia de las estructuras hidráulicas que se han construido en los cauces, y que han tenido influencia en el funcionamiento de la bifurcación; para ello, se incluye en el análisis la capacidad del transporte de sedimentos y la evolución de cada uno de los cauces.

El estudio inicia con el empleo de un modelo matemático, que es válido para flujo a superficie libre del tipo unidimensional, que incluye varios métodos para el cálculo del transporte de sedimento; con base en un conjunto de mediciones de gasto sólido hechas en el tramo final del río Mezcalapa, se hizo un análisis para seleccionar el modelo numérico que representara de manera adecuada las mediciones de gasto sólido disponibles; así se selecciona la ecuación de Engelund-Hansen, la cual es válida para calcular el gasto sólido total de fondo, y que es aplicable a cauces con arenas.

Después, los resultados del modelo unidimensional se emplearon para definir las condiciones iniciales y de frontera requeridas para calcular el campo de velocidades al considerar que el flujo es del tipo bidimensional horizontal; para ello se utiliza el modelo matemático TELEMAC, con el empleo del módulo SISYPHE, para incluir el transporte de sedimentos.

Finalmente como resultado de los escenarios simulados se presenta erosión en la margen izquierda del río Mezcalapa y Samaria, para el caso del escenario uno el balance neto de sedimentos indica que el depósito es mayor principalmente en el cauce del río Samaria, para el escenario dos se presenta erosión en ambos cauces y finalmente en el escenario tres el cauce del río Carrizal es sedimentado mientras el río Samaria presenta erosión.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Zona de estudio

El río Grijalva está considerado como el segundo de mayor caudal en la República Mexicana; este río inicia en la falda oriental de la Sierra de Cuchumatanes, en Guatemala, y recorre la depresión Central de Chiapas; cruza por el Cañón del Sumidero; después, la planicie costera del Pacífico y confluye con el río Usumacinta, para desembocar en el Golfo de México, como se observa en la figura 1.

En este río se tiene un sistema integrado por cuatro centrales hidroeléctricas; por ello, el río Grijalva es el mayor productor de energía eléctrica en el país. La primera de las centrales hidroeléctricas es la Presa Angostura, puesta en operación en 1976, siendo la de mayor capacidad de almacenamiento; a 104 km aguas abajo se ubica la presa Chicoasén, en operación desde 1981, con una cortina de 261 m de altura; después, a 81 km aguas abajo, se localiza la presa Malpaso, puesta en operación desde 1969 y, finalmente, a 72 km se tiene la presa Peñitas, que opera desde 1987.



Figura 1 Sistema Hidroeléctrico sobre el cauce del río Grijalva.

Al río Grijalva se le han asignado diferentes nombres en el tramo de la planicie; así, el que se localiza entre la presa Malpaso, al norte de Chiapas, y hasta unos 30 km antes de la Ciudad de Villahermosa, se le conoce como el río Mezcalapa; este tramo termina donde se bifurca en los ríos Samaria y Carrizal; el primero de ellos corresponde la brazo izquierdo de la bifurcación, y desemboca en el Golfo de México; el segundo es el brazo

derecho de la misma bifurcación, y continúa su curso hacia la Ciudad de Villahermosa, donde recibe aportaciones de los ríos de las montañas de la cuenca del Bajo Grijalva; después de pasar por Villahermosa se une al río Usumacinta, para desembocar en el Golfo de México.

El sistema fluvial de la bifurcación formada por los ríos Mezcalapa - Samaria - Carrizal, se localiza geográficamente en las coordenadas $93^{\circ} 18' 29.96''$ al oeste del meridiano de Greenwich y en el paralelo $17^{\circ} 57' 6.97''$ de Latitud Norte (figura 2).



Figura 2 Bifurcación del río Mezcalapa en Samaria y Carrizal

En CONAGUA (2013) se tiene documentado que el río Mezcalapa ha estado cambiando; uno de esos cambios ocurrió en el año 1881, cuyo resultado fue la formación del Mezcalapa - Carrizal, debido al llamado rompido del cauce. Otro rompido ocurrido en 1932, dio lugar a la formación del río Samaria.

En particular, el tramo inicial del río Samaria comenzó a tener un proceso de azolve; esto se nota con base en observaciones hechas en un conjunto de fotografías del tramo, las cuales se incluyen en la figura 3, que corresponden a un periodo de 35 años. En la figura 3a se nota que en el año de 1980 no hay grandes zonas de depósito de sedimentos; después del año de 1999 se observan sobre el cauce del río Samaria grandes zonas de depósito (figura 3b); en el año 2008 (figura 3c), disminuyen las zonas de depósito en el río Samaria; para el año 2014 es notable la sedimentación en el tramo inicial del río Carrizal, entre la bifurcación y la estructura de control.

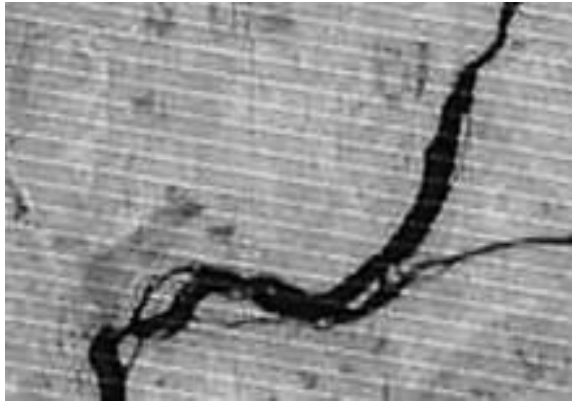


Figura 3a Año 1980.

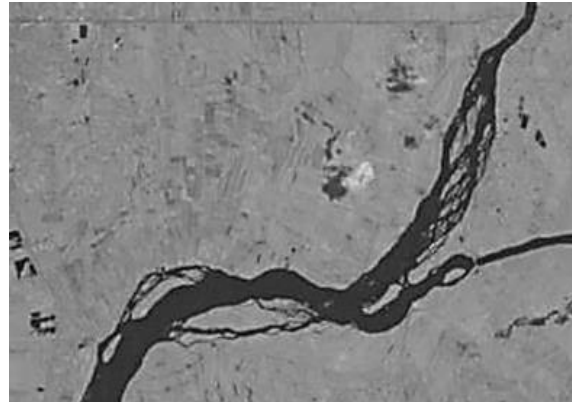


Figura 3c Año 2008.



Figura 3b Año 1999.



Figura 3d Año 2014.

Figura 3 Fotografías de la bifurcación del río Mezcalapa - Samaria - Carrizal

Además, se sabe que la construcción de las cuatro centrales hidroeléctricas ha tenido efectos notables en la evolución de este tramo del río Grijalva. Por ejemplo, la operación de la presa Peñitas hace que los niveles de la superficie libre del agua en el río Mezcalapa fluctúen, como consecuencia de las descargas de la hidroeléctrica Peñitas, ubicada aproximadamente a 100 km de la Ciudad de Villahermosa; se ha dicho que este tipo de funcionamiento ha dado lugar al proceso de erosión de las márgenes, principalmente en los ríos Mezcalapa y Samaria; como ejemplo se tiene la erosión de la margen derecha del tramo inicial del río Samaria (figura 4).

También se tiene registrado que, en el año de 1999, después del paso de una avenida extraordinaria en el río Mezcalapa, cambio notablemente la distribución de gastos en la bifurcación, lo que favoreció que el río Carrizal se desbordara en los siguientes años, inundando una parte considerable de la Ciudad de Villahermosa, desde ese mismo año; con el objetivo de comenzar a disminuir el riesgo de que dicho río se desbordara, como una medida de emergencia, se propuso construir una escotadura en el río Carrizal, aproximadamente a 2.5 km aguas abajo de la bifurcación, (figura 5), cuyo objetivo fue el de limitar la capacidad de conducción de este cauce; además, se comenzó con el diseño y la construcción de bordos de protección en la zona urbana de la Ciudad de Villahermosa.

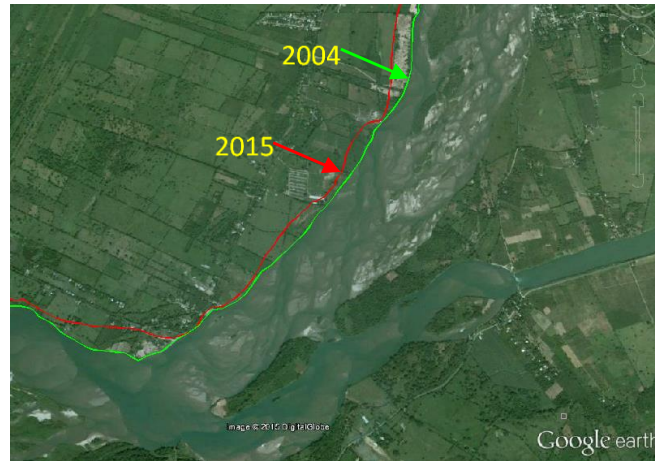


Figura 4 Erosión marginal (2004-2015)

En 2003 se inició la construcción de la estructura conocida como el Macayo, en el municipio de Reforma, Chiapas, con la cual se sustituye a la escotadura. Esta estructura fue inaugurada en el 2013; está formada por un canal en la margen derecha con cuatro compuertas y una capacidad de conducción de $500 \text{ m}^3/\text{s}$, un canal en la margen izquierda con tres compuertas y una capacidad de $350 \text{ m}^3/\text{s}$; y al centro una cortina de material permeable con una corona en la elevación 22 msnm; en la figura 6 se incluye una fotografía aérea de la estructura terminada.



Figura 5 Escotadura sobre el río Carrizal.



Figura 6 Estructura de control sobre el río Carrizal.

Los principales fenómenos que intervienen para que cambien las características geométricas de un cauce son: la erosión, el transporte y el depósito de sedimentos el que proceden tanto del cauce como de la cuenca; por ello, es indispensable su estudio para conocer su efecto en la pérdida de capacidad del cauce.

Tanto el gasto que es transportado en el fondo como el que viaja en suspensión, son resultado de la interacción de las características hidrodinámicas del flujo con las del material del cauce; cuanto más intensa es la velocidad de la corriente, el tamaño de las partículas que se encuentran en suspensión se incrementa, y ocurre lo contrario cuando la acción de la corriente disminuye. El gasto en suspensión está regido por la

turbulencia y la velocidad de caída de cada grano, mientras que el gasto de fondo corresponde a los materiales que se mueven sobre el fondo de una corriente.

En condiciones naturales no hay una división exacta entre el gasto de fondo y el gasto de fondo suspendido, debido a que existe una constante interacción entre las partículas en suspensión y las de fondo ocasionado por las condiciones hidrodinámicas. Por tanto, es necesario definir una capa que represente matemáticamente el transporte de fondo. Por ejemplo, Einstein (1950) propuso que el gasto de fondo es el que se mueve dentro de una capa adyacente al lecho del cauce, cuyo espesor es del orden de dos veces el diámetro de la partícula; algunos otros autores, como Van Rijn (1984), han propuesto una relación empírica para determinar el espesor de capa de fondo; sin embargo, este espesor es todavía difícil de definir.

La determinación del transporte de sedimentos es una tarea complicada, por lo que existen diversas ecuaciones empíricas que tratan de cuantificar el gasto en función de las características del flujo, del cauce y las del material que es transportado por el flujo. Se dispone de gran cantidad de formulaciones y modelos numéricos para cuantificar el sedimento que transporta un cauce, (ver por ejemplo Maza y García, 1996); unos métodos intentan estimar el gasto total de fondo, otros calculan el gasto que proviene del fondo, pero que viaja en suspensión, etc.

Por ejemplo, las ecuaciones de Meyer-Peter y Müller (1932-1948) son recomendadas para calcular la llamada carga de fondo; éstas se rigen por un principio determinístico, en donde se afirma que existe una relación directa entre las variables dependientes (transporte de sedimentos) e independientes (gasto, velocidad, esfuerzo de fricción, pendiente de energía); este modelo numérico fue desarrollado en Suiza a partir de ensayos de laboratorio; es muy empleada en Europa para cauces arenosos, cuyo tamaño del material tiene diámetro menor que 30 mm, y con pendientes medias del cauce menores que 2%.

Entre las ecuaciones más empleadas para determinar el transporte de sedimentos se encuentra la de Einstein-Brown (1950), que está basada en un enfoque probabilístico.

La ecuación de Engelund - Hansen (1967) se basa en los resultados de cuatro conjuntos de experimentos en que utilizaron arenas; del análisis se obtuvo una relación expresada en términos de parámetros adimensionales, la cual permite obtener la carga total del fondo y es aplicable a cauces arenosos.

1.2 Objetivos

Se ha estudiado el río desde el punto de vista hidráulico, en modelos físicos y matemáticos, desde antes de iniciar el estrechamiento hasta ahora que ya se concluyó la estructura (Jimenez C y Berezowsky V, 1991, Cruz, 2003, Millán, 2014). Hay pocos

estudios de los procesos de erosión y depósito en la zona y, sobre todo, de los impactos que las distintas obras han tenido en los procesos morfológicos en el corto plazo.

Este trabajo tiene por objeto estudiar el comportamiento hidrodinámico y los procesos de erosión, transporte y sedimentación que se producen en el entorno del río Mezcalapa, en la zona donde se bifurca en los ríos Samaria y Carrizal, mediante la aplicación de un modelo numérico bidimensional y su verificación con mediciones de campo que permitan aplicar el modelo para estudiar el desarrollo del tramo en tres escenarios. Los escenarios de simulación corresponden a los periodos:

1. A partir de 1997.
2. A partir de 2004, con estrechamiento en el río Carrizal.
3. A partir de 2013, con la estructura de control el Macayo sobre el río Carrizal.

Los cálculos se realizarán en un modelo bidimensional (promediado en la profundidad) hidrodinámico (TELEMAC-MASCARET), que incluye un módulo de fondo móvil (llamado SISYPHE).Objetivos de la investigación

1.3 Conformación de la tesis

El documento se encuentra estructurado en cinco capítulos. En el capítulo 2 se presentan las características geomorfológicas, hidrológicas y sedimentológicas de la zona. El capítulo 3 describe el proceso de calibración efectuado para lograr un modelo confiable; se presentan los resultados del modelo que servirán como base para la construcción del modelo bidimensional. El capítulo 4 describe el modelo TELEMAC 2D y su módulo SISYPHE; se indican las características principales del modelo bidimensional, así como su calibración; finalmente se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios y las conclusiones.

CAPÍTULO 2 DATOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

2.1 Información disponible

Se realizó una recopilación de la información correspondiente a la zona de estudio; hay que tener en cuenta que la información disponible es limitada, sobre todo en lo relativo a las características y procesos sedimentológicos, por lo que el presente trabajo debe ser considerado como una aproximación a un modelo morfológico de la bifurcación del río Mezcalapa.

Se cuenta con las características de la zona de la bifurcación realizadas en una campaña de mediciones en 2004, de la cual se obtiene el levantamiento topográfico, medición de perfiles de velocidad, muestras del material del fondo y su análisis granulométrico, medición de concentración de sedimentos; así mismo, se tiene la topografía correspondiente a 1997. Paralelamente se realizó una recopilación de información existente, en particular, series de niveles y series de gastos líquidos correspondientes a las estaciones hidrométricas Samaria y González.

2.2 Modelo digital de elevaciones

Se cuenta con información batimétrica correspondiente a los años de 1997 y 2004, así como secciones correspondientes al cauce del Carrizal desde la estructura de control El Macayo hasta la estación González.

La topografía del año de 1997, cubre una superficie que se inicia aproximadamente 1 km aguas arriba de la bifurcación, por el Samaria hasta la estación hidrométrica Samaria y por el Carrizal aproximadamente 1.5 km aguas abajo de la sección donde se ubica la estructura de control; con curvas de nivel a cada metro; adicional a esta topografía, se tienen secciones correspondientes al río Carrizal, desde la estructura de control hasta la estación hidrométrica González.

En el caso de la topografía de 2004 la zona que cubre es menor a la de 1997, pues cubre aproximadamente 2 km aguas abajo de la bifurcación.

2.3 Registros hidrológicos

Se dispone de un registro relativamente extenso de caudales en las estaciones hidrométricas González y Samaria ubicadas en el cauce del río Carrizal y Samaria,

respectivamente. Se tiene gastos diarios en ambas estaciones, curva de elevaciones-gasto (figuras 7 y 8) (Cruz, 2003) y la curva elevaciones-gasto medida en 2004 para algunas secciones dentro de la zona de estudio (UJAT, 2004)

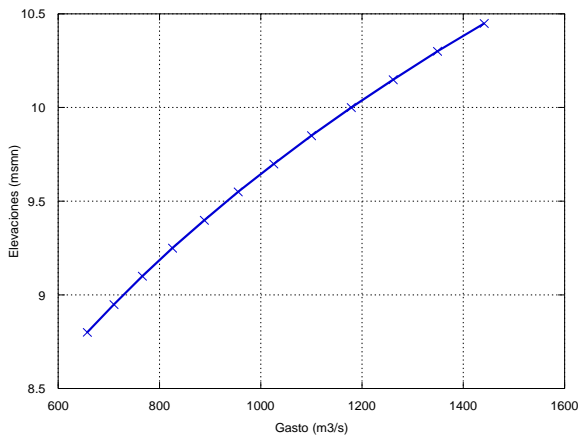


Figura 7 Curva elevaciones gastos para la estación González (Cruz, 2003).

