



**CORPORACION AUTONOMA REGIONAL
DEL VALLE DEL CAUCA**
**ESTUDIO DE LA DINAMICA DEL COMPLEJO DE
HUMEDALES EN EL VALLE ALTO DEL RIO CAUCA**
Convenio Interadministrativo 0144 de 2008



MODELACION MATEMATICA DEL SISTEMA RIO CAUCA - HUMEDALES



***Humedales Guinea, Guarinó, El Avispal, Chiquique, Videles,
Bocas de Tuluá, La Bolsa, La Herradura y Cementerio***

VOLUMEN I

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA DE RECURSOS
NATURALES Y DEL AMBIENTE**

Santiago de Cali, Ooctubre de 2009



**CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA
DIRECCIÓN TÉCNICA AMBIENTAL**

Convenio Interadministrativo 144 de 2008
entre la CVC y la Universidad del Valle

**MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL SISTEMA RÍO
CAUCA - HUIMEDALES**

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS
NATURALES Y DEL AMBIENTE
GRUPO DE HIDRÁULICA FLUVIAL Y MARÍTIMA - HIDROMAR

Santiago de Cali, Agosto de 2009

El presente estudio fue realizado en el marco del Convenio Interadministrativo 144 de 2008 suscrito entre la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC y la Universidad del Valle.

Este informe fue elaborado por el Grupo de Hidráulica Fluvial y Marítima – HIDROMAR, adscrito a la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle con la participaron de los siguientes profesionales:

Ing. Carlos Alberto Ramírez Callejas	Director del Proyecto
Ing. José Luis García Vélez	Subdirector del Proyecto
Ing. Ricardo Andrés Bocanegra Vinasco	Ingeniero del Grupo de Hidrodinámica
Ing. Santiago Santacruz Salazar	Ingeniero del Grupo de Hidrodinámica

Personal Auxiliar:

En el presente estudio participaron en calidad de Auxiliares de Ingeniería los estudiantes, Yeni Potes Sánchez e Iván Jojoa, quienes cursan los últimos semestres de Ingeniería Agrícola y Civil, respectivamente.

Debe destacarse la colaboración de los profesionales y técnicos de la CVC quienes participaron desde la fase inicial del Estudio, mediante la concepción de procedimientos, el suministro de información y la revisión de informes. El Comité de Seguimiento de CVC estuvo integrado principalmente por:

Biól. Maria Isabel Salazar Ramírez	Coordinadora General
Ing. María Clemencia Sandoval García	Comité Técnico
Ing. Álvaro Calero Aguado	Comité Técnico
Biól. Milton A. Reyes Gutiérrez	Comité Técnico
Biól. Pedro Nel Montoya Montaya	Comité Técnico

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1.1
2.	ANTECEDENTES	2.1
3.	MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL RÍO CAUCA Y SUS PRINCIPALES HUMEDALES	3.1
3.1	Red de modelación	3.1
3.2	Fronteras del modelo	3.3
3.2.1	Frontera aguas arriba	3.3
3.2.2	Fronteras internas	3.3
3.2.3	Frontera aguas abajo	3.3
3.3	Malla computacional	3.8
3.4	Calibración	3.8
4.	MODELACION DE CRECIENTES DEL RIO CAUCA CON PERIODOS DE RETONO DE 10, 25, 30 Y 100 AÑOS	4.1
4.1	Determinación de caudales extremos	4.1
4.2	Modelación de crecientes con periodos de retorno de 10, 25, 30 y 100 años	4.2
5.	MODELACION DE ESCENARIOS PARA DETERMINAR LA FRANJA FORESTAL PROTECTORA	5.1
5.1	Escenarios planteados	5.1
5.1.1	Escenario No. 1	5.1
5.1.2	Escenario No. 2	5.2
5.1.3	Escenario No. 3	5.4
5.1.4	Escenarios No. 4 al 7	5.6
5.1.5	Escenario No. 8	5.7
5.2	RESULTADOS DE LA MODELACION	5.7
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	6.1
6.1	Conclusiones	6.1
6.1.1	Modelo matemático	6.1
6.1.2	Modelación de escenarios	6.2
6.2	Recomendaciones	6.3

BIBLIOGRAFÍA

LISTADO DE TABLA

Cuadro 3.1	Características de los tributarios modelados como brazos laterales	3.2
Cuadro 3.2	Fronteras definidas en la modelación tramo La Balsa – La Virginia	3.5
Cuadro 3.3	Factores de resistencia definidos en los sectores próximos a las estaciones hidrométricas	3.10
Cuadro 4.1	Caudales máximos correspondientes a eventos con diferentes períodos de retorno en el río Cauca y sus principales tributarios	4.2
Cuadro 4.2	Caudales introducidos en las fronteras del modelo hidrodinámico para la modelación de crecientes con períodos de retorno de 10, 25, 30 y 100 años	4.3
Cuadro 5.1	Escenarios planteados para establecer criterios para la determinación del ancho óptimo de la franja forestal protectora	5.2
Cuadro 5.2	Características geométricas de los sectores en los que se dividió el cinturón meándrico del río Cauca	5.5

LISTADO DE FIGURAS

Figura 3.1	Tipos de frontera y esquematización del río Cauca, los humedales y las planicies de inundación	3.4
Figura 3.2	Calibración del modelo hidrodinámico, estación La Bolsa período: octubre – diciembre 1998	3.11
Figura 3.3	Calibración del modelo hidrodinámico, estación Hormiguero período: octubre – diciembre 1998	3.13
Figura 3.4	Calibración del modelo hidrodinámico, estación: Juanchito período: octubre – diciembre 1998	3.15
Figura 3.5	Calibración del modelo hidrodinámico, estación: Mediacanoa período: octubre – diciembre 1998	3.17
Figura 3.6	Calibración del modelo hidrodinámico, estación: Guayabal período: octubre – diciembre 1998	3.19
Figura 3.7	Calibración del modelo hidrodinámico, estación: La Victoria período: octubre – diciembre 1998	3.21
Figura 3.8	Calibración del modelo hidrodinámico, estación: Anacaro período: octubre – diciembre 1998	3.23
Figura 3.9	Calibración del modelo hidrodinámico – planicies de inundación, estación: La Bolsa período: enero – marzo 1999	3.25
Figura 3.10	Calibración del modelo hidrodinámico - planicies de inundación estación: Hormiguero período: enero – marzo 1999	3.27
Figura 3.11	Calibración del modelo hidrodinámico - planicies de inundación estación: Juanchito período: enero – marzo 1999	3.29
Figura 3.12	Calibración del modelo hidrodinámico - planicies de inundación estación: Mediacanoa período: enero – marzo 1999	3.31
Figura 3.13	Calibración del modelo hidrodinámico - planicies de inundación estación: Guayabal período: enero – marzo 1999	3.33
Figura 3.14	Calibración del modelo hidrodinámico - planicies de inundación estación: La Victoria período: enero – marzo 1999	3.35
Figura 3.15	Calibración del modelo hidrodinámico - planicies de inundación estación: Anacaro período: enero – marzo 1999	3.37
Figura 4.1	Niveles de agua del río Cauca para crecientes con diferentes Períodos de retorno, tramo Km 25 – Km 170	4.6

Figura 4.2	Niveles de agua del río Cauca para crecientes con diferentes Períodos de retorno, tramo Km 170 – Km 310	4.7
Figura 4.3	Niveles de agua del río Cauca para crecientes con diferentes Períodos de retorno, tramo Km 310 – Km 440	4.8
Figura 4.4	Diferencia entre los niveles de agua calculados para las crecientes con Trs 10, 25 y 30 años en comparación con la creciente Tr de 100 años	4.9
Figura 5.1	Características geométricas de los diques para el control de inundaciones	5.3
Figura 5.2	Geometría típica de las secciones utilizadas en los escenarios 1, 4, 5, 6 y 7	5.3
Figura 5.3	Geometría típica de las secciones utilizadas en el escenario 2	5.4
Figura 5.4	Geometría típica de las secciones utilizadas en el escenario 3	5.4
Figura 5.5	Cinturón meandrítico del río Cauca. Tramo K27+000 – K150+000	5.10
Figura 5.6	Cinturón meandrítico del río Cauca. Tramo K150+000 – K240+000	5.11
Figura 5.7	Cinturón meandrítico del río Cauca. Tramo K240+000 – K340+000	5.12
Figura 5.8	Cinturón meandrítico del río Cauca. Tramo K340+000 – K420+000	5.13
Figura 5.9	Niveles de agua del río Cauca calculados con el modelo matemático considerando diferentes anchos de berma, estación: La Bolsa Período: Enero – Marzo 1999	5.14
Figura 5.10	Niveles de agua del río Cauca calculados con el modelo matemático considerando diferentes anchos de berma, estación: Hormiguero Período: Enero – Marzo 1999	5.15
Figura 5.11	Niveles de agua del río Cauca calculados con el modelo matemático considerando diferentes anchos de berma, estación: Juanchito Período: Enero – Marzo 1999	5.16
Figura 5.12	Niveles de agua del río Cauca calculados con el modelo matemático considerando diferentes anchos de berma, estación: Mediacanoa Período: Enero – Marzo 1999	5.17
Figura 5.13	Niveles de agua del río Cauca calculados con el modelo matemático considerando diferentes anchos de berma, estación: Guayabal Período: Enero – Marzo 1999	5.18
Figura 5.14	Niveles de agua del río Cauca calculados con el modelo matemático considerando diferentes anchos de berma, estación: La Victoria Período: Enero – Marzo 1999	5.19

Figura 5.15	Niveles de agua del río Cauca calculados con el modelo matemático considerando diferentes anchos de berma, estación: Anacaro Período: Enero – Marzo 1999	5.20
Figura 5.16	Niveles de agua máximos en el río Cauca para los caudales de la creciente del año 1999 considerando diferentes localizaciones del dique de protección, tramo Km 25 – Km 170	5.21
Figura 5.17	Niveles de agua máximos en el río Cauca para los caudales de la creciente del año 1999 considerando diferentes localizaciones del dique de protección tramo Km 170 – Km 310	5.22
Figura 5.18	Niveles de agua máximos en el río Cauca para los caudales de la creciente del año 1999 considerando diferentes localizaciones del dique de protección tramo Km 310 – Km 410	5.23
Figura 5.19	Niveles de agua del río Cauca considerando diferentes crecientes y diferentes anchos de berma, tramo Km 25 – Km 170	5.24
Figura 5.20	Niveles de agua del río Cauca considerando diferentes crecientes y diferentes anchos de berma, tramo Km 170 – Km 310	5.25
Figura 5.21	Niveles de agua del río Cauca considerando diferentes crecientes y diferentes anchos de berma, tramo Km 310 – Km 445	5.26
Figura 5.22	Niveles de agua del río Cauca para una creciente con un período de retorno de 10 años, tramo Km 25 – Km 165	5.27
Figura 5.23	Niveles de agua del río Cauca para una creciente con un período de retorno de 10 años, tramo Km 170 – Km 310	5.28
Figura 5.24	Niveles de agua del río Cauca para una creciente con un período de retorno de 10 años, tramo Km 315 – Km 440	5.29
Figura 5.25	Niveles de agua del río Cauca para una creciente con un período de retorno de 25 años considerando diferentes anchos de berma, tramo Km 25 – Km 170	5.30
Figura 5.26	Niveles de agua del río Cauca para una creciente con un período de retorno de 25 años considerando diferentes anchos de berma, tramo Km 170 – Km 310	5.31
Figura 5.27	Niveles de agua del río Cauca para una creciente con un período de retorno de 25 años considerando diferentes anchos de berma, tramo Km 310 – Km 445	5.32
Figura 5.28	Niveles de agua del río Cauca para una creciente con un período de retorno de 30 años considerando diferentes anchos de berma, tramo Km 25 – Km 170	5.33

Figura 5.29	Niveles de agua del río Cauca para una creciente con un período de retorno de 30 años considerando diferentes anchos de berma, tramo Km 170 – Km 310	5.34
Figura 5.30	Niveles de agua del río Cauca para una creciente con un período de retorno de 30 años considerando diferentes anchos de berma, tramo Km 310 – Km 445	5.35
Figura 5.31	Niveles de agua del río Cauca para una creciente con un período de retorno de 100 años considerando diferentes anchos de berma, tramo Km 25 – Km 170	5.36
Figura 5.32	Niveles de agua del río Cauca para una creciente con un período de retorno de 100 años considerando diferentes anchos de berma, tramo Km 170 – Km 310	5.37
Figura 5.33	Niveles de agua del río Cauca para una creciente con un período de retorno de 100 años considerando diferentes anchos de berma, tramo Km 310 – Km 440	5.38

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

El río Cauca es uno de los ríos más importantes del país. Tiene una longitud total de 1350 Km y una cuenca hidrográfica de aproximadamente 63.300 Km². La zona de interés en el presente estudio corresponde al tramo comprendido entre la represa de La Salvajina, en el departamento del Cauca, y la Virginia, en el departamento de Risaralda, de unos 450 Km de longitud,. Los ríos afluentes en esta zona se pueden clasificar, en general, como torrentes, de pendiente fuerte, que presentan crecientes considerables de corta duración y aportan al Río Cauca volúmenes significativos de sedimentos y materiales de arrastre, especialmente durante los períodos de invierno. Los afluentes más destacados, son en su orden los ríos La Vieja, Palo, Risaralda, Ovejas, Timba, Tuluá, Bugalagrande, Guachal, Jamundí, Amaime, Claro y Riofrío. En la Figura 1.1 se presentan los principales tributarios del río Cauca y las estaciones hidrométricas localizadas en el tramo de estudio.

