

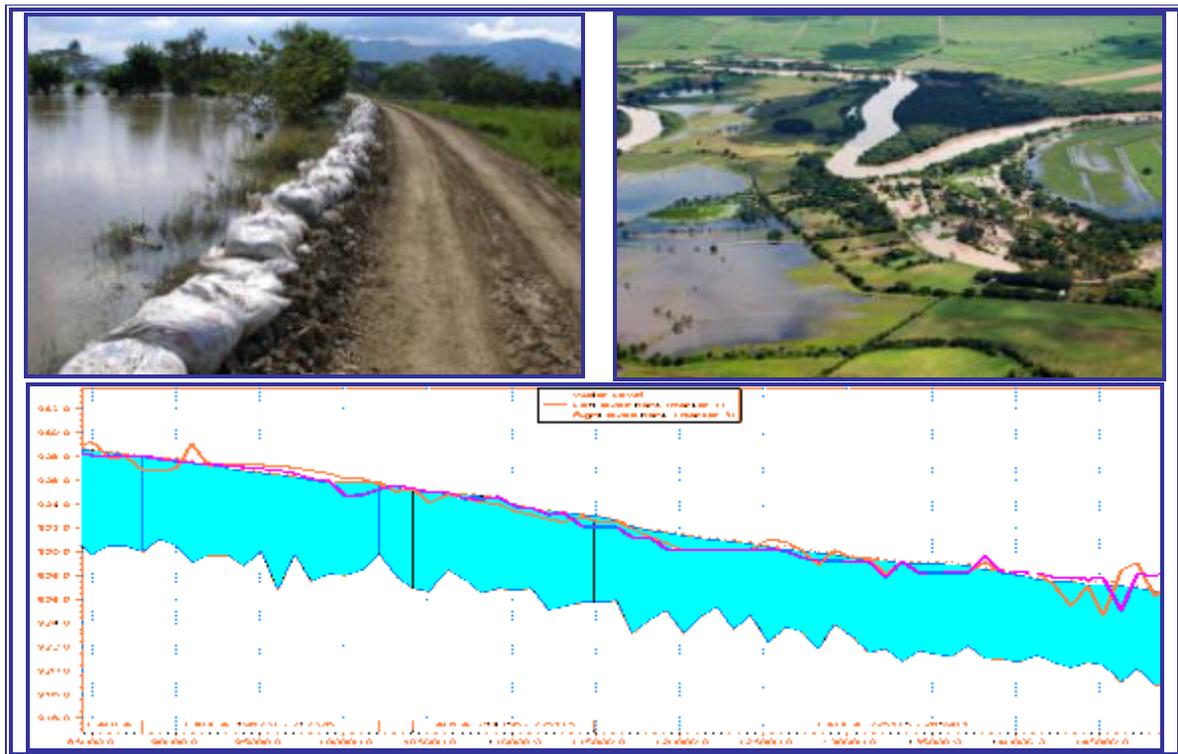


Convenio de Asociación No.001 de 2013
ASOCARS – UNIVERSIDAD DEL VALLE



**ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR INUNDACIONES DEL
RÍO CAUCA EN SU VALLE ALTO Y PLANTEAMIENTO
DE OPCIONES DE PROTECCION**

PROPUESTA Y MODELACIÓN HIDRÁULICA DE ESCENARIOS PARA LA GESTIÓN DE INUNDACIONES EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CAUCA



VOLUMEN XI

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS
NATURALES Y DEL AMBIENTE
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN
HIDRÁULICA FLUVIAL Y MARÍTIMA**



Santiago de Cali, Junio de 2014



Copia NO controlada CVC

El presente estudio fue realizado en desarrollo del Proyecto: *Zonificación de amenazas por inundaciones del río Cauca en su valle alto y planteamiento de opciones de protección*, dentro del Convenio 001 de 2013 suscrito entre ASOCARS, la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y la Universidad del Valle.

Este informe fue elaborado por la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle. Participaron en el desarrollo del informe 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 ASOCARS
Ing. Andrés Felipe Ojeda Arias	Ingeniero Agrícola
Ing. Yeni Potes Sánchez	Ingeniera Agrícola
Ing. Emilio Corrales Lalinde	Ingeniero Civil
Ing. David Cataño Benavides	Ingeniero Civil
Ing. Julián Andrés Escobar Rojas	Ingeniero Topográfico

Personal Auxiliar: participaron durante la elaboración del presente informe los siguientes estudiantes de los últimos semestres de Ingeniería:

Diana Gimena Martínez, Diana Soraya Daniela Muñoz, Elizabeth Fajardo y Valeria Patiño.

Debe destacarse la colaboración de los profesionales y técnicos de la CVC y ASOCARS quienes suministraron información para el desarrollo de este estudio. El Comité de Seguimiento de CVC estuvo integrado principalmente por:

Ing. María Clemencia Sandoval García	Coordinadora General
Ing. Mary Loly Bastidas	Interventora ASOCARS

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1.1
2	PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES PARA LA GESTIÓN DE LAS INUNDACIONES EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CAUCA..	2.1
2.1	DESCRIPCIÓN DE LAS MEDIDAS ESTRUCTURALES.....	2.1
2.1.1.	Medidas Extensivas.....	2.2
2.1.2.	Medidas Intensivas.....	2.3
2.2	MEDIDAS ESTRUCTURALES EN LA REGIÓN.....	2.3
2.3	DESCRIPCIÓN DE las ALTERNATIVAS propuestas.....	2.4
2.3.1	Embalses de regulación en tributarios.....	2.4
	Esquematzación de los embalses de regulación en ríos tributarios.....	2.5
2.3.2	Relocalización de diques.....	2.8
2.3.3	Lagunas de laminación de crecientes.....	2.12
2.3.4	Alternativa estructural de diques e integración de humedales al sistema fluvial (Acuerdo CVC 052 del año 2011).....	2.13
2.3.5	Alternativa combinada de dos o más medidas estructurales.....	2.14
2.3.6	Alternativas propuestas.....	2.15
3	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.....	3.1
3.1	REVISIÓN Y AJUSTE DEL MODELO MATEMÁTICO básico DEL RÍO CAUCA.....	3.1
3.1.1	Red de Modelación.....	3.2
3.1.2	Malla computacional.....	3.10
3.1.3	Parámetros de calibración.....	3.10
3.2	EVALUACIÓN de los efectos DEL EMBALSE DE SALVAJINA.....	3.12
3.2.1	Modelación de la creciente ocurrida en el año 2010 sin considerar el efecto del embalse de Salvajina.....	3.12
3.2.2	Modelación de la creciente ocurrida en el Año 1971 considerando una hipotética regulación de caudales del Río Cauca.....	3.14
3.3	ESQUEMATIZACIÓN Y AJUSTES DEL MODELO PARA LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS.....	3.37
3.3.1	Rugosidad.....	3.37
3.3.2	Hidrógrafas de caudales.....	3.37
3.3.3	Modelo alternativo de sólo diques distanciados 60, 90 y 120 m del cauce del río Cauca.....	3.38
3.3.4	Modelo de la alternativa estructural de diques a 60 m del río Cauca con integración de los humedales al sistema fluvial.....	3.40
3.3.5	Modelo de la alternativa estructural de diques a 60 m del río Cauca con embalses de regulación en tributarios.....	3.42
3.3.6	Modelo de la alternativa estructural de diques a 60 m del río Cauca con integración de los humedales y lagunas de laminación al sistema fluvial.....	3.42
3.3.7	Modelo de la alternativa estructural de diques a 60 m del río Cauca con lagunas de laminación.....	3.43

3.3.8	Modelo de la alternativa estructural de diques a 60 m del río Cauca con integración de humedales y embalses de regulación.....	3.43
3.3.9	Modelo de la alternativa estructural de diques a 60 m del río Cauca con lagunas de laminación y embalses de regulación.....	3.43
3.3.10	Modelo de la alternativa estructural total de diques a 60 m del río Cauca con integración de humedales, lagunas de laminación y embalses de regulación de tributarios.....	3.44
4	DETERMINACIÓN DE NIVELES DE AGUA EN EL RÍO CAUCA A SU PASO POR LA CIUDAD DE CALI MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA.....	4.1
4.1	CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS PARA LA MODELACIÓN MATEMÁTICA, CON BASE EN ESTACIÓN JUANCHITO (TR: 500 AÑOS).....	4.1
4.2	RESULTADOS.....	4.9
5	DETERMINACIÓN DE LA RONDA HÍDRICA DEL RIO CAUCA EN SU VALLE ALTO.....	5.1
5.1	INTRODUCCIÓN.....	5.1
5.2	RONDA HÍDRICA.....	5.1
5.2.1	Componentes de la ronda hídrica.....	5.1
5.2.2	Delimitación de la ronda hídrica.....	5.3
5.3	CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS PARA LA MODELACIÓN HIDRODINÁMICA de la ronda hídrica.....	5.3
5.3.1	Modelación Hidráulica.....	5.4
5.3.2	Consideración del factor de resistencia y coeficiente de rugosidad.....	5.4
5.4	RESULTADOS.....	5.5
6	ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR INUNDACIONES EN EL VALLE ALTO DEL RIO CAUCA.....	6.1
6.1	INTRODUCCIÓN.....	6.1
6.2	METODOLOGÍA DE ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR INUNDACIONES.....	6.3
6.2.1	Selección y delimitación del área de estudio.....	6.3
6.2.2	Recopilación de información de la zona de estudio.....	6.3
6.2.3	Estudio hidrológico.....	6.3
6.2.4	Estudio hidráulico.....	6.5
6.2.5	Elaboración de los mapas de inundaciones.....	6.9
6.2.6	Análisis y selección del método de clasificación de la amenaza por inundaciones.....	6.10
6.2.7	Elaboración de los mapas de amenaza por inundaciones.....	6.10
6.2.8	Mapa general o global de amenaza por inundaciones.....	6.10
6.2.9	Método de clasificación de la amenaza por inundaciones.....	6.10
6.2.10	Metodología de clasificación de la amenaza por inundaciones.....	6.13
6.2.11	Metodología seleccionada para este proyecto.....	6.16
6.3	MODELACIÓN HIDRODINÁMICA.....	6.17
6.3.1	Consideraciones metodológicas para la modelación hidrodinámica.....	6.17
6.3.2	Escenarios considerados para la Modelación Hidráulica.....	6.18
6.3.3	Determinación de Caudales Extremos.....	6.18
6.3.4	Condiciones hidrodinámicas de frontera.....	6.19
6.3.5	Simulación hidráulica.....	6.19
6.4	MAPAS DE INUNDACIONES.....	6.38

6.5	MAPAS DE AMENAZA	6.38
7	ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA LAGUNA DE SONSO EN LA HIDRODINÁMICA DEL RÍO CAUCA	7.1
7.1	INTRODUCCIÓN	7.1
7.2	CONDICIÓN ACTUAL DE LA INTERACCIÓN RÍO CAUCA – LAGUNA SONSO	7.1
7.3	ALTERNATIVAS PLANTEADAS	7.2
7.4	ESQUEMATIZACIÓN E IMPLEMENTACIÓN EN EL MODELO DE LAS ALTERNATIVAS PLANTEADAS	7.4
7.5	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE ALTERNATIVAS PLANTEADAS	7.4
7.5.1	Efectos de la conexión única en la zona norte de la Laguna (Caño Nuevo) .	7.4
7.5.2	Efectos de una conexión única Río Cauca – Laguna de Sonso en la zona sur	7.7
7.5.3	Efectos de una doble conexión Río Cauca – Laguna de Sonso localizadas en los extremos sur (abscisa K206+272) y norte (abscisa K223+037) de la Laguna	7.10
8	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA DE MEDIDAS ESTRUCTURALES	8.1
8.1	RELOCALIZACIÓN DE DIQUES	8.1
8.2	ACUERDO CVC 052 (DIQUES A 60 M + HUMEDALES)	8.11
8.3	LAGUNAS DE LAMINACIÓN	8.11
8.4	EMBALSES EN TRIBUTARIOS	8.12
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	9.1
9.1	CONCLUSIONES	9.1
9.2	RECOMENDACIONES	9.5
10	BIBLIOGRAFÍA	10.1