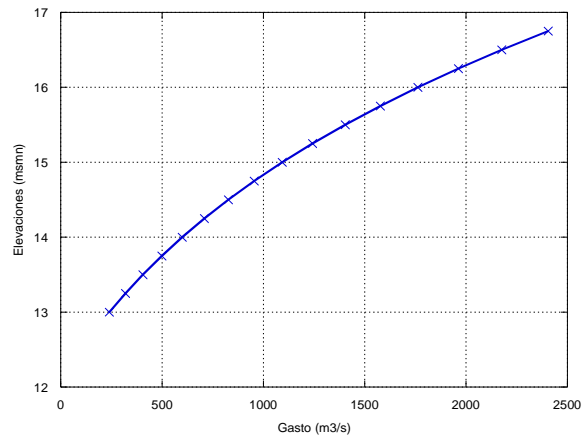


Figura 8 Curva elevaciones gastos para la estación Samaria (Cruz, 2003).

A partir de los registros de gastos diarios de las estaciones hidrométricas se obtuvo el gasto proveniente por el río Mezcalapa y la distribución de gastos de la bifurcación para los años de 1997 y 2004. En las figuras 9 y 10, se puede observar el gasto proveniente por el río Mezcalapa y el porcentaje transportado por el río Carrizal. Nótese que el gasto cambia del 40% (1997) a poco más de 50% (2004).

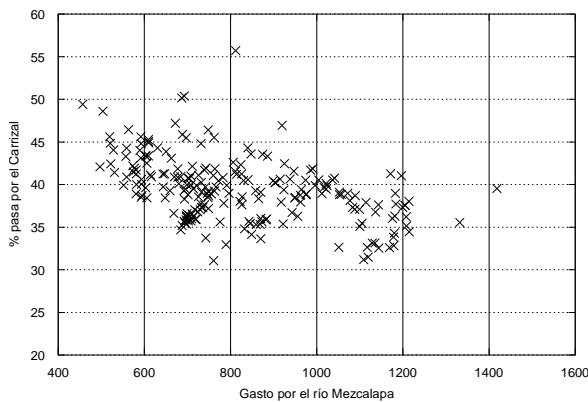


Figura 9 Distribución de gastos en la Bifurcación en 1997 (CONAGUA, 2015)

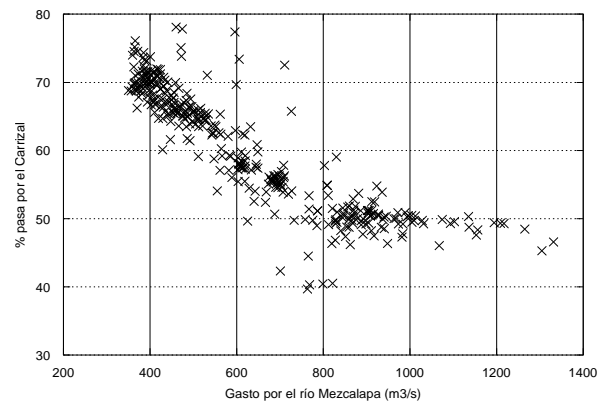


Figura 10 Distribución de gastos en la Bifurcación en 2004 (CONAGUA, 2015)

La curva de descarga de la estructura de control El Macayo se incluye en la figura 11 (Millán, 2014), esta curva considera que las compuertas de la estructura se encuentran totalmente abiertas; cabe mencionar que esta curva cambia dependiendo de la política de operación de la estructura, sin embargo para las modelaciones que se realizan se contempla que todas las compuertas están abiertas.

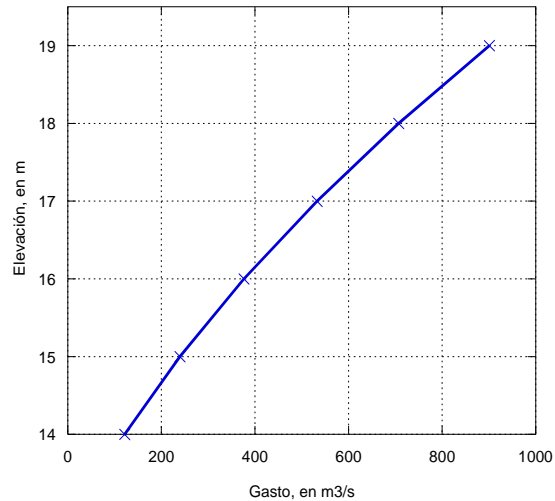


Figura 11 Ley de descarga de la estructura de control el Macayo con compuertas totalmente abiertas.

2.4 Granulometría

Se cuenta con información de medición de sedimentos en 5 secciones del cauce. En la figura 12 se muestra la ubicación de las secciones de medición.

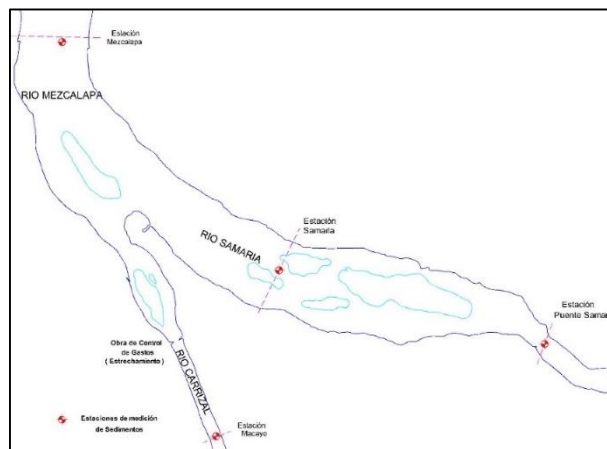


Figura 12 Ubicación de las secciones de medición.

Se dispone de la siguiente información:

- i) Mediciones puntuales y aisladas en los años 1991 y 2004.
- ii) Mediciones con un número de muestras aceptables para el año de 2004.
- iii) Muestras tomadas durante el muestreo sedimentológico del material de fondo en 2004.

Mediante la clasificación de partículas por tamaño, se obtienen las curvas granulométricas. Se tienen curvas granulométricas para tres secciones dentro de la zona de estudio, tanto para el fondo como para los sedimentos en suspensión.

Las muestras fueron tomadas con el dispositivo US BMH-60 el cual toma una muestra superficial del lecho y con el dispositivo US BL-84 para medir la carga de fondo. Del estudio se tiene que el Mezcalapa arrastra principalmente arenas.

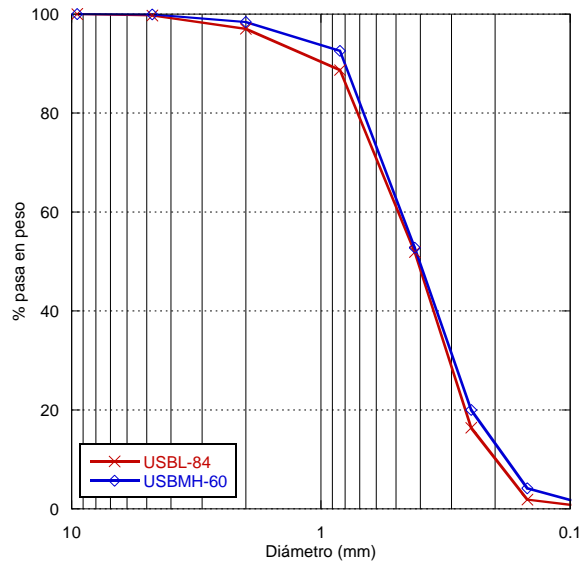


Figura 13 Curva Granulométrica estación Samaria

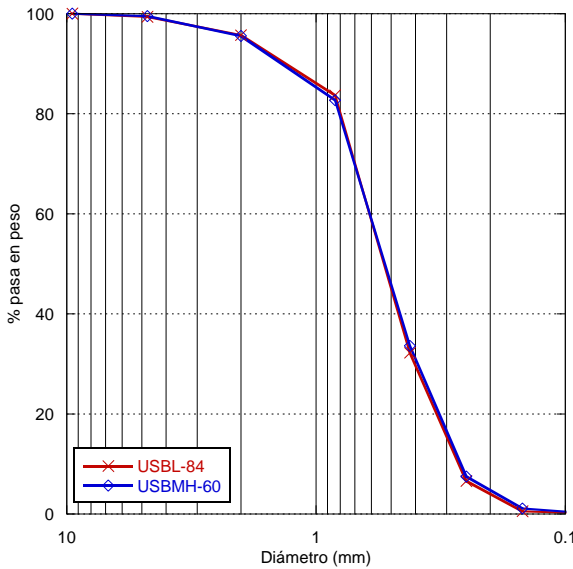


Figura 14 Curva Granulométrica estación Mezcalapa.

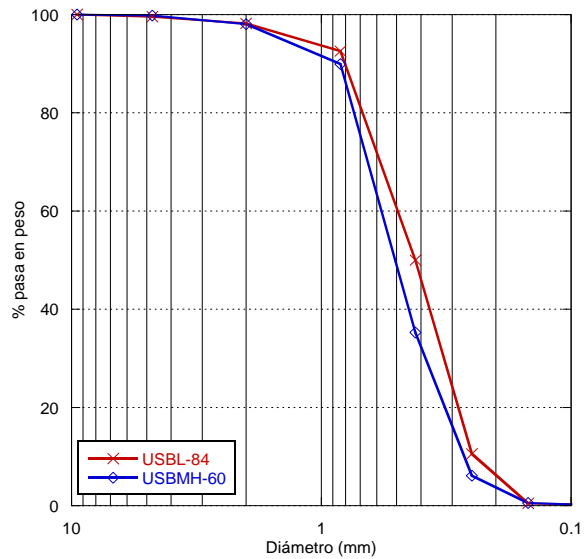


Figura 15 Curva Granulométrica estación Carrizal.

2.5 Transporte de sedimentos

Para el caso de transporte de sedimentos se dispone de mediciones del material sólido en el fondo y en suspensión. Se cuenta con la curva de gasto sólido vs gasto líquido para tres de las secciones (figuras 16, 17 y 18); mediante estas se selecciona la función de transporte de sedimentos que mejor se ajuste a la serie de datos.

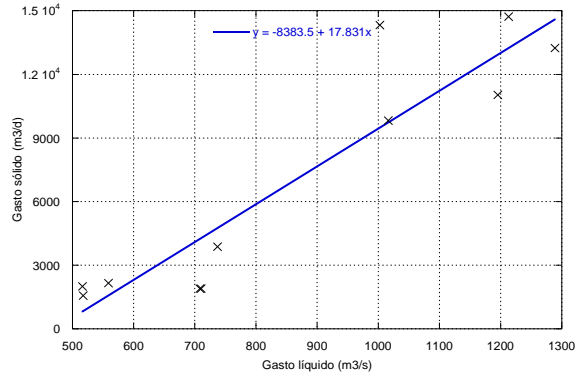


Figura 16 Curva de Gasto sólido en la estación Mezcalapa (UJAT, 2004)

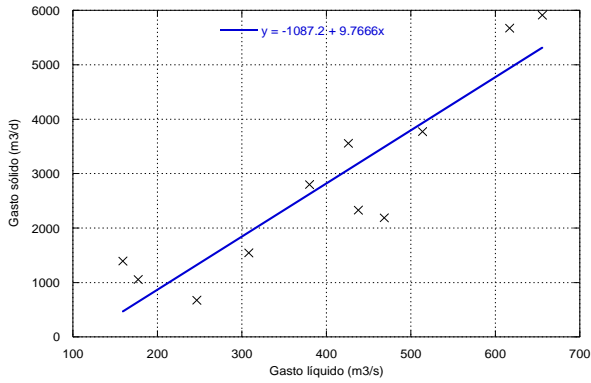


Figura 17 Curva de Gasto sólido en la estación Samaria (UJAT, 2004)

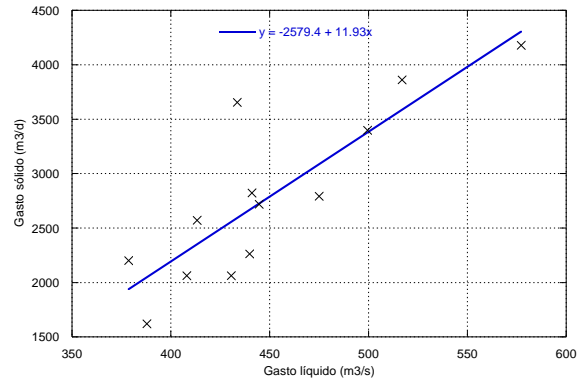


Figura 18 Curva de Gasto sólido en la estación Macayo (UJAT, 2004)

CAPÍTULO 3 MODELO UNIDIMENSIONAL

Las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento para el gasto líquido y la ecuación de continuidad de sedimentos son la base de los modelos morfológicos que se aplican en la actualidad. La modelación matemática se ha convertido en una herramienta importante para el análisis y predicción del comportamiento de un sistema, pues ofrecen muchas ventajas ante el avance de los ordenadores, el software y el conocimiento de los fenómenos.

Este estudio parte de la construcción de un modelo unidimensional, el cual permitirá conocer el funcionamiento de la zona con la ventaja de hacerlo en menor tiempo y recursos de cómputo comparado con un modelo bidimensional. Para esto se empleó el modelo Hec-Ras desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU, que es capaz de realizar cálculo de perfiles de la superficie libre del agua y transporte de sedimentos, así como otros cálculos de diseño hidráulico.

Para la realización de un modelo hidráulico con el programa Hec-Ras, en las opciones de flujo permanente y transporte de sedimentos se ha seleccionado un tramo que comprende 1.5 km aguas arriba de la bifurcación y hasta llegar a las estaciones hidrométricas Samaria y González, la primera sobre el río del mismo nombre y la segunda sobre el río Carrizal.

3.1 Modelo matemático unidimensional Hec-Ras

3.1.1 *Características generales*

El modelo matemático Hec-Ras es un software ampliamente usado en ingeniería para la modelación unidimensional de flujos, transporte de sedimentos y procesos morfológicos de erosión y sedimentación. Es de fácil acceso, presenta facilidad para la introducción y representación de datos, ya que está desarrollado bajo un entorno Windows. La versión que se usa para este modelo es la 4.1.0.

3.1.2 *Modelo hidrodinámico*

El modelo hidrodinámico constituye el núcleo principal del sistema de modelación, es la base para los demás modelos, está basado en la ecuación de conservación de la energía, expresada en términos unidimensionales, con la pérdida de energía calculada con la ecuación de Manning.

La finalidad del modelo hidrodinámico es comprobar el funcionamiento de la bifurcación para las dos topografías disponibles complementándolas con secciones del río Carrizal hasta la estación hidrométrica González.

3.1.3 Modelo sedimentológico

La simulación de transporte y depósito de sedimentos se realiza con el módulo Sediment Transport Analyses (STA) de la versión 4.1.0 del Hec-Ras. La ecuaciones de transporte incluidas en el modelo son: Meyer-Peter-Muller (1948), Toffaleti (1968), Engelund-Hansen (1972), Ackers-White (1973), Yang (1973) y Laursen modificado por Copeland (1989); resuelve los cambio del fondo mediante la solución de la ecuación de continuidad del sedimento (Exner).

3.2 Modelo de flujo permanente.

3.2.1 Geometría

Para el caso de la topografía de 2004 la geometría de la bifurcación es representada por 100 secciones transversales con una separación promedio de 50 m, obtenidas mediante CivilCad y exportadas a Hec-Ras. La topografía de 1997 cuenta con 100 secciones transversales con una separación promedio de 200 m, estas son más que la anterior debido a que se hizo el análisis sobre el río Carrizal hasta la estación González.

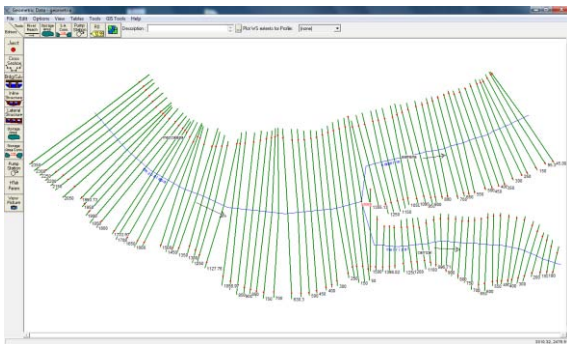


Figura 19 Vista en planta de las secciones importadas a Hec-Ras.

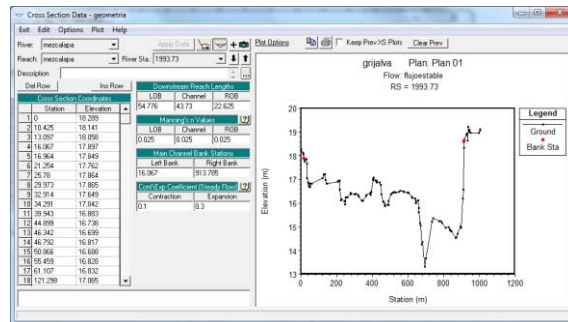


Figura 20 Editor de sección transversal.

3.2.2 Condiciones de frontera

Una vez que se tienen los datos geométricos, se ingresa los datos para flujo permanente, que son las condiciones iniciales del sistema a ser analizado.

Frontera aguas arriba: La frontera superior de la zona a modelar se localizó 1 km antes de la bifurcación. Se introduce el valor de gasto.

Fronteras aguas abajo: Para el brazo izquierdo se localizó en la estación hidrométrica González y se introdujo su curva de elevaciones-gastos (figura 7). Para el brazo

derecho se localizó en la estación hidrométrica Samaria y se introdujo su curva de elevaciones-gastos (figura 8).

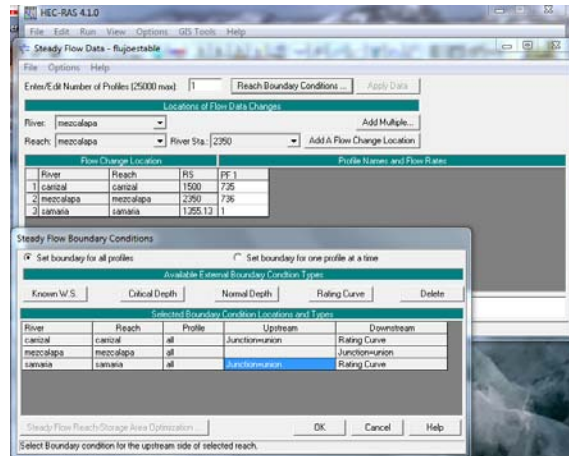


Figura 21 Ingreso de Datos Hidrológicos.