El río Cauca a su paso por el departamento del Valle del Cauca corre por suelos aluviales, presenta una alta sinuosidad y una gran movilidad debido a la evolución y progresión de sus meandros. Esta intensa movilidad origina en muchos casos la estrangulación de los cuellos de los meandros formando madre viejas. Estos humedales constituyen ecosistemas altamente productivos que sustentan grandes concentraciones de aves, mamíferos, reptiles, anfibios, peces y especies de invertebrados, ofrecen abundantes recursos naturales a la sociedad, ayudan a regular las crecientes, cumplen un rol importante en los ciclos de la materia, contribuyen a mejorar la calidad del agua mediante la retención de nutrientes, sedimentos y contaminantes.

Actualmente los humedales figuran entre los ecosistemas más amenazados del planeta debido a su continua desecación, contaminación y sobreexplotación de sus recursos por causas como la tala de árboles, la expansión de la frontera agrícola, el vertimiento de aguas residuales, el uso de los suelos de los linderos del humedal para ganadería y agricultura, el crecimiento acelerado de vegetación acuática y la inexistencia de zonas de amortiguamiento respecto de los cultivos.

La franja forestal protectora de un río corresponde a una parte de la ribera, adyacente al cauce que debe estar protegida con vegetación apropiada para retener el nivel freático y tener un mínimo atractivo comercial. Esta franja cumple importantes funciones por cuanto contribuye a generar condiciones ambientales favorables para el sostenimiento de la biodiversidad y la regularización de la hidrología. En la actualidad la franja foresta protectora de las corrientes naturales presenta diversos conflictos debido a que ha sido invadida o adquirida ilegalmente y ha sido destinada a otros usos.

Con el fin de plantear soluciones a la problemática de los humedales y de la franja forestal protectora es necesario adelantar estudios que permitan establecer su estado actual y su comportamiento hidrodinámico. El presente informe presenta los resultados más relevantes de la modelación matemática realizada con los objetivos de estudiar la interacción entre el río Cauca y los humedales medidos en campo y establecer criterios para determinar el ancho de la franja forestal protectora (franja comprendida entre la margen del río y el dique) del río Cauca. Los resultados de esta modelación podrán ser utilizados por la CVC para realizar la actualización del acuerdo 023 de 1979, el cual reglamenta la ubicación de

los diques riberaños de protección. Este informe se desarrolló en el marco del convenio celebrado entre la CVC y la Universidad del Valle denominado “Estudio de la Dinámica del Complejo de Humedales en el Valle Alto del Río Cauca mediante Modelación Matemática para su Ordenamiento, Manejo y Conservación”.

En el presente estudio se realizó la modelación matemática del sistema río Cauca – humedales en el departamento del Valle del Cauca, en el tramo (de 425 km de longitud) comprendido entre las estaciones hidrométricas La Bolsa y La Virginia con el fin de plantear y analizar diferentes escenarios considerando la localización de los diques marginales de protección a diferentes espaciamientos del cauce principal del río Cauca y evaluar los niveles de agua en el río y la planicie cuando se presentan crecientes de períodos de retorno de 10, 25, 30 y 100 años.

El modelo matemático del sistema Río Cauca – humedales está basado en el modelo implementado durante los estudios del Proyecto de Caracterización y Modelación del Río Cauca PMC (CVC – Universidad del Valle, 2001, 2005, 2007) y las batimetrías realizadas en el río Cauca (tramo La Balsa – La Bolsa, año 2005) y de los humedales (efectuadas en desarrollo del presente estudio).

La optimización efectuada consistió en: (i) la inclusión en el sistema modelado de los humedales medidos en este proyecto (ver volumen I) y (ii) la utilización de las secciones medidas en el proyecto PMC entre los meses de septiembre y noviembre de 2005 para representar el tramo comprendido entre la estación La Balsa (frontera aguas arriba) y La Bolsa.

En el Capítulo 2 de este informe se presentan los principales antecedentes relacionados con la modelación matemática del río Cauca en su valle alto y los principales análisis realizados sobre la delimitación de la Franja Forestal Protectora.

El Capítulo 3 presenta el procedimiento implementado para la construcción del modelo matemático del río Cauca; se hace énfasis en la optimización realizada, las esquematizaciones adoptadas y los principales parámetros de calibración que permitieron que el modelo realizará una adecuada descripción del comportamiento hidrodinámico del río Cauca y sus tributarios.

El Capítulo 4 describe la metodología implementada para modelar las crecientes del río Cauca con períodos de retorno de 10, 25, 30 y 100 años; se incluye la determinación de los caudales correspondientes a estos eventos, la información suministrada en las fronteras y un análisis de los resultados obtenidos.

El capítulo 5 contiene la modelación de diversos escenarios planteados con el objetivo de establecer criterios para la determinación del ancho óptimo de la franja forestal protectora. Se describen los ocho escenarios planteados y se realiza un análisis comparativo de los niveles de agua calculados por el modelo para cada uno de ellos.

El Capítulo 6 presenta las principales conclusiones del estudio desarrollado y algunas recomendaciones tendientes a aumentar la precisión de la información de campo disponible y, por ende, la confiabilidad del modelo.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2. ANTECEDENTES

El río Cauca ha sido modelado en numerosas oportunidades con diferentes objetivos, tales como mejorar el conocimiento de los procesos hidrodinámicos, morfológicos y de calidad de agua que toman lugar en el río, establecer el posible efecto de intervenciones antrópicas y realizar diferentes análisis relacionados con la calidad del agua.

La primera modelación del río Cauca se efectuó en el año 1972 y tenía como principal objetivo establecer la carga orgánica admisible y el tratamiento que debería dársele al agua residual en el tramo Paso de La Bolsa – Paso de la Torre. En 1973, la CVC implementó, con el acompañamiento de la Organización Panamericana de la Salud, un modelo de calidad del agua.

En el período comprendido entre 1977 y 1985 la CVC y la Universidad del Valle desarrollaron el Estudio Morfológico del Río Cauca con la colaboración de Colciencias y el Laboratorio de Hidráulica de Delft. En este estudio se realizó una modelación morfológica con el objetivo de estimar el impacto de la construcción del Proyecto de Regulación del río Cauca; se encontró que en los primeros 3 kilómetros aguas abajo de Salvajina se presentaría, en un lapso de 15 años, una erosión de entre 0.5 y 2.0 m. Con el objetivo de mejorar la calibración alcanzada la investigación recomendó realizar nuevas mediciones hidrométricas, topográficas, granulométricas y del transporte de sedimentos.

En 1988 INGESAM/URLS y EMCALI realizaron la investigación denominada “Simulación de la Calidad del Agua del Río Cauca, Calibración, Verificación y Aplicación”, el cual se desarrolló en el marco del Estudio del Tratamiento de Aguas Residuales para la ciudad de Cali. En esta investigación se implementó el modelo Storm Water Management Model – SWMM para simular el oxígeno disuelto y la DBO en el tramo del Río Cauca comprendido entre Hormiguero y Riofrío. Esta modelación permitió evaluar el impacto que tendría en la calidad del agua del Río Cauca el tratamiento de las aguas residuales y el embalse de Salvajina.

Entre los años 1997 y 2001 la CVC y la Universidad del Valle desarrollaron la Fase I del Proyecto PMC con los objetivos de caracterizar el río Cauca y sus tributarios e implementar un modelo matemático integrado en el tramo Salvajina – La Virginia. Se desarrollaron los modelos hidrodinámico, sedimentológico, morfológico, de advección – dispersión y de calidad del agua, los cuales permitieron simular varios escenarios considerados representativos de las posibles intervenciones que se podrían realizar en el río Cauca. Con el fin de optimizar la modelación efectuada el estudio realizó las siguientes recomendaciones: (i) construir una red geodésica de alta precisión, (ii) modelar las planicies de inundación, (iii) estudiar la composición granulométrica del material del lecho del río Cauca y sus afluentes y (iv) realizar el levantamiento topobatimétrico de los principales tributarios.

Entre los años 2002 y 2005 se ejecutó la segunda fase del proyecto PMC, la cual tuvo como objetivo principal optimizar y realizar aplicaciones de los modelos hidrodinámico, sedimentológico y de calidad del agua construidos durante la primera fase del proyecto. En esta etapa se implementaron varias de las recomendaciones realizadas en la primera fase del proyecto, lo cual permitió mejorar la precisión y confiabilidad de los modelos construidos. Entre los principales resultados alcanzados se tienen la generación de los mapas de inundación de la creciente de 1999 y la estimación del impacto que tendría la construcción de obras de protección contra inundaciones en la hidrodinámica del Río Cauca en el tramo La Balsa – La Virginia. Finalmente, con el fin de optimizar y actualizar el modelo construido, el estudio recomendó realizar nuevas mediciones hidrométricas, topográficas y de transporte de sedimentos, modelar los principales ríos afluentes y estimar del caudal intercambio río – acuífero.

En el período 2003 – 2005 se desarrolló la Fase III del proyecto PMC. En esta fase se optimizó el modelo hidrodinámico del río Cauca y el modelo digital de elevaciones de la planicie aluvial desarrolladas durante la Fase II para el tramo La Balsa - La Virginia y se generaron los mapas de inundaciones originadas por las crecientes del Río Cauca con períodos de retorno de 10, 25, 100 y 500 años y la cartografía de riesgo de inundación en el tramo comprendido entre los municipios de Yumbo y Toro. Esta cartografía fue generada aplicando la metodología simplificada propuesta por la Comunidad Autónoma de Valencia - España.

Con respecto a la Franja Forestal Protectora del río Cauca en su valle alto se han realizado tres estudios principales tendientes a su delimitación y caracterización. El primer estudio, denominado “Caracterización Morfológica e Hidrodinámica del Río Cauca para establecer el Corredor de su Franja Forestal Protectora”, fue desarrollado por el ingeniero Freide Guzmán en el año 2006. En este estudio se realizó una propuesta para establecer el ancho de la franja con base en las especificaciones definidas en los POTs de varios municipios y los resultados de una simulación realizada utilizando el modelo matemático implementado en el Proyecto PMC.

En el año 2006 la Universidad del Tolima y la CVC desarrollaron el estudio denominado “Construcción de una Propuesta de Corredor Biológico en el Bosque Seco Tropical a través del Análisis de los Remanentes de Bosque y Humedales y el Establecimiento y Consolidación de la Franja Protectora del Río Cauca”. En este estudio se realizó un inventario de los relictos de bosque seco tropical existentes en la Franja Forestal, se identificó el número de relictos, el municipio en el que están localizados, el área de cobertura y su situación político – administrativa. La investigación concluyó que aproximadamente el 32 % de la franja corresponde a espejo de agua y madre viejas, un 24 % corresponde a pastos naturales que se explotan en ganadería tradicional, un 9 % está cubierto por bosques naturales y el restante 35 % está dedicado a cultivos agrícolas y pastos manejados, lo cual significa que cerca del 60 % de la franja forestal protectora del río Cauca presenta conflictos de uso.

En el año 2007 se desarrolló en la Universidad del Valle la tesis de pregrado “Determinación de la Franja Forestal Protectora del río Cauca tramo La Bolsa – Juanchito”.

En este estudio se determinó el ancho de la franja forestal protectora entre las estaciones La Bolsa y Juanchito con base en información recopilada de las características del río Cauca, el análisis del Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables (C.R.N.R.) y una modelación matemática del río utilizando el modelo Hec Ras que permitió calcular los niveles de agua correspondientes a los caudales máximos anuales de los últimos 15 años.

Adicionalmente, en el año 1979 la CVC expidió el acuerdo 023, en el cual establece normas para la ubicación de los diques marginales de protección; este acuerdo incluye algunos lineamientos generales tendientes a conservar el equilibrio ecológico al mantener integradas al río el mayor número de madrevejas y ciénagas; debido a esto, en los tramos en los cuales existen humedales el acuerdo contempla que los diques deben localizarse de tal forma que éstos no queden aislados del río, de acuerdo con un análisis de estabilidad de orillas y con criterios conservacionistas.

CAPÍTULO 3

MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL RÍO CAUCA Y SUS PRINCIPALES HUMEDALES

3. MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL RÍO CAUCA Y SUS PRINCIPALES HUMEDALES

Se implementó un modelo matemático del río Cauca, sus humedales y la planicie de inundación en el tramo de 417 kilómetros de longitud en el departamento del Valle del Cauca comprendido entre las estaciones hidrométricas de La Balsa, al sur en límites con el departamento del Cauca, y el municipio de La Virginia, al norte en el departamento de Risaralda (muy próximo al límite con el departamento del Valle del Cauca). En el Esquema 1 se presentan los principales humedales del río Cauca localizados en el departamento del Valle del Cauca.

El modelo matemático está basado en el modelo construido en desarrollo del proyecto de caracterización y modelación matemática del río Cauca, en el período 1999 – 2007 (CVC, Universidad del Valle, 2001a, 2005, 2007a).