LISTADO DE CUADROS

Cuadro 2.1. Descripción de los principales tipos de medidas estructurales	2.2
Cuadro 2.2. Cálculo de caudales regulados para embalses	2.5
Cuadro 2.3. Características de los embalses de regulación propuestos	2.6
Cuadro 2.4. Localización de diques e integración de humedales al sistema fluvial.....	2.9
Cuadro 2.5. Características generales de las Lagunas de Laminación propuestas	2.12
Cuadro 2.6 Alternativas estructurales propuestas para el manejo de las inundaciones en el corredor del río Cauca	2.16
Cuadro 3.1 Fronteras definidas en la modelación Tramo La Balsa – La Virginia	3.4
Cuadro 3.2 Longitud y número de secciones transversales utilizadas en los ríos tributarios esquemáticos como brazos laterales	3.7
Cuadro 3.3 Factores de rugosidad de Manning – Strickler ($m^{1/3}/s$) del río Cauca definidas durante la calibración del modelo hidrodinámico	3.11
Cuadro 3.4 Niveles de Interfase definidos del río Cauca durante la Calibración del Modelo Hidrodinámico	3.11
Cuadro 3.5 Rugosidad, niveles de interface y factores de resistencia del río Cauca y ríos tributarios definidos para el modelo hidrodinámico.....	3.38
Cuadro 3.6 Caudales Máximos estimados en las estaciones hidrométricas del río Cauca para una creciente con un periodo de retorno de 30 años.....	3.39
Cuadro 3.7 Caudales Máximos estimados en las Fronteras del Modelo Hidrodinámico para un periodo de retorno de 30 años.....	3.39
Cuadro 3.8 Conexiones directas al río Cauca en los modelos de sólo diques a 60 m, 90 m y 120 m del río Cauca.....	3.40
Cuadro 3.9 Humedales incluidos en la alternativa modelada de diques a 60 m con integración de humedales al sistema fluvial	3.41
Cuadro 3.10 Caudales estimados para representar la disminución en los aportes de caudales de los ríos Timba, Riofrío y Bugalagrande al río Cauca por la implementación de embalses	3.42
Cuadro 3.11 Identificación de lagunas de laminación esquematizadas en el modelo	3.44
Cuadro 3.12 Diferentes configuraciones simuladas y evaluadas de la conexión entre el río Cauca y las lagunas de laminación en la alternativa estructural total	3.45
Cuadro 4.1. Caudales Máximos estimados para un periodo de retorno de 500 años en la estación Juanchito de acuerdo con las distribuciones de Gumbel, LogNormal y	4.1
Cuadro 4.2. Resultados de la Modelación Matemática, Tramo Canal Interceptor –Río Cali para un Tr de 500 años	4.2
Cuadro 4.3. Resultados Modelación Matemática, Tramo Canal Interceptor-Río Cali.....	4.3
Cuadro 4.4. Nivel del Dique Tr 500 años – Haskoning y Corporación OSSO	4.5
Cuadro 4.5 Niveles del Thalweg y de la Banca Llena de la margen izquierda del río Cauca, tramo Canal Interceptor –Río Cali, obtenido de la batimetría realizada por la CVC en el año 2012	4.6
Cuadro 4.6. Nivel de agua Tr 500 años – Haskoning y Corporación OSSO.....	4.8
Cuadro 5.1 Rugosidad, niveles de interfase y factores de resistencia del río Cauca definidas para el modelo hidrodinámico de la ronda hídrica	5.5

Cuadro 6.1 Clasificación de la magnitud o intensidad de la inundación según la profundidad de agua, la velocidad del flujo y/o el caudal unitario en las zonas inundadas	6.11
Cuadro 6.2 Clasificación de la frecuencia de la inundación según el período de retorno de la creciente en el río.....	6.11
Cuadro 6.3 Metodología 1 para la clasificación de la amenaza según la magnitud	6.14
Cuadro 6.4 Metodología 2 para la clasificación de la amenaza según la frecuencia de ocurrencia del evento de inundación	6.14
Cuadro 6.5 Metodología 3 para la clasificación de la amenaza según la magnitud y la frecuencia de ocurrencia de la inundación	6.15
Cuadro 6.6 Metodología 4 para la clasificación de la amenaza según la magnitud y la frecuencia de ocurrencia de la inundación	6.16
Cuadro 6.7. Metodología 5 para la clasificación de la amenaza según la magnitud y la frecuencia de ocurrencia de la inundación	6.16
Cuadro 6.8 Clasificación de la frecuencia de la inundación según el período de retorno de la creciente en el río Cauca y adoptada en el proyecto.....	6.16
Cuadro 6.9 Clasificación de la magnitud de la inundación según la profundidad de agua en el área afectada por el desbordamiento del río Cauca y adoptada en el proyecto	6.17
Cuadro 6.10 Clasificación de la amenaza por las inundaciones causadas por el desbordamiento del río Cauca	6.17
Cuadro 6.11. Nivel de frecuencia de los eventos de inundaciones.....	6.18
Cuadro 6.12. Caudales Máximos estimados para la creciente de 2011 en las Estaciones Hidrométricas del Río Cauca.....	6.19
Cuadro 6.13. Caudales Máximos estimados para la creciente de 2011 en los Tributarios del Río Cauca	6.20
Cuadro 6.14 Niveles máximos y Niveles a banca llena por estación para los diferentes periodos de retorno	6.21
Cuadro 7.1 Alternativas propuestas para la conexión río Cauca Laguna de Sonso	7.5
Cuadro 8.1 Caudales máximos en el río Cauca calculados para diferentes localizaciones de los diques marginales de protección Periodo de Retorno: 30 años	8.2
Cuadro 8.2 Niveles de agua máximos en el río Cauca calculados para diferentes localizaciones de los diques marginales de protección Periodo de Retorno: 30 años.....	8.10

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1. Efecto del retiro de la cobertura vegetal en el escurrimiento.....	2.3
Figura 2.2 Esquema de localización del embalse del río Timba	2.6
Figura 2.3 Esquema de localización del embalse del río Bugalagrande	2.7
Figura 2.4 Esquema de localización del embalse del río Riofrío	2.7
Figura 2.5 Esquema de relocalización de diques de protección contra inundaciones a 60m, 90m y 120m del cauce principal del río Cauca	2.8
Figura 2.6 Ubicación de diques según el Acuerdo 052 del año 2011	2.14
Figura 2.7 Esquema de medidas estructurales en la planicie	2.15
Figura 3.1 Esquematación del Sistema río Cauca – Tributarios – Planicie – Humedales	3.3
Figura 3.2 Condición hidrodinámica en la frontera aguas arriba	3.9
Figura 3.3 Condición hidrodinámica en la frontera aguas abajo curva de calibración Nivel – Caudal - Estación: La Virginia Periodo: Octubre 1998 – Marzo 1999.....	3.10
Figura 3.4. Zonas y niveles de interfase en una sección típica del río Cauca	3.11
Figura 3.5 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: La Bolsa Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Caudal calculado vs Caudal medido	3.16
Figura 3.6 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: La Bolsa Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Nivel calculado vs Nivel medido	3.16
Figura 3.7 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Hormiguero Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Caudal calculado vs Caudal medido	3.17
Figura 3.8 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Hormiguero Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Nivel calculado vs Nivel medido	3.17
Figura 3.9 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Juanchito Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Caudal calculado vs Caudal medido	3.18
Figura 3.10 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Juanchito Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Nivel calculado vs Nivel medido	3.18
Figura 3.11 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Mediacanoa Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Caudal calculado vs Caudal medido	3.19
Figura 3.12 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Mediacanoa Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Nivel calculado vs Nivel medido	3.19
Figura 3.13 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Guayabal Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Caudal calculado vs Caudal medido	3.20
Figura 3.14 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Guayabal Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Nivel calculado vs Nivel medido	3.20
Figura 3.15 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: La Victoria Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Caudal calculado vs Caudal medido	3.21
Figura 3.16 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: La Victoria Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Nivel calculado vs Nivel medido	3.21
Figura 3.17 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Anacaro Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Caudal calculado vs Caudal medido	3.22
Figura 3.18 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Anacaro Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Nivel calculado vs Nivel medido	3.22
Figura 3.19 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: La Bolsa.....	3.23

Figura 3.20 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: La Bolsa	3.23
Figura 3.21 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: Hormiguero	3.24
Figura 3.22 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: Hormiguero	3.24
Figura 3.23 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: Juanchito	3.25
Figura 3.24 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: Juanchito	3.25
Figura 3.25 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: Mediacanoa	3.26
Figura 3.26 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: Mediacanoa	3.26
Figura 3.27 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: Guayabal	3.27
Figura 3.28 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: Guayabal	3.27
Figura 3.29 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: La Victoria	3.28
Figura 3.30 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: La Victoria	3.28
Figura 3.31 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: Anacaro	3.29
Figura 3.32 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: Anacaro	3.29
Figura 3.33 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente ocurrida entre 1970 y 1971 2010. Estación: La Bolsa	3.30
Figura 3.34 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente ocurrida entre 1970 y 1970. Estación: La Bolsa..	3.30
Figura 3.35 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente ocurrida entre 1970 y 1971 2010. Estación: Hormiguero	3.31
Figura 3.36 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente ocurrida entre 1970 y 1970. Estación: Hormiguero	3.31
Figura 3.37 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente ocurrida entre 1970 y 1971 2010. Estación: Juanchito	3.32
Figura 3.38 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente ocurrida entre 1970 y 1970. Estación: Juanchito.	3.32
Figura 3.39 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente ocurrida entre 1970 y 1971 2010. Estación: Mediacanoa	3.33
Figura 3.40 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente ocurrida entre 1970 y 1970. Estación: Mediacanoa	3.33
Figura 3.41 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente ocurrida entre 1970 y 1971 2010. Estación: Guayabal	3.34

Figura 3.42 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente ocurrida entre 1970 y 1970. Estación: Guayabal.	3.34
Figura 3.43 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente ocurrida entre 1970 y 1971 2010. Estación: La Victoria	3.35
Figura 3.44 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente ocurrida entre 1970 y 1970. Estación: La Victoria	3.35
Figura 3.45 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente ocurrida entre 1970 y 1971 2010. Estación: Anacaro	3.36
Figura 3.46 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente ocurrida entre 1970 y 1970. Estación: Anacaro	3.36
Figura 4.1. Curva de Calibración Nivel-Caudal en la Estación Juanchito	4.7
Figura 4.2. Niveles de agua en el río Cauca, tramo Canal Interceptor - Río Cali para un evento con un período de retorno de 500 años	4.10
Figura 4.3. Niveles de agua en el río Cauca, tramo Canal Interceptor - Río Cali para un evento con un período de retorno de 500 años	4.11
Figura 4.4 Nivel Requerido Dique para $Tr = 500$ años – $Q = 1355$ m ³ /s, Borde Libre = 1 m	4.12
Figura 4.5. Realce Dique de protección de la ciudad de Cali para la creciente de $Tr = 500$ años	4.13
Figura 5.1 Componentes de la ronda hídrica	5.2
Figura 5.2. Niveles de agua en el Río Cauca para la alternativa de ronda hídrica (TR=15 años)	5.7
Figura 5.3. Niveles de agua en el Río Cauca para la alternativa de ronda hídrica	5.8
Figura 5.4 Niveles de agua en el Río Cauca para la alternativa de ronda hídrica	5.8
Figura 5.5. Niveles de agua en el Río Cauca para la alternativa de ronda hídrica	5.9
Figura 5.6 Niveles de agua en el Río Cauca para la alternativa de ronda hídrica	5.9
Figura 6.1 Área inundada en la planicie cuando se presenta en el río una creciente de frecuencia alta	6.12
Figura 6.2 Área inundada en la planicie cuando se presenta en el río una creciente de frecuencia media	6.12
Figura 6.3 Área inundada en la planicie cuando se presenta en el río una creciente de frecuencia baja	6.13
Figura 6.4 Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques	6.22
Figura 6.5. Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques	6.23
Figura 6.6 Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques	6.23
Figura 6.7. Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques	6.24
Figura 6.8 Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques	6.24
Figura 6.9. Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques	6.25
Figura 6.10. Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques	6.26
Figura 6.11. Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques	6.26
Figura 6.12. Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques	6.27
Figura 6.13 Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques	6.27
Figura 6.14 Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques	6.28
Figura 6.15 Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques	6.29
Figura 6.16 Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques	6.29
Figura 6.17 Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques	6.30