3.2.3 Coeficiente de rugosidad

La rugosidad constituyó el principal parámetro de calibración durante la modelación hidrodinámica. Para obtener el coeficiente de rugosidad de Manning, se hace uso de la topografía de 2004 y las mediciones de gasto y elevación en secciones intermedias y se probó con diferentes coeficientes de rugosidad hasta que los niveles de la superficie libre del agua fueron adecuadamente reproducidos por el modelo. El modelo obtenido también reprodujo adecuadamente la distribución de gastos; así se obtuvo que el coeficiente de rugosidad adecuado es 0.030 y este es el que se aplica para el resto de los análisis, tanto para el modelo unidimensional como el bidimensional.

3.2.4 Resultados del modelo de flujo permanente

Se muestra el perfil de la superficie libre del agua para el tramo comprendido por el río Mezcalapa-Carrizal (figura 22) y el tramo Mezcalapa-Samaria (figura 23) obtenido para un gasto de 1400 m³/s, y el coeficiente de rugosidad calibrado así como la distribución de gastos por cada una de las ramas de la bifurcación (figura 24).

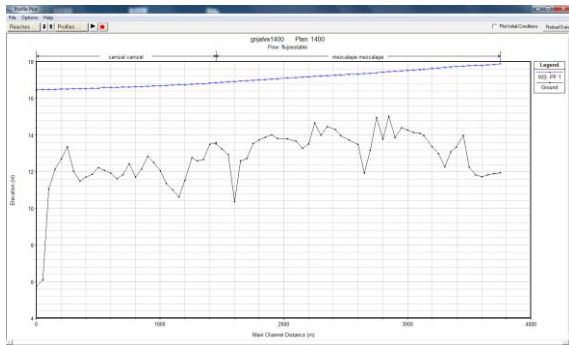


Figura 22 Perfil de la superficie libre del agua para el río Mezalapa y Carrizal, 2004.

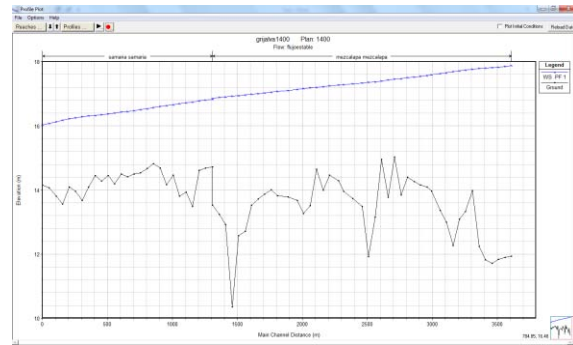


Figura 23 Perfil de la superficie libre del agua para el río Mezalapa y Samaria, 2004.

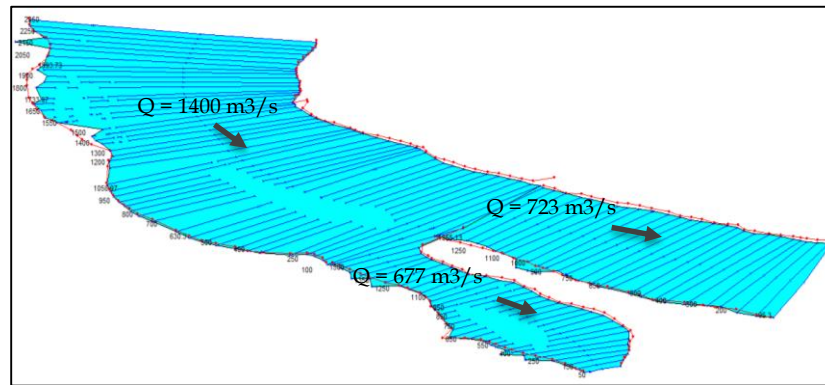


Figura 24 Distribución de gastos en la bifurcación, año 2004.

Se hicieron cálculos para varios gastos, como se muestra en la tabla 1, con las topografías de 1997 y 2004.

Se tiene que para 1997 el río Carrizal conduce aproximadamente el 35% del gasto que comparado con la figura 9, donde este conduce cerca del 40% por lo que el modelo se encuentra ligeramente por debajo de lo medido. Para 2004 el Carrizal conduce el 48% comparado con la figura 10 donde conduce cerca del 50%.

Q Mezalapa (m ³ /s)	1997		2004	
	Q Carrizal (m ³ /s)	Q Samaria (m ³ /s)	Q Carrizal (m ³ /s)	Q Samaria (m ³ /s)
1400	415	1065	677.38	722.62
1300	390	910	633.22	666.78
1200	364	836	588.73	611.27
1100	338	762	549.75	550.25
1000	311	689	514.19	485.81
900	286	614	479.83	420.17
800	262	538	450.37	349.63
700	234	466	420.44	279.56
600	207	393	384.28	215.73
500	178	322	346.42	153.58

Tabla 1 Distribución de gastos calculados en la bifurcación.

3.3 Modelo sedimentológico

El objetivo del modelo unidimensional con arrastre de sedimentos es analizar diferentes ecuaciones de gasto sólido, teniendo en cuenta los fenómenos de erosión, transporte y sedimentación con diferentes valores de gasto para identificar la ecuación de transporte de sedimento que mejor se ajuste a las peculiaridades de la bifurcación del Mezcalapa basado en datos medidos en el año 2004.

El modelo Hec-Ras tiene como limitación que el cálculo de transporte de sedimentos en una bifurcación no está disponible, por lo que para realizar el análisis de arrastre de sedimentos el modelo se recortó a una zona del río Mezcalapa, donde se cuenta con una sección de medición justo antes de llegar a la bifurcación.

3.3.1 *Condiciones iniciales y archivo de sedimentos*

El editor del archivo de sedimentos permite indicar la función de transporte, el método de velocidad de caída y la granulometría de cada una de las secciones transversales. Como funciones de transporte se aplicaron los modelos de Meyer-Peter-Muller, Yang, Engelund-Hansen, Ackers-White con la ecuación de Ruby como velocidad de caída de las partículas.

En condiciones iniciales se indicó carga en equilibrio, donde Hec-Ras calcula la capacidad de transporte para cada intervalo de tiempo en la sección que se indique y el valor obtenido es el aplicado como gasto de ingreso de sedimentos, hasta que la capacidad de transporte y la carga se igualen para no haber sedimentación ni erosión en esa sección.

Como propiedades del sedimento se ingresan la gravedad específica, el factor de forma (relación entre el eje más corto y el eje más largo de la partícula) y la densidad, a falta de información se utilizaron los valores predeterminados y solo se modificó la densidad.

3.3.2 *Archivo de flujo casi no permanente*

El cálculo de transporte de sedimentos en Hec-Ras está basado en el flujo casi no permanente, que es una aproximación del hidrograma en series de flujo permanente y sus respectivas duraciones; en nuestro caso el hidrograma que se ingresa es un valor de gasto constante. Se definió como tiempo de simulación seis meses con incremento de tiempo cada 48 horas. Se busca el gasto sólido de entrada al tramo para el cual el fondo está en equilibrio.

3.4 Resultados del modelo unidimensional

La figura 25 muestra también los perfiles hidráulicos para el gasto de 1400 m³/s, calculados con Hec-Ras. La diferencia entre el perfil hidráulico al inicio y al final del periodo es pequeña, en el orden de centímetros. Entre los 0 y 1500 m el fondo del

canal presenta depósitos pequeños y para el resto del tramo la variación del fondo es mínima. Se aprecia que el perfil hidráulico varía mucho menos que el fondo por lo que se consideró al modelo estable.

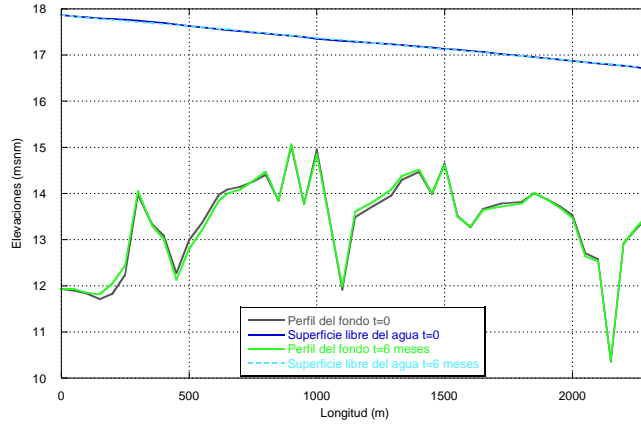


Figura 25 Simulación durante 6 meses con un gasto de 1400 m³/s.

Se realizó un análisis comparativo de cada una de las ecuaciones de gasto sólido, se aplicaron tres de las fórmulas de transporte de carga total disponibles en Hec-Ras (Engelund-Hansen, Ackers y Tofaletti); también se realizó el análisis con las ecuaciones de Yang y Meyer-Peter sin embargo no se obtuvieron buenos resultados.

De los resultados obtenidos se considera que la fórmula de Engelund-Hansen que se sitúa por encima de las mediciones es la adecuada para realizar el análisis; aunque no es la que parece ajustarse mejor es la ecuación que también incluye el modelo bidimensional con el que se hará el análisis de la bifurcación.

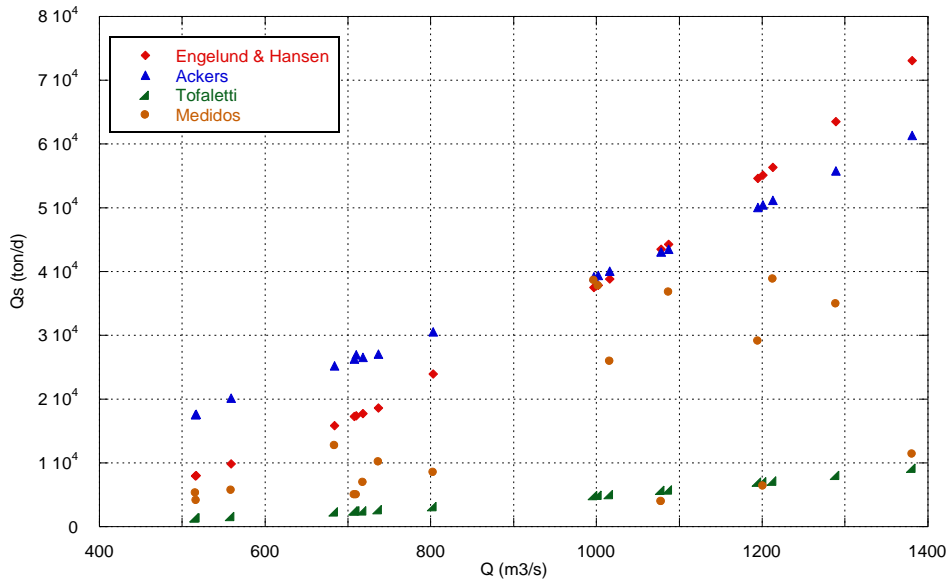


Figura 26 Ajuste de las ecuaciones de transporte.

En el siguiente capítulo se muestra el ajuste de la ecuación de Engelund-Hansen de manera de acercar los cálculos a las mediciones.

CAPÍTULO 4 MODELO BIDIMENSIONAL

La elección del modelo que se emplea considera el tipo de fenómeno que se va a considerar y la información disponible para su construcción, ya que algunos modelos son más exigentes en cuanto a la cantidad de datos que se deben ingresar, así como los recursos computacionales necesarios para su ejecución pues el modelo puede resultar con una estructura muy robusta. Dado que se analiza una bifurcación donde la dirección del flujo ya no es predominante en una sola dirección es necesario aplicar un modelo bidimensional como TELEMAC 2D, el cual es un modelo ampliamente aplicado para la simulación de procesos morfológicos, además de ser un software de uso libre.

4.1 Modelo Telemac

El sistema Telemac fue desarrollado para simular procesos físicos asociados a ríos, estuarios y aguas costeras; se basa en las técnicas de elementos finitos con mallas triangulares no estructuradas, lo que permite hacer representaciones de batimetrías complicadas. Creado por un consorcio integrado por diversos centros de investigación franceses ((EDF, el laboratorio de puertos CETMEF y la consultora Sogreah-Artelia), ingleses (HR Wallingford y el Laboratorio de Daresbury) y alemanes (centro público BAW) los cuales han puesto a disposición gratuita el software aplicable a análisis bidimensionales y tridimensionales junto a otros módulos como son: SISYPHE para análisis de transporte de sedimentos, DELWAQ para calidad de agua y otros para aplicaciones costeras.

En cuanto a los módulos con que dispone, TELEMAC 2D proporciona la hidrodinámica (velocidades promediadas con la profundidad, la profundidad) resuelve las ecuaciones de Saint-Venant para aguas poco profundas en dos dimensiones; considera diversos fenómenos físicos como fricción, turbulencia, velocidad del viento, variación en la presión atmosférica, fuerzas generadas por la luna, diques, vertedores y alcantarillas; y Sisyphe, módulo de transporte de sedimentos que permite resolver las ecuaciones asociadas a cambios espaciales de la batimetría originados por la presencia de un transporte de sedimentos, con las ecuaciones de carga de fondo y suspendida para arenas así como el transporte de sedimentos cohesivos.

El modelo hidrodinámico requiere información básica de las siguientes variables:

- Modelo digital de elevaciones.

- Datos de gasto (curvas elevaciones-gasto).

El modelo morfodinámico necesita ciertos datos de entrada adicionales al comportamiento hidrodinámico como:

- Composición del material del fondo.
- Gastos sólidos (datos de transporte de sedimentos de fondo o suspensión).
- Características granulométricas del sedimento.

4.2 Modelo hidrodinámico

Dado que los procesos morfológicos son en el largo plazo (años) y el río está controlado por una presa aguas arriba, el gasto no tiene una variación con un hidrograma anual sino una variación continua pues el gasto se modifica conforme los requisitos de generación de energía. Se acepta aquí, que pequeñas variaciones en el gasto no tienen efecto morfológico en el largo plazo; por ello, se utiliza un gasto constante que sea equivalente al gasto dominante o formativo. Como la central varía el caudal, desde cero hasta 1400 m³/s a lo largo del año y se desea un mayor efecto en el movimiento del sedimento, se empleó el gasto de 1400 m³/s, pero para respetar el gasto medio anual, este caudal por 6 meses equivale a un año. Dicho de otra manera, 6 meses con un caudal de 1400 m³/s equivale para efectos de sedimentación a un año con gasto medio anual, a esto se le llama aquí, un año morfológico.

4.2.1 Elección de paso de tiempo

Para determinar un valor adecuado del paso de tiempo fue necesario realizar un proceso de prueba error hasta lograr una solución estable y a su vez que fuera lo suficientemente grande desde el punto de vista computacional. No es una tarea fácil ya que este depende del tirante, el coeficiente de Manning y el tamaño de la malla que varía espacialmente. Es así que el paso de tiempo óptimo aquí, resultó en 10 s para el escenario 1 y de 7.5 s para los escenarios 2 y 3.

4.2.2 Rugosidad

Durante el desarrollo del modelo unidimensional se obtuvo el coeficiente de rugosidad que permitía igualar las elevaciones del modelo con los datos medidos; sin embargo, durante las pruebas con el modelo bidimensional fue necesario realizar algunos ajustes a este parámetro, modificándolo ligeramente en algunas zonas a fin de mejorar el comportamiento hidrodinámico, en el escenario 1 se usaron valores de rugosidad de 0.035 en el último kilómetro del río Samaria con la finalidad de disminuir el gasto que este transporta y ajustar el modelo a las mediciones de distribución de gastos, el resto del modelo uso un coeficiente de rugosidad de 0.030, en los otros escenarios se usó solo el coeficiente de rugosidad de 0.030 en todo el dominio.

4.2.3 *Condiciones de frontera*

4.2.3.1 *Frontera aguas arriba*

Se ingresa un valor del gasto constante en el tiempo con un valor de 1400 m³/s, gasto equivalente a un año morfológico.

4.2.3.2 *Frontera aguas abajo*

Como información debe introducirse la variación de los niveles en el tiempo. Dado que considerará un gasto constante en el tiempo, se ingresa la elevación del río Carrizal de 16.32 m y en el río Samaria de 16.20 m para el escenario 1 con un gasto de 1400 m³/s y de 16.25 m y 16.13 m para el escenario 2; estos valores se obtuvieron con ayuda del modelo unidimensional descrito en el capítulo anterior.

4.3 Modelo Morfodinámico

4.3.1 *Condición de frontera aguas arriba*

Se indicó una condición de frontera en equilibrio, esto es, el modelo calcula el gasto sólido de manera que no hay cambio en el fondo.

El modelo de turbulencia que se eligió es el de Elder, pues el modelo k-Epsilon requiere de una malla más fina y un aumento en el tiempo de cálculo.

4.3.2 *Función de transporte*

De la figura 26 se observa que la ecuación de Engelund-Hansen sobreestima el gasto total, por lo que se dio a la tarea de ajustar el coeficiente experimental de la ecuación original afectando la pendiente de la ecuación lo que permitió obtener el gasto de sedimentos totales medidos para un gasto líquido de 1400 m³/s. La ecuación de Engelund-Hansen para el resto del análisis queda como:

$$\Phi_s = 0.06(\theta')^{5/2}$$

4.4 Escenario 1 (topografía de 1997).

La generación de la malla es una parte importante en la construcción del modelo bidimensional. Para definir el tamaño adecuado de los lados de los triángulos fue necesario proponer diferentes tamaños y verificar los resultados sin sobrepasar un tiempo de cálculo razonable.