La gran dinámica espacial y temporal del río Cauca a su paso por el departamento del Valle del Cauca se refleja en los procesos de agradación y degradación del lecho y en su movilidad horizontal, con formación de meandros que evolucionan hasta, en muchos casos, producir cortes originando cauces abandonados o madre viejas. Debido a esto es necesario actualizar periódicamente la información de entrada al modelo, representativa de las condiciones físicas y topobatemétricas del cauce principal del río Cauca, los ríos afluentes y las planicies de inundación. El modelo construido en el proyecto PMC se basó en la batimetría detallada efectuada en el año 2000. Para el presente estudio se utilizó la información topobatemétrica levantada en el año 2005 durante la Fase III del proyecto PMC en el tramo de 52 kilómetros de longitud comprendido entre las estaciones La Balsa y la Bolosa, sector en el cual el río experimenta un cambio importante en su pendiente al ingresar al Valle del Cauca.

Adicionalmente se incluyeron en el modelo nueve de los humedales o madre viejas del Valle del Cauca, los cuales fueron medidos (topobatemetría) en desarrollo del presente estudio (CVC – Universidad del Valle, 2009)

3.1 RED DE MODELACIÓN

Se modeló el tramo del río Cauca comprendido entre las estaciones hidrométricas La Balsa y La Virginia. La geometría de este tramo del río fue representada por medio de 416 secciones transversales separadas entre sí 1 km, en promedio. En el tramo comprendido entre las estaciones La Balsa y La Bolsa se utilizaron las secciones levantadas entre los meses de septiembre y noviembre del año 2005 en desarrollo de la fase III del proyecto PMC (CVC – Universidad del Valle, 2001b); en el tramo Hormiguero – La Virginia se emplearon las secciones levantadas entre los meses de octubre y diciembre del año 2000 durante la Fase I del Proyecto PMC (CVC – Universidad del Valle, 2001b).

Los 12 ríos tributarios más importantes fueron representados por medio de secciones transversales levantadas entre los meses de julio y septiembre del año 2003, la longitud modelada de cada río, el número de secciones utilizadas y la separación media entre ellas se presenta en el Cuadro 3.1.

Esquema 1. Principales Humedales del río Cauca localizados en el Valle del Cauca

Cuadro 3.1 Características de los ríos tributarios modelados como brazos laterales

Río	Longitud Modelada (m)	No. de Secciones Utilizadas	Espaciamiento Medio entre Secciones (m)
Claro	5000	15	333
Palo	7600	25	306
Jamundí	6500	20	323
Guachal	8000	20	400
Amaime	5000	20	250
Guadalajara	5000	22	227
Riofrío	5000	20	250
Tuluá	5000	20	250
Bugalagrande	8000	25	320
La Paila	5000	20	250
La Vieja	8000	21	381
Risaralda	5000	20	250

Para la selección de las secciones transversales utilizadas en la modelación se consideraron los siguientes criterios:

- **Conductancia del cauce:** Entre dos secciones adyacentes no deben presentarse fuertes variaciones de la conductancia o factor de conducción del cauce. En los casos en los que se presentaron variaciones importantes se procedió a evaluar su representatividad en los sectores en los que se encontraban y se reemplazaron aquellas consideradas poco representativas; en otros casos fue necesario introducir secciones intermedias para evitar cambios abruptos en la geometría y la conductancia del cauce, lo cual podría originar inestabilidades durante la modelación.
- **Representatividad.** Se seleccionaron secciones consideradas representativas del tramo en el que se encuentran ubicadas. En los sectores en los que se presentan fuertes variaciones se incluyeron secciones intermedias.
- **Perfil descendente.** Se procuró obtener perfiles de fondo descendentes dado que con pendientes adversas el modelo MIKE 11 puede sobreestimar el caudal y en ocasiones originar inestabilidades numéricas.
- **Ubicación.** En general se seleccionaron las secciones transversales localizadas en los tramos rectos y representativos de los ríos modelados; se evitó utilizar secciones ubicadas en curvas y en sitios con cambios geométricos fuertes.

Según el comportamiento de los flujos durante los desbordamientos las planicies de inundación fueron representadas en el modelo matemático mediante alguna de las siguientes esquematizaciones: (i) áreas de almacenamiento adyacentes al cauce principal, (ii) secciones compuestas y (iii) canales independientes y conectados al cauce principal. La esquematización por medio de áreas de almacenamiento fue utilizada en aquellos sectores en los que no existen diques riberaños de protección. A cada sección transversal se le introdujo la relación nivel – área de almacenamiento, la cual fue obtenida a partir de la cartografía realizada por FAL en el año 1998 y las áreas inundadas durante las crecientes de febrero y marzo de 1999.

En los sectores en los que existen diques marginales de protección, la planicie de inundación fue esquematizada por medio de secciones compuestas, las cuales están conformadas por el canal principal, la berma y el dique. En el sector comprendido entre los municipios de Yumbo y Tuluá la información relacionada con la berma y el dique fue obtenida del informe “Levantamiento Topográfico de Ejes de Diques Marginales y Llanuras de Inundación del Río Cauca” (CVC – Universidad del Valle, 2006). En las restantes zonas esta información se obtuvo a partir de la cartografía elaborada por FAL (1998) y los estudios de diseños de diques existentes en CVC.

La fracción de la planicie de inundación localizada después del dique de protección fue representada por medio de canales independientes en la planicie (de sección variable de acuerdo con su topografía) conectados a las secciones compuestas del río Cauca por medio de canales de conexión. La geometría de estos canales de conexión constituyó un parámetro de calibración; basándose en los resultados de múltiples corridas se le definió a estos canales un ancho de 10 metros y una longitud igual al ancho de la corona del dique, es decir, igual a 3 m. Los humedales La Guinea, Guarinó, El Avispal, Chiquique, Videles, Bocas de Tuluá, La Bolsa, La Herradura y Cementerio, levantados en desarrollo del presente estudio, se incluyeron en el modelo por medio de esta esquematización.

En la Figura 3.1 se ilustra la esquematización realizada para efectuar la modelación matemática hidrodinámica del río Cauca, los humedales y la planicie de inundación.

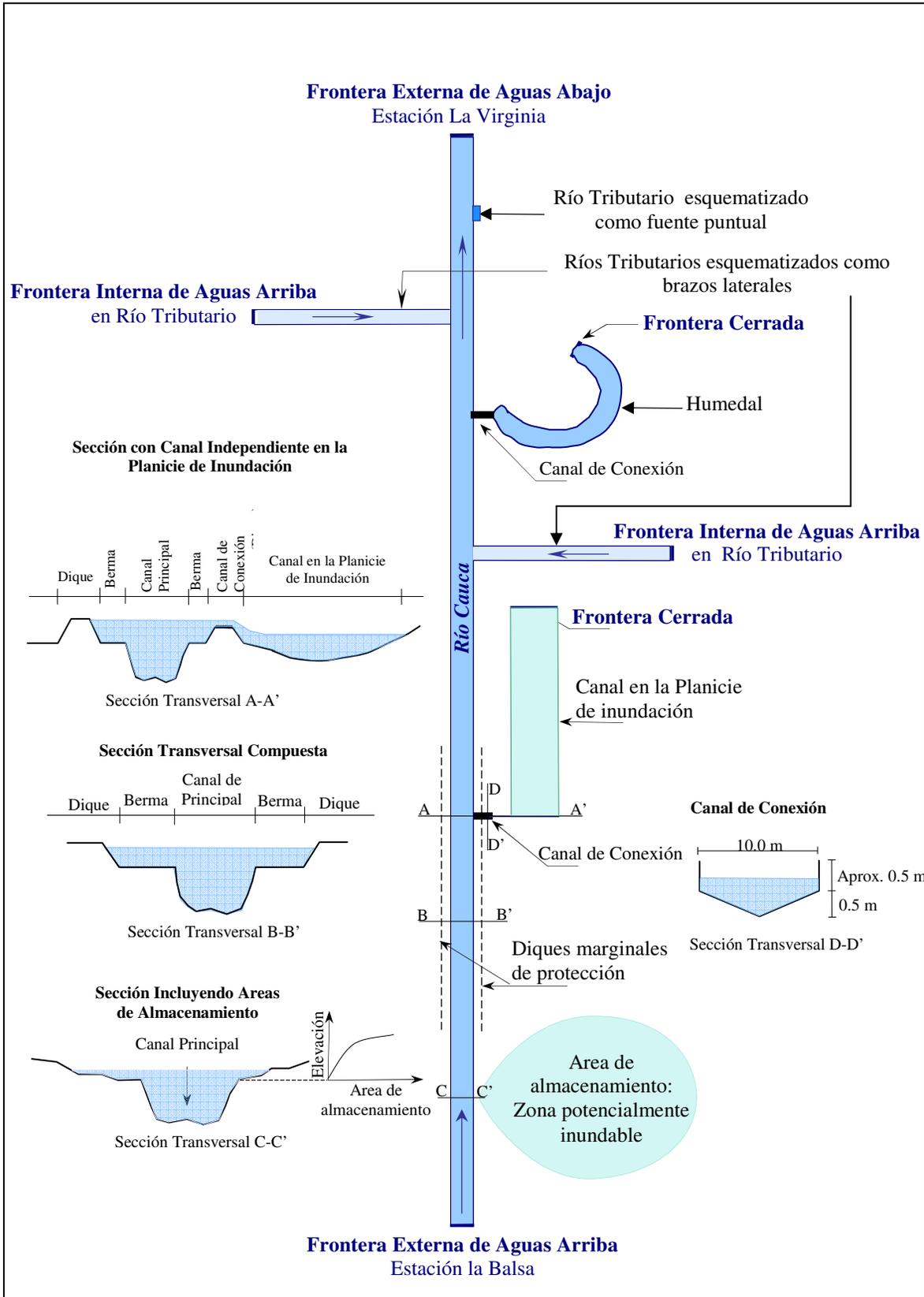
3.2 FRONTERAS DEL MODELO

Las fronteras del modelo construido corresponden a los límites de la zona de estudio (fronteras aguas arriba y aguas abajo), los ríos tributarios y los extremos de los canales con los cuales se representaron la llanura de inundación y los humedales. En la Figura 3.1 se presenta un esquema de los diferentes tipos de fronteras definidas en la modelación.

3.2.1 Frontera Aguas Arriba

Se localizó en la estación hidrométrica La Balsa. Como información de entrada se introdujo la serie de caudales horarios, la cual se obtuvo a partir del limnigrama y la curva de calibración de la estación.

Figura 3.1 Tipos de Fronteras y Esquemización del río Cauca, los Humedales y las Planicies de Inundación



3.2.2 Fronteras Internas

En total se definieron 124 fronteras internas distribuidas así: 12 ríos tributarios esquematizados como brazos laterales, 26 ríos tributarios representados como fuentes puntuales, 43 extremos iniciales de los canales en la planicie representados como fuentes puntuales y 43 extremos finales de los canales en la planicie representados como fronteras cerradas.

En los ríos Palo, Jamundí y Guachal se introdujo como condición de frontera la serie de caudales diarios reportados por la CVC en las correspondientes estaciones hidrométricas. En los restantes afluentes se utilizó la serie de caudales diarios generados por la CVC a través del modelo hidrológico HBV.

3.2.3 Frontera Aguas Abajo

Se localizó en la estación La Virginia. Como información de entrada se introdujo la curva de calibración nivel – caudal suministrada por el IDEAM.

En el Cuadro 3.2 se presentan las fronteras definidas en el modelo matemático. Para cada frontera se indican el río o corriente en la que está localizada, su identificación, el tipo de frontera y la abscisa.

Cuadro 3.2 Fronteras definidas en la Modelación Tramo La Balsa – La Virginia

Río / Humedal	Identificación	Tipo de Frontera	Abscisa (Km)
Cauca	Estación La Balsa	Abierta – Aguas Arriba	27.385
Humedal Guinea	Humedal Guinea	Cerrada	34.582
Humedal Guarinó	Humedal Guarinó	Cerrada	39.658
Cauca	Río Teta	Fuente Puntual	42.412
Cauca	Río Quinamayó	Fuente Puntual	46.351
Humedal El Avispal	Humedal Avispal	Cerrada	45.467
Cauca	Quebrada La Quebrada	Fuente Puntual	65.342
Claro	Río Claro	Abierta – Brazo Lateral	79.171
Palo	Río Palo	Abierta – Brazo Lateral	99.291
Jamundí	Río Jamundí	Abierta – Brazo Lateral	110.219
Cauca	Zanjón Oscuro	Fuente Puntual	121.997
Cauca	Desbaratado	Fuente Puntual	121.504
Cauca	Canal Sur	Fuente Puntual	129.988
Cauca	Canal General	Fuente Puntual	143.730
Cauca	Canal Oriental	Fuente Puntual	146.856
Cauca	Río Cali	Fuente Puntual	148.475
C161-165d ⁽¹⁾	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	165.000
C161-165d	Planicie de Inundación	Cerrada	165.000