Figura 6.18 Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques.....	6.30
Figura 6.19 Caudales de agua calculados en el Río Cauca	6.32
Figura 6.20 Niveles de agua calculados en el Río Cauca.....	6.32
Figura 6.21 Caudales de agua calculados en el Río Cauca	6.33
Figura 6.22 Niveles de agua calculados en el Río Cauca.....	6.33
Figura 6.23 Caudales de agua calculados en el Río Cauca	6.34
Figura 6.24. Niveles de agua calculados en el Río Cauca.....	6.34
Figura 7.1 Comunicación actual entre el río Cauca y la Laguna de Sonso	7.2
Figura 7.2 Disminución máxima del Nivel de Agua en el río Cauca considerando la conexión actual Río – Laguna de Sonso a través de Caño Nuevo con respecto a la alternativa hipotética sin conexión río laguna. - Escenario: Creciente Tr 30 años.....	7.6
Figura 7.3 Disminución máxima de los Niveles de Agua en el río Cauca considerando diferentes anchos del canal Caño Nuevo con respecto a la conexión actual (Caño Nuevo de 10m de ancho) - Escenario Creciente Tr 30 años	7.6
Figura 7.4 Disminución máxima de los Niveles de Agua en el río Cauca considerando diferentes anchos del canal Caño Nuevo con respecto a la conexión actual (Caño Nuevo de 10m de ancho) - Escenario Creciente Tr 30 años	7.7
Figura 7.5 Disminución máxima de los caudales en el río Cauca considerando una conexión única al sur (abscisa K206 + 272) con diferentes niveles de fondo y ancho constante de 10 m con respecto a la conexión actual al norte en caño Nuevo Escenario: Creciente Tr 30 años.....	7.8
Figura 7.6 Disminución máxima de los niveles de agua en el río Cauca considerando una conexión única al sur con diferentes anchos y un nivel de fondo cte. de 935.00 msnm con respecto a la conexión actual al norte en caño Nuevo Escenario: Creciente Tr 30 años.....	7.9
Figura 7.7 Disminución máxima de los niveles de agua en el río Cauca considerando una conexión única al sur con diferentes anchos y un nivel de fondo cte. de 936.83 msnm con respecto a la conexión actual al norte en caño Nuevo Escenario: Creciente Tr 30 años...	7.10
Figura 7.8 Disminución máxima de los niveles de agua en el río Cauca considerando una doble conexión río – laguna, con diferentes anchos en la conexión sur y un nivel de entrada en la cota 938.33 msnm, con respecto a la conexión actual al norte en caño Nuevo Escenario: Creciente Tr 30 años.....	7.12
Figura 7.9 Disminución máxima de los niveles de agua en el río Cauca considerando una doble conexión río – laguna, con diferentes anchos en la conexión sur y un nivel de entrada en la cota 936.83 msnm, con respecto a la conexión actual al norte en caño Nuevo Escenario: Creciente Tr 30 años.....	7.12
Figura 7.10 Caudales en la Laguna de Sonso (sección k5+850) considerando una doble conexión río-laguna, con diferentes anchos en la conexión sur y un nivel de entrada en la cota 936.83 msnm, con respecto a la conexión actual al norte en Caño Nuevo Escenario: Creciente de Tr 30 años	7.13
Figura 7.11 Caudales en la Laguna de Sonso (sección k5+850) considerando una doble conexión río-laguna, con diferentes anchos en la conexión sur y un nivel de entrada en la cota 936.83 msnm, con respecto a la conexión actual al norte en Caño Nuevo Escenario: Creciente de Tr 30 años	7.13
Figura 7.12 Caudales en la Laguna de Sonso (sección k5+850) considerando una doble conexión río-laguna, con diferentes anchos en la conexión sur y un nivel de entrada en la cota 938.33 msnm, con respecto a la conexión actual al norte en Caño Nuevo Escenario: Creciente de Tr 30 años	7.14

Figura 7.13 Caudales en la Laguna de Sonso (sección k8+250) considerando una doble conexión río-laguna, con diferentes anchos en la conexión sur y un nivel de entrada en la cota 938.33 msnm, con respecto a la conexión actual al norte en Caño Nuevo Escenario: Creciente de Tr 30 años	7.14
Figura 7.14 Niveles en la Laguna de Sonso (sección k5+700) considerando una doble conexión río-laugna, con diferentes anchos en la conexión sur y un nivel d entrada en la cota 936.83 msnm Escenario: Creciente Tr 30 años	7.15
Figura 7.15 Niveles en la Laguna de Sonso (sección k5+700) considerando una doble conexión río-laugna, con diferentes anchos en la conexión sur y un nivel d entrada en la cota 938.33 msnm Escenario: Creciente Tr 30 años	7.15
Figura 7.16 Caudales en las dos conexiones río Cauca – Laguna de Sonso considerando diferentes anchos en la conexión sur y un nivel de entrada en la cota 936.83 msnm Escenario: Creciente de Tr 30 años	7.16
Figura 7.17 Caudales en las dos conexiones río Cauca – Laguna de Sonso considerando diferentes anchos en la conexión sur y un nivel de entrada en la cota 938.33 msnm Escenario: Creciente de Tr 30 años	7.16
Figura 8.1 Caudales en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques.....	8.3
Figura 8.2 Niveles de agua en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques...	8.3
Figura 8.3 Caudales en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques marginales	8.4
Figura 8.4 Niveles de agua en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques...	8.4
Figura 8.5 Caudales en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques.....	8.5
Figura 8.6 Niveles de agua en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques...	8.5
Figura 8.7 Caudales en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques.....	8.6
Figura 8.8 Niveles de agua en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques...	8.6
Figura 8.9 Caudales en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques.....	8.7
Figura 8.10 Niveles de agua en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques.	8.7
Figura 8.11 Caudales en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques.....	8.8
Figura 8.12 Niveles de agua en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques.	8.8
Figura 8.13 Disminución relativa de los niveles de agua máximos en el río Cauca considerando diferentes localizaciones de los diques marginales de protección Período de Retorno: 30 años.....	8.9
Figura 8.14 Disminución de los Niveles de agua en el Río Cauca considerando la alternativa 5 (Diques a 60 m + Humedales + Laguna de laminación) respecto a la alternativa 1 (Diques a 60 m del cauce), para diferentes anchos y niveles de entrada a las Lagunas de Lamin	8.15
Figura 8.15 Disminución de los Niveles de agua en el Río Cauca considerando la alternativa 8 (Diques a 60 m + Humedales + Laguna de laminación + Embalses) respecto a la alternativa 2 (Diques a 60 m del cauce + Humedales), para diferentes anchos y niveles de entrada	8.16
Figura 8.16 Disminución de los Niveles de agua en el Río Cauca considerando la alternativa 8 (Diques a 60 m + Humedales + Laguna de laminación + Embalses) respecto a la alternativa 2 (Diques a 60 m del cauce + Humedales), para diferentes anchos y niveles de entrada	8.17
Figura 8.17 Disminución de los Niveles de agua en el Río Cauca considerando la alternativa 8 (Diques a 60 m + Humedales + Laguna de laminación + Embalses) respecto a la alternativa 1 (Diques a 60 m del cauce), para diferentes anchos y.....	8.18

Figura 8.18 Disminución de los Niveles de agua en el Río Cauca considerando diferentes alternativas para el manejo de las inundaciones con respecto a la alternativa 1 (Diques a 60 m del cauce) Escenario: Periodo de Retorno = 30 años 8.19

Figura 8.19 Disminución de los Niveles de agua en el Río Cauca considerando diferentes alternativa para el manejo de las inundaciones con respecto a la alternativa 2 (Diques a 60 m del cauce + Humedales) Escenario: Periodo de Retorno = 30 años 8.20

1 INTRODUCCIÓN

Las condiciones climáticas, hidrológicas, hidráulicas y geomorfológicas del valle alto del río Cauca propician la generación de crecientes en el río y sus tributarios durante los períodos de invierno, originado con cierta frecuencia el desbordamiento del río y la inundación de la planicie adyacente. Las inundaciones son parte importante de la dinámica natural de los ríos y son necesarias para mantener su buen estado ecológico, por cuanto en ellas se produce un aporte significativo de sedimentos y nutrientes, contribuyendo a la fertilización de las tierras de cultivo. Sin embargo, las intervenciones indebidas en la planicie y la disminución de la capacidad reguladora de la cuenca (por la deforestación, los cambios en los usos del suelo, la ganadería extensiva, etc.) así como el cambio y la variabilidad climática (fenómeno de La Niña) han ido incrementando la magnitud y frecuencia de los eventos extremos y, por ende, los impactos negativos de las inundaciones.

Debido al desarrollo socioeconómico del Valle del Cauca se ha ocupado una parte importante de la planicie de inundación, por lo cual cuando se presenta el desbordamiento del río Cauca se afecta el normal desarrollo de las diferentes actividades productivas en la región. Las inundaciones durante la ola invernal del período 2010-2011 causaron cuantiosas pérdidas en los diferentes sectores productivos y en poblaciones ribereñas. Entre las principales causas de estas pérdidas se pueden mencionar: la ocupación indebida de la planicie natural de inundación del río, las intervenciones u obras de protección deficientes (obras incompletas, localizadas en sitios inapropiados y diseñadas y construidas sin suficiente rigor técnico) y la deficiente gobernabilidad (baja presencia de las instituciones, falta claridad en la definición de funciones y competencias y falta de personal para realizar el seguimiento de los procesos).

Esta problemática llevó a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC, a plantear un proyecto piloto en la zona hidrográfica del alto Cauca, consistente en la construcción de un modelo conceptual para la restauración del corredor de conservación y uso sostenible del sistema río Cauca en su valle alto, considerando escenarios de cambio climático. Con este proyecto la CVC pretende realizar una planificación regional de mediano y largo plazo en el nivel de zona hidrográfica, la cual permitirá definir la ruta a seguir en gestión del riesgo por inundaciones causadas por crecientes en cauces aluviales. Se requiere con urgencia replantear el modelo de adecuación de tierras para el control de inundaciones propuesto años atrás por la CVC e implementado parcialmente, considerando los nuevos enfoques de sostenibilidad y proponer acciones para devolverle al río el espacio que requiere para el desarrollo de sus funciones, el mejoramiento de las condiciones ambientales en las áreas que rodean el cauce y minimizar los efectos adversos de las inundaciones.

Entre las diferentes medidas estructurales más empleadas en la actualidad a nivel mundial para lograr una gestión más eficiente y eficaz del riesgo de inundaciones se tienen las siguientes: lagunas de laminación de crecientes ubicadas sobre la planicie aluvial; relocalización de los diques marginales de protección a mayores distancias del cauce principal del río; construcción de un doble dique, considerando un dique bajo y cercano al río y otro dique más alto y más alejado del cauce principal; reintegración de los humedales y cauces abandonados a la dinámica del río; descenso de las bermas adyacentes al cauce;

canales paralelos al cauce principal para transportar los caudales desbordados del cauce principal; y, construcción de embalses de regulación en ríos tributarios.

La Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC se halla adelantando la primera fase de este proyecto y a partir de sus conclusiones y propuestas se pretende desarrollar un plan director para el río Cauca con un horizonte al año 2050, llevando a cabo una serie de medidas de sensibilización e intervención para conservar en buen estado el río Cauca, siempre desde el marco de la participación de la población y de los principales actores de la región. En el marco de esta primera fase, la Universidad del Valle adelanta para ASOCARS y la CVC los estudios de “Zonificación de amenazas por desbordamientos del río Cauca en su valle alto y planteamiento y selección de opciones de protección a partir del análisis de información y modelación de escenarios”.

El presente informe hace parte de dichos estudios y tiene por objeto plantear y evaluar hidráulicamente, mediante la modelación matemática, diferentes alternativas estructurales para lograr una mejor gestión del riesgo por inundaciones causadas por el desbordamiento del río Cauca en su valle alto. Cada una de las medidas estructurales propuestas fue simulada numéricamente para identificar su influencia sobre los niveles y caudales durante las crecientes del río Cauca.