La construcción de las mallas se realizó mediante el software Bluekenue; del análisis de tamaño de mallas contra tiempo de cálculo se observó que una malla adecuada para nuestro modelo es con una resolución variable en cada zona, se destacan las siguientes:

- La zona I comprende aproximadamente 200 m antes de la bifurcación sobre el río Mezcalapa con un tamaño de la malla de 30 m por lado.
- La zona II ubicada al final del tramo del río Carrizal de aproximadamente 400 m con un tamaño de malla de 45 m por lado.
- La zona III ubicada al final del tramo del río Samaria aproximadamente 1200 m con un tamaño de malla de 55 m por lado.
- El resto de las áreas es cubierta por un tamaño de malla de 70 m por lado.
- La malla cuenta con 2659 nodos y 4924 elementos.

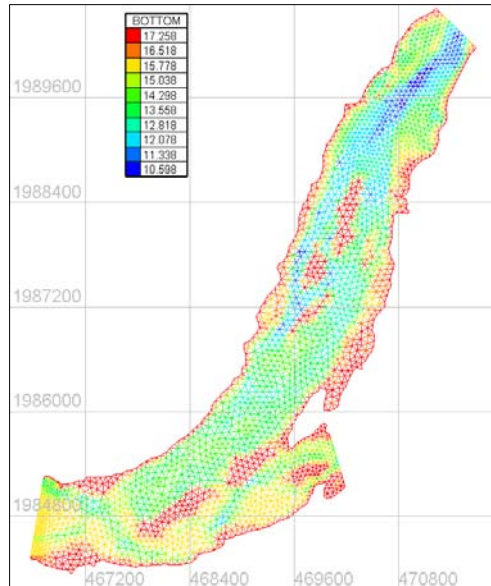


Figura 27 Malla empleada en la simulación, topografía de 1997.

4.4.1 Resultados del modelo hidrodinámico

Se obtiene que el río Carrizal conduce el 30% del gasto; en la tabla 2 se compara los resultados obtenidos con los datos medidos y los resultados del modelo bidimensional.

	Medido	Modelo unidimensional	Modelo bidimensional
Río Mezcalapa	1400	1400	1400
Río Samaria	930	986	1012
Río Carrizal	470	415	402

Tabla 2 Comparación de la distribución de gasto en la bifurcación, 1997.

Las velocidades de la figura 28 muestran una magnitud máxima de 1.75 m/s; estos valores se presentan aproximadamente 1 km aguas abajo de la frontera de entrada, sobre una zona donde el fondo sobresale del resto.

La distribución de gastos de la figura 29 indica que el río Samaria posee una gran capacidad de conducción comparada con el río Carrizal alcanzando hasta 4.5 m²/s

comparado con 1.5 m²/s del Carrizal. Nótese que el flujo se hace en canales bien definidos.

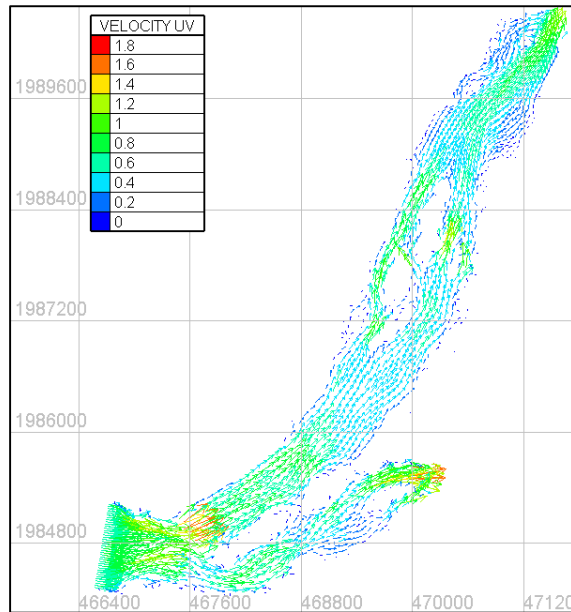


Figura 28 Velocidades calculadas para un gasto de 1400 m³/s, año 1997.

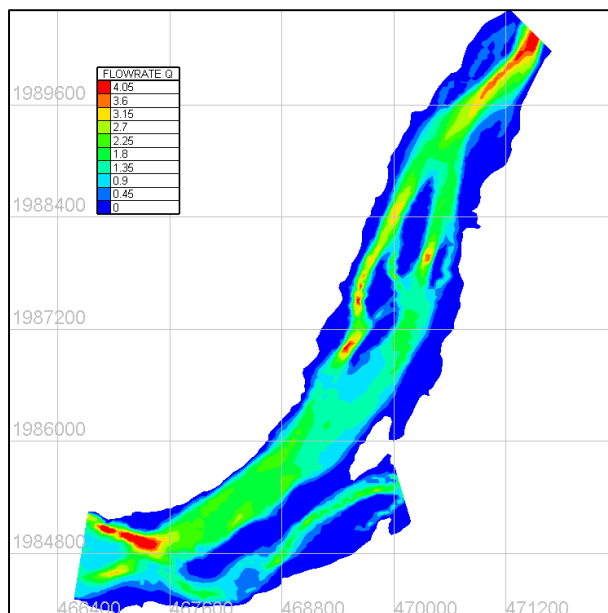


Figura 29 Gasto unitario para un gasto de 1400 m³/s, año 1997.

4.4.2 Resultados del modelo morfodinámico

4.4.2.1 Después de 2 años con un gasto de 1400 m³/s.

Después de dos años de simulación el montículo que se ubicaba al inicio de la bifurcación sobre el río Samaria ha desaparecido y ahora se presenta un canal con dirección al río Carrizal con velocidades de hasta 1.80 m/s a la salida de este.

En la figura 30 se notan importantes zonas de erosión sobre todo al principio de la bifurcación y en la zona del río Carrizal donde la erosión alcanza valores altos, lo que podría indicar el incremento de su capacidad de conducción y lo que afecta la distribución de gastos en la bifurcación. En el caso de la figura 31 las zonas de depósito se muestran principalmente a lo largo del río Samaria, aguas abajo de la bifurcación con valores mayores a 0.5 m. Como balance se tiene que el volumen neto depositado el primer año es de 40,000 m³ y el segundo año de 400,000 m³.

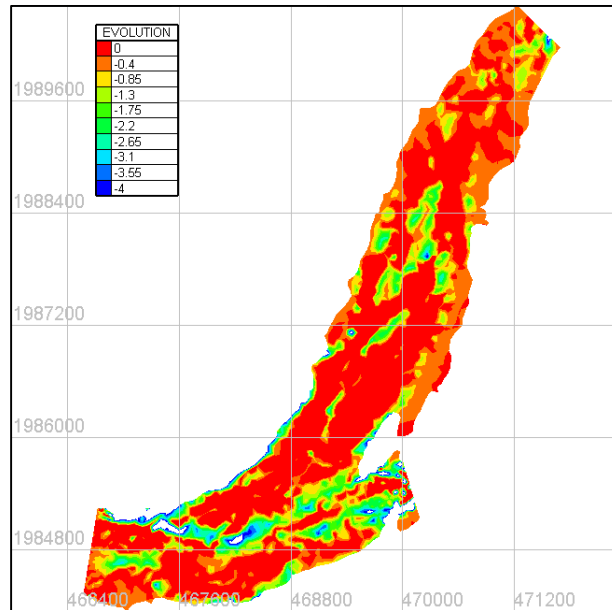


Figura 30 Erosión después de 2 años de simulación con un gasto de 1400 m³/s.

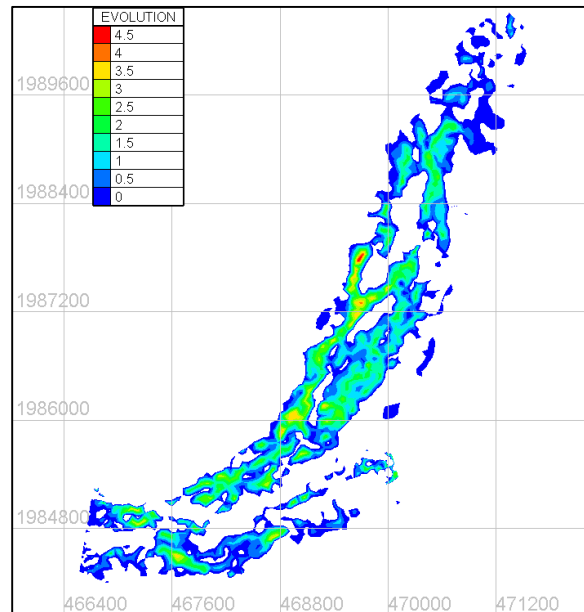


Figura 31 Zonas de depósito después de 2 años de simulación con un gasto de 1400 m³/s.

Los gastos sólidos, de entrada se tiene un valor de 0.10 m³/s, de salida por el río Carrizal 0.056 m³/s y por el Samaria 0.002 m³/s lo que justifica que el depósito sea

mayor que la erosión; en la figura 32 se muestra que el gasto sólido es transportado mayormente por el río Carrizal. Con respecto a la distribución de gasto líquido, se tiene que el río Carrizal transporta el 60%, el incremento del caudal en el río Carrizal para 1999 se debe al depósito sobre el cauce del río Samaria.

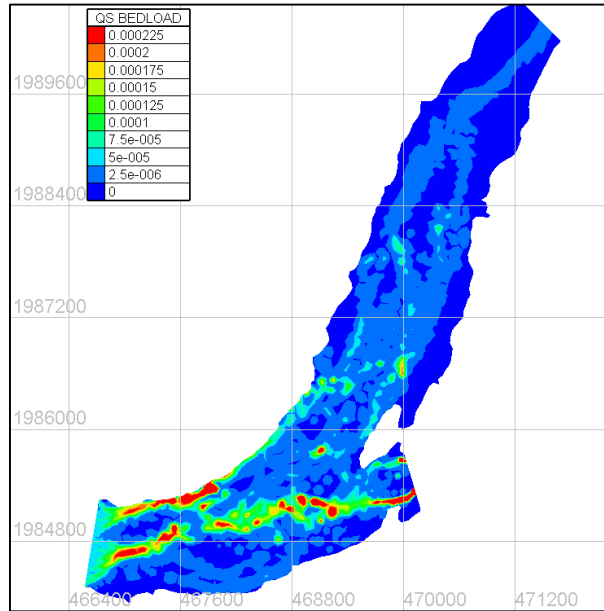


Figura 32 Gasto sólido unitario en m²/s después de 2 años de simulación con un gasto de 1400 m³/s.

4.4.2.2 Simulación con avenida de 1999.

El análisis de este escenario se continuó considerando la avenida que se presentó en el año de 1999; al contar con solo los gastos derramados por la presa Peñitas, el hidrograma se considera como el gasto máximo descargado por la presa durante un periodo suficiente para cubrir el volumen total derramado, por lo que se simularon 5 días con un gasto constante de 3500 m³/s.

En la figura 33 se observa una zona de erosión de aproximadamente 3 km en la margen izquierda donde se presentaron valores de cortante superiores a 16 N/m² y se conserva el canal que iniciaba en el río Mezcalapa y se dirigía al río Carrizal; en la figura 34 se observan depósitos principalmente sobre el río Samaria con un incremento del fondo de entre 1 y 5 m. El volumen neto de sedimentos depositado durante la avenida es poco más de 100,000 m³.

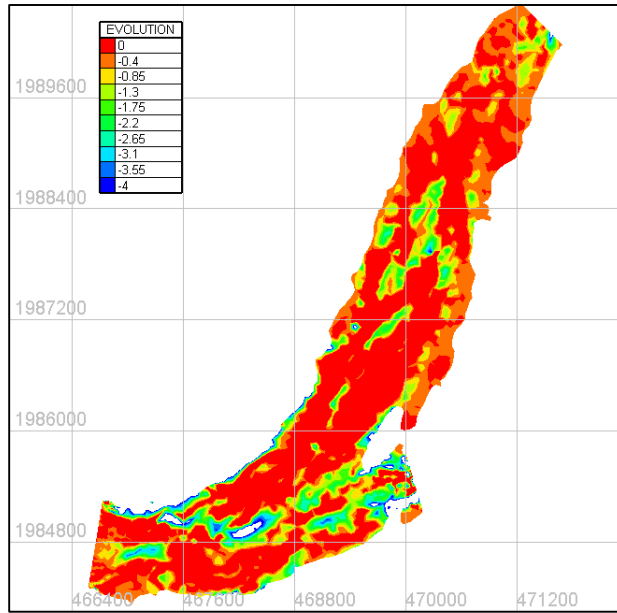


Figura 33 Erosión después de la avenida con un gasto de 4000 m³/s.

Los gastos sólidos, de entrada se tiene un valor de 0.92 m³/s y de salida por el río Carrizal 0.42 m³/s y por el Samaria 0.04 m³/s es decir el depósito es mayor que la erosión; en la figura 35 se muestra que el gasto sólido es transportado mayormente por el río Carrizal. La distribución de gasto líquido corresponde a que el río Carrizal transporta el 75% del gasto proveniente del Mezcalapa.

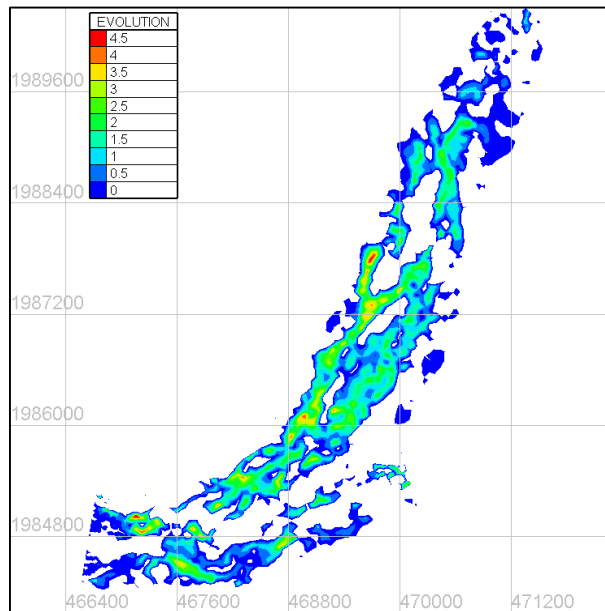


Figura 34 Zonas de depósito después de la avenida con un gasto de 4000 m³/s.

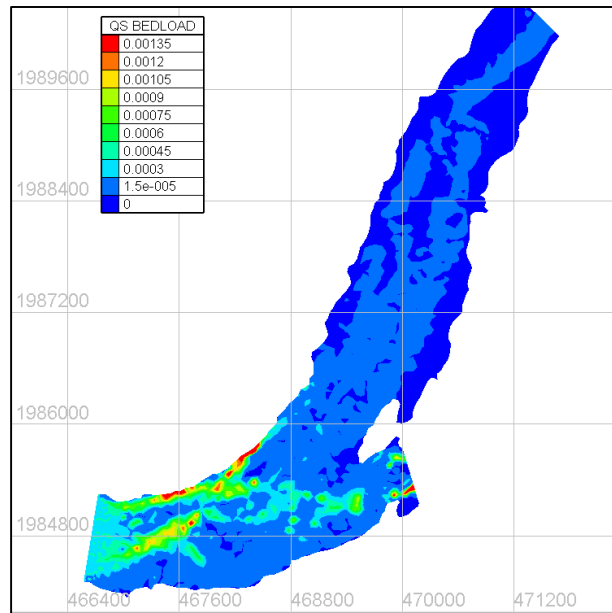


Figura 35 Gasto sólido unitario en m^2/s después de la avenida.

4.4.2.3 Simulación un año después de la avenida.

A fin de observar los efectos de la avenida en la distribución de gastos en el largo plazo, se continuó la simulación durante un año más con un gasto constante de $1400 m^3/s$. La figura 36 muestra que el flujo se concentra en canales como los que se formaron en la margen izquierda y con dirección al río Carrizal.

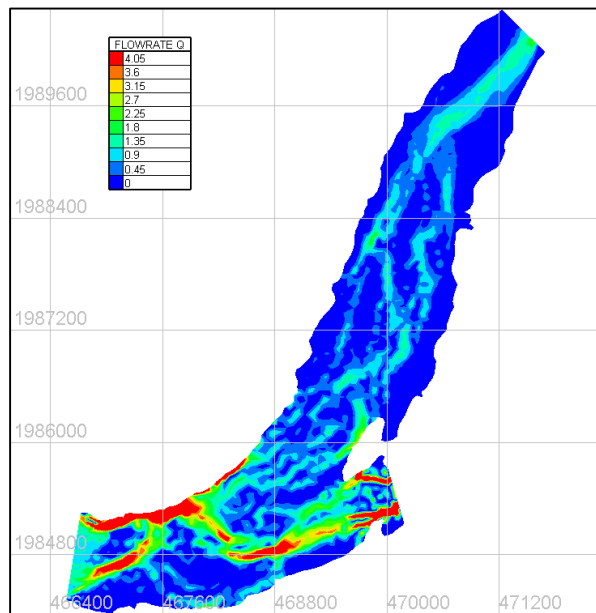


Figura 36 Gasto unitario en m^2/s después de 1 año de la avenida con un gasto de $1400 m^3/s$

En la figura 37 se observa que la erosión en la margen izquierda provocada después de la avenida se conserva y se incrementaron las zonas erosionadas en el cauce del Carrizal; en la figura 38 el río Samaria muestra una cantidad mucho mayor de zonas

de depósito sobre todo al inicio de este con valores de entre 1.5 y 5m. El volumen de sedimentos neto depositado durante un año después de la avenida es de más de 200,000 m³.