**Cuadro 3.2 Fronteras definidas en la Modelación
Tramo La Balsa – La Virginia (Cont.)**

Río / Humedal	Identificación	Tipo de Frontera	Abscisa (Km)
C162-163i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	163.000
C162-163i	Planicie de Inundación	Cerrada	163.000
Cauca	Río Yumbo	Fuente Puntual	166.183
Guachal	Río Guachal	Abierta – Brazo Lateral	167.866
Amaime	Río Amaime	Abierta – Brazo Lateral	182.356
C173-176i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	176.000
C173-176i	Planicie de Inundación	Cerrada	-
C175-177d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	177.000
C175-177d	Planicie de Inundación	Cerrada	-
C177-179d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	179.000
C177-179d	Planicie de Inundación	Cerrada	-
C179-180i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	180.000
C179-180i	Planicie de Inundación	Cerrada	-
C180-180d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	180.000
C180-180d	Planicie de Inundación	Cerrada	-
Cauca	Río Vijes	Fuente Puntual	184.037
C184-186i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	186.000
C184-186i	Planicie de Inundación	Cerrada	-
Cauca	Río Cerrito	Fuente Puntual	188.465
C189-190d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	190.000
C189-190d	Planicie de Inundación	Cerrada	-
Cauca	Río Zabaletas	Fuente Puntual	193.829
C192-194i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	194.000
C192-194i	Planicie de Inundación	Cerrada	-
C193-197d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	197.000
C193-197d	Planicie de Inundación	Cerrada	-
Cauca	Río Guabas	Fuente Puntual	199.245
Humedal Videles	Humedal Videles	Cerrada	198.237
Cauca	Río Sonso	Fuente Puntual	205.972
Humedal Chiquique	Humedal Chiquique	Cerrada	212.328
Cauca	Río Yotoco	Fuente Puntual	214.105
C214-216i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	216.000
C214-216i	Planicie de Inundación	Cerrada	-
C216-217i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	217.000
C216-217i	Planicie de Inundación	Cerrada	-
C217-219d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	219.000
C217-219d	Planicie de Inundación	Cerrada	-

**Cuadro 3.2 Fronteras definidas en la Modelación
Tramo La Balsa – La Virginia (Cont.)**

Río / Humedal	Identificación	Tipo de Frontera	Abscisa (Km)
Cauca	Río Mediacanoa	Fuente Puntual	221.907
Cauca	Caño Nuevo	Fuente Puntual	220.845
C219-221i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	221.000
C219-221i	Planicie de Inundación	Cerrada	-
Laguna sonso	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	222.000
Laguna sonso	Planicie de Inundación	Cerrada	-
C221-222i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	222.000
C221-222i	Planicie de Inundación	Cerrada	-
C223-225i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	225.000
C223-225i	Planicie de Inundación	Cerrada	-
C221-221i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	222.000
C221-221i	Planicie de Inundación	Cerrada	-
Guadalajara	Río Guadalajara	Abierta – Brazo Lateral	225.115
C226-230i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	230.000
C226-230i	Planicie de Inundación	Cerrada	-
Cauca	Quebrada La Negra	Fuente Puntual	248.304
C252-254i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	254.000
C252-254i	Planicie de Inundación	Cerrada	-
C254-258i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	258.000
C254-258i	Planicie de Inundación	Cerrada	-
C259-260i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	260.000
C259-260i	Planicie de Inundación	Cerrada	-
C257-262d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	262.000
C257-262d	Planicie de Inundación	Cerrada	-
Cauca	Río Piedras	Fuente Puntual	267.466
C269-281d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	281.000
C269-281d	Planicie de Inundación	Cerrada	-
Riofrío	Río Riofrío	Abierta – Brazo Lateral	285.903
Tuluá	Río Tuluá	Abierta – Brazo Lateral	291.711
Humedal Bocas de Tuluá	H BocasTuluá	Cerrada	292.600
Cauca	Río Morales	Fuente Puntual	295.852
Cauca	Quebrada Robledo	Fuente Puntual	310.910
Bugalagrande	Río Bugalagrande	Abierta – Brazo Lateral	325.208
C310-314d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	314.000
C310-314d	Planicie de Inundación	Cerrada	-
Humedal La Herradura	H La Herradura	Cerrada	317.636

**Cuadro 3.2 Fronteras definidas en la Modelación
Tramo La Balsa – La Virginia (Cont.)**

Río / Humedal	Identificación	Tipo de Frontera	Abscisa (Km)
C317-318d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	318.000
C317-318d	Planicie de Inundación	Cerrada	-
C319-320d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	320.000
C319-320d	Planicie de Inundación	Cerrada	-
C316-321i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	321.000
C316-321i	Planicie de Inundación	Cerrada	-
C324-326i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	326.000
Humedal Cementerio	H Cementerio	Cerrada	326.685
C324-326i	Planicie de Inundación	Cerrada	-
C327-329i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	329.000
C327-329i	Planicie de Inundación	Cerrada	-
Cauca	Río Pescador	Fuente Puntual	332.694
C330-333i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual	333.000
C330-333i	Planicie de Inundación	Cerrada	-
Paila	Río Paila	Abierta – Brazo Lateral	333.371
Cauca	Quebrada Las Cañas	Fuente Puntual	341.831
Cauca	Quebrada Los Micos	Fuente Puntual	378.426
Cauca	R.U.T.	Fuente Puntual	393.378
Cauca	Río San Francisco	Fuente Puntual	411.754
Cauca	Río Obando	Fuente Puntual	414.813
Cauca	Río Chanco	Fuente Puntual	416.988
Cauca	Río Catarina	Fuente Puntual	424.672
La Vieja	Río La Vieja	Abierta – Brazo Lateral	427.455
Risaralda	Río Risaralda	Abierta – Brazo Lateral	437.000
Cauca	Estación La Virginia	Abierta – Aguas Abajo	444.928

⁽¹⁾ = Nomenclatura dada a los canales en la planicie. La letra C inicial indica que es un canal, los números siguientes muestran las abscisas aproximadas entre las que se encuentra el canal y la letra final indica la margen del Río Cauca en la que se encuentra el canal (margen derecha si la letra es una d y margen izquierda si la letra es una i)

3.3 MALLA COMPUTACIONAL

El espaciamiento máximo entre secciones transversales en el río Cauca Δx fue definido igual a 1000 m en el río Cauca e igual a 200 m en los ríos tributarios. Para el intervalo de tiempo Δt se adoptó un valor igual a 2 minutos. Con estos valores se logró una adecuada descripción de la hidrodinámica del río Cauca y sus tributarios y se garantizó la estabilidad

numérica del modelo, la cual fue establecida mediante la evaluación de los resultados arrojados por el modelo, el número de Courant y la condición de velocidad.

Además, simulaciones adicionales efectuadas con valores más pequeños de Δx y Δt no contribuyeron a mejorar significativamente la precisión de los cálculos efectuados por el modelo, pero si incrementaron de manera considerable el tiempo computacional.

3.4 CALIBRACIÓN

Como se indicó previamente, la presente modelación tomó como punto de partida el modelo matemático implementado en desarrollo del Proyecto de Modelación del Río Cauca PMC, el cual alcanzó un grado de precisión bastante razonable y realiza una adecuada descripción de los procesos hidrodinámicos que se presentan en el río Cauca y sus tributarios. Vale la pena mencionar que el modelo del río Cauca desarrollado en el proyecto PMC incluye los diques marginales de protección existentes a lo largo del Valle del Cauca.

En la presente modelación se adicionaron los nueve humedales ya referenciados como canales amplios en la planicie de inundación (que actúan como áreas de almacenamiento). Con el fin de estimar el efecto de estos humedales en la hidrodinámica del río Cauca se realizaron varias simulaciones, encontrando variaciones poco significativas en los parámetros hidrodinámicos del río con relación a los resultados alcanzados sin considerar los humedales. Este efecto mínimo de los humedales sobre la hidrodinámica en el cauce principal del río Cauca se debe muy posiblemente a los volúmenes de agua relativamente bajos que se almacenan en ellos al paso de las avenidas en el río.

El procedimiento de calibración implementado puede dividirse en 4 pasos:

1. Se realizó una primera simulación utilizando los factores de rugosidad obtenidos durante la Fase II del proyecto PMC. Sin embargo, considerando que se realizaron cambios a las secciones transversales con las que se representaron el río Cauca y sus tributarios, los valores calculados por el modelo presentaron en algunos casos diferencias apreciables en relación con la información medida en campo.
2. Se realizaron varias simulaciones ajustando en cada una de ellas los valores de rugosidad y los niveles de interfase. Este procedimiento permitió mejorar el ajuste entre la información de campo y los resultados del modelo en gran parte de la zona de estudio para aquellos caudales que no generan desbordamientos. No obstante, en algunos sectores las diferencias continuaban siendo apreciables.
3. Se evaluó la representatividad de las secciones transversales utilizadas en el modelo. En algunos casos se encontró que las secciones empleadas no representaban adecuadamente el tramo esquematizado. Se procedió, en consecuencia a reemplazar estas secciones por otras más representativas y a realizar nuevas simulaciones ajustando los coeficientes de rugosidad y los niveles de interfase. Este procedimiento permitió obtener ajustes adecuados en todo el tramo modelado para caudales y niveles

inferiores a los correspondientes al nivel de banca llena; los resultados de la calibración alcanzada para esta condición se presentan en las Figuras 3.2 a 3.8.

4. Para niveles superiores al nivel de banca llena se utilizó la herramienta del modelo MIKE 11 denominada Factor de Resistencia, el cual multiplica el valor del coeficiente de rugosidad. Se realizaron múltiples simulaciones adoptando en cada una de ellas diferentes valores del Factor de Resistencia para niveles superiores al de banca llena hasta lograr que el modelo reprodujera adecuadamente las condiciones registradas en el río (para niveles inferiores al de banca llena el Factor de Resistencia se mantuvo igual a 1.0); los valores finalmente adoptados se presentan en el Cuadro 3.3. En las Figuras 3.9 a 3.15 se presentan los resultados de la calibración lograda para caudales y niveles que generan desbordamientos.

Cuadro 3.3 Factores de Resistencia definidos en los sectores próximos a las estaciones hidrométricas

Estación	Abscisa (Km)	Nivel de Banca Llena (msnm)	Factor de Resistencia ⁽¹⁾
La Bolsa	79+923	960.00	1.0
Hormiguero	115+193	952.46	0.70
Juanchito	141+151	946.72	0.70
Mediacanoa	223+320	932.02	0.60
Guayabal	350+669	911.10	0.90
La Victoria	372+503	907.85	0.60
Anacaro	418+521	902.84	0.55

⁽¹⁾ Valor del Factor de Resistencia para niveles superiores al de banca llena. Para niveles inferiores al de banca llena se adoptó un Factor de Resistencia igual a 1.0.

CAPÍTULO 4

MODELACIÓN DE LAS CRECIENTES EN EL RÍO CAUCA CON DIFERENTES PERIODOS DE RETONO

4. MODELACIÓN DE LAS CRECIENTES EN EL RÍO CAUCA CON DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO

Las crecientes son fenómenos naturales y recurrentes en los ríos que generan la inundación de extensas zonas de la llanura de inundación. Una de las alternativas empleadas para proteger las zonas potencialmente inundables consiste en la construcción de diques marginales. Con el fin de establecer las alturas de estos diques es necesario definir el grado de protección (frecuencia de ocurrencia o período de retorno) que se le desea dar a las zonas amenazadas por los potenciales desbordamientos y conocer los niveles que alcanzaría el agua para los eventos que generen tales desbordamientos.

En este capítulo se determinaron, mediante modelación matemática, los niveles de agua que se presentarían en el río Cauca al ocurrir crecientes con diferentes períodos de retorno; esta información servirá de base a la CVC para definir las alturas que deben tener los diques a lo largo del río Cauca en su valle alto.

Como ya se anotó, la presente modelación se basa en el modelo construido durante la Fase III del proyecto PMC. Este modelo matemático del río Cauca se actualizó y optimizó incluyendo en él nueva información topobatimétrica del cauce principal del río y de nueve humedales (levantados en desarrollo del presente estudio). Se incluyeron en el sistema modelado los humedales a los cuales se les realizaron mediciones topobatimétricas entre los meses de abril y junio de este año (ver volumen I) y (ii) se reemplazaron las secciones con las cuales se representó el tramo comprendido entre las estaciones La Balsa (K 27+385-Frontera aguas arriba) y La Bolsa (K 79+923) por cuanto se utilizaron las secciones transversales medidas entre los meses de septiembre y noviembre de 2005; el sector del río Cauca restante (estaciones La Bolsa – La Virginia) fue representado con base en las secciones del levantamiento batimétrico detallado realizado en desarrollo de la primera fase del proyecto PMC en el año 2000 (CVC – Universidad del Valle, 2001b).

También se presenta en este capítulo una breve descripción del procedimiento de modelación aplicado para obtener los niveles de agua correspondientes a diferentes períodos de retorno a lo largo del río Cauca. El procedimiento completo y detallado puede ser consultado en el Capítulo 4 del volumen XIV de la Fase III del proyecto PMC (CVC – Universidad del Valle, 2007).

4.1 DETERMINACIÓN DE CAUDALES EXTREMOS

El período de retorno o de recurrencia de un caudal corresponde al número promedio de años en que este caudal es igualado o excedido. Para la determinación de los caudales del río Cauca correspondientes a determinados períodos de retorno se utilizó el método de Gumbel por cuanto la serie hidrológica de los registros de caudales en el valle geográfico del río Cauca se ajusta mejor a esta distribución (Erazo, 1999).

La estimación de caudales extremos en las estaciones hidrométricas localizadas sobre el Cauca se efectuó utilizando las series de caudales máximos registrados después de la entrada en operación del embalse de Salvajina, es decir, en el período 1985 – 2006. En el

caso de los ríos tributarios se utilizó la serie completa de caudales máximos anuales disponible; en los afluentes que tienen dos o más estaciones hidrométricas los cálculos se realizaron para la estación ubicada más cerca a la desembocadura en el Río Cauca.

En todas las estaciones hidrométricas se determinaron los caudales correspondientes a eventos con períodos de retorno de 5, 10, 25, 30, 50, 100 y 500 años. Los resultados se presentan en el Cuadro No. 4.1.