En el Capítulo 2 de este informe inicialmente se presenta una descripción general de los diferentes tipos de medidas, extensivas e intensivas, utilizadas en la actualidad para lograr una mejor gestión del riego por inundaciones. Los nuevos enfoques y las tendencias actuales que se están implementando con éxito alrededor del mundo buscan devolverle al sistema fluvial parte del espacio que le pertenece para regular o laminar de forma más natural las crecientes, permitiendo el almacenamiento temporal en algunas las zonas más bajas de la planicie contigua al cauce y disminuyendo los caudales y los niveles de agua, obteniendo como resultado una reducción de los niveles de amenaza, y, por ende, mitigando los riesgos por inundaciones. Posteriormente en el capítulo se describen brevemente las medidas o alternativas estructurales que se considera pueden contribuir a la laminación o regulación de las crecientes en el río Cauca, teniendo en cuenta para ello las características del sistema fluvial y las experiencias de los problemas y fallas del sistema actual de protección observadas en las crecientes históricas, en especial, las más recientes del periodo 2010-2012.

En el Capítulo 3 se presenta la revisión y el ajuste del modelo matemático disponible actualmente del sistema río Cauca y sus afluentes, el cual fue implementado por la CVC y la Universidad del Valle durante los estudios del Proyecto de Modelación del río Cauca y de Interacción del sistema río Cauca-tributarios-humedales. En este capítulo también se evalúa, mediante la modelación matemática, la influencia del embalse de la Salvajina sobre la hidrodinámica del río Cauca durante las crecientes. Se realizó la simulación de la creciente del año 1971, asumiendo que existiese el embalse, una regulación hipotética de los caudales del río Cauca en el sector de Salvajina e igualmente se efectuó la simulación de la creciente del año 2011 suponiendo que no existiese la represa de Salvajina.

En el Capítulo 4 se incluyen los resultados de los estudios de modelación realizados enfocados específicamente en la determinación de los niveles de agua en el río Cauca a su

paso por la ciudad de Cali durante crecientes en el río Cauca de periodos de retorno de 100 y 500 años, con el fin de establecer los niveles requeridos del dique marginal de protección de la ciudad, denominado Jarillón Aguablanca.

Posteriormente, en el Capítulo 5 se presenta el proceso de implementación y construcción del modelo matemático que permitió determinar la extensión de la ronda hídrica, definida como aquellas áreas que son inundadas durante una creciente en el río Cauca con un período de retorno de 15 años y suponiendo una condición de no intervenciones en la llanura de inundación, es decir, asumiendo la no existencia de diques marginales de protección para permitir la inundación natural de la planicie aluvial.

En el Capítulo 6 del informe se presenta la zonificación de la amenaza por inundaciones en el valle alto del río Cauca causadas por su desbordamiento durante crecientes con períodos de retorno de 15, 30 y 100 años. En la primera parte del capítulo se presenta una metodología general para la zonificación de la amenaza por inundaciones causadas por el desbordamiento de ríos, la cual se puede aplicar a otros ríos de la región y del país. En la segunda parte se presentan los estudios realizados para simular numéricamente las crecientes en el río Cauca y generar primero los mapas de inundaciones y finalmente los mapas de amenaza por inundaciones.

Teniendo en cuenta la importancia de la laguna de Sonso para la región, la cual cumple múltiples funciones, entre ellas la de laminación de las crecientes del río Cauca, en el Capítulo 7 se realizó, mediante la modelación matemática, un análisis de los posibles efectos sobre la hidrodinámica de la laguna de Sonso y los niveles de agua en el río Cauca de diferentes alternativas, considerando varias opciones de conexión entre el río Cauca y la laguna.

En el Capítulo 8 se incluye la modelación matemática de las medidas o alternativas estructurales que se consideraron en el estudio con el fin de lograr la laminación o regulación de las crecientes en el río Cauca y reducir, en consecuencia, los caudales y los niveles de agua en el río Cauca. Las medidas estructurales modeladas fueron: localización de diques de protección a diferentes distancias del cauce del río Cauca, lagunas de laminación de crecientes, integración de los humedales existentes al sistema fluvial y embalses de regulación en algunos ríos tributarios del río Cauca. Se describe el proceso de implementación en el modelo de las alternativas, se presentan los resultados obtenidos orientados principalmente a comparar la magnitud de la reducción de los niveles de agua con respecto a la alternativa que considera sólo diques marginales de protección localizados a una distancia de 60 metros del cauce del río Cauca.

Por último, en el Capítulo 9 se presentan las principales conclusiones y recomendaciones del estudio.

2 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES PARA LA GESTIÓN DE LAS INUNDACIONES EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CAUCA

Para el manejo del riesgo por inundaciones es posible implementar tanto medidas estructurales como no estructurales. Sin embargo, dado que no es posible diseñar y construir estructuras para brindar una protección total, la estrategia más eficaz para la gestión del riesgo por inundaciones se obtiene cuando se combinan las medidas estructurales y no estructurales, ya que estas últimas complementan a las primeras contribuyendo a disminuir las pérdidas a un costo menor (Escuder, 2010; Tucci y Bertoni, 2003).

Las medidas no estructurales corresponden a aquellas medidas que permiten una mejor convivencia de la comunidad con las crecientes, minimizando los impactos negativos a través de medidas de prevención como la zonificación de amenaza, vulnerabilidad y riesgos de inundación, los sistemas de pronóstico y alerta temprana, los seguros contra inundaciones, las medidas de protección individual, las construcciones resistentes a inundaciones y los planes de reubicación (Tucci, 2007; Alveirinho, 2006).

Las medidas estructurales corresponden a obras de ingeniería que modifican el sistema fluvial (en la cuenca, el río o la planicie aluvial) con el objetivo de lograr un mejor manejo de las inundaciones, disminuyendo los caudales y los niveles en el río, y por ende, la magnitud y frecuencia de la amenaza por inundación. Las medidas estructurales pueden ser de diferentes tipos y características que las convierten en apropiadas o no dependiendo de las condiciones de cada situación en particular. A continuación se presenta una breve descripción de estas medidas.

2.1 DESCRIPCIÓN DE LAS MEDIDAS ESTRUCTURALES

Las medidas estructurales corresponden a obras de ingeniería que pretenden modificar el sistema fluvial para reducir los caudales y los niveles de agua en el río. Los nuevos enfoques y las tendencias actuales que se están implementando con éxito alrededor del mundo buscan devolverle al sistema fluvial parte del espacio que le pertenece para regular o laminar de forma más natural las crecientes, permitiendo el almacenamiento temporal en algunas las zonas más bajas de la planicie contigua al cauce y disminuyendo los caudales y los niveles de agua, obteniendo como resultado una reducción de los niveles de amenaza y riesgo por inundaciones.

Cuando las medidas estructurales se implementan a nivel de la cuenca reciben el nombre de extensivas y cuando se implementan en el río y la planicie se denominan intensivas (Tucci, 2007; Invías, 2011). En el Cuadro 2.1 se presentan las principales características de las medidas estructurales.

Cuadro 2.1. Descripción de los principales tipos de medidas estructurales

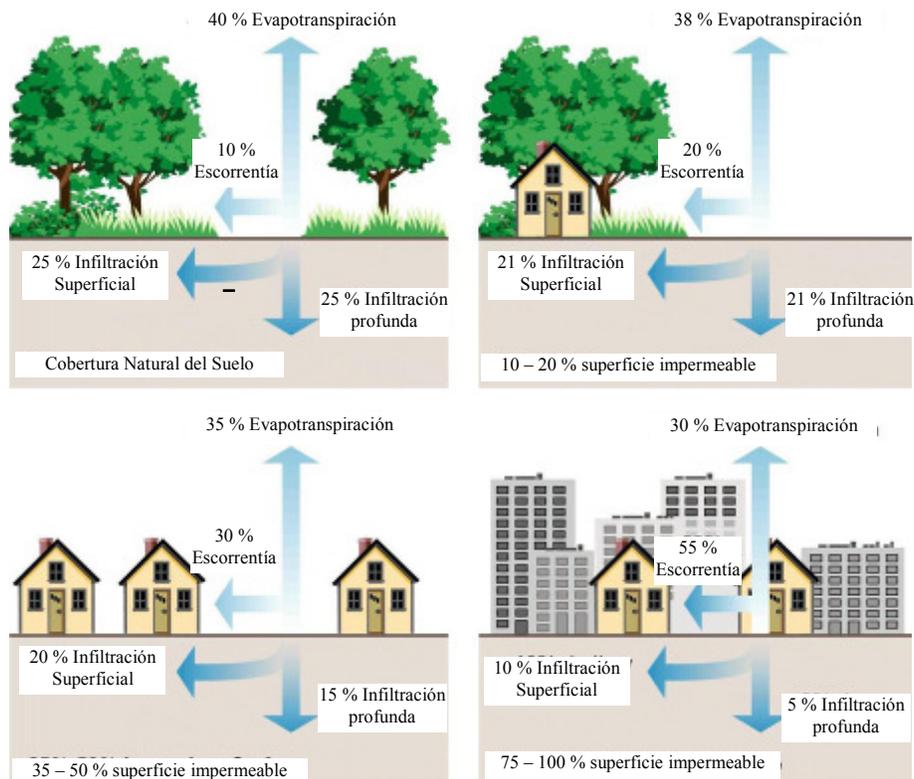
Medidas Estructurales		Ventaja	Desventaja	Aplicación
Extensivas	Cambio de la Cobertura Vegetal	Reducción del pico de la creciente	Inaplicable en áreas grandes	Cuencas Pequeñas
	Control de erosión	Reducción del escurrimiento	Inaplicable en áreas grandes	Cuencas Pequeñas
Intensivas	Construcción de Diques	Alto grado de protección	Generación de daños grandes si fallan	Ríos grandes
	Desobstrucción - Reducción de la rugosidad	Aumento de la capacidad de drenaje	Efecto puntual	Ríos pequeños
	Corte de Meandros	Aceleración del escurrimiento	Impacto negativo en ríos aluviales	Áreas de inundación estrechas
	Construcción de Represas	Regulación de la creciente	Difícil Localización	Cuencas medianas
	Canales de Desvío	Reducción del caudal en el canal principal	Dependencia de la topografía	Cuencas medianas y grandes
	Lagunas de laminación	Regulación de la creciente	Dependencia de la topografía	Cuencas pequeñas y medianas

2.1.1. Medidas Extensivas

Las medidas extensivas corresponden a intervenciones en la cuenca que buscan modificar la relación precipitación – caudal. Entre estas medidas se tienen la alteración de la cobertura vegetal del suelo y el control de la erosión de la cuenca.

La cobertura vegetal reduce y retarda los picos de las crecientes mediante el almacenamiento de una parte de la precipitación a través de la interceptación vegetal, el aumento de la evapotranspiración y la reducción de las velocidades de flujo. El aumento de la cobertura es una medida extensiva para el manejo de las inundaciones que aporta buenos resultados en cuencas pequeñas (áreas menores a 10 km²).

Debe evitarse la erosión del suelo de la cuenca por cuanto ésta tiene altos impactos ambientales debido al transporte de sedimentos. Entre estos impactos se tienen la disminución de la sección de los ríos, la alteración de la relación entre el transporte y la capacidad de transporte, la posible contaminación de los ríos aguas abajo y el aumento de la frecuencia de las inundaciones en los sectores en los que se produzca agradación del fondo. El control de la erosión se puede realizar mediante reforestación, construcción de pequeños reservorios, obras de estabilización de orillas e implementación de técnica agropecuarias adecuadas.

Figura 2.1. Efecto del retiro de la cobertura vegetal en el escurrimiento

Fuente: Federal Interagency Stream Restoration Working Group (2001)

2.1.2. Medidas Intensivas

Las medidas intensivas se enfocan en el río y pueden ser de tres tipos (Simons *et al.*, 1977): (i) obras que aceleran el escurrimiento, como son la construcción de diques, el aumento de la capacidad de drenaje de los ríos y la rectificación del cauce; (ii) obras que regulan la creciente, como por ejemplo, las presas; y, (iii) obras que desvían parte del caudal, como son los canales de desvíos.

2.2 MEDIDAS ESTRUCTURALES EN LA REGIÓN

Es importante señalar que el periodo que puede transcurrir desde esta primera etapa de conceptualización, pasando por las propuestas iniciales y análisis preliminares, evaluaciones, diseños definitivos y construcción, hasta la puesta en operación de las obras propuestas para el manejo de las inundaciones puede ser de muchos años, debido a diferentes circunstancias, tales como, la complejidad de las intervenciones, el proceso de concertación entre los diferentes actores, la consecución de los recursos económicos y definición de los mecanismos de financiación, así como las dificultades en la gestión y decisión política por parte de las autoridades, instituciones y diferentes actores involucrados.