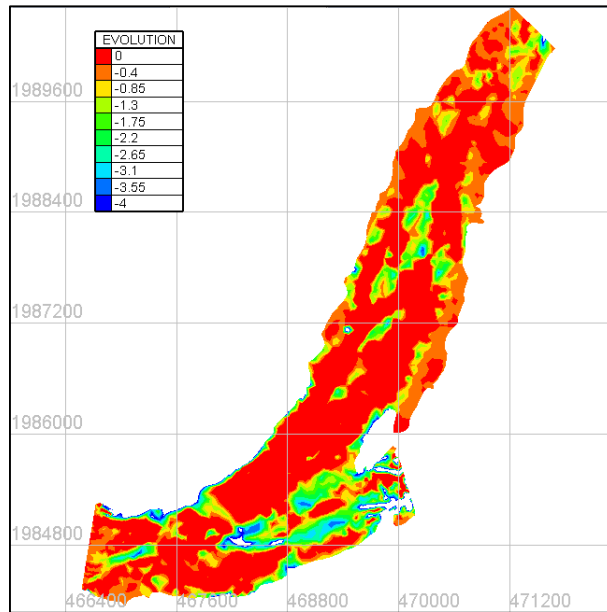


Figura 37 Erosión después 1 año de la avenida con un gasto de 1400 m³/s.

Los gastos sólidos, de entrada se tiene un valor de 0.10 m³/s y de salida por el río Carrizal 0.08 m³/s y por el Samaria 0.0002 m³/s, en la figura 39 se muestra que el gasto sólido practicante es conducido únicamente por el río Carrizal.

Al final del periodo el río Carrizal transporta el 65% del caudal, que comparado con el inicio del periodo, se nota un incremento.

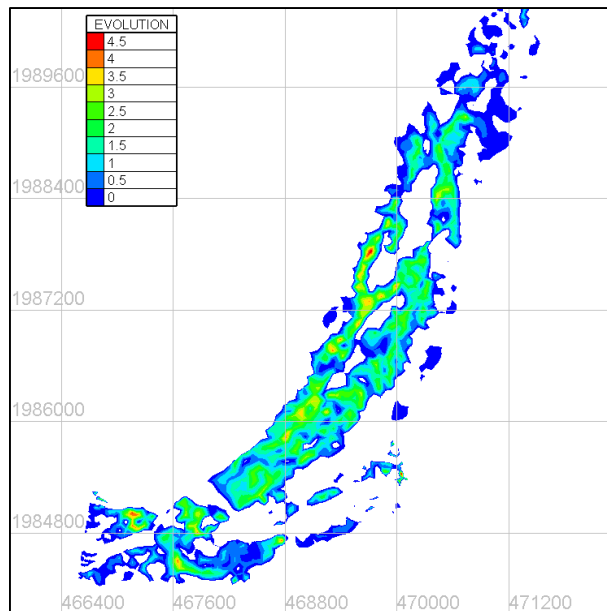


Figura 38 Zonas de depósito después de 1 año de la avenida con un gasto de 1400 m³/s

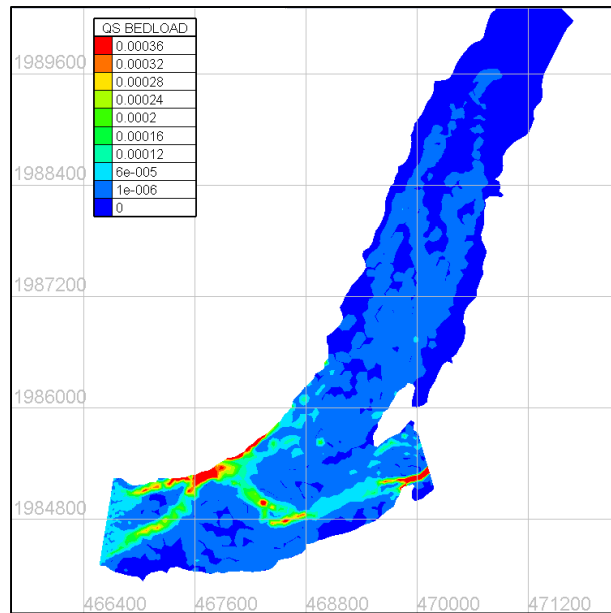


Figura 39 Gasto sólido unitario en m²/s después de 1 año de la avenida con un gasto de 1400 m³/s.

4.5 Escenario 2 (topografía de 2004).

La malla está conformada por diferentes tamaños que se enlistan a continuación:

- La zona I comprende aproximadamente 200 m antes de la bifurcación sobre el río Mezcalapa con un tamaño de la malla de 30 m por lado.
- La zona II ubicada al final del tramo del río Carrizal aproximadamente 400 m con un tamaño de malla de 45 m por lado.
- La zona III ubicada al final del tramo del río Samaria aproximadamente 800 m con un tamaño de malla de 45 m por lado.
- El resto de las áreas es cubierta por un tamaño de malla de 65 m por lado.
- La malla cuenta con 2334 nodos y 4366 elementos con una elevación mínima de 11.40 m y una máxima de 20.00 m.

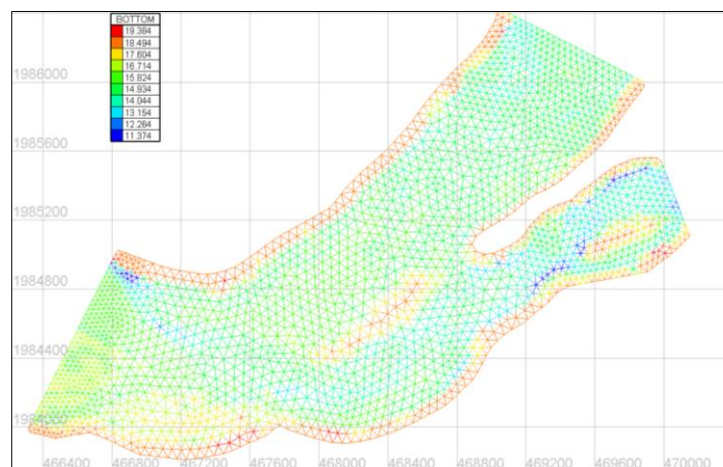


Figura 40 Malla empleada para la simulación, topografía de 2004.

4.5.1 Resultados del modelo hidrodinámico

Para un gasto de 1400 m³/s indica que el 47% es conducido por el río Carrizal; en la tabla 3 se puede observar la comparación de los datos medidos y los obtenidos con el modelo unidimensional y bidimensional.

	Medido	Modelo unidimensional	Modelo bidimensional
Río Mezcalapa	1400	1400	1400
Río Samaria	630	723	716
Río Carrizal	770	677	663

Tabla 3 Comparación de la distribución de gasto en la bifurcación, 2004.

Las velocidades de la figura 41 muestran valores altos sobre el cauce del río Carrizal. La distribución de gastos en la figura 42 se nota que el río Carrizal posee una gran capacidad de conducción comparada con el río Samaria.

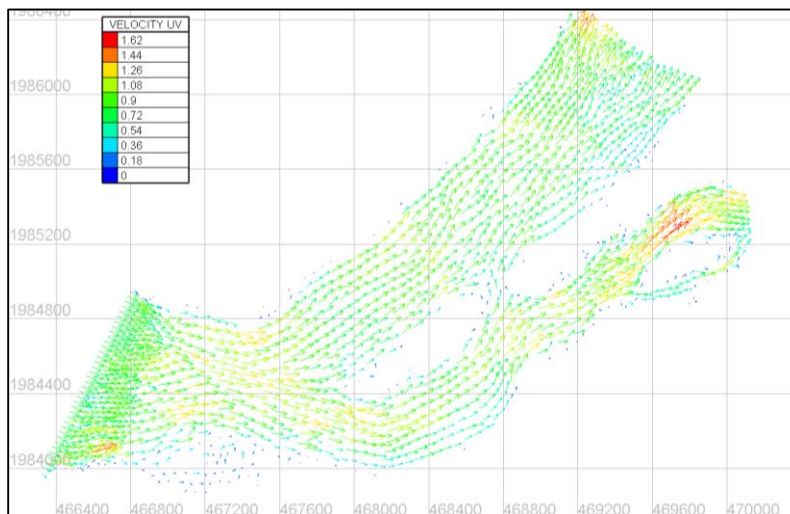


Figura 41 Velocidades calculadas para un gasto de 1400 m³/s, año 2004.

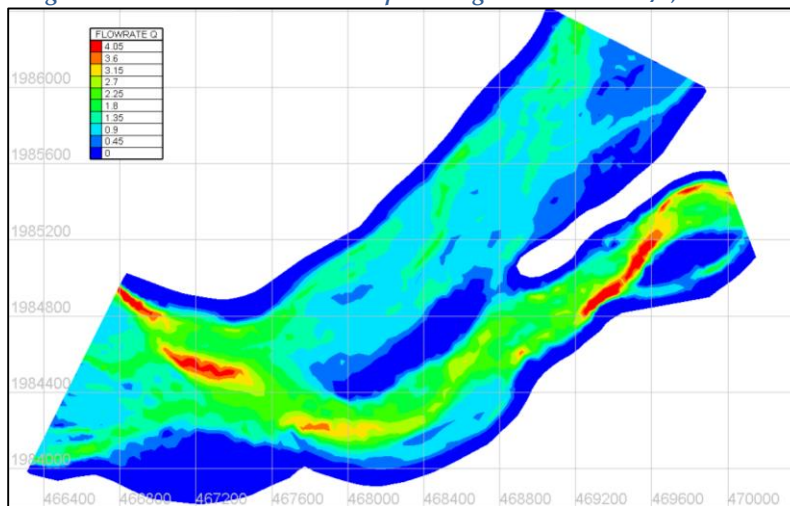


Figura 42 Gasto unitario para un gasto de 1400 m³/s, año 2004.

4.5.2 Resultados del modelo morfodinámico

4.5.2.1 Después de 2 años con un gasto de 1400 m³/s.

En la figura 43 se notan importantes zonas de erosión donde el cortante presentó valores superiores a 11 N/m². En la figura 44 las zonas de depósito se muestran principalmente a lo largo del río Carrizal con elevaciones superiores a 0.50 m. El balance muestra que la erosión neta para el primer año es cercana a 2.3 hm³ y para el segundo de poco más de 500,000 m³.

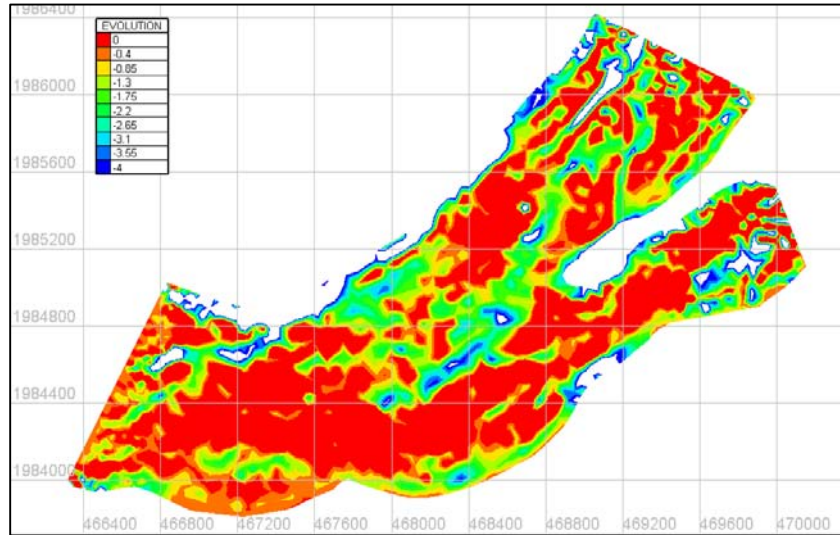


Figura 43 Erosión después de 2 años de simulación con un gasto de 1400 m³/s

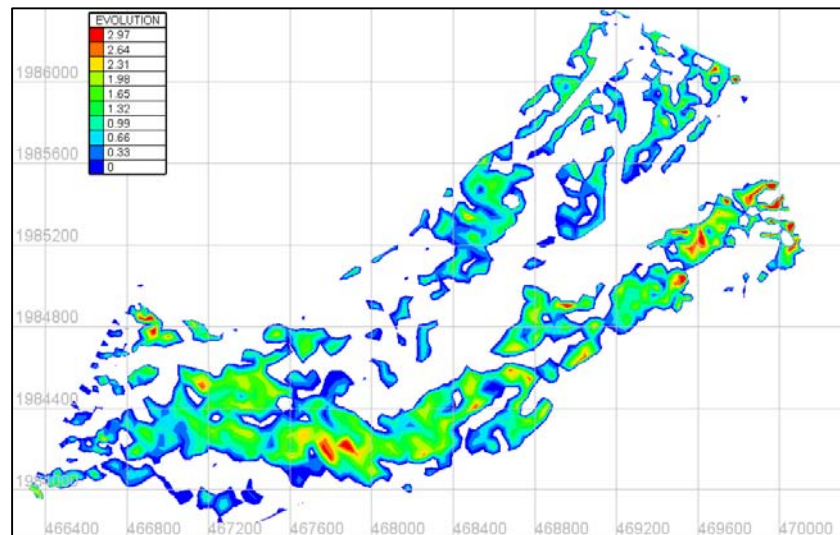


Figura 44 Zonas de depósito después de 2 años de simulación con un gasto de 1400 m³/s

El balance de gastos sólidos, se tiene un valor de entrada de 0.12 m³/s y de salida por el río Carrizal 0.003 m³/s y por el Samaria 0.24 m³/s, en la figura 45 se muestra que el gasto sólido es transportado mayormente por la margen izquierda del río Samaria.

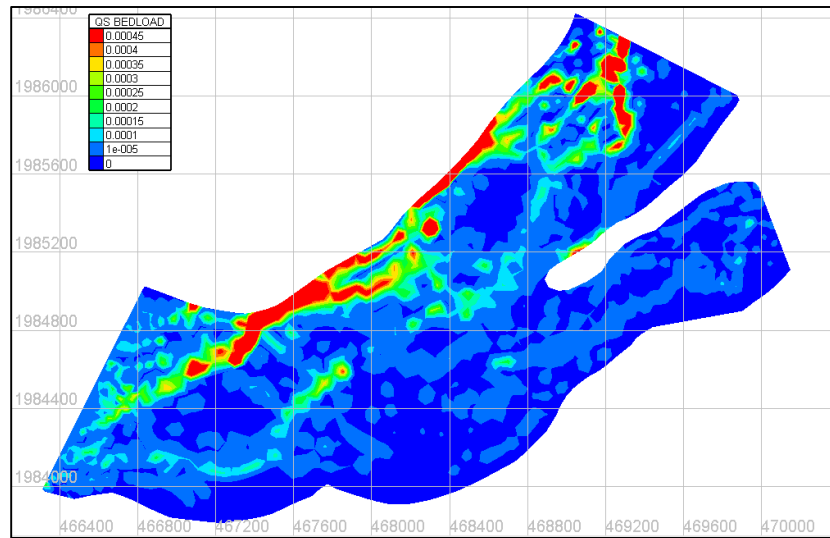


Figura 45 Gasto sólido unitario en m²/s después de 2 años de simulación con un gasto de 1400 m³/s.

Al final del periodo el río Carrizal transporta el 23% del caudal, que comparado con el inicio del periodo, se nota una disminución del gasto transportado por el río Carrizal.

4.5.2.2 Simulación con avenida de 2006

El análisis se continuó considerando la avenida que se presentó en el año de 2007, el hidrograma supuesto considera el gasto máximo descargado por la presa durante un periodo suficiente para cubrir el volumen total derramado; se simularon 7 días con un gasto constante de 3000 m³/s.

En la figura 46 se observa que la erosión en la zona de la margen izquierda es importante en un tramo de aproximadamente 2 km pues se forma un canal que inicia en el río Mezcalapa y se dirige al río Samaria por la margen izquierda; en la figura 47 se observan depósitos principalmente sobre el río Carrizal con un incremento del fondo de hasta 5 m. El balance muestra que el volumen de material erosionado durante la avenida es cercano a los 120,000 m³.

El gasto sólido de entrada es de 0.85 m³/s y de salida, por el río Carrizal 0.28 m³/s y por el Samaria 0.69 m³/s, en la figura 48 se muestra que el gasto sólido es transportado mayormente por canales bien definidos sobre el río Samaria. La distribución de gasto líquido indica que el río Carrizal transporta el 30%

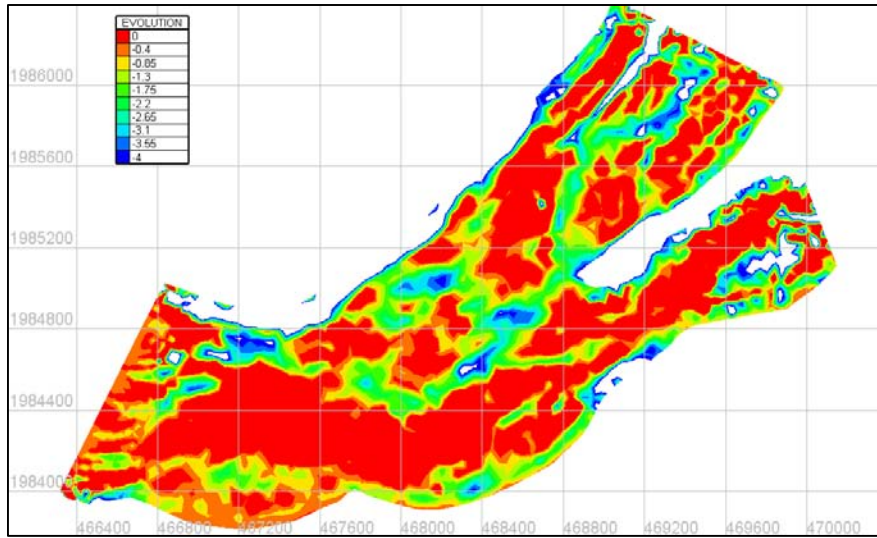


Figura 46 Erosión después de la avenida.