Cuadro 4.1 Caudales Máximos Correspondientes a Eventos con Diferentes Períodos de Retorno en el Río Cauca y sus Principales Tributarios

Río	Estación	Caudal Medio	Caudales Máximos Estimados (m ³ /s)					
			Período de Retorno (Años)					
			5	10	25	30	50	100
Cauca	La Balsa	176.0	558.00	625.86	711.61	729.33	775.22	838.36
	Tablanca	186.0	586.08	655.09	742.27	760.29	806.95	871.16
	La Bolsa	221.0	659.04	744.45	852.38	874.68	932.44	1011.91
	Hormiguero	253.0	764.15	868.49	1000.32	1027.57	1098.12	1195.20
	Juanchito	267.0	838.85	960.67	1114.59	1146.40	1228.78	1342.12
	Mediacanoa	310.0	827.43	934.56	1069.92	1097.89	1170.33	1270.00
	Guayabal	364.0	964.51	1089.34	1247.06	1279.66	1364.06	1480.20
	La Victoria	371.0	962.00	1081.82	1233.22	1264.51	1345.53	1457.02
	Anacaro	386.0	1025.09	1155.47	1320.20	1354.25	1442.41	1563.72
Claro	La Luisa	7.00	70.88	82.01	96.07	98.97	106.50	116.85
Palo	Pto. Tejada	36.38	282.43	322.59	373.33	383.82	410.98	448.35
Jamundí	P. Carretera	10.90	77.19	84.39	93.48	95.36	100.23	106.92
Amaime	Los Ceibos	7.80	87.25	112.00	143.28	149.74	166.48	189.51
Guadalajara	El Vergel	4.00	105.64	131.03	163.11	169.74	186.91	210.54
Riofrío	Salónica	6.70	50.72	62.42	77.21	80.26	88.18	99.06
Tuluá	Mateguadua	15.70	67.62	80.84	97.54	100.99	109.92	122.22
Bugalagrande	El Placer	14.50	118.35	141.72	171.25	177.35	193.15	214.89

4.2 MODELACIÓN DE CRECIENTES CON PERÍODOS DE RETORNO DE 10, 25, 30 y 100 AÑOS

Para modelar estos eventos en primera instancia se analizaron las características de las crecientes del río Cauca, lo cual llevó a concluir lo siguiente: (i) La duración de las crecientes en el río Cauca es relativamente variable, siendo posible adoptar como duración promedio un período de 5 días, el cual fue el valor adoptado en el presente estudio y (ii) es complejo identificar una tendencia en la evolución temporal de las crecientes, por lo cual en

estas simulaciones se asumió un caudal máximo constante durante el tiempo de duración de la creciente.

En cada uno de los eventos analizados se modeló un período de 15 días adoptando la siguiente distribución de caudales en la frontera aguas arriba (localizada en la estación La Balsa) y en las fronteras internas (ríos tributarios y vertimientos): en los primeros 5 días (o más dependiendo del tiempo de tránsito de la creciente) se incluyó el caudal medio, en los siguientes 5 días el caudal correspondiente a la creciente y en los 5 días finales (o menos de acuerdo con el tránsito de la creciente) el caudal medio. En algunos afluentes menores se incluyó un caudal constante durante todo el periodo modelado. En la frontera de aguas abajo, localizada en la estación La Virginia, se introdujo la curva de calibración Nivel – Caudal.

En algunas fronteras internas se introdujeron o extrajeron los caudales requeridos para garantizar el caudal correspondiente a las crecientes analizadas en las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca; con este fin fue necesario ajustar gradualmente y por tanteo los caudales aportados por los tributarios. Estos caudales fueron introducidos teniendo en cuenta el tiempo de tránsito de las avenidas, garantizando siempre la simultaneidad entre las crecientes en el Río Cauca y los tributarios. En el Cuadro 4.2 se presentan los caudales introducidos al modelo y los días de inicio y finalización de la creciente.

Cuadro 4.2 Caudales Introducidos en las Fronteras del Modelo Hidrodinámico para la Modelación de Crecientes con Períodos de Retorno de 10, 25, 30 y 100 Años

Frontera	Abscisa (Km)	Día Inicio Creciente	Día Fin Creciente	Caudales Introducidos (m ³ /s)				
				Antes y Después de la Creciente	Durante la Creciente			
					Período de Retorno (años)			
					10	25	30	100
La Balsa (Río Cauca)	27.385	5.00	9.00	500.00	625.86	711.61	729.33	838.36
Río Teta	42.412	5.00	9.00	5.14	10.00	16.00	18.00	23.00
Río Quinamayó	46.351	5.00	9.00	5.77	10.00	16.00	18.00	23.00
Queb. La Quebrada	65.342	5.00	9.00	4.90	8.59	8.77	9.35	20.35
Río Claro	79.171	5.50	9.00	50.00	90.00	100.00	100.00	100.00
Río Palo	99.291	6.00	10.00	36.00	100.00	110.00	114.95	125.20
Río Jamundí	110.219	6.00	10.00	11.00	24.45	37.94	37.94	58.09
Aporte Adicional	116.000	6.50	10.50	9.00	29.72	37.09	38.61	47.97
Aporte Adicional	122.000	6.50	10.50	9.00	29.72	37.09	38.61	47.97
Canal Sur	129.988	-	-	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Aporte Adicional	130.000	6.50	10.50	9.00	29.72	37.09	38.61	47.97
Canal General	143.730	-	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Cuadro 4.2 Caudales Introducidos en las Fronteras del Modelo Hidrodinámico para la Modelación de Crecientes con Períodos de Retorno de 10, 25, 30 y 100 Años (Cont.)

Frontera	Abscisa (Km)	Día Inicio Creciente	Día Fin Creciente	Caudales Introducidos (m ³ /s)				
				Antes y Después de la Creciente	Durante la Creciente			
					Período de Retorno (años)			
					10	25	30	100
Canal Oriental	146.856	-	-	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Río Cali	148.475	6.50	10.50	3.80	-5.00	-5.00	-5.34	-8.40
Río Guachal	167.866	-	-	11.60	11.60	11.60	11.60	11.60
Río Amaime	182.356	7.00	11.00	7.80	-5.00	-10.00	-10.70	-13.40
Río Zabaletas	193.829	7.00	11.00	1.00	-5.00	-10.00	-10.70	-13.40
Río Guabas	199.245	7.00	11.00	1.00	-6.00	-10.00	-10.70	-13.40
Río Sonso	205.972	7.00	11.00	1.00	-5.00	-10.00	-10.70	-13.40
Río Yotoco	214.105	7.00	11.00	1.00	-5.00	-10.00	-10.70	-13.40
Río Mediacanoa	221.907	7.00	11.00	0.83	-1.80	-3.37	-3.37	-10.42
Canal Sonso	220.845	-	-	1.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00
Río Guadalajara	225.115	-	-	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Qda. La Negra	248.304	8.00	12.00	1.00	5.00	10.00	11.63	13.20
Río Piedras	267.466	-	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Río Riofrío	285.903	8.00	12.00	6.70	30.00	36.00	38.00	39.20
Río Tuluá	291.711	8.00	12.00	15.70	35.00	40.00	42.00	43.20
Río Morales	295.852	8.00	12.00	3.30	20.00	20.00	20.00	23.20
Qda. Robledo	310.910	8.00	12.00	1.00	10.00	10.00	10.00	14.00
Río Bugalagrande	325.208	8.00	12.00	14.00	30.00	36.00	36.00	43.20
Río Pescador	332.694	8.00	12.00	1.00	10.00	10.00	10.00	14.00
Río Paila	333.371	8.00	12.00	4.80	10.00	10.00	10.00	14.00
Qda. Las Cañas	341.831	8.00	12.00	0.50	0.75	1.14	1.14	2.20
Aporte Adicional	360.000	8.50	12.00	1.00	-7.52	-15.00	-15.15	-15.00
Qda. Los Micos	378.426	-	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
R.U.T.	393.378	8.50	12.00	1.70	28.00	30.00	30.00	36.00
Río San Francisco	411.754	8.50	12.00	0.60	22.65	28.00	29.21	35.70
Río Obando	414.813	-	-	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53
Río Chanco	416.988	8.50	12.00	2.20	23.00	29.00	29.00	35.00
Río Catarina	424.672	-	-	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Río La Vieja	427.455	-	-	121.00	121.00	121.00	121.00	121.00
Río Risaralda	437.000	-	-	63.68	63.68	63.68	63.68	63.68

Para la modelación de los escenarios planteados se tomaron como punto de partida las redes de modelación definidas en el Proyecto PMC para cada uno de los eventos estudiados, adicionándole los humedales levantados en campo; estos humedales fueron incluidos en el modelo como canales en la planicie conectados al río Cauca mediante canales de conexión.

En las Figuras 4.1 a 4.3 y en el Cuadro 4.3 se presentan los niveles de agua calculados por el modelo para las crecientes estudiadas. En la Figura 4.4 se presenta la diferencia entre los niveles de agua calculados para las crecientes con períodos de retorno de 10, 25 y 30 años con respecto a la creciete con período de retorno de 100 años. El análisis de esta información permite concluir lo siguiente:

- Las menores diferencias entre los niveles de agua calculados se presentan, como es de esperarse, en los primeros kilómetros del tramo modelado, en donde la diferencia de niveles entre la creciete con período de retorno de 100 años y la creciete con período de retorno de 10 años no excede los 0.7 m.
- Las mayores diferencias entre los eventos simulados se presentan en el tramo comprendido entre las estaciones Hormiguero y Juanchito, en el cual la diferencia de niveles entre los eventos con períodos de retorno de 10 y 100 años presenta un valor promedio de 1.65 m y un valor máximo de 1.87 m.
- La mayor diferencia de niveles de agua calculada entre los eventos con períodos de retorno de 30 y 100 años es de 0.80 m. En consecuencia, y considerando que, de acuerdo con las especificaciones técnicas de diseño de la CVC, a los diques debe proveérseles un borde libre de 1 m, al proteger terrenos agrícolas para crecientes con períodos de 30 años, realmente se está ofreciendo una protección contra avenidas con períodos de retorno superiores a los 100 años.
- Las diferencias promedio de niveles de agua entre cada una de las crecientes estudiadas y la creciete con periodo de recurrencia de 100 años son las siguientes: (i) Creciente con período de retorno de 10 años: 0.85 m, aunque debe destacarse que en este caso las diferencias oscilan en un rango bastante amplio, (ii) Creciente con período de retorno de 25 años: 0.45 m y (iii) Creciente con período de retorno de 30 años: 0.37 m.
- De acuerdo con los resultados obtenidos las crecientes con intervalos de recurrencia de 25 y 30 años presentan niveles de agua similares con una diferencia máxima del 0.2 m a la altura del kilómetro 135 a partir del embalse de Salvajina, lo cual se ajusta al comportamiento esperado del río Cauca.

**Cuadro 4.3 Niveles de Agua del Río Cauca para Crecientes
Con diferentes Periodos De Retorno**

Abscisa (Km)	Período de Retorno de la Creciente (años)			
	10	25	50	100
27.39	985.21	985.37	985.40	985.58
30.47	982.43	982.65	982.69	982.88
35.30	979.10	979.30	979.33	979.54
40.50	976.10	976.30	976.31	976.37
45.47	972.33	972.52	972.56	972.80
50.48	969.90	970.15	970.21	970.49
55.72	968.79	968.96	969.00	969.21
60.67	967.44	967.57	967.61	967.86
65.34	964.93	965.18	965.23	965.53
70.38	963.36	963.53	963.57	963.82
75.03	961.20	961.43	961.49	961.79
79.92	960.58	960.88	960.93	961.24
80.46	960.45	960.74	960.80	961.13
85.21	959.55	959.86	959.92	960.28
90.11	958.82	959.14	959.21	959.59
95.34	958.10	958.44	958.52	958.93
100.06	957.16	957.62	957.73	958.27
104.97	956.71	957.23	957.34	957.93
110.12	955.81	956.49	956.63	957.33
115.19	954.83	955.59	955.73	956.45
120.17	953.90	954.84	955.00	955.77
125.18	952.60	953.39	953.55	954.22
130.18	951.73	952.57	952.74	953.40
135.15	950.63	951.36	951.54	952.31
135.67	950.45	951.20	951.39	952.18
140.13	949.74	950.42	950.60	951.29
145.10	948.29	948.87	948.97	949.55
150.14	947.07	947.60	947.70	948.22
155.11	946.29	946.80	946.89	947.39
160.10	945.40	945.88	945.96	946.41
165.10	944.08	944.51	944.59	945.01
170.08	943.07	943.44	943.52	943.91
175.19	942.22	942.64	942.72	943.15
180.16	941.18	941.58	941.65	942.08
185.18	940.56	940.98	941.06	941.52