Es claro, entonces, que con esta propuesta de medidas estructurales se inicia un proceso de un plan de manejo integrado de inundaciones en el valle alto del río Cauca, en el cual se requerirá del compromiso y la participación real y decidida de autoridades, instituciones y los distintos sectores y actores implicados, que permitirá transformarla posteriormente en una realidad sostenible en el tiempo. Teniendo clara esta visión, cabe anotar que este estudio se encuentra ubicado en el primer nivel del proceso, en el cual se plantea un conjunto de alternativas estructurales, las cuales se evalúan considerando los efectos en la hidrodinámica del río, con base en información disponible, y servirán de base para las etapas subsiguientes del proceso.

Existen diferentes intervenciones para el manejo de inundaciones, las cuales se pueden implementar individualmente o en conjunto de acuerdo con los objetivos que se quieran alcanzar. Entre las diferentes medidas estructurales más empleadas en la actualidad para lograr una gestión más eficiente y eficaz de las inundaciones, que son aplicables en este proyecto, teniendo en cuenta las características del sistema del río Cauca se tienen las siguientes:

- A. Construcción de embalses de regulación en algunos de los principales ríos tributarios del río Cauca.
- B. Relocalización de diques de protección
- C. Integración de los humedales al sistema fluvial.
- D. Lagunas de laminación de crecientes..

2.3 DESCRIPCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS

A continuación se describen las alternativas estructurales planteadas para el proceso de modelación matemática del río Cauca en su Valle Alto.

2.3.1 Embalses de regulación en tributarios

Los embalses de regulación en los tributarios se implementan con el objetivo de disminuir los caudales picos de una creciente en los tributarios, de tal manera que el aporte al cauce principal del río Cauca es controlado. La CVC inició en los años noventa los estudios básicos para la posible implementación de embalses multipropósito en los ríos tributarios del río Cauca. Con este fin se identificaron diferentes posibles sitios para la ubicación de represas y obras de desvío. Las sucesivas etapas o fases de los estudios permitieron ir seleccionando los proyectos con mejores posibilidades y perspectivas, en un proceso de cuatro etapas en las que, por medio de indicadores, se medía la viabilidad de los proyectos. La primera etapa de inventario inicial permitió identificar y seleccionar 111 proyectos, la segunda etapa de catálogo sólo 25 proyectos, la tercera etapa de pre-factibilidad 9 proyectos y la cuarta de factibilidad solamente 4 proyectos.

De los proyectos que alcanzaron las fases de pre-factibilidad y factibilidad para el presente estudio se seleccionaron los siguientes proyectos de embalses en los ríos Timba (a nivel de pre-factibilidad), Bugalagrande (en la cota 1.100 msnm, a nivel de factibilidad) y Riofrío (a nivel de pre-factibilidad) como los proyectos viables para el corredor del río Cauca. Con respecto a los otros proyectos de embalses que alcanzaron estas etapas y no seleccionados en este estudio es necesario realizar las siguientes observaciones:

- Los proyectos fuera de cauce para la regulación de tributarios quedan limitados por la capacidad hidráulica de las estructuras de desviación (tuberías, túneles y canales) durante el período de una creciente, la cual es muy inferior en relación con los caudales pico del tributario que se quiere regular.
- El proyecto de la Quebrada San Pedro con trasvase del río Tuluá se encuentra a nivel de factibilidad; sin embargo, en el río Tuluá existen en la actualidad tres proyectos de generación de energía que serían un obstáculo muy difícil de sortear para llevar a cabo este proyecto.
- En el proyecto Quebrada Los Micos se trasvasa un caudal máximo de $30 \text{ m}^3/\text{s}$, provenientes de excedentes del río La Vieja; sin embargo, los altos costos e impactos sociales y ecológicos contrastan con la escasa capacidad de regulación de las crecientes del río Cauca, sumado a la ubicación misma del proyecto de la regulación, casi al final del corredor, perdiendo importancia debido al bajo impacto sobre el manejo de inundaciones en el río Cauca en su valle alto.

Esquematación de los embalses de regulación en ríos tributarios

Para el análisis del impacto de la regulación de tributarios se tuvieron en cuenta varios criterios para la esquematización en el modelo matemático:

- Se definió una duración de la creciente en el río Cauca de un mes, período necesario para operar el embalse.
- El volumen útil del embalse definido como un limitante para definir la capacidad de regulación del embalse, el cual es afectado por un porcentaje debido a que en el momento de la creciente en el río Cauca muy posiblemente el embalse no se encuentra totalmente vacío.

En el Cuadro 2.2 se muestra el análisis de los caudales retenidos por los embalses de regulación según los datos y los criterios arriba descritos. Como resultado se obtiene un caudal constante, llamado caudal retenido, el cual se resta de las hidrógrafas del modelo matemático y con ello se busca encontrar el impacto sobre los niveles de la creciente en el río Cauca.

Cuadro 2.2. Cálculo de caudales regulados para embalses

Ítem	Timba	Riofrío	Bugalagrande
Volumen Útil (hm ³)	220	40	60
Volumen disponible para regulación (70%)	110*	28	42
Tiempo (días)	30	30	30
Q retenido (m ³ /s)	42,44	10,80	16.20

*El volumen disponible para regulación en el embalse de Timba se considero igual al 50% del volumen útil debido a su carácter multipropósito y potencial energético

Adicionalmente en el Cuadro 2.3 se presentan las características generales de los embalses de regulación en los ríos Timba, Riofrío y Bugalagrande.

Cuadro 2.3. Características de los embalses de regulación propuestos

Características		Embalse Timba	Embalse Bugalagrande	Embalse Riofrío
Cota-Ubicación (msnm)		1044	1100	980
Alternativas Alturas de presa (m)	1	91	100	79
	2	81		70
	3	61		60
Área (Km ²)			1.87	
Q medio (m ³ /s)			16	16.5
Nivel Máximo (msnm)				1050
Volumen Útil (hm ³)		220	60	40
Volumen disponible para regulación (70%)		110	42	28
Tiempo (días)		30	30	30
Q retenido (m ³ /s)		42,44	16.20	10,80
Costos Embalse por alternativas (Millones de US\$) de acuerdo a la altura de presa	1	155.35	99.35	95.87
	2	134.83		84.87
	3	106.12		82.17

En las Figuras 2.2 a 2.4 se presentan los esquemas de localización general de los embalses de regulación propuestos en los ríos Timba, Riofrío y Bugalagrande.

Figura 2.2 Esquema de localización del embalse del río Timba

Figura 2.3 Esquema de localización del embalse del río Bugalagrande



Figura 2.4 Esquema de localización del embalse del río Riofrío



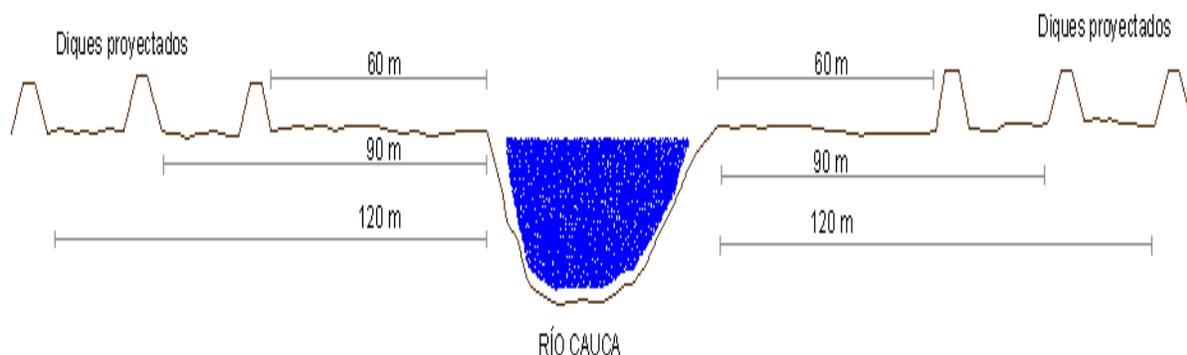
2.3.2 Relocalización de diques

Los diques marginales deben ubicarse suficientemente distanciados del cauce principal para permitir que la planicie adyacente o llanura aluvial cumpla con sus funciones naturales (laminación de los caudales pico de las crecientes, soporte básico de flora y fauna, recarga de acuíferos subterráneos, etc.). Los diques construidos muy cerca del cauce principal originan mayores niveles de agua, lo cual a su vez obliga a diseñar y construir diques cada vez más altos, aumentando la presión sobre ellos y, por ende, el riesgo de falla o rotura.

La normativa actual de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC indica que en el río Cauca los diques marginales deben ubicarse a 60 metros del borde del río, es decir, el ancho de berma mínimo debe ser igual a 60 m (CVC, 2011). Sin embargo, considerando las características geomorfológicas, hidráulicas y geométricas del río Cauca, y la magnitud de los caudales que circulan por el cauce durante las crecientes este ancho de berma podría resultar insuficiente.

De acuerdo con las características del cauce del río Cauca se optó por evaluar adicionalmente, por medio de la modelación matemática, separaciones de diques del río de 60, 90 y 120 m. En la Figura 2.5 se presenta un esquema de la geometría de las secciones incluidas en el modelo matemático. Inicialmente se modelaron solamente el río Cauca, los ríos tributarios y los diques marginales distanciados 60m, 90m y 120m del cauce principal del río Cauca. Posteriormente, se incluyeron en el modelo los diferentes humedales existentes a lo largo del corredor integrándolos al cauce principal, es decir, se eliminaron los diques en los sectores de los humedales para permitir el libre flujo de las aguas desbordadas del río hacia los humedales. En el Cuadro 2.4 se presenta la localización de los diques marginales de protección y los humedales que se integran al sistema fluvial del río Cauca.

Figura 2.5 Esquema de relocalización de diques de protección contra inundaciones a 60m, 90m y 120m del cauce principal del río Cauca



Cuadro 2.4. Localización de diques e integración de humedales al sistema fluvial

Tramo	Abcisas sobre río Cauca	Zona	Margen	Medida estructural	Und	Cant	Costo
Río Ovejas - Río Desbaratado	K000+000 a K122+800	1	D	NA	NA	0	\$ -
Timba-Zanjon Tinajas	K23+500 a K56+000	2	I	Dique de protección contra el río Cauca para el corregimiento de Villa Paz	Km	2	\$3360
Zanjón Tinajas - Río Claro	K56+000 a K77+700	2	I	Integración de Humedales	Un	3	\$ 1,008
Río Claro - Canal Navarro	K77+700 a K129+100	2	I	Integración de Humedales	Un	4	\$ 1,344
Río Desbaratado - Zanjón Tortugas	K122+800 a K145+500	3	D	NA	NA	0	\$ -
Zanjón Tortugas - Zanjón Rozo	K145+500 a K167+800	3	D	Dique marginal sobre el río Cauca	Km	22	\$ 11,088
Zanjón Rozo - Río Zabaletas	K167+800 a K193+300	3	D	Dique marginal sobre el río Cauca tramo río Yumbo espinal	Km	25	\$ 13,272
				Integración de Humedales	Un	2	
Río Zabaletas - Río Sonso	K167+700 a K205+700	3	D	Dique marginal sobre el río Cauca e Integración de Humedales	Km	12	\$ 6,384
				Integración de Humedales	Un	1	
Río Cali - Río Yumbo	K148+000 a K165+000	3	I	Integración de Humedales	Un	1	\$ 11,536
				Dique marginal sobre el río Cauca	Km	20	
Río Yumbo - Quebrada Espinal	K165+500 a K192+700	3 y 5	I	Integración de Humedales	Un	4	\$ 15,960
				Dique marginal sobre el río Cauca tramo río Yumbo espinal	Km	29	
Río Sonso - Río Tulua	K225+800 a K291+800	4	D	Integración de Humedales	Un	6	\$ 44,352
				Dique marginal sobre el río Cauca	Km	84	
Río Tulua - Río Morales	K291+300 a K294+000	4	D	Integración de Humedales	Un	1	\$ 2,856
				Dique marginal sobre el río Cauca tramo río Tulua - Río Morales	Km	5	
Río Morales - Acequia Quintana	K294+000 a K303+000	4	D	Integración de Humedales	Un	4	\$ 8,904
				Dique marginal sobre el río Cauca tramo Río Morales - Zanjón Madre Vieja	Km	11	
				Dique marginal sobre el río Cauca Zanjón madre vieja - Acq. Quintana	Km	4	