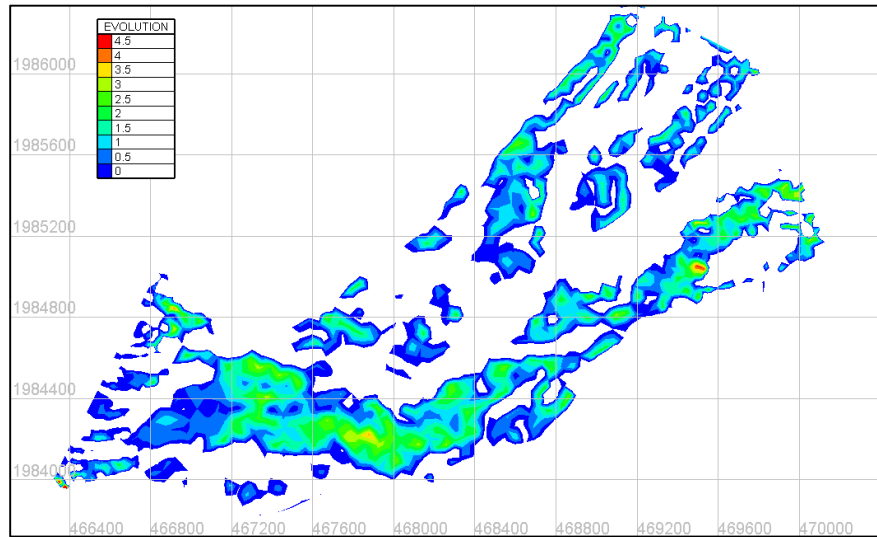


Figura 47 Zonas de depósito después de la avenida.

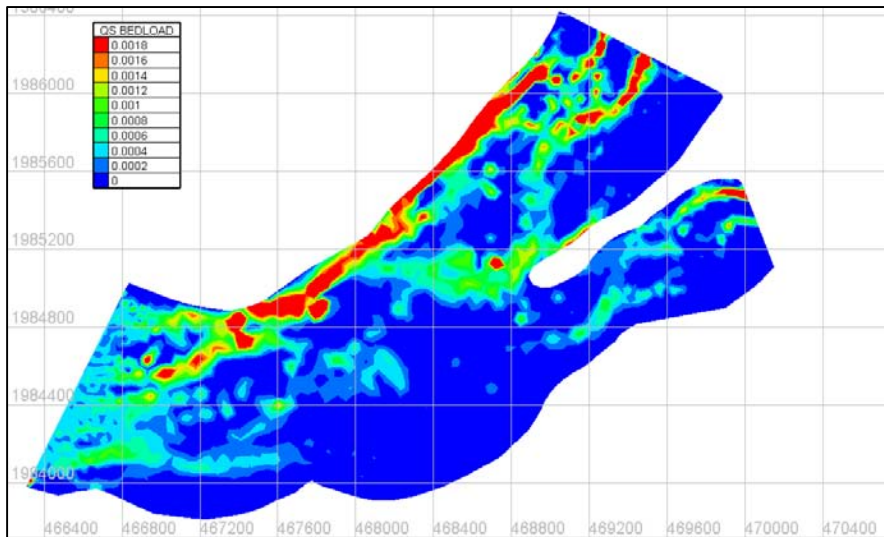


Figura 48 Gasto sólido unitario en m^2/s después de la avenida.

4.5.2.3 Simulación un año después de la avenida.

Para observar los efectos de la avenida en el largo plazo, se continuó la simulación durante un año más con un gasto constante de 1400 m³/s.

La figura 49 muestra que el flujo predomina en la margen izquierda y sobre el río Samaria.

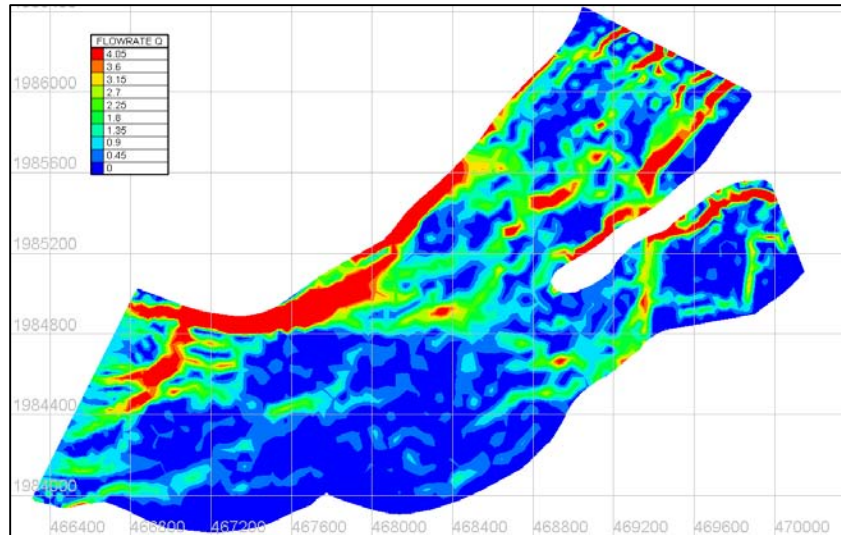


Figura 49 Gasto unitario m²/s después de 1 año de la avenida para un gasto de 1400 m³/s

La evolución del fondo (figura 50) muestra severas zonas de erosión en la margen izquierda donde se presentan valores de cortante superiores a los 14 N/m² y en la margen derecha depósitos que provocan reducción en la capacidad del río Carrizal.

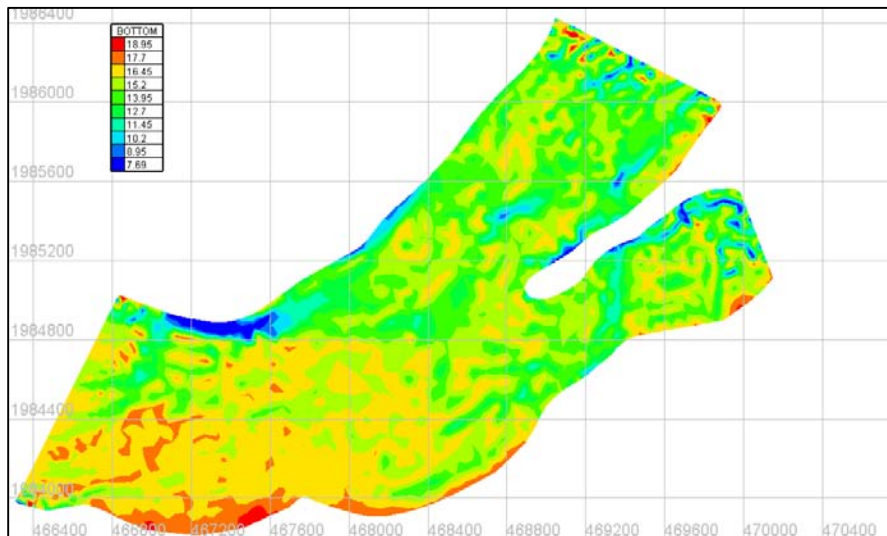


Figura 50 Evolución del fondo después de 1 año de la avenida con un gasto de 1400 m³/s.

La figura 51 muestra que la erosión en la margen izquierda provocada después de la avenida (figura 46) se mantiene; en la figura 52 la zona de depósitos se concentra

sobre la margen derecha del río Mezcalapa y sobre el cauce del río Carrizal. El balance muestra que el volumen de sedimentos depositados es de 250,000 m³.

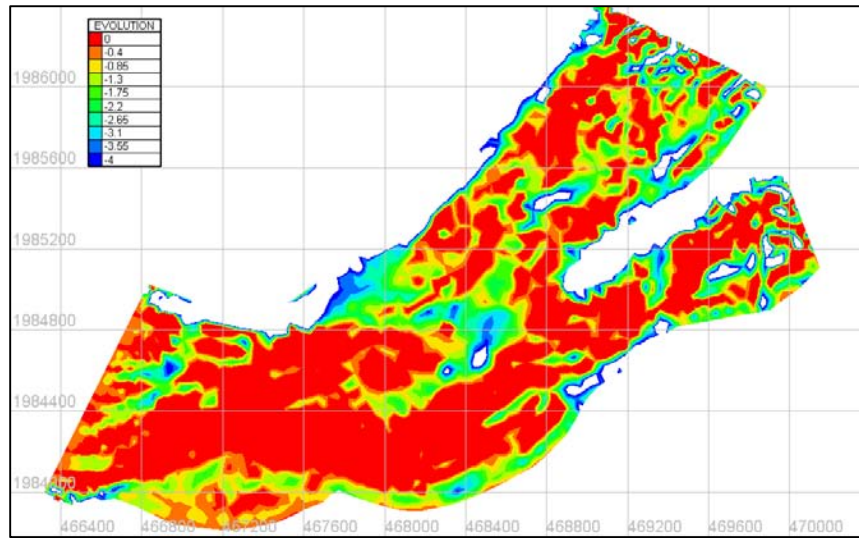


Figura 51 Erosión después de 1 año de la avenida con un gasto de 1400 m³/s.

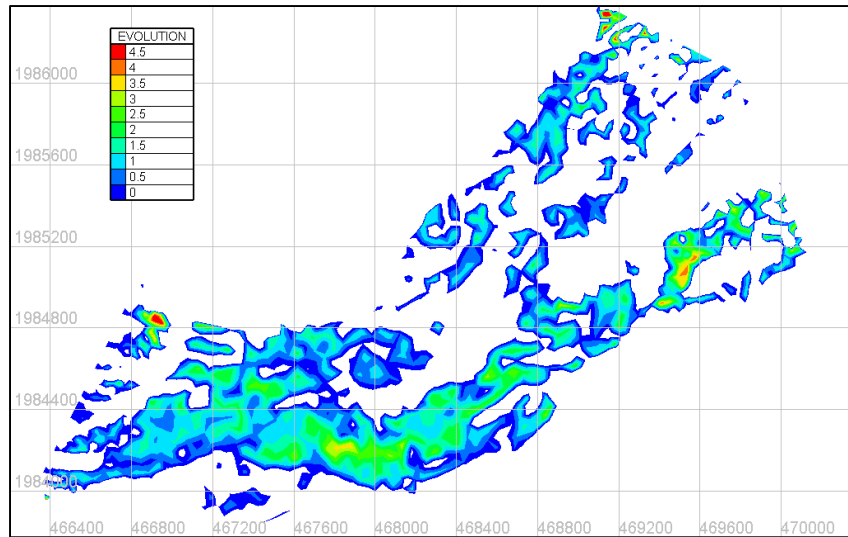


Figura 52 Zonas de depósito después de 1 año de la avenida con un gasto de 1400 m³/s.

Los gastos sólidos, de entrada se tiene un valor de 0.17 m³/s y de salida por el río Carrizal 0.03 m³/s y por el Samaria 0.08 m³/s, en la figura 53 se muestra que el gasto sólido practicante es conducido únicamente por el río Samaria. En cuanto a la distribución de gasto líquido, se tiene que el río Carrizal transporta el 35%.

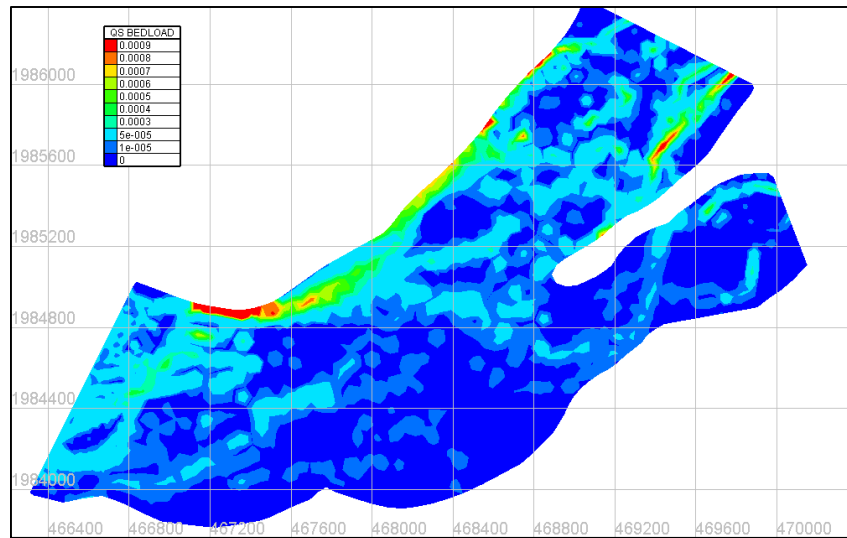


Figura 53 Gasto sólido unitario en m^2/s después de 1 año de la avenida con un gasto de $1400 m^3/s$.

4.6 Escenario 3 (Estructura de control “El Macayo”).

Para este caso se parte de los resultados obtenidos del Escenario 2 y se considera la ley de descarga de la estructura de control con compuertas completamente abiertas como condición de frontera en el río Carrizal. La cresta de la estructura de control se encuentra a una elevación de 12 m, para considerar la influencia de esta en el fondo móvil, se consideró una zona de fondo fijo a la elevación de la cresta.

4.6.1 Resultados del modelo hidrodinámico

Las velocidades de la figura 54 muestran canales bien definidos en la margen derecha del río Carrizal y Samaria con valores superiores a $1.50 m/s$.

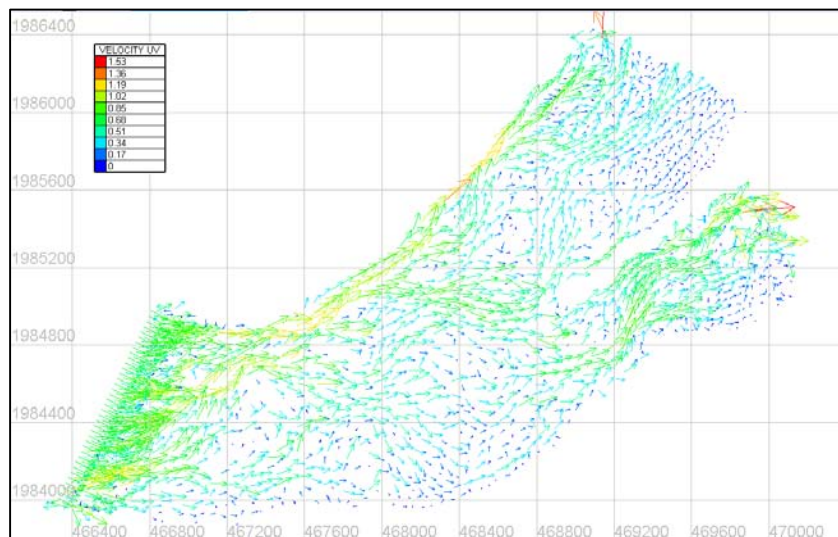


Figura 54 Velocidad del modelo hidrodinámico para un gasto de $1400 m^3/s$, con estructura de control.

La distribución de gastos de la figura 55 muestra que el río Samaria posee una gran capacidad de conducción comparada con el río Carrizal el cual transporta el 35% del gasto proveniente del río Mezcalapa.

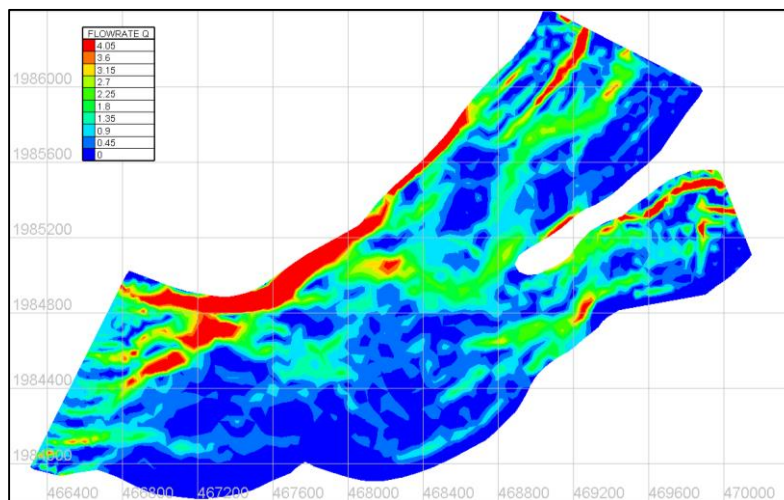


Figura 55 Gasto líquido unitario en m²/s para un gasto de 1400 m³/s, con estructura de control.

4.6.2 Resultados del modelo morfodinámico

4.6.2.1 Después de 2 años con un gasto de 1400 m³/s.

En la figura 56 se notan importantes zonas de erosión sobre todo al principio de la bifurcación sobre la margen izquierda y sobre el río Samaria donde el cortante supera los 11 N/m². En el caso de la figura 57 las zonas de depósito se muestran principalmente al inicio del río Carrizal con hasta 3 m de depósito. El balance de sedimentos indica que el volumen sedimentado es cercano a los 2 hm³ el primer año y para el segundo de poco más de 500,000 m³.

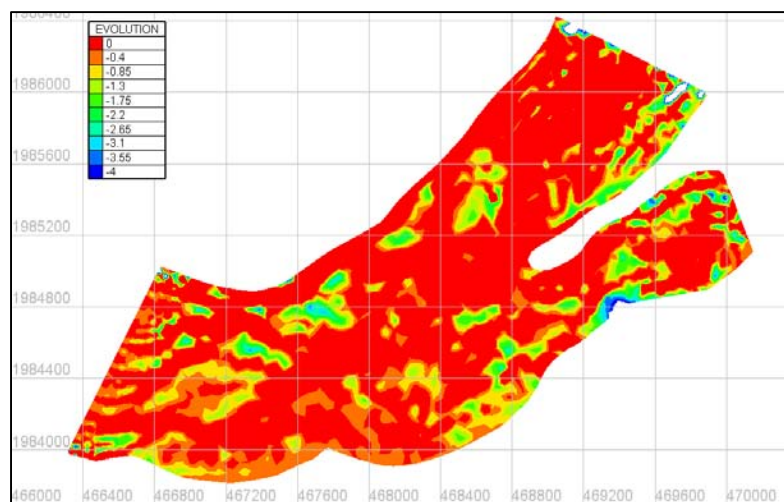


Figura 56 Erosión para un gasto de 1400 m³/s después de 2 años de simulación.