**Cuadro 4.3 Niveles de Agua del Río Cauca para Crecientes
Con diferentes Periodos De Retorno (Continuación)**

Abscisa (Km)	Período de Retorno de la Creciente (años)			
	10	25	50	100
190.21	939.79	940.16	940.24	940.64
195.23	938.85	939.21	939.28	939.66
200.21	938.10	938.44	938.50	938.85
205.30	937.45	937.87	937.95	938.34
210.32	936.91	937.31	937.38	937.76
215.34	936.10	936.48	936.55	936.91
220.41	934.57	934.88	934.94	935.23
225.12	933.22	933.47	933.52	933.77
230.40	931.77	932.07	932.13	932.39
234.96	930.69	931.01	931.06	931.34
239.95	929.95	930.25	930.31	930.56
244.98	929.52	929.84	929.90	930.15
249.96	928.47	928.79	928.85	929.12
255.42	927.47	927.84	927.91	928.24
259.97	926.78	927.13	927.19	927.50
265.49	926.24	926.59	926.66	926.97
269.98	925.50	925.84	925.91	926.21
275.55	924.24	924.67	924.75	925.10
280.08	923.07	923.41	923.48	923.76
285.07	922.14	922.43	922.49	922.73
289.56	921.27	921.56	921.62	921.85
295.60	920.14	920.45	920.51	920.75
299.75	919.61	919.91	919.97	920.22
304.80	918.76	919.03	919.09	919.33
309.83	918.05	918.36	918.42	918.69
314.71	917.29	917.60	917.66	917.93
320.16	916.57	916.98	917.05	917.38
325.21	915.86	916.29	916.37	916.75
330.15	915.03	915.49	915.57	915.97
335.18	914.41	914.88	914.96	915.37
340.20	913.72	914.20	914.28	914.72
344.67	913.08	913.57	913.66	914.07
349.71	912.47	912.95	913.04	913.45
354.69	911.95	912.42	912.51	912.92

**Cuadro 4.3 Niveles de Agua del Río Cauca para Crecientes
Con diferentes Periodos De Retorno (Continuación)**

Abscisa (Km)	Período de Retorno de la Creciente (años)			
	10	25	50	100
359.55	911.52	911.99	912.08	912.50
365.55	910.64	911.11	911.19	911.59
370.52	909.78	910.24	910.32	910.71
375.50	908.80	909.26	909.35	909.74
380.00	907.83	908.26	908.34	908.72
384.51	906.97	907.38	907.45	907.81
385.51	906.88	907.27	907.35	907.70
390.47	906.01	906.41	906.48	906.83
395.00	905.31	905.73	905.81	906.17
399.58	905.00	905.44	905.52	905.89
404.57	904.79	905.24	905.32	905.70
409.53	904.50	904.97	905.05	905.45
415.45	903.58	904.01	904.08	904.44
420.03	902.45	902.79	902.85	903.16
424.99	901.64	901.95	902.01	902.30
430.42	899.58	900.01	900.08	900.43
434.94	898.36	898.76	898.83	899.18
440.04	897.45	897.83	897.90	898.23
444.93	896.60	896.99	897.06	897.41

CAPÍTULO 5

MODELACIÓN DE ESCENARIOS PARA EVALUAR DIFERENTES ALTERNATIVAS DE LOCALIZACIÓN DE LOS DIQUES MARGINALES DE PROTECCIÓN

5. MODELACIÓN DE ESCENARIOS PARA EVALUAR DIFERENTES ALTERNATIVAS DE LOCALIZACIÓN DE LOS DIQUES MARGINALES DE PROTECCIÓN

La berma corresponde al espacio comprendido entre la margen del río y el talud seco del dique; esta zona está ubicada contigua al límite superior del cauce y debe estar protegida con vegetación apropiada para retener el nivel freático y tener un mínimo atractivo comercial. Actualmente esta zona presenta diversos conflictos debido a que ha sido invadida o adquirida ilegalmente.

Con el fin de establecer criterios para la determinación del ancho de la berma, en el presente capítulo se plantean y modelan siete escenarios en los cuales se consideran diferentes localizaciones de los diques y varios caudales. Los resultados de esta modelación permitirán modificar el acuerdo 023 de 1979, el cual establece las normas a seguir para la ubicación de diques de protección.

5.1 ESCENARIOS PLANTEADOS

Se plantearon ocho escenarios con el fin de obtener información que permita establecer criterios conducentes a la determinación del ancho óptimo de la Franja Forestal Protectora del río Cauca en su valle alto. Para la construcción de estos escenarios se combinaron cinco condiciones de caudales y tres geometrías diferentes; las condiciones de caudales estudiadas estuvieron conformadas por los caudales registrados durante la creciente ocurrida entre los meses de febrero y marzo del año 1999 y los caudales correspondientes a los períodos de retorno de 10, 25, 30 y 100 años a lo largo del río Cauca.

Las tres geometrías consideradas presentan variaciones en la localización de los diques, es decir, en el ancho de la berma; el cauce del río Cauca no fue modificado en ninguno de los escenarios estudiados. Las principales características de estas geometrías son las siguientes:

Geometría No. 1: Se considera un ancho de franja forestal de 60 m y a partir de allí se construyen diques; en los sectores en los que ya existen diques el ancho de la franja se toma igual al ancho de la berma existente.

Geometría No. 2: Se considera un ancho de franja de 60 m y se construyen diques a partir de allí, es decir, no se consideran los diques actuales.

Geometría No. 3: El ancho de la franja se toma igual al ancho del cinturón meándrico, el cual corresponde a la franja donde históricamente ha transitado el río y que incluye las madrevejas formadas por la dinámica natural del río.

Los ocho escenarios finalmente construidos se presentan en el Cuadro 5.1.

Cuadro 5.1 Escenarios Evaluados para establecer Criterios para la Determinación del Ancho Óptimo de la Franja Forestal Protectora

Escenario No.	Ancho de la Franja Forestal Protectora	Caudal
1	Igual al ancho de la berma en los sectores en los que existe dique e igual a 60 m en los sectores en los que no existe dique	Creciente de febrero – marzo de 1999
2	Igual a 60 m	Creciente de febrero – marzo de 1999
3	Igual al ancho del cinturón meándrico	Creciente de febrero – marzo de 1999
4	Igual al ancho de la berma en los sectores en los que existe dique e igual a 60 m en los sectores en los que no existe dique	Creciente con Tr de 10 años a lo largo del río Cauca
5	Igual al ancho de la berma en los sectores en los que existe dique e igual a 60 m en los sectores en los que no existe dique	Creciente con Tr de 25 años a lo largo del río Cauca
6	Igual al ancho de la berma en los sectores en los que existe dique e igual a 60 m en los sectores en los que no existe dique	Creciente con Tr de 30 años a lo largo del río Cauca
7	Igual al ancho de la berma en los sectores en los que existe dique e igual a 60 m en los sectores en los que no existe dique	Creciente con Tr de 100 años a lo largo del río Cauca

5.1.1 Escenario 1

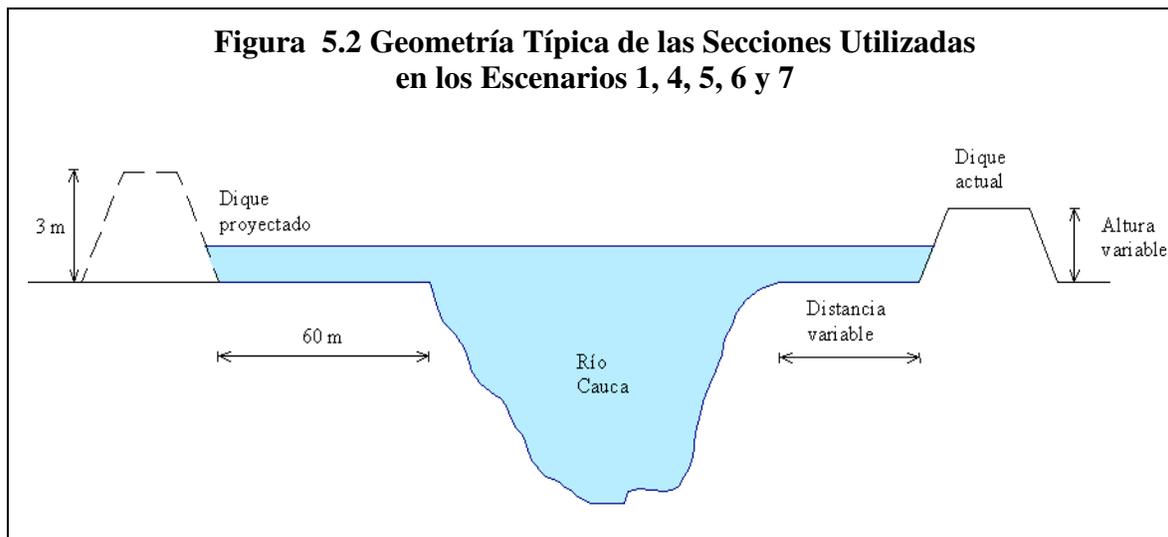
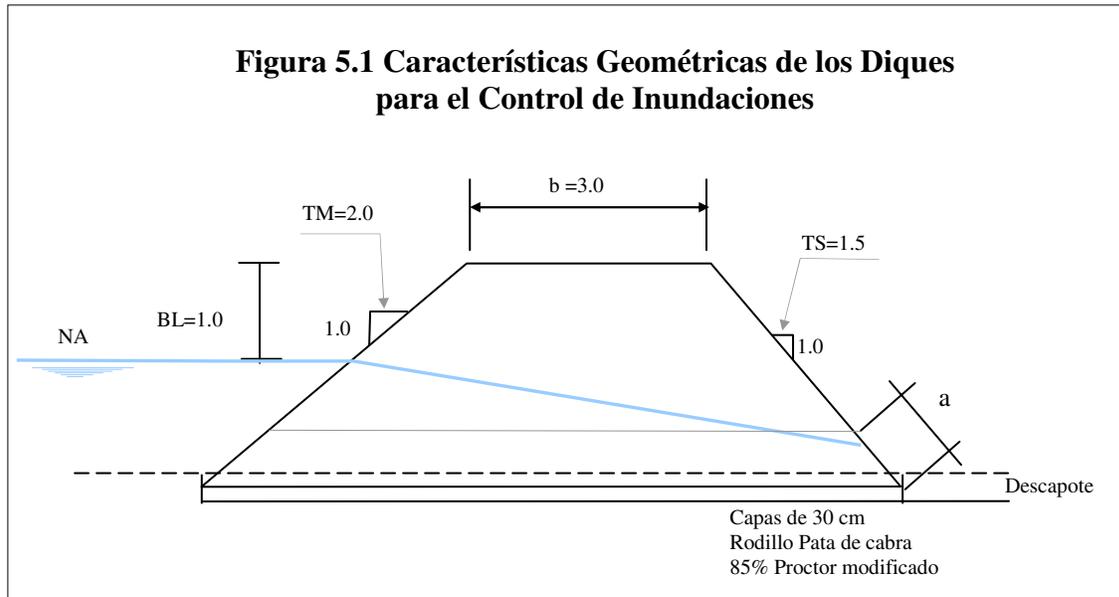
En este escenario se modelaron los caudales registrados durante la creciente de febrero – marzo del año 1999 y se adoptaron diferentes anchos de la franja forestal protectora en cada sector: (i) en aquellos sectores en donde existen diques, el ancho de la franja se adoptó igual al ancho de la berma (franja comprendida entre la margen del río y el inicio de la pata húmeda del dique); (ii) en los sitios en donde no existen diques se adoptó un ancho de berma igual a 60 m, proyectando la construcción de diques a partir de esta zona.

Para la modelación de este escenario fue necesario modificar varias de las secciones transversales introducidas en el modelo, adicionando en los sectores carentes de diques, un jarillón de 3 metros de altura. La geometría adoptada de los diques proyectados se ajustó a las especificaciones técnicas definidas por la CVC el diseño y construcción de este tipo de obras (Figura 5.1).

En la Figura 5.2 se presenta un esquema de las características geométricas de las secciones utilizadas en la esquematización de este escenario.

5.1.2 Escenario 2

En este escenario se modelaron los caudales registrados durante la creciente de febrero – marzo de 1999 y se consideró un ancho de franja igual a 60 m y la construcción de diques de protección de 3 metros de altura, es decir, no se consideran los diques actuales.