Cuadro 2.4 Localización de diques a lo largo del río Cauca (continuación)

Tramo	Abcisis sobre río Cauca	Zona	Margen	Medida estructural	Und	Cant	Costo
Quebrada Espinal - Río Mediacanoa	K192+600 a K220+900	5	I	Integración de Humedales	Un	5	\$ 14,784
				Dique marginal sobre el río Cauca	Km	26	
Río Mediacanoa - Quebrada Chimbilaco	K221+000 a K231+000	5	I	Integración de Humedales	Und.	3	\$ 5,796
				Dique marginal sobre el río Cauca en el sector Punta Brava	Km.	2,5	
				Dique marginal sobre el río Cauca en el sector Vía Buga – Mediacanoa y Hda. El Trapiche	Km.	3,5	
				Dique marginal sobre el río Cauca en el sector Hda. El trapiche – Qda. Chimbilaco	Km.	3,5	
Hacienda Armonía (Qda. Chimbilaco) - Río Piedras	K241+000 a K267+000	5	I	Integración de Humedales	Und.	4	\$ 16,464
				Dique sobre el río Cauca	Km.	30	
Río Piedras - Quebrada Huasanó	K267+000 a K309+000	5	I	Integración de Humedales	Und.	1	\$ 16,716
				Dique marginal sobre el río Cauca sector Río Piedras-Z. Seco	Km.	4,3	
				Dique marginal sobre el río Cauca sector Z. Seco - Caserío La Sultana	Km.	3,5	
				Dique marginal sobre el río Cauca sector Caserío La Sultana- Río Riofrío	Km.	5,6	
				Dique marginal sobre el río Cauca sector Río Riofrío- H. Madrigal	Km.	11,0	
				Dique marginal sobre el río Cauca sector H. Madrigal- Hatoviejo	Km.	5,3	
				Dique marginal sobre el río Cauca sector Q. Guásimo--Q. Huasanó	Km.	2,8	
Quebrada Huazano - Río Pescador	K309+000 a K333+000	5	I	Integración de Humedales	Und.	2	\$ 13,927
				Dique sector Qda. Huasano – Qda Robledo	Km.	2,2	
				Dique sector Qda. Robledo – Paso de la barca	Km.	2,7	
				Dique sector Paso de la barca – Qda La Herradura	Km.	2,6	
				Dique sector Qda. La Herradura – Humedal San Mateo	Km.	3,8	
				Dique sector Humedal San Mateo – Qda. El Buey	Km.	6,8	
				Dique sector Qda. El Buey – Pto. Pedreros	Km.	2,5	
				Dique sector Pto. Pederos – Río Pescador	Km.	5,7	

Cuadro 2.4 Localización de diques a lo largo del río Cauca (continuación)

Tramo	Abscisas sobre río Cauca	Zona	Margen	Medida estructural	Und	Cant	Costo
Río Pescador - La Peña	K333+000 a K338+000	6	I	Integración de Humedales	Un	2	\$ 4,000
				Dique marginal río Cauca	Km	5.3	
Distrito RUT	K350+900 a K393+350	6	I	Integración de Humedales	Un	2	\$ 10,000
				Realineamiento de dique (Curva El Palmar)	Un	1	
				Realineamiento de dique (Curva La Bodega)	Un	1	
Acequia Quintana - Río Bugalagrande	K306+000 a K326+000	6	D	Dique marginal sobre el río Cauca sector Acq. Quintana – Z. El Medio	Km	4.5	\$ 10,000
				Dique marginal sobre el río Cauca sector Z. El Medio – Río B/lagrande	Km	12	
				Integración de Humedales	Un	3	
Río Bugalagrande - Quebrada La Honda	K326+000 a K361+000	6	D	Dique marginal sobre el río Cauca sector río Bugalagrande - Qda. La Cañas	Km	14	\$ 12,000
				Dique marginal sobre el río Cauca sector La Victoria – Qda. Micos	Km	9.8	
Quebrada La Honda - Quebrada Los Micos (1 y 2)	K359+000 a K379+000	6	D	Dique marginal sobre el río Cauca sector Qda. Honda – Z. Tinajón	Km	10.5	\$ 7,000
				Dique marginal sobre el río Cauca sector La Victoria – Qda. Micos	Km	3.4	
				Dique marginal sobre el río Cauca sector Z. Guineo – Z. Mohahuevos	Km	8	
				Integración de humedales	Un	3	
Quebrada Loa Micos - Quebrada Aguas Prietas	K379+000 a K416+000	6	D	Dique marginal sobre el río Cauca sector Qda. Micos – Z. Guineo	Km	7.8	\$ 20,000
				Dique marginal sobre el río Cauca sector Z. Guineo – Z. Mohahuevos	Km	10.2	
				Dique marginal sobre el río Cauca sector Z. Mohahuevos – Qda. Aguas prietas	Km	13.4	
Canal Interceptor (RUT) - La Virginia	K393+000 a K445+500	7	I	Integración de Humedales	Un	1	\$ 22,000
				Dique marginal sobre el río Cauca	Km.	42,5	
Quebrada Aguas prietas - Río La Vieja	K415+000 a K429+000	7	D	Dique marginal sobre el río Cauca sector Qda. Aguas prietas – xxxx	Km	5.6	\$ 8,000
				Dique marginal sobre el río Cauca sector Z. Guineo – Z. Mohahuevos	Km	8	
				Integración de humedales	Un	3	

2.3.3 Lagunas de laminación de crecientes

Otra de las medidas estructurales que vienen siendo adoptadas e implementadas en los últimos años para el manejo de inundaciones es la *laguna de laminación de crecientes*. Esta alternativa consiste en habilitar ciertas zonas para que puedan inundarse y almacenar determinados volúmenes de agua durante las crecientes, amortiguando la onda, disminuyendo los caudales y niveles máximos; es decir, son áreas naturales que años atrás eran parte de la planicie de inundación y que pueden adecuarse para permitir la regulación o laminación de las crecientes. Debe tenerse en cuenta que el proceso de implementación de este tipo de medida en la planicie puede ser muy largo y complejo debido a las implicaciones sociales y económicas que ésta conlleva, por cuanto muchas de estas áreas vienen siendo utilizadas principalmente para fines agrícolas.

Se considera la reconexión de algunos sectores de la planicie de inundación al río Cauca, dado que, la planicie de inundación constituye el área natural para la laminación de las crecientes y deberían ser utilizadas de esta forma. Esta reconexión brindaría amplios beneficios para la recuperación ambiental del sistema fluvial. En el Cuadro 2.5 se presentan las características generales de las lagunas de laminación propuestas a lo largo del corredor del Río Cauca. Se plantea realizar esta reconexión mediante la disminución del nivel de corona del dique localizado frente a algunos sectores topográficamente deprimidos que han resultado inundados durante un alto porcentaje de las crecientes del río Cauca de las cuales se tienen registros. Los niveles y anchos de entrada a las lagunas pueden determinarse mediante la modelación matemática evaluando diferentes configuraciones de las mismas. Adicionalmente, en esta alternativa se considera la recuperación de la Laguna de Sonso, ampliando el área del espejo lagunar, dado que la capacidad de este humedal se ha visto reducida debido a diferentes factores como son su aislamiento del río Cauca debido a la construcción de diques perimetrales (lo cual disminuyó el flujo de caudales desde el río hacia la laguna), el avance de la frontera agrícola y la proliferación del buchón de agua.

Cuadro 2.5. Características generales de las Lagunas de Laminación propuestas

Código	Nombre	Zona	Margen	Área (ha)	Volumen (m ³)	Abscisa sobre el Río Cauca
HLL1	Cauca Seco	2	Izquierda	1176	21	K120+000 a K129+000
HLL2	Dolores	3	Derecha	1290.423075	39	K147+714 a K155+892
HLL3	Guachal	3	Derecha	285.2686919	9	K162+224 a K168+388
HLL4	Yumbo	3	Izquierda	95.00255461	2.9	K179+342 a K181+745
HLL5	Vidal	3	Izquierda	87.36247029	2.6	K186+446 a K189+428
HLL6	Zabaletas	3	Derecha	87.58845502	2.6	K191+845 a K194+183
HLL7	Videles - Cocal	3 Y 5	Ambas	539.2845984	16	K195+791 a K212+200
HLL8	Yocambo	5	Izquierda	422.1974282	13	K214+287 a K223+287
HLL9	Sonso	4	Derecha	3450	104	K204+902 a K224+151
HLL10	Burriagá	4 Y 5	Ambas	1644.14531	50	K270+890 a K282+492
HLL11	Charco de Oro	4	Derecha	182.19	5.5	K296+845 a K301+000
HLL12	San Antonio	6	Derecha	170	5	K306+500 a K311+700
HLL13	La Cañada	6	Derecha	682	20	K313+000 a K326+000
HLL14	Guare -Zarzal	6	Ambas	609.7645814	18	K338+900 a K349+759
HLL15	Ansermanuevo	7	Izquierda	386	12	K404+200 a K414+250

2.3.4 Alternativa estructural de diques e integración de humedales al sistema fluvial (Acuerdo CVC 052 del año 2011)

Esta alternativa se rige por las directrices del Acuerdo CD No. 052 de 2011 expedido por la CVC, “*por medio del cual se subroga el Acuerdo 23 de septiembre 12 de 1979 por el cual se dictan normas generales relativas a ubicación de diques riberaños de cauces de aguas de uso público*”

Los lineamientos generales de ubicación de los diques, según los Artículos Segundo, Tercero y Cuarto, son los siguientes:

Artículo Segundo:

En la ubicación de diques confinantes de aguas de crecida de cauces en la planicie inundable se deben conciliar los intereses de los distintos sectores, teniendo en cuenta la siguiente prioridad:

- 1. Protección contra inundaciones de los centros poblados marginales a los cauces para el nivel asociado a un periodo de retorno de 1 en 100 años más un borde libre de un metro o lo que defina el acuerdo con el cual fue adoptado el Plan de Ordenamiento Territorial respectivo.*
- 2. Conservación del equilibrio ecológico manteniendo integrado el río con su sistema de humedales, delimitados según lo establecido en la Resolución 0196 de 2006.*
- 3. Uso sostenible en la planicie inundable, con la incorporación al beneficio agropecuario, mediante diques, del área que fuere posible sin detrimento de la dinámica del cauce. El periodo de retorno, recomendado por la CVC, para el nivel de diseños de protección contra inundaciones en el sector agropecuario es de 1 en 30 años, más el borde libre de un metro.*

Artículo Tercero:

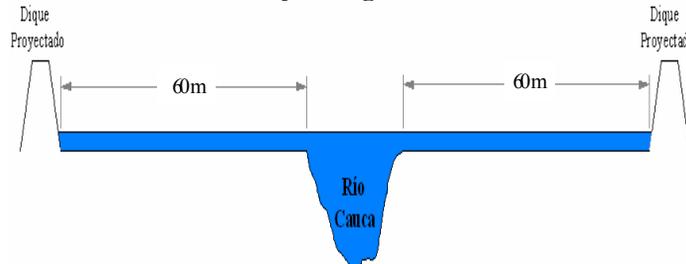
Para definir la ubicación adecuada y garantizar la estabilidad de los diques, se debe tener en cuenta la información geomorfológico-multitemporal que indica la movilidad y la tendencia del río a desplazarse y cumplir con los siguientes criterios técnicos para su alineamiento:

- 1. Los diques no deben causar alteraciones en el cauce principal, por lo tanto como regla general el eje del dique debe ser paralelo a la corriente de las aguas de desbordamiento.*
- 2. En tramos del río relativamente rectos y de escaso desplazamiento lateral, la berma o espaciamento entre la corona del barranco que define la sección del cauce a banca llena y el pié de la cara mojada del dique será mínimo de 60 metros.*
- 3. En tramos de alta movilidad y sinuosidad del río, meandros consecutivos, el dique no será paralelo al río, sino que tendrá un trazo relativamente recto entre curvas consecutivas de meandros de modo que el dique no presente resistencia al flujo de las aguas que circulan por las bermas.*
- 4. En tramos en que existieren humedales como madres viejas, lagunas o ciénagas que tradicionalmente hubieren constituido una unidad ecológica con el río, el dique deberá localizarse de tal manera que estos humedales queden incorporados al río. En estas condiciones el alineamiento del eje lo determinará la CVC en cada caso particular, de acuerdo con lo establecido en la resolución MAVDT 0196 de 2006.*

Artículo Cuarto:

Para el alineamiento de diques riberales de otros ríos y canales distintos del río Cauca, la berma mínima en ningún caso será menor que el ancho de la franja forestal protectora sin desconocer los artículos precedentes cuando apliquen.