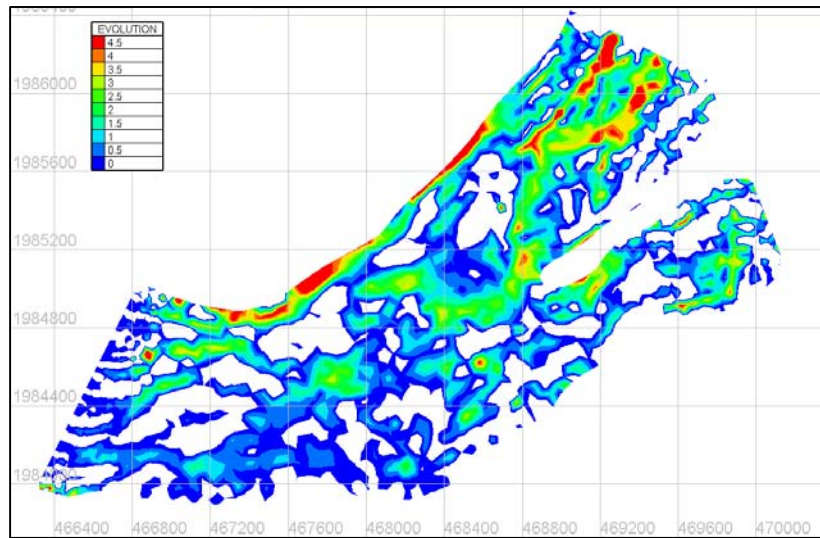


Figura 57 Zonas de depósito para un gasto de 1400 m³/s después de 2 años de simulación.

Como gasto sólidos, de entrada se tiene un valor de 0.11 m³/s y de salida por el río Carrizal 0.058 m³/s y por el Samaria 0.037 m³/s, en la Figura 45 se muestra que el gasto sólido es transportado mayormente por la margen izquierda del río Samaria. Al final del periodo el río Carrizal transporta el 39% del caudal.

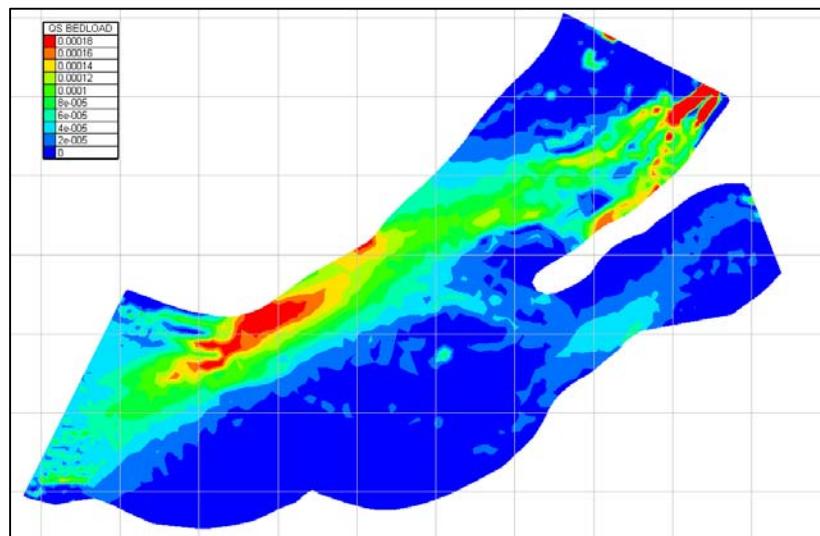


Figura 58 Gasto sólido unitario en m²/s después de 2 años de simulación.

La estructura de control inicio operaciones en el año de 2013 y con los dos años que se simularon se cubre la evolución del fondo a la fecha actual; sin embargo, para guardar un orden con los escenarios desarrollados anteriormente, se supone una avenida y un año después de esta.

4.6.2.2 Simulación con avenida similar a la presentada en 2010

El análisis de este escenario continuó considerando una avenida similar a la que se presentó en el año de 2010; el hidrograma considera un gasto de 4000 m³/s durante 10 días.

En la figura 59 se muestra la erosión; se aprecia un canal proveniente del río Mezcalapa que se extiende al río Samaria incrementado su capacidad de conducción. En la figura 60 se aprecian las zonas de depósito, las cuales se concentran principalmente en el inicio del río Carrizal con valores superiores a los 0.50 m. El balance muestra que el volumen de sedimentos erosionados es aproximadamente de 800,000 m³.

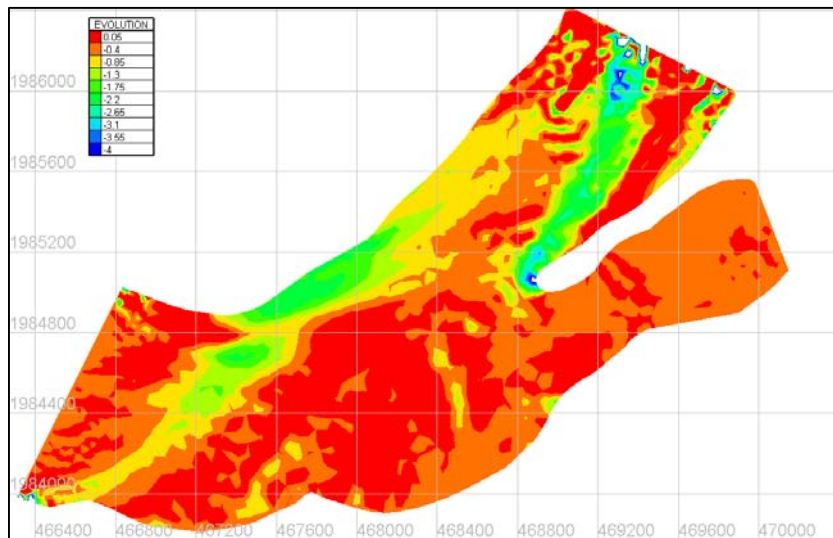


Figura 59 Erosión después de la avenida.

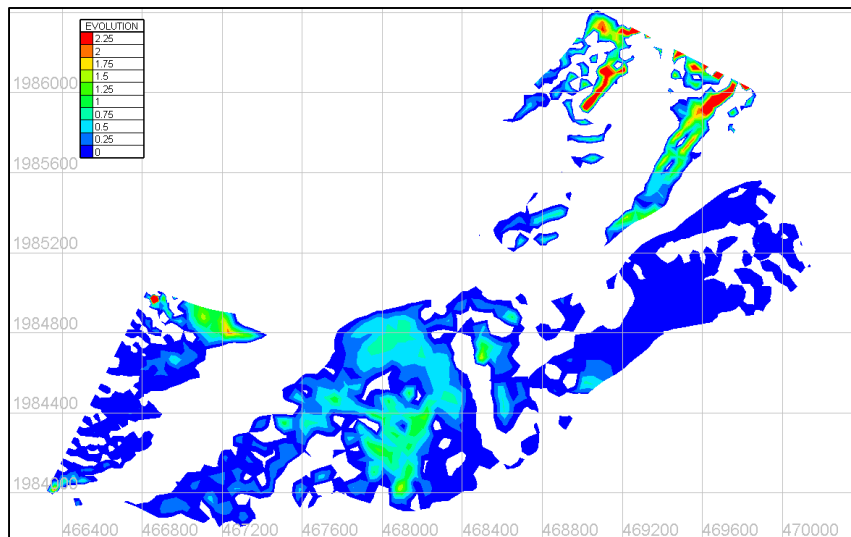


Figura 60 Zonas de depósito después de la avenida.

Como gastos sólidos se tiene, de entrada $0.95 \text{ m}^3/\text{s}$ y de salida, en el río Carrizal $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ y el río Samaria $1.7 \text{ m}^3/\text{s}$. La distribución de gastos indica que el río Carrizal transporta el 20% del gasto.

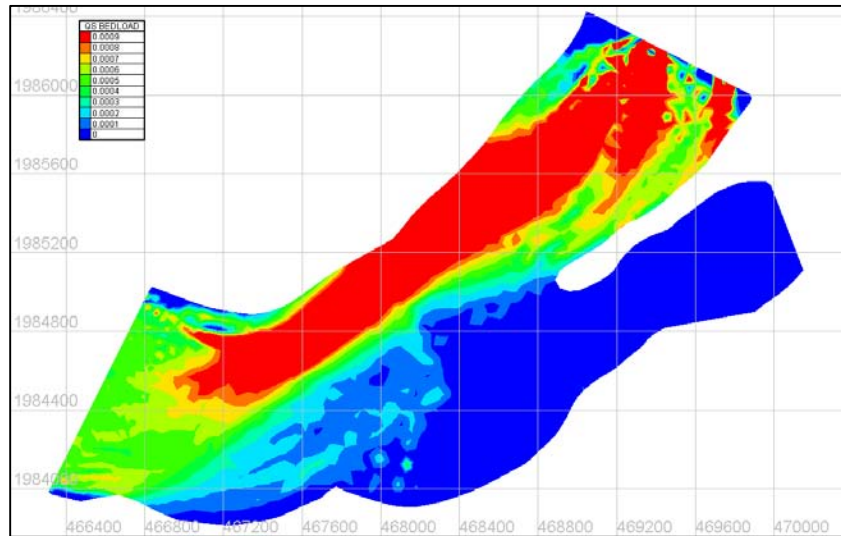


Figura 61 Gasto sólido unitario en m^2/s después de la avenida.

4.6.2.3 Simulación un año después de la avenida

Para observar los efectos de la avenida a largo plazo se continuó la simulación durante un año más con un gasto constante de $1400 \text{ m}^3/\text{s}$.

La figura 62 muestra que el flujo se realiza por canales bien definidos y principalmente por la margen izquierda.

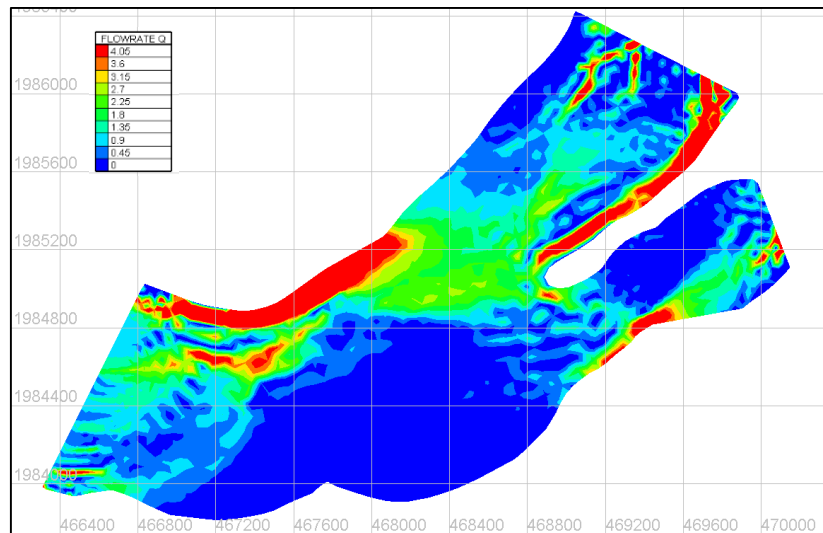


Figura 62 Gasto unitario en m^2/s después de 1 año de la avenida para un gasto de $1400 \text{ m}^3/\text{s}$

La evolución de fondo (figura 63) muestra que en el río Carrizal se sigue presentando sedimentación causando la disminución del flujo que conduce.

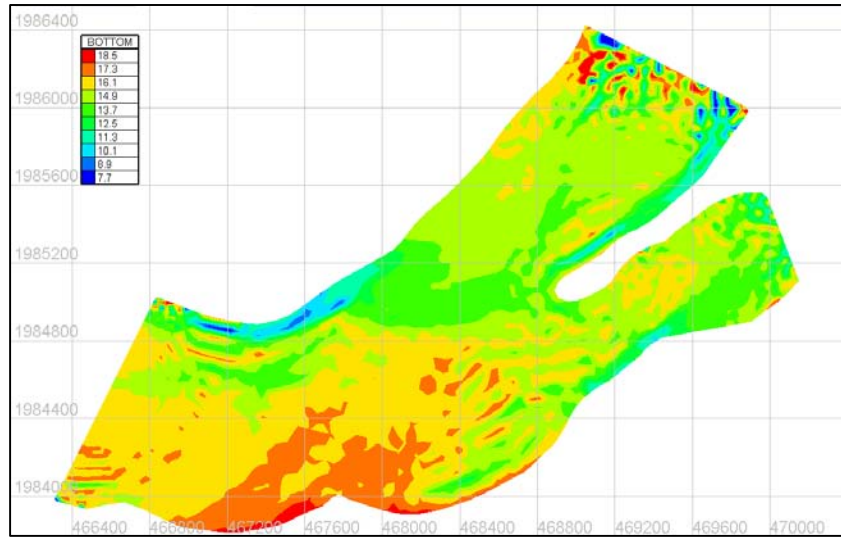


Figura 63 Evolución de fondo después de 1 año de la avenida con un gasto de 1400 m³/s.

La figura 64 muestra que la erosión disminuyó si se compara con la obtenida después de la avenida. En la figura 65 se observa que las zonas de depósito se concentran ahora en la zona donde se presentó erosión después de la avenida y en el cauce del río Carrizal así como en la margen derecha del río Samaria. El balance muestra que el volumen de sedimentos erosionados es aproximadamente de 750,000 m³.

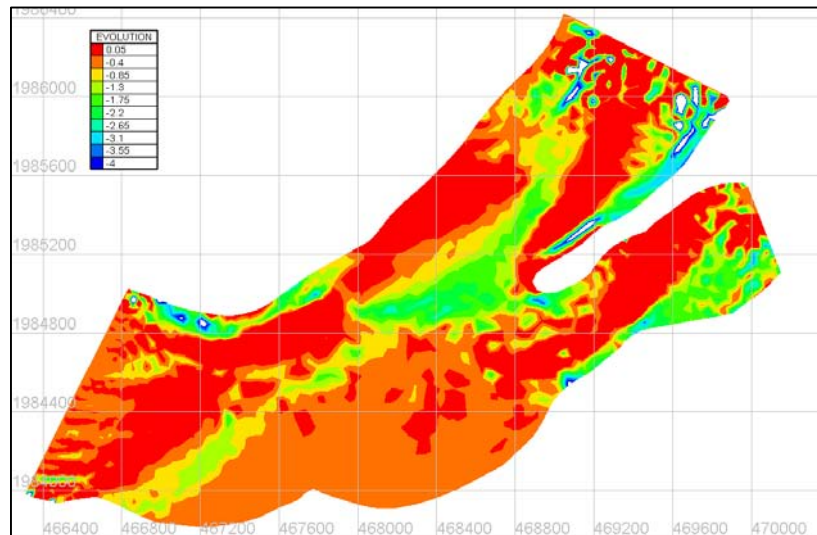


Figura 64 Erosión después de 1 año de la avenida con un gasto de 1400 m³/s.

Como gastos sólidos se tiene, de entrada 0.23 m³/s y de salida, en el río Carrizal 0.07 m³/s y el río Samaria 0.16 m³/s. La distribución de gastos indica que el río Carrizal transporta el 29% del gasto.

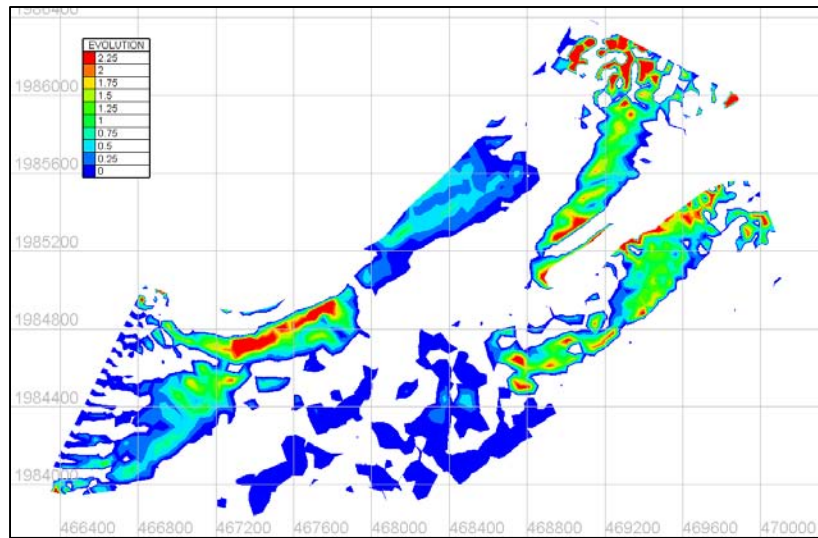


Figura 65 Zonas de depósito después de 1 año de la avenida con un gasto de 1400 m³/s.

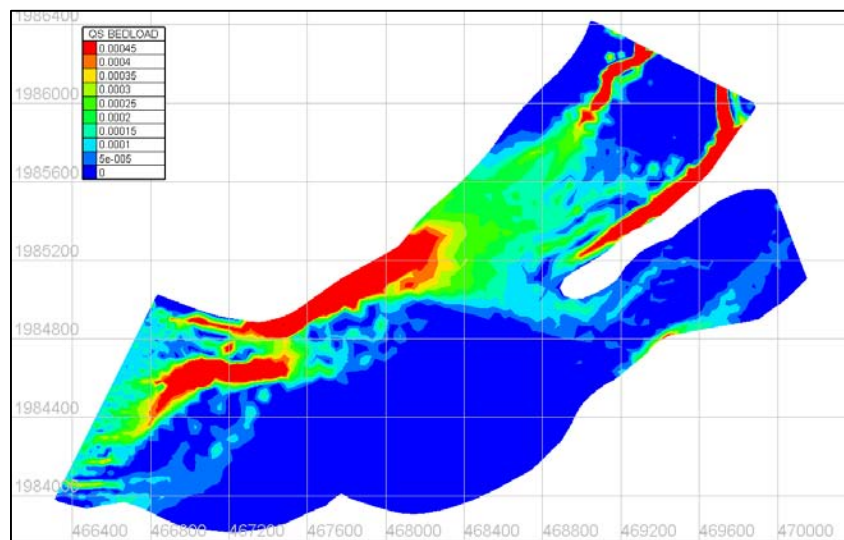


Figura 66 Gasto sólido unitario m²/s después de 1 año de la avenida con un gasto de 1400 m³/s.