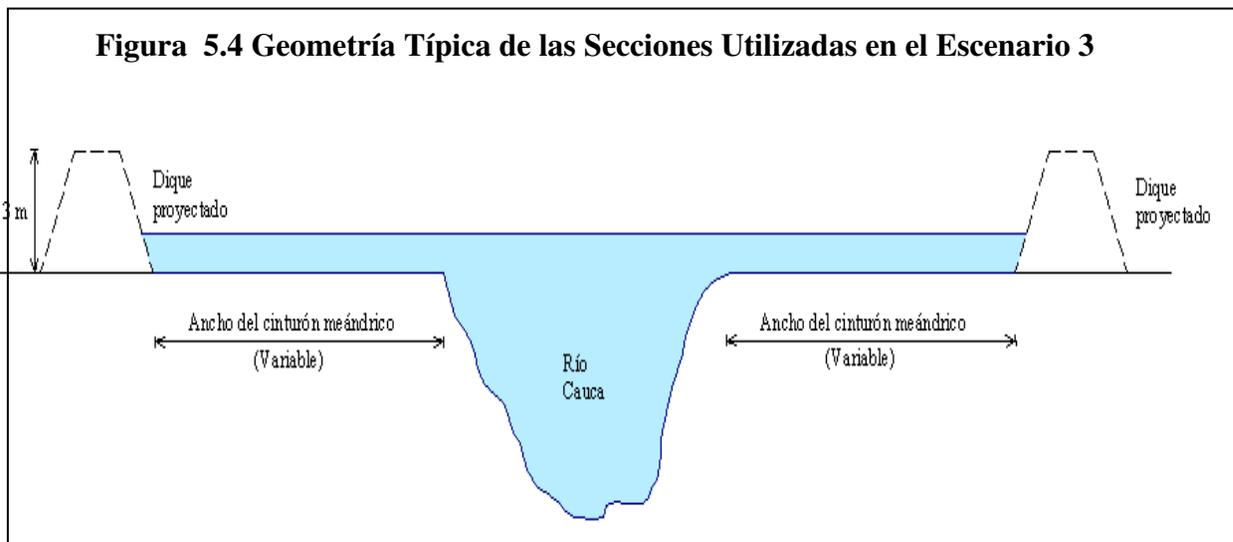
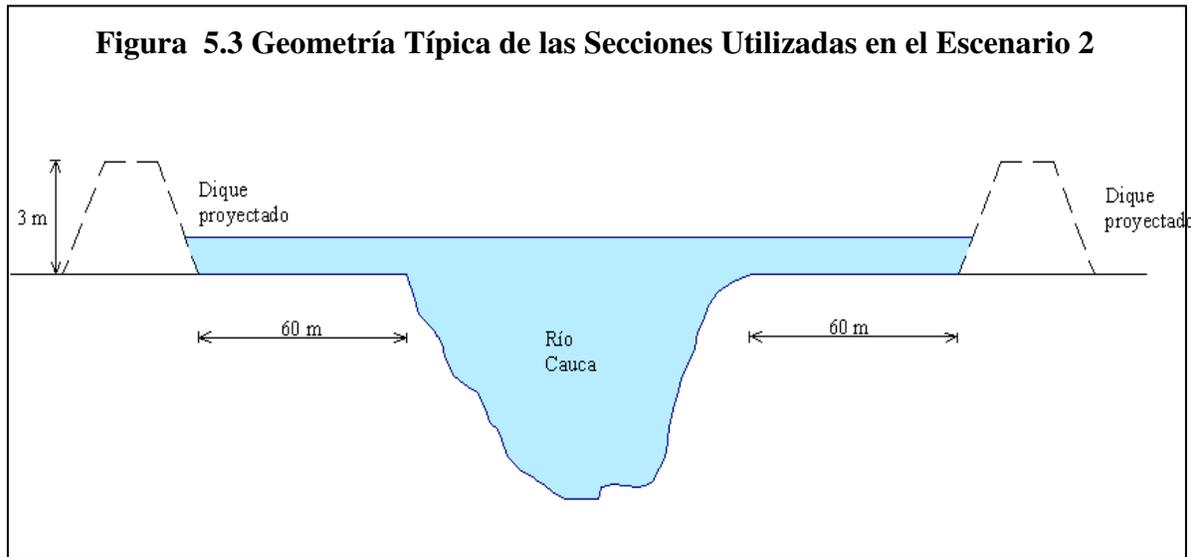
Para propósitos de modelación fue necesario modificar las secciones con las cuales se representó el río Cauca, por cuanto en las secciones en las que existen diques éstos no se ajustan a los criterios especificados (ancho de berma de 60 m y altura de 3 m) por lo cual

fue necesario modificarlos y en las secciones en las que no existen diques éstos fueron incluidos.

La Figura 5.3 presenta un esquema de la geometría utilizada para la esquematización de las bermas en el escenario No. 2.

5.1.3 Escenario 3

En la Figura 5.4 se presenta un esquema de la geometría típica de las secciones utilizadas para la construcción de este escenario, en el cual se adoptó como ancho de la franja forestal protectora el ancho del cinturón meándrico del río Cauca. Para la determinación de los límites del cinturón meándrico se utilizó la cartografía levantada por FAL en el año 1997 a escala 1:10.000. En las Figuras 5.5 a 5.8 se presenta el cinturón meándrico definido para el río Cauca en su valle alto.



Para la determinación de la fracción de la planicie de inundación correspondiente a cada sección transversal, el cinturón meándrico fue dividido en 44 sectores por la margen izquierda y 40 sectores por la margen derecha. Para la esquematización de este cinturón se determinó el ancho promedio de cada sector (dividiendo el área del mismo entre la longitud del tramo del río analizado) y se le asignó a las secciones ubicadas en cada sector un ancho de berma igual al ancho promedio calculado. En el Cuadro 5.2 se indican el área, la longitud del tramo del río analizado y el ancho promedio de cada uno de estos sectores.

Cuadro 5.2 Características Geométricas de los Sectores en los que se Dividió el Cinturón Meándrico del río Cauca

Sector No.	Margen Izquierda				Margen Derecha			
	Área (Ha)	Long. el tramo del río analizado (m)	Ancho promedio (m)	Secciones localizadas en el tramo	Área (Ha)	Long. Del tramo del río analizado (m)	Ancho promedio (m)	Secciones localizadas en el tramo
1	229.77	4.29	535.04	30 a 37	504.09	13.12	384.16	28 a 41
2	357.44	9.32	383.54	38 a 47	62.07	2.97	209.30	42 a 44
3	139.94	8.27	169.29	48 a 56	244.59	7.39	331.00	46 a 52
4	122.06	5.39	226.50	57 a 60	431.00	13.12	328.56	53 a 65
5	505.76	16.20	312.17	62 a 78	250.28	7.87	318.00	66 a 73
6	35.23	1.86	189.34	79 y 80	532.99	11.50	463.51	74 a 84
7	251.65	9.84	255.64	81 a 90	31.19	1.81	172.62	85 y 86
8	50.41	3.46	145.64	91 a 94	123.54	6.70	184.42	87 a 92
9	167.15	6.02	277.67	95 a 100	250.52	10.32	242.77	99 a 105
10	54.77	2.48	221.12	101 y 102	162.64	7.19	226.12	106 a 112
11	77.40	5.63	137.59	103 a 108	171.18	7.31	234.11	113 a 120
12	202.11	5.41	373.59	110 a 112	16.61	0.98	170.14	121
13	243.26	5.69	427.75	113 a 115	93.39	3.84	243.44	122 a 124
14	580.58	11.79	492.30	116 a 126	168.88	4.60	367.30	125 a 129
15	680.10	10.70	635.40	127 a 138	109.06	3.65	298.56	130 a 133
16	222.81	5.30	420.20	142 a 145	70.02	3.83	182.75	134 a 137
17	270.17	10.07	268.24	146 a 155	1 378.30	15.75	875.33	138 a 152
18	2 232.59	34.05	655.59	156 a 190	462.37	6.67	693.47	153 a 160
19	105.60	3.51	301.08	191 a 194	164.20	4.36	376.36	167 a 171
20	181.36	5.27	344.03	195 a 200	642.76	21.86	294.08	172 a 192
21	270.74	5.38	503.55	201 a 205	163.47	4.26	383.53	193 a 197

Cuadro 5.2 Características Geométricas de los Sectores en los que se Dividió el Cinturón Meándrico del río Cauca (Cont.)

Sector No.	Margen Izquierda				Margen Derecha			
	Área (Ha)	Long. Del tramo del río analizado (m)	Ancho promedio (m)	Secciones localizadas en el tramo	Área (Ha)	Long. Del tramo del río analizado (m)	Ancho promedio (m)	Secciones localizadas en el tramo
22	151.82	5.11	296.92	206 a 210	328.42	10.80	304.15	198 a 207
23	15.80	1.48	166.91	211 a 212	844.20	19.90	424.23	208 a 227
24	82.26	4.37	308.42	213 a 216	363.16	9.89	367.14	228 a 237
25	279.14	8.13	463.55	217 a 225	620.71	18.21	340.81	238 a 255
26	183.47	4.66	393.90	226 a 229	252.60	6.32	399.74	258 a 263
27	420.27	16.42	256.01	230 a 245	112.12	3.64	307.62	264 a 267
28	520.78	15.09	345.01	247 a 261	855.88	14.47	591.68	268 a 282
29	208.03	4.27	487.10	262 a 265	219.58	4.85	452.37	283 a 287
30	104.44	5.65	184.72	266 a 271	923.89	12.66	729.72	288 a 300
31	255.52	7.90	323.60	272 a 279	535.47	8.49	631.02	301 a 308
32	683.69	11.92	573.48	280 a 291	519.76	13.71	379.16	309 a 322
33	115.57	4.23	272.93	292 a 295	328.19	7.35	446.66	323 a 331
34	312.66	7.93	394.41	296 a 303	304.82	6.36	479.42	332 a 338
35	97.98	3.62	270.34	304 a 306	862.46	16.48	523.42	339 a 355
36	571.26	12.58	454.26	307 a 319	1 186.04	12.91	918.67	357 a 369
37	462.59	13.24	349.26	322 a 334	606.28	14.90	406.97	370 a 385
38	248.77	7.30	340.77	337 a 344	1 067.97	19.44	549.46	386 a 404
39	2 983.06	34.63	861.45	345 a 378	880.10	18.66	471.57	405 a 423
40	695.96	11.19	621.95	379 a 390	330.17	12.07	273.64	424 a 432
41	87.58	2.47	354.92	391 a 392	-	-	-	-
42	403.75	7.84	515.30	393 a 400	-	-	-	-
43	1 083.48	25.35	427.43	401 a 426	-	-	-	-
44	243.90	8.38	290.96	427 a 436	-	-	-	-
Total	17 192.67				17 174.96			

5.1.4 Escenarios 4

En este escenario se modeló el caudal correspondiente a la creciente con período de retorno de 10 años y se empleó la misma geometría utilizada en el escenario 1 (ver Figura 5.2), es

decir, se consideraron los diques actuales y se proyectaron diques a 60 m de la margen del río en aquellos sectores sin protección contra inundaciones.

5.1.5 Escenario 5

En este escenario se modelaron los caudales correspondientes a una creciente con período de retorno de 25 años y se consideró el ancho de berma actual en los sectores en los que existe dique y un ancho de berma igual a 60 m en los sectores en los que no existen diques (Ver Figura 5.2).

5.1.6 Escenario 6

Se empleó la misma geometría utilizada en el escenario 1: se consideraron los diques actuales y se proyectaron diques a 60 m de la margen del río en aquellos sectores sin protección contra inundaciones (ver Figura 5.2). El caudal modelado fue el correspondiente a la creciente con período de retorno de 30 años

5.1.7 Escenario 7

En este escenario se modelaron los caudales correspondientes a una creciente con frecuencia de ocurrencia de 100 años, se consideraron los diques actuales y se proyectaron diques a 60 m de la margen del río en aquellos sectores sin protección contra inundaciones.

5.2 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

Escenarios 1, 2 y 3

Los niveles de agua calculados mediante la simulación numérica en las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca para los escenarios Nos. 1, 2 y 3 se presentan en las Figuras 5.9 a 5.15, en las Figuras 5.16 a 5.18 se presentan los perfiles longitudinales de los niveles de agua obtenidos para estos mismos escenarios. El análisis de la información consignada en estos gráficos permite plantear lo siguiente:

- En términos generales, los niveles de agua calculados para los escenarios 1 (diques actuales y proyectados a 60 m en los sectores en los que no hay dique) y 2 (diques proyectados a 60 m) no presentan variaciones importantes entre sí, con excepción de la estación Guayabal, en la cual durante el pico de la creciente los niveles de agua para el escenario No. 1 son aproximadamente 40 cm superiores a los niveles calculados en el escenario No. 2; en las estaciones La Bolsa, Hormiguero y Anacaro los niveles de agua para ambos escenarios son prácticamente iguales.

- Los niveles de agua obtenidos en el escenario (diques proyectados localizados al ancho del cinturón meándrico) son significativamente inferiores a los niveles de agua calculados por el modelo en los escenarios 1 y 2 para los caudales pico; la mayor reducción en los niveles se presenta en la estación Guayabal, en la cual, de haber existido este escenario durante la creciente del año 1999 no se hubieran presentado desbordamientos, dado que los niveles hubieran sido aproximadamente 2.0 m inferiores a los ocurridos durante el pico de la creciente. Como era de esperarse, la menor reducción en los niveles de agua se presenta en la estación La Bolsa con valores inferiores a 0.5 m.

Debe destacarse que la Franja Forestal Protectora tendría en el escenario 1 un área aproximada de 6.400 ha, en el escenario 2 un área de 5.000 ha y en el escenario 3 un área de unas 34.400 ha (ver Cuadro 5.2).

- En las estaciones La Bolsa, Juanchito, Guayabal y La Victoria, además del descenso en los niveles altos en el escenario No. 3 en relación con los escenarios 1 y 2, también se presenta un descenso para los niveles bajos aunque éste es menos marcado que la disminución observada para niveles altos; en este caso la mayor disminución es del orden de 0.7 m y se presenta en la estación Guayabal. En las restantes estaciones los niveles bajos presentan valores similares en los tres escenarios analizados.
- Los niveles de agua calculados en el escenario No. 3 presentan, en relación con los niveles de los escenarios 1 y 2, un desfase que se va incrementando en dirección aguas abajo; el mayor desfase se presenta en la estación Anacaro, en donde el pico de la creciente ocurre aproximadamente dos días y nueve horas después en el escenario No. 3.

En las Figuras 5.19 a 5.21 se presentan los niveles de agua obtenidos al simular el escenario 1, los niveles alcanzados al modelar la creciente de febrero – marzo de 1999 modelación bajo las condiciones actuales para y los niveles correspondientes a los períodos de retorno de 10, 30 y 100 años. El análisis de estas figuras permite realizar las siguientes observaciones:

- La creciente ocurrida entre los meses de febrero y marzo del año 1999 presentó desde la estación La Balsa hasta el kilómetro 65 aproximadamente, un período de retorno cercano a los 10 años, entre el kilómetro 65 y el kilómetro 165 el período de retorno de este evento estuvo comprendido entre los 10 y los 30 años, entre el kilómetro 165 y el kilómetro 320 esta creciente presentó un período de retorno cercano a los 30 años y a partir del kilómetro 320 el período de retorno fue ligeramente superior a los 30 años.
- Si durante la creciente estudiada hubieran existido los diques proyectados durante la presente modelación, los niveles de agua hubieran sido mayores a los calculados en varios tramos del río Cauca, lo cual implica que esta creciente hubiera correspondido a eventos con mayores períodos de retorno, llegando a presentar frecuencias cercanas a 1:

100 años en algunos sitios. Debido a esto, la construcción de los diques faltantes obligará a adoptar mayores alturas de las obras de protección contra inundaciones a lo largo del río Cauca.

- Dado que las especificaciones técnicas para el diseño y la construcción de diques indican que a partir del nivel de protección especificado debe adicionarse 1.0 metro a la altura del dique y considerando que la CVC contempla una protección contra inundaciones de 30 años para los sectores agrícolas y de 100 años para los cascos urbanos, si en el año 1999 hubiesen estado construidos todos los diques riberaños de protección no se hubieran presentado desbordamientos, por cuanto el nivel de la corona del dique hubiese superado los niveles alcanzados por el agua.

Escenarios 4, 5, 6 y 7

En las Figuras 5.22 a 5.33 se presenta el perfil longitudinal de los niveles de agua calculados por el modelo en los escenarios 4 a 7. En estas gráficas se comparan los niveles calculados en estos escenarios con los obtenidos mediante modelación para la condición actual, es decir, considerando sólo los diques existentes. El análisis de esta información permite concluir lo siguiente:

- En términos generales la construcción de los diques proyectados a 60 m del borde del río generaría un incremento en los niveles de agua a lo largo del río Cauca. Este incremento alcanzaría valores cercanos a los 60 centímetros en varios sectores del río. Este comportamiento se presenta como consecuencia del mayor confinamiento impuesto al río, dado que dejarían de inundarse extensos sectores de la planicie de inundación que actualmente se encuentran sin protección contra inundaciones.
- De acuerdo con los resultados del modelo, en algunos sectores muy localizados se presentarían disminuciones en los niveles de agua al construir los diques proyectados para los períodos de retorno analizados; las disminuciones máximas serían del orden de 25 centímetros.
- Al considerar la construcción de diques a 60 metros del borde del río en los sectores sin protección se presentaría, con respecto a la condición actual, un ligero desfase por cuanto las crecientes iniciarían algunas horas antes (entre 3 y 6 horas dependiendo del período de retorno).

Finalmente, de acuerdo con los resultados del modelo, la berma debería tener un ancho no menor al ancho del cinturón meándrico, ya que esta es la condición en la que la hidrodinámica del río Cauca se vería menos modificada, por lo cual permitiría mantener el equilibrio ecológico del río, generar condiciones aptas para el sostenimiento de la biodiversidad, regular los niveles freáticos y estabilizar el clima y la hidrología del río.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

En el presente estudio se implementó un modelo matemático del sistema río Cauca – humedales, incluyendo la planicie de inundación, con el fin de analizar la interacción entre el río Cauca y sus humedales y evaluar las variaciones de los procesos hidrodinámicos (niveles de agua y caudales) cuando se consideran diferentes escenarios de localización y niveles de los diques marginales de protección contra inundaciones.

Se optimizó el modelo matemático del río Cauca en el tramo La Balsa – La Virginia mediante la inclusión de nueva información de campo, lo cual permitió obtener una mayor precisión en los resultados arrojados por el modelo, especialmente en el tramo comprendido entre las estaciones La Balsa y La Bolsa.

La representación de las planicies se llevó a cabo de tres formas diferentes: (i) áreas de almacenamiento en aquellos sectores donde no existen diques, (ii) secciones compuestas en los sectores donde existen diques y los niveles de la corona no son superados por los niveles de agua y (iii) canales en la planicie conectados al cauce principal mediante canales de conexión en las zonas en las que existen diques y se presentan desbordamientos; esta fue la esquematización a través de la cual se representaron los humedales.

Los principales parámetros de calibración del modelo fueron la rugosidad de los cauces y canales en la planicie y la geometría de los canales de conexión entre el río Cauca y la planicie. Los factores de rugosidad de Strickler que permitieron alcanzar los mejores ajustes fluctuaron entre 20 y 39 $m^{1/3}/s$; los canales de conexión fueron definidos con un ancho de 10 metros y una longitud de 3 metros, correspondientes al ancho de la corona del dique.

La construcción de los diques marginales a lo largo del río Cauca permitió la recuperación de extensas zonas para la agricultura y la ganadería. Sin embargo, estos diques han afectado la hidrodinámica del río Cauca al excluir importantes zonas de almacenamiento.

Se calcularon con el modelo los niveles de agua a lo largo del río Cauca para crecientes con períodos de retorno de 10, 25, 30 y 100 años. Los caudales correspondientes a estas crecientes en las estaciones hidrométricas fueron determinados a través del método de Gumbel, utilizando la serie de caudales máximos anuales registrados después de la entrada en operación del embalse de Salvajina para en el río Cauca y las series disponibles de caudales máximos anuales en los ríos tributarios.

De acuerdo con los resultados de la modelación, la creciente ocurrida en el período febrero – marzo de 1999 corresponde a una avenida de un período de retorno cercano a los 10 años en el sector superior del tramo de estudio (La Balsa – Juanchito); más abajo, debido a los aportes significativos de la mayoría de sus afluentes (por la intensa y prolongada temporada invernal) los caudales en el río Cauca se fueron incrementando

gradualmente hasta alcanzar valores similares a los correspondientes a períodos de retorno de 30 años en el kilómetro 310; a partir de esta abscisa el período de retorno de la creciente osciló en torno a los 30 años.

Con el objetivo de establecer criterios para la determinación del ancho óptimo de la berma se plantearon y simularon varios escenarios que permitieron evaluar el comportamiento del río en diferentes condiciones. Se consideraron tres anchos de berma: (i) ancho igual a 60 m, (ii) ancho igual a 60 m en los sectores que no existe dique e igual al ancho de la berma en los sectores en los que existe dique y (iii) ancho igual al ancho del cinturón meándrico. Los caudales modelados fueron los registrados durante la creciente de febrero – marzo del año 1999 y los correspondientes a las crecientes con períodos de retorno de 10, 25, 30 y 100 años. Los resultados de esta modelación podrán ser utilizados por la CVC para realizar la actualización del acuerdo 023 de 1979.

De acuerdo con los resultados obtenidos y como era de esperarse, la construcción de los diques proyectados a 60 m del borde del río generaría un incremento en los niveles de agua del río Cauca debido al mayor confinamiento impuesto por los diques. Este incremento alcanzaría valores cercanos a los 60 centímetros en varios sectores del río, lo cual obligaría a construir diques de mayores elevaciones y realzar los diques existentes.

Si se establece el ancho de la Franja Forestal Protectora igual al ancho del cinturón meándrico y se construyeran los diques marginales de protección contra inundaciones al final de éste, los niveles de agua del río Cauca durante los desbordamientos serían significativamente inferiores a los niveles que se obtendrían bajo la condición actual y más aún al proyectar diques distanciados a 60 m del cauce principal. La menor reducción en los niveles se presentaría en los primeros kilómetros del tramo modelado. Adicionalmente, ocurriría un desfase en el tránsito de la creciente por cuanto el caudal pico o máximo de la avenida se presentaría varias horas después con relación a la condición actual y al escenario con diques proyectados a 60 m del cauce del río Cauca.

De acuerdo con los resultados del modelo, al localizar los diques en el límite del cinturón meándrico se obtienen los niveles más bajos en el río, lo cual se aproxima mejor a la condición natural. Al ubicar los diques más próximos al cauce principal se genera un mayor confinamiento, lo cual origina mayores niveles de agua, es decir, se produce un mayor impacto en el comportamiento hidrodinámico del río

Los resultados obtenidos indican que el borde libre de 1.0 m establecido por la CVC para el diseño y la construcción de diques otorga una protección contra un evento mucho mayor al de diseño. Debido a esto, en los terrenos agrícolas en los que se construyen diques de protección contra avenidas con período de retorno de 30 años, el borde libre les proporciona una protección para eventos con períodos de retorno cercanos a 100 años.

6.2 RECOMENDACIONES

Con el propósito de mejorar la precisión de los resultados obtenidos se sugiere implementar las siguientes recomendaciones:

- Dada la intensa dinámica del río Cauca se recomienda efectuar nuevas batimetrías del cauce principal del río Cauca en su valle alto. También es conveniente realizar levantamientos topográficos de los diques marginales y la planicie aluvial en aquellos sectores en los que no se dispone de información actualizada.
- Con el fin complementar la esquematización efectuada en el modelo deben realizarse trabajos de campo ligados a la Red Geodésica de Alta Precisión de la CVC que permitan conocer con un buen grado de precisión la topografía de la llanura de inundación y de los diques marginales de protección.
- Considerando que en el valle alto del río Cauca existen más de 50 humedales, se recomienda continuar efectuando el levantamiento topobatimétrico para incluirlos en el modelo matemático. Estas mediciones siempre deben estar ligadas a la Red Geodésica de Alta Precisión de la CVC.
- Para disponer de una aproximación más precisa a las respuestas del sistema río Cauca – humedales – tributarios, deben modelarse crecientes correspondientes a diferentes períodos de retorno de los ríos afluentes al río Cauca.
- Se recomienda estudiar las respuestas del río Cauca bajo las condiciones proyectadas considerando crecientes de diferentes períodos de retorno. Esto permitirá establecer si es necesario o no el realce de los diques de protección y en que sectores debido a la imposición de mayores restricciones al flujo al construir los diques faltantes.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

BLADE I CASTELLET, E y GOMEZ VALENTIN, M. (2006). Modelación del Flujo en Lámina Libre Sobre Cauces Naturales. Análisis Integrado en Una y Dos Dimensiones. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Barcelona.

CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA CVC. (1997). Boletín Hidrológico 1996. Cali.

CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA CVC. (1985). Salvajina “El Parto de una Quimera”. Cali.

CUNGE, J.A, HOLLY, F. M., VERWEY A. (1980). Practical Aspects of Computational River Hydraulics, Pitman Publishing Limited. Londres.

CHOW, V. T. (1994). Hidrología Aplicada. Mc Graw Hill. Santa Fé de Bogotá.

DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (1999). Mike 11 A Modelling System for Rivers and Channel, Short description, Guide to Getting Started, Tutorial. Dinamarca.

GONZALEZ DEL TANAGO DEL RIO, M Y GARCIA DE JALON LASTRA, D. (1995). Restauración de Ríos y Riberas. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid

JANSEN, P. Ph., VAN BENDEGOM, L., VAN DEN BERG, J. y ZANEN, A. (1979). Principios de Ingeniería de Ríos. Pitman, Londres.

MARTIN VIDE, J. P. (1997). Ingeniería Fluvial. Escuela Colombiana de Ingeniería, Santa Fé de Bogotá.

MAZA ALVAREZ, J. A. (1987). Introducción a la Ingeniería de Ríos. Universidad Italiana per Stranieri, Perugia.

MONSALVE SAENZ, G. (1995). Hidrología en la Ingeniería. Escuela Colombiana de Ingeniería, Santa Fé de Bogotá.

UNIVERSIDAD DEL VALLE-CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA CVC. (2006). Estudio de Batimetría del Río Cauca. Tramo Suárez – Hormiguero. Cali.

UNIVERSIDAD DEL VALLE-CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA CVC. (2007). Optimización del Modelo Hidrodinámico y Generación de Mapas de Inundación del Río Cauca Tramo Yumbo – Toro. Cali.

UNIVERSIDAD DEL VALLE-CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA CVC. (2006). Estudio de Batimetría del Río Cauca. Tramo Suárez - Hormiguero. Cali.

UNIVERSIDAD DEL VALLE-CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA CVC. (2006). Levantamiento Topográfico de Ejes de Diques Marginales y Llanura de Inundación del Río Cauca. Tramo Yumbo – Tuluá. Cali.

UNIVERSIDAD DEL VALLE-CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA CVC. (2005). Optimización y Aplicaciones de los modelos Hidrodinámico, Sedimentológico y Morfológico del Río Cauca. Tramo La Balsa - La Virginia. Cali.

UNIVERSIDAD DEL VALLE-CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA CVC. (2004). Red Geodésica de Alta Precisión. Tramo Salvajina – La Virginia. Cali.

UNIVERSIDAD DEL VALLE-CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA CVC. (2004). Estudio Topobatimétrico de los Principales Ríos Tributarios del Río Cauca. Tramo Salvajina – La Virginia. Cali.

UNIVERSIDAD DEL VALLE-CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA CVC. (2001). Modelación Matemática del Río Cauca. Tramo Salvajina – La Virginia. Cali.

UNIVERSIDAD DEL VALLE-CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA CVC. (2001). Levantamiento Batimétrico del Río Cauca. Octubre – Diciembre de 2000. Tramo Salvajina – La Virginia. Cali.

UNIVERSIDAD DEL VALLE-CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA CVC. (2000). Caracterización del Río Cauca. Tramo Salvajina – La Virginia. Cali.

UNIVERSIDAD DEL VALLE-CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA CVC. (2000). Caracterización de Ríos Tributarios del Río Cauca. Tramo Salvajina – La Virginia. Cali.

UNIVERSIDAD DEL VALLE-CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA CVC. (1986). Estudio Morfológico del Río Cauca II Etapa. Informe Final. Volumen 2. Cali.

VAN RIJN, L. C. (1993). Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications, New Netherlands.

ANEXOS