Figura 2.6 Ubicación de diques según el Acuerdo 052 del año 2011



2.3.5 Alternativa combinada de dos o más medidas estructurales

Esta alternativa se compone de diferentes tipos de intervenciones a lo largo del río Cauca en su Valle Alto, ya que en algunos casos un solo tipo de intervención puede no ser suficiente o no ser aplicable en todos los sectores del río; o por sí sola no se convierten en una alternativa de gestión de inundaciones, por lo cual se han planteado diferentes intervenciones que en conjunto se convierten en una opción de manejo de inundaciones a evaluar en este estudio.

Las consideraciones contempladas para el planteamiento de esta alternativa son las siguientes:

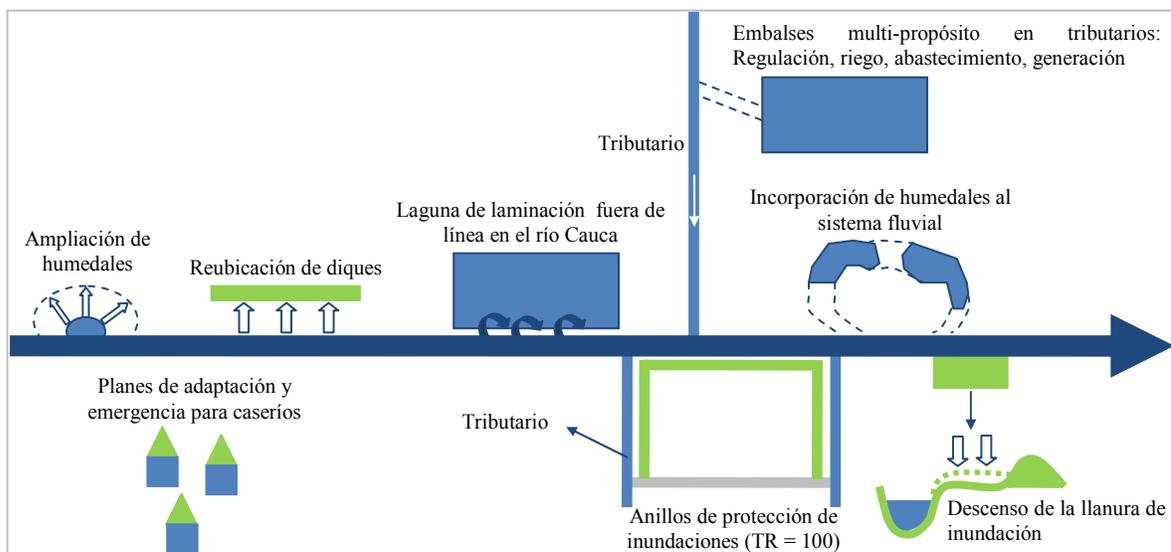
- La movilidad del río como una potencial amenaza de la estabilidad de los diques.
- Inclusión de los cuerpos de agua desconectados actualmente del sistema fluvial.
- Consideración de planes de adaptación o reubicación de las poblaciones en el sector a intervenir.
- Construcción técnica colectiva de cada alternativa.
- Conceptualización de los mecanismos de ingreso y salida de caudales en las lagunas de laminación.
- Estimación del área y capacidad de almacenamiento de las lagunas de laminación, a partir de la topografía, las frecuencias de inundación y la ocupación del territorio.
- Gestión de los excesos de volúmenes de las crecientes que ponen en riesgo la seguridad hidráulica del corredor.
- Revisión de diferentes fuentes de información para la definición de las alternativas.
- Visitas de campo son indispensables en el proceso de construcción de las propuestas de intervención.

Con base en lo anterior, se definieron una serie de intervenciones aplicables al corredor del río Cauca en su valle alto, las cuales se presentan a continuación:

- Inclusión de los cuerpos de agua desconectados actualmente del sistema fluvial.

- Construcción de diques sobre los ríos tributarios, de tal manera que se evite desbordamientos ocasionados por los remansos del río Cauca.
- La desembocadura de los ríos tributarios en el río Cauca, debe ser lo más natural posible, por esta razón se debe garantizar que los diques en este punto conformen un delta..
- La altura de los diques en la zona agrícola debe garantizar una protección para 30 años mientras que para las zonas urbanas debe garantizar una protección de 100 años.
- Lagunas de laminación.
- Cuando los meandros son muy agudos, el dique debe ir por fuera de éste y no paralelo a la margen del río.

Figura 2.7 Esquema de medidas estructurales en la planicie



2.3.6 Alternativas propuestas

Como se ha descrito en capítulos anteriores, existen diferentes tipos de medidas estructurales para el manejo de las inundaciones, tales como, Localización de Diques a diferentes distancias del cauce, Integración de Humedales al sistema fluvial, Embalses de regulación en tributarios y Lagunas de Laminación, entre otras, las cuales se pueden implementar individualmente o combinadas, de acuerdo con las necesidades y los objetivos que se quieran alcanzar, así como de las limitaciones específicas de cada sector.

Para el caso particular del corredor del río Cauca en su valle alto, objeto de este proyecto, finalmente se plantearon diez (10) combinaciones de alternativas estructurales, conformadas por diferentes tipos de intervenciones, y teniendo como base diferentes parámetros y/o criterios, tales como normativas existentes, observaciones de campo y de registros foto-filmográficos, entre otros. Estas alternativas están orientadas a lograr un mejor manejo de las inundaciones, procurando disminuir los niveles de agua en el río y la planicie adyacente.

Las alternativas seleccionadas y que serán objeto de una evaluación hidráulica rigurosa, mediante la aplicación del modelo computacional MIKE 11, se presentan en el Cuadro 2.6.

Cuadro 2.6 Alternativas estructurales propuestas para el manejo de las inundaciones en el corredor del río Cauca

Alternativa	Descripción de la alternativa
1	Diques a 60 m de las bancas del cauce
2	Diques a 60 m de las bancas del cauce + Humedales
3	Diques a 60 m de las bancas del cauce + Embalses de regulación en tributarios
4	Diques a 60 m de las bancas del cauce + Lagunas de Laminación
5	Diques a 60 m de las bancas del cauce + Humedales + Lagunas de Laminación
6	Diques a 60 m de las bancas del cauce + Humedales + Embalses de regulación en tributarios
7	Diques a 60 m de las bancas del cauce + Lagunas de Laminación + Embalses de regulación en tributarios
8	Diques a 60 m de las bancas del cauce + Humedales + Lagunas de Laminación + Embalses de regulación en tributarios
9	Diques a 90 m de la banca
10	Diques a 120 m de la banca

3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Se realizó la modelación matemática del río Cauca y sus afluentes tomando como base el modelo matemático implementado por la CVC y la Universidad del Valle en desarrollo del proyecto de Modelación del río Cauca PMC (ejecutado en el período comprendido entre los años 1997 y 2007) y el proyecto de Estudio de la Dinámica de Humedales en el Valle Alto del Río Cauca (ejecutado en el año 2009). El modelo fue construido utilizando el modelo MIKE 11 y abarcó el tramo del río Cauca en su valle alto de una longitud aproximada de 420 kilómetros comprendido entre las estaciones hidrométricas La Balsa y La Virginia.

Considerando que aún no se dispone de la información que actualmente se está recolectando mediante tecnología LIDAR, la modelación matemática del río Cauca y sus afluentes se realizará utilizando el modelo matemático implementado por la CVC y la Universidad del Valle en desarrollo del proyecto de Modelación del río Cauca PMC (el cual fue ejecutado en el período comprendido entre los años 1997 y 2007) y el Estudio de la Dinámica de Humedales en el Valle Alto del Río Cauca (ejecutado en el año 2009). Para la implementación del modelo se consultaron los siguientes estudios:

- Modelación Matemática del Río Cauca. Tramo La Balsa – La Virginia, publicado en el año 2001. Proyecto PMC Fase I.
- Optimización y Aplicaciones de los Modelos Hidrodinámico, Sedimentológico y Morfológico del río Cauca. Tramo La Balsa – La Virginia, publicado en el año 2005. Proyecto PMC Fase II.
- Optimización del Modelo Hidrodinámico y Generación de Mapas de Inundación del río Cauca. Tramo Yumbo – Toro, publicado en el año 2007. Proyecto PMC Fase III.
- Modelación Matemática del Sistema Río Cauca - Humedales, publicado en el año 2009. Estudio de la Dinámica del Complejo de Humedales en el Valle Alto del Río Cauca.

La primera tarea consistió en revisar el modelo construido en el proyecto PMC, para lo cual se verificaron los archivos construidos para la esquematización del sistema río Cauca – tributarios – humedales y, posteriormente, analizar los resultados alcanzados.

Finalmente, con el propósito de analizar la influencia del embalse de Salvajina sobre la hidrodinámica del río durante las crecientes, se simularon dos escenarios diferentes: (i) la creciente del año 2010 asumiendo que no existiese la represa, (ii) la creciente del año 1971 considerando que en ese año ya estuviese en operación la represa.

3.1 REVISIÓN Y AJUSTE DEL MODELO MATEMÁTICO BÁSICO DEL RÍO CAUCA

Como se indicó previamente, la construcción del modelo matemático del río Cauca se inició durante el Proyecto de Modelación del río Cauca y se finalizó en el proyecto de Estudio de la Dinámica de Humedales en el Valle Alto del Río Cauca. Este modelo abarcó el tramo del río Cauca comprendido entre las estaciones hidrométricas La Balsa y La Virginia, el cual tiene una longitud aproximada de 420 kilómetros. Las principales características de este modelo son las que se describen a continuación.

3.1.1 Red de Modelación

Se modeló el sistema constituido por el río Cauca, sus ríos tributarios y la planicie de inundación, incluyendo los humedales. En la Figura 3.1 se presenta la esquematización realizada del sistema río Cauca – tributarios – planicie -humedales. En el Cuadro 3.1 se presentan los ríos, humedales y canales en la planicie incluidos en la modelación.

3.1.1.1 Río Cauca

Se representó el río Cauca a través de 416 secciones transversales separadas entre sí 1 kilómetro, en promedio. En el tramo comprendido entre las estaciones La Balsa y Juanchito se utilizaron secciones transversales medidas por la CVC en el período comprendido entre los meses de Septiembre y Noviembre de 2005; en el tramo comprendido entre las estaciones Juanchito y La Virginia se emplearon las secciones transversales levantadas entre los meses de Octubre y Diciembre del año 2000 en desarrollo del proyecto PMC (CVC – Univalle, 2001).

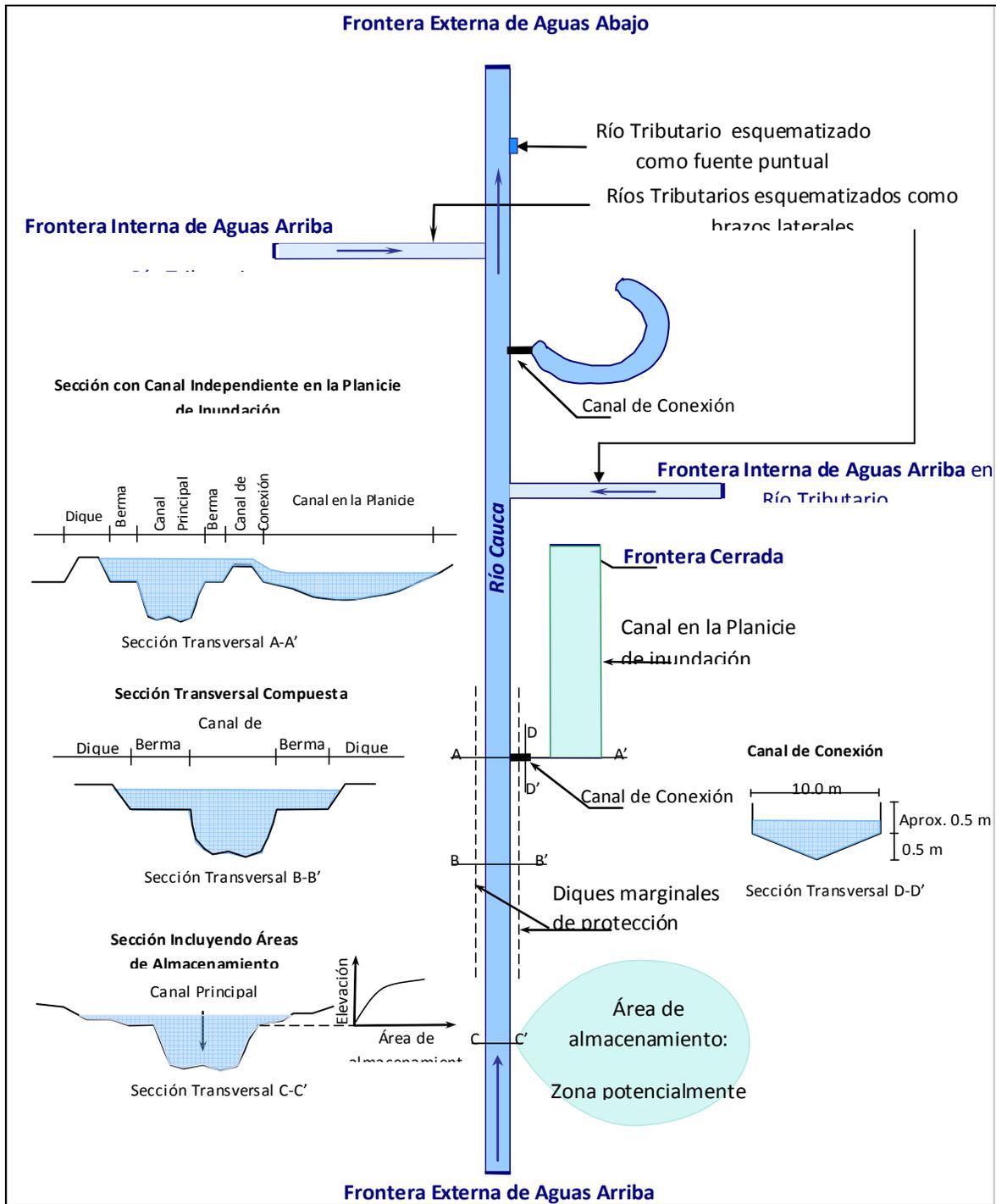
3.1.1.2 Ríos Tributarios

Los 12 ríos tributarios principales fueron modelados como brazos laterales utilizando secciones transversales levantadas en desarrollo del proyecto PMC entre julio y septiembre del año 2003 (CVC – Univalle 2004). En el Cuadro 3.2 se presentan los ríos principales modelados, la longitud considerada de cada uno de estos ríos, el número de secciones transversales utilizadas y el espaciamiento promedio entre secciones transversales.

3.1.1.3 Llanura de Inundación – Humedales

Las planicies de inundación fueron representadas ó esquematizadas teniendo en cuenta las características que presentan los desbordamientos durante las crecientes del río Cauca. Se adoptaron tres tipos de esquematización diferentes: áreas de almacenamiento, secciones compuestas y canales independientes en la llanura de inundación conectados al cauce principal. A continuación se describen los tres tipos de representaciones o esquematizaciones adoptadas para la planicie aluvial.

Figura 3.1 Esquematación del Sistema río Cauca – Tributarios – Planicie – Humedales



Cuadro 3.1 Fronteras definidas en la modelación Tramo La Balsa – La Virginia

Abscisa sobre el río Cauca (Km)	Río / Humedal en el que se localiza la Frontera	Identificación	Tipo de Frontera
27.385	Cauca	Estación La Balsa	Abierta – Aguas Arriba
34.582	Humedal Guinea	Humedal Guinea	Cerrada
39.658	Humedal Guarinó	Humedal Guarinó	Cerrada
42.412	Cauca	Río Teta	Fuente Puntual
46.351	Cauca	Río Quinamayó	Fuente Puntual
45.467	Humedal El Avispal	Humedal Avispal	Cerrada
65.342	Cauca	Quebrada La Quebrada	Fuente Puntual
79.171	Claro	Río Claro	Abierta – Brazo Lateral
99.291	Palo	Río Palo	Abierta – Brazo Lateral
110.219	Jamundí	Río Jamundí	Abierta – Brazo Lateral
121.997	Cauca	Zanjón Oscuro	Fuente Puntual
121.504	Cauca	Desbaratado	Fuente Puntual
129.988	Cauca	Canal Sur	Fuente Puntual
143.730	Cauca	Canal General	Fuente Puntual
146.856	Cauca	Canal Oriental	Fuente Puntual
148.475	Cauca	Río Cali	Fuente Puntual
165.000	C161-165d ⁽¹⁾	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
165.000	C161-165d	Planicie de Inundación	Cerrada
163.000	C162-163i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
163.000	C162-163i	Planicie de Inundación	Cerrada
166.183	Cauca	Río Yumbo	Fuente Puntual
167.866	Guachal	Río Guachal	Abierta – Brazo Lateral
182.356	Amaime	Río Amaime	Abierta – Brazo Lateral
176.000	C173-176i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C173-176i	Planicie de Inundación	Cerrada
177.000	C175-177d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C175-177d	Planicie de Inundación	Cerrada
179.000	C177-179d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C177-179d	Planicie de Inundación	Cerrada
180.000	C179-180i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C179-180i	Planicie de Inundación	Cerrada
180.000	C180-180d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C180-180d	Planicie de Inundación	Cerrada
184.037	Cauca	Río Vijes	Fuente Puntual
186.000	C184-186i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C184-186i	Planicie de Inundación	Cerrada

**Cuadro 3.1 Fronteras definidas en la modelación
Tramo La Balsa – La Virginia (Cont.)**

Abscisa sobre el río Cauca (Km)	Río / Humedal en el que se localiza la Frontera	Identificación	Tipo de Frontera
188.465	Cauca	Río Cerrito	Fuente Puntual
190.000	C189-190d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C189-190d	Planicie de Inundación	Cerrada
193.829	Cauca	Río Zabaletas	Fuente Puntual
194.000	C192-194i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C192-194i	Planicie de Inundación	Cerrada
197.000	C193-197d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C193-197d	Planicie de Inundación	Cerrada
199.245	Cauca	Río Guabas	Fuente Puntual
198.237	Humedal Videles	Humedal Videles	Cerrada
205.972	Cauca	Río Sonso	Fuente Puntual
212.328	Humedal Chiquique	Humedal Chiquique	Cerrada
214.105	Cauca	Río Yotoco	Fuente Puntual
216.000	C214-216i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C214-216i	Planicie de Inundación	Cerrada
217.000	C216-217i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C216-217i	Planicie de Inundación	Cerrada
219.000	C217-219d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C217-219d	Planicie de Inundación	Cerrada
221.907	Cauca	Río Mediacanoa	Fuente Puntual
220.845	Cauca	Caño Nuevo	Fuente Puntual
221.000	C219-221i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C219-221i	Planicie de Inundación	Cerrada
222.000	Laguna sonso	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	Laguna sonso	Planicie de Inundación	Cerrada
222.000	C221-222i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C221-222i	Planicie de Inundación	Cerrada
225.000	C223-225i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C223-225i	Planicie de Inundación	Cerrada
222.000	C221-221i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C221-221i	Planicie de Inundación	Cerrada
225.115	Guadalajara	Río Guadalajara	Abierta – Brazo Lateral
230.000	C226-230i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C226-230i	Planicie de Inundación	Cerrada
248.304	Cauca	Quebrada La Negra	Fuente Puntual

**Cuadro 3.1 Fronteras definidas en la modelación
Tramo La Balsa – La Virginia (Cont.)**

Abscisa sobre el río Cauca (Km)	Río / Humedal en el que se localiza la Frontera	Identificación	Tipo de Frontera
254.000	C252-254i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C252-254i	Planicie de Inundación	Cerrada
258.000	C254-258i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C254-258i	Planicie de Inundación	Cerrada
260.000	C259-260i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C259-260i	Planicie de Inundación	Cerrada
262.000	C257-262d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C257-262d	Planicie de Inundación	Cerrada
267.466	Cauca	Río Piedras	Fuente Puntual
281.000	C269-281d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C269-281d	Planicie de Inundación	Cerrada
285.903	Riofrío	Río Riofrío	Abierta – Brazo Lateral
291.711	Tuluá	Río Tuluá	Abierta – Brazo Lateral
292.600	Humedal Bocas de Tuluá	H BocasTuluá	Cerrada
295.852	Cauca	Río Morales	Fuente Puntual
310.910	Cauca	Quebrada Robledo	Fuente Puntual
325.208	Bugalagrande	Río Bugalagrande	Abierta – Brazo Lateral
314.000	C310-314d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C310-314d	Planicie de Inundación	Cerrada
317.636	Humedal La Herradura	H La Herradura	Cerrada
318.000	C317-318d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C317-318d	Planicie de Inundación	Cerrada
320.000	C319-320d	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C319-320d	Planicie de Inundación	Cerrada
321.000	C316-321i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C316-321i	Planicie de Inundación	Cerrada
326.000	C324-326i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
326.685	Humedal Cementerio	H Cementerio	Cerrada
-	C324-326i	Planicie de Inundación	Cerrada
329.000	C327-329i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C327-329i	Planicie de Inundación	Cerrada
332.694	Cauca	Río Pescador	Fuente Puntual
333.000	C330-333i	Planicie de Inundación	Fuente Puntual
-	C330-333i	Planicie de Inundación	Cerrada
333.371	Paila	Río Paila	Abierta – Brazo Lateral

**Cuadro 3.1 Fronteras definidas en la modelación
Tramo La Balsa – La Virginia (Cont.)**

Abscisa sobre el río Cauca (Km)	Río / Humedal en el que se localiza la Frontera	Identificación	Tipo de Frontera
341.831	Cauca	Quebrada Las Cañas	Fuente Puntual
378.426	Cauca	Quebrada Los Micos	Fuente Puntual
393.378	Cauca	R.U.T.	Fuente Puntual
411.754	Cauca	Río San Francisco	Fuente Puntual
414.813	Cauca	Río Obando	Fuente Puntual
416.988	Cauca	Río Chanco	Fuente Puntual
424.672	Cauca	Río Catarina	Fuente Puntual
427.455	La Vieja	Río La Vieja	Abierta – Brazo Lateral
437.000	Risaralda	Río Risaralda	Abierta – Brazo Lateral
444.928	Cauca	Estación La Virginia	Abierta – Aguas Abajo

⁽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)

Nota: La abscisa K0+000 se halla sobre el eje de la represa de Salvajina

Cuadro 3.2 Longitud y número de secciones transversales utilizadas en los ríos tributarios esquematizados como brazos laterales

Río Tributario	Longitud Modelada (m)	No. de Secciones Utilizadas	Espaciamiento Medio entre Secciones transversales (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

Áreas de almacenamiento

Esta alternativa de esquematización de la planicie aluvial se utilizó en aquellos sectores donde no existen diques de protección contra inundaciones. En los sectores en los que se presentaron desbordamientos en el año 1999, se les asoció a cada sección transversal la relación nivel – área de almacenamiento obtenida a partir de la cartografía elaborada por la firma FAL en el año 1996 y la extensión de las áreas inundadas.

Secciones compuestas

En los sectores donde existen diques de protección contra inundaciones, la sección transversal del cauce, la berma y el dique se representaron por medio de secciones compuestas. La alineación y la altura de los diques en el sector comprendido entre los municipios de Yumbo y Tuluá fue extractada del informe “Levantamiento Topográfico de Ejes de Diques Marginales y Llanuras de inundación del río Cauca” (CVC – Universidad del Valle, 2006). En los restantes sectores esta información fue obtenida a partir de la cartografía elaborada por la firma FAL en el año 1998 y los informes de diseños de diques elaborados por la CVC.

Canales independientes en la llanura de inundación conectados al cauce principal

Las madrevejas ó humedales asociados al río Cauca y la sección de la planicie de inundación localizada más allá del dique de protección contra inundaciones fueron representadas ó esquematizadas como canales independientes conectados al río Cauca por medio de canales de conexión, denominados en el modelo MIKE 11 como *Link Channel*. Dado que no se dispone de un conocimiento detallado de la variación de la corona del dique, la geometría de los canales de conexión constituyó uno de los parámetros de calibración que permitió que el modelo reprodujera en forma aceptable el comportamiento del sistema río Cauca.

3.1.1.4 Fronteras del modelo