Según las modelaciones realizadas la presencia de la estructura de control sobre el río Carrizal causó una disminución de la velocidad en el cauce provocando sedimentación que afecta la capacidad de conducción haciendo que el río Samaria deba conducir un mayor gasto.

4.6.2.4 Simulación con la presencia del espigón

En 2014 se construyó un espigón sobre la margen derecha a 2.7 km aguas arriba de la estructura de control, para observar su efecto en el comportamiento de la bifurcación, la simulación se retomó a la mitad del periodo que se desarrolla en el apartado 4.6.2.1, es decir, se corrió un año con sedimentos sin la presencia del espigón y con la geometría del fondo obtenida se incluyó el espigón y se continuó la simulación por un año más con un gasto de 1400 m³/s.

En la figura 67 se observa que las zonas de depósito se concentran en el cauce del río Samaria y en la zona cercana al espigón, así como en la margen derecha del río Carrizal. En cuanto a las zonas de depósito (figura 68) se observa que ambos cauces sufren sedimentación. Comparado con los resultados obtenidos sin la presencia del espigón se observa que la erosión en el cauce del Samaria se incrementa incluso se observa la presencia de un canal y para el caso de la sedimentación esta es mayor e inclusive se notan la formación de islas justo en el punto donde se bifurca el Mezcalapa.

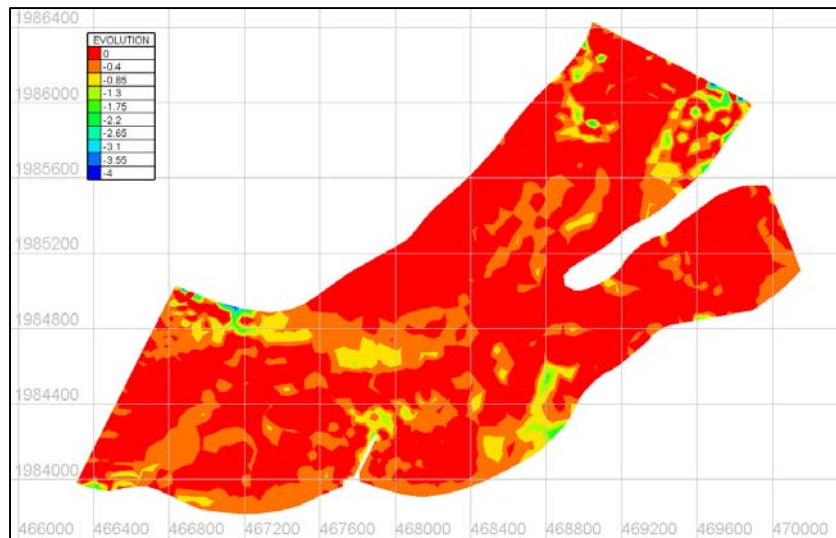


Figura 67 Zonas de erosión con espigón y gasto de 1400 m³/s.

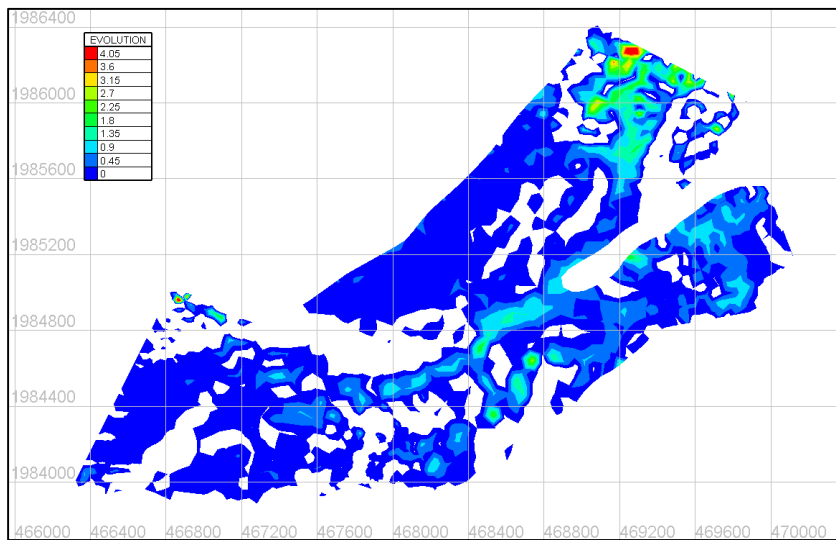


Figura 68 Zonas de depósito con espigón y gasto de 1400 m³/s.

El balance muestra que el volumen de sedimentos depositados es aproximadamente de 900,000 m³ mayor en 300,000 m³ que sin el espigón.

Como gastos sólidos se tiene, de entrada 0.07 m³/s y de salida, en el río Carrizal cercano a 0 m³/s y el río Samaria 0.04 m³/s. La distribución de gastos indica que el

río Carrizal transporta el 42% del gasto que comparado con el obtenido sin la presencia del espigón este se incrementa en un 3%.

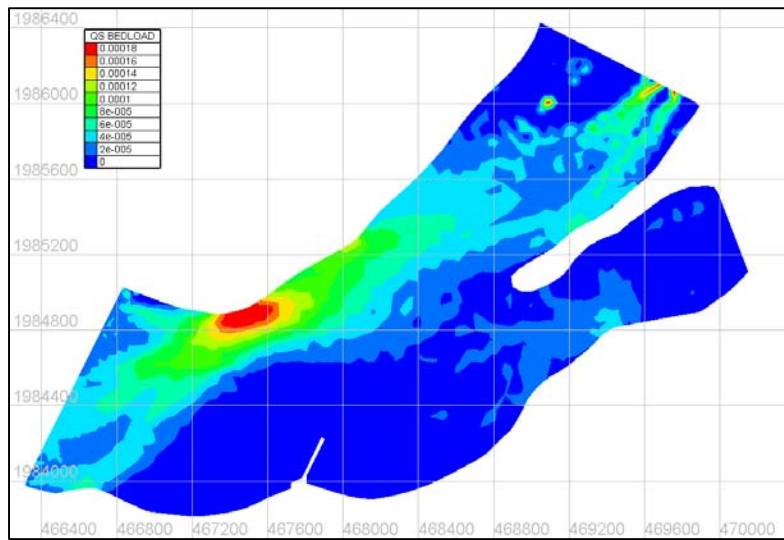


Figura 69 Gasto sólido unitario m²/s con espigón y gasto de 1400 m³/s.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

Los escenarios simulados en el modelo TELEMAC-MASCARET muestran los efectos de la intervención antrópica en los procesos morfológicos que definen el comportamiento y la forma de la bifurcación del Mezcalapa.

El modelo bidimensional aplicado en el escenario 1 permitió representar el incremento de gasto en el cauce del río Carrizal, tal como las mediciones muestran, hay un cambio en la distribución de gastos que según el modelo se debe al incremento de la sedimentación en el río Samaria. En el escenario se observó que después de dos años de simulación hubo un incremento en la capacidad de flujo del río Carrizal, que continua la tendencia al presentarse la avenida de 1999 y después de un año disminuye. Durante el periodo de simulación se depositaron sedimentos aproximadamente a una tasa de $200,000 \text{ m}^3/\text{año}$.

Con respecto al escenario 2 se observa una disminución del gasto transportado por el Carrizal; sin embargo los gastos sólidos se incrementaron. Se aprecia erosión durante todo el periodo simulado, presentándose valores de $1.5 \text{ hm}^3/\text{año}$ a los dos años y después de un año de la avenida de $2.7 \text{ hm}^3/\text{año}$.

El escenario 3, muestra que los efectos de la estructura de control son la sedimentación en el cauce del río Carrizal aunque al final del periodo simulado se observa que la erosión en el Samaria es de importancia alcanzando valores de $750,000 \text{ m}^3$ de material erosionado.

En el escenario 3 se incrementó el tiempo de la avenida de 10 a 20 días manteniendo el gasto de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ con estas condiciones se obtuvo que para gastos pequeños el río Carrizal es incapaz de conducir gasto debido a las zonas de depósito en su cauce, resultado del arrastre de sedimentos durante la avenida, por lo que se debe prestar atención al funcionamiento de la estructura pues una avenida lo suficientemente grande podría alterar el comportamiento de la bifurcación.

La presencia del espigón, nos hace notar que influye no solo en el comportamiento de la distribución de gastos, sino en la distribución del sedimento, como el modelo realizado lo indica, el espigón causó un incremento en el depósito de sedimentos sobre el cauce del río Carrizal, efecto que posiblemente afecte el comportamiento de ambos cauces aguas abajo.

Para lograr una mejor caracterización del patrón evolutivo de la bifurcación, es necesario realizar estudios más detallados que el presentado en este trabajo. Además de considerar las características del material de las márgenes que permitan estimar el efecto sobre la margen izquierda, ya que esta margen presenta altos valores de esfuerzo cortante y por consiguiente, erosión, que se ha presentado en la bifurcación del Mezcalapa.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- CONAGUA. (2013). *Plan Hídrico Integral de Tabasco*.
- CONAGUA. (2015). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)*. Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>
- Cruz, J. A. (2003). *Estudio de una estructura de control en una bifurcación de una corriente natural*. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F.
- Jimenez C, A., y Berezowsky V, M. (1991). *Estudio en modelo matemático del Fenomeno de Arrastre y Depósito de Sedimentos del Río Mezcalapa-Samaria. Informe Técnico del Instituto de Ingeniería*. UNAM, México, D.F.
- Jiménez Castañeda, A. A., Gracia Sánchez, J., Berezowsky Verduzco, M., & Martínez Cuaxospa, J. (2007). *Estudio de la bifurcación de un río con modelación numérica*. Series del Instituto de Ingeniería. UNAM, México, D.F.
- Maza, J. A., y García, M. (1996). *Transporte de sedimentos. Capitulo 10 del Manual de Ingeniería de Ríos*. Series del Instituto de Ingeniería. UNAM, México, D.F.
- Millán, K. (2014). *Estudio para determinar las leyes de descarga de la estructura de control El Macayo*. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM México D.F.
- Rivera Trejo, F., Quintanilla Cobián, A., y Quiroga, L. A. (2004). *Estudio del comportamiento de los sedimentos en el sistema de los ríos Mezcalapa, Samaria, Carrizal, Estado de Tabasco. Segunda Etapa*. Villahermosa.
- Rivera Trejo, F., Vázquez Rodríguez, J. M., Mendoza Palacios, J. d., y Estrada Botello, M. (2008). *Alteración que presenta la distribución de sedimento en una bifurcación de un río de planicie debido a cambios morfológicos inducidos. Estudio de campo. Ingeniería Hidráulica en México*, 49-63.
- UJAT, U. (2004). *Estudio del Comportamiento de los Sedimentos en el Sistema de los ríos Mezcalapa-Samaria-Carrizal*. Tabasco.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Sistema Hidroeléctrico sobre el cauce del río Grijalva.....	2
Figura 2 Bifurcación del río Mezcalapa en Samaria y Carrizal	3
Figura 3 Fotografías de la bifurcación del río Mezcalapa – Samaria - Carrizal	4
Figura 4 Erosión marginal (2004-2015)	5
Figura 5 Escotadura sobre el río Carrizal.	5
Figura 6 Estructura de control sobre el río Carrizal.....	5
Figura 7 Curva elevaciones gastos para la estación González (Cruz, 2003).	9
Figura 8 Curva elevaciones gastos para la estación Samaria (Cruz, 2003).	9
Figura 9 Distribución de gastos en la Bifurcación en 1997 (CONAGUA, 2015)	9
Figura 10 Distribución de gastos en la Bifurcación en 2004 (CONAGUA, 2015)	9
Figura 11 Ley de descarga de la estructura de control el Macayo con compuertas totalmente abiertas.	10
Figura 12 Ubicación de las secciones de medición.....	10
Figura 13 Curva Granulométrica estación Samaria	11
Figura 14 Curva Granulométrica estación Mezcalapa.	11
Figura 15 Curva Granulométrica estación Carrizal.	11
Figura 16 Curva de Gasto sólido en la estación Mezcalapa (UJAT, 2004)	12
Figura 17 Curva de Gasto sólido en la estación Samaria (UJAT, 2004).....	12
Figura 18 Curva de Gasto sólido en la estación Macayo (UJAT, 2004)	12
Figura 19 Vista en planta de las secciones importadas a Hec-Ras.....	14
Figura 20 Editor de sección transversal.....	14
Figura 21 Ingreso de Datos Hidrológicos.....	15
Figura 22 Perfil de la superficie libre del agua para el río Mezcalapa y Carrizal, 2004.	16
Figura 23 Perfil de la superficie libre del agua para el río Mezcalapa y Samaria, 2004.	16
Figura 24 Distribución de gastos en la bifurcación, año 2004.....	16
Figura 25 Simulación durante 6 meses con un gasto de 1400 m ³ /s.....	18
Figura 26 Ajuste de las ecuaciones de transporte.	18
Figura 27 Malla empleada en la simulación, topografía de 1997.	22
Figura 28 Velocidades calculadas para un gasto de 1400 m ³ /s, año 1997.	23
Figura 29 Gasto unitario para un gasto de 1400 m ³ /s, año 1997.....	23
Figura 30 Erosión después de 2 años de simulación con un gasto de 1400 m ³ /s.	24
Figura 31 Zonas de depósito después de 2 años de simulación con un gasto de 1400 m ³ /s.	24
Figura 32 Gasto sólido unitario en m ² /s después de 2 años de simulación con un gasto de 1400 m ³ /s.	25
Figura 33 Erosión después de la avenida con un gasto de 4000 m ³ /s.....	26
Figura 34 Zonas de depósito después de la avenida con un gasto de 4000 m ³ /s.....	26
Figura 35 Gasto sólido unitario en m ² /s después de la avenida.....	27
Figura 36 Gasto unitario en m ² /s después de 1 año de la avenida con un gasto de 1400 m ³ /s	27
Figura 37 Erosión después 1 año de la avenida con un gasto de 1400 m ³ /s.....	28
Figura 38 Zonas de depósito después de 1 año de la avenida con un gasto de 1400 m ³ /s	28
Figura 39 Gasto sólido unitario en m ² /s después de 1 año de la avenida con un gasto de 1400 m ³ /s.	29
Figura 40 Malla empleada para la simulación, topografía de 2004.	29
Figura 41 Velocidades calculadas para un gasto de 1400 m ³ /s, año 2004.	30
Figura 42 Gasto unitario para un gasto de 1400 m ³ /s, año 2004.	30
Figura 43 Erosión después de 2 años de simulación con un gasto de 1400 m ³ /s.....	31
Figura 44 Zonas de depósito después de 2 años de simulación con un gasto de 1400 m ³ /s	31

Figura 45 Gasto sólido unitario en m^2/s después de 2 años de simulación con un gasto de $1400 m^3/s$	32
Figura 46 Erosión después de la avenida.....	33
Figura 47 Zonas de depósito después de la avenida.....	33
Figura 48 Gasto sólido unitario en m^2/s después de la avenida.....	33
Figura 49 Gasto unitario m^2/s después de 1 año de la avenida para un gasto de $1400 m^3/s$	34
Figura 50 Evolución del fondo después de 1 año de la avenida con un gasto de $1400 m^3/s$	34
Figura 51 Erosión después de 1 año de la avenida con un gasto de $1400 m^3/s$	35
Figura 52 Zonas de depósito después de 1 año de la avenida con un gasto de $1400 m^3/s$	35
Figura 53 Gasto sólido unitario en m^2/s después de 1 año de la avenida con un gasto de $1400 m^3/s$	36
Figura 54 Velocidad del modelo hidrodinámico para un gasto de $1400 m^3/s$, con estructura de control.....	36
Figura 55 Gasto líquido unitario en m^2/s para un gasto de $1400 m^3/s$, con estructura de control...	37
Figura 56 Erosión para un gasto de $1400 m^3/s$ después de 2 años de simulación.....	37
Figura 57 Zonas de depósito para un gasto de $1400 m^3/s$ después de 2 años de simulación.....	38
Figura 58 Gasto sólido unitario en m^2/s después de 2 años de simulación.....	38
Figura 59 Erosión después de la avenida.....	39
Figura 60 Zonas de depósito después de la avenida.....	39
Figura 61 Gasto sólido unitario en m^2/s después de la avenida.....	40
Figura 62 Gasto unitario en m^2/s después de 1 año de la avenida para un gasto de $1400 m^3/s$	40
Figura 63 Evolución de fondo después de 1 año de la avenida con un gasto de $1400 m^3/s$	41
Figura 64 Erosión después de 1 año de la avenida con un gasto de $1400 m^3/s$	41
Figura 65 Zonas de depósito después de 1 año de la avenida con un gasto de $1400 m^3/s$	42
Figura 66 Gasto sólido unitario m^2/s después de 1 año de la avenida con un gasto de $1400 m^3/s$..	42
Figura 67 Zonas de erosión con espigón y gasto de $1400 m^3/s$	43
Figura 68 Zonas de depósito con espigón y gasto de $1400 m^3/s$	43
Figura 69 Gasto sólido unitario m^2/s con espigón y gasto de $1400 m^3/s$	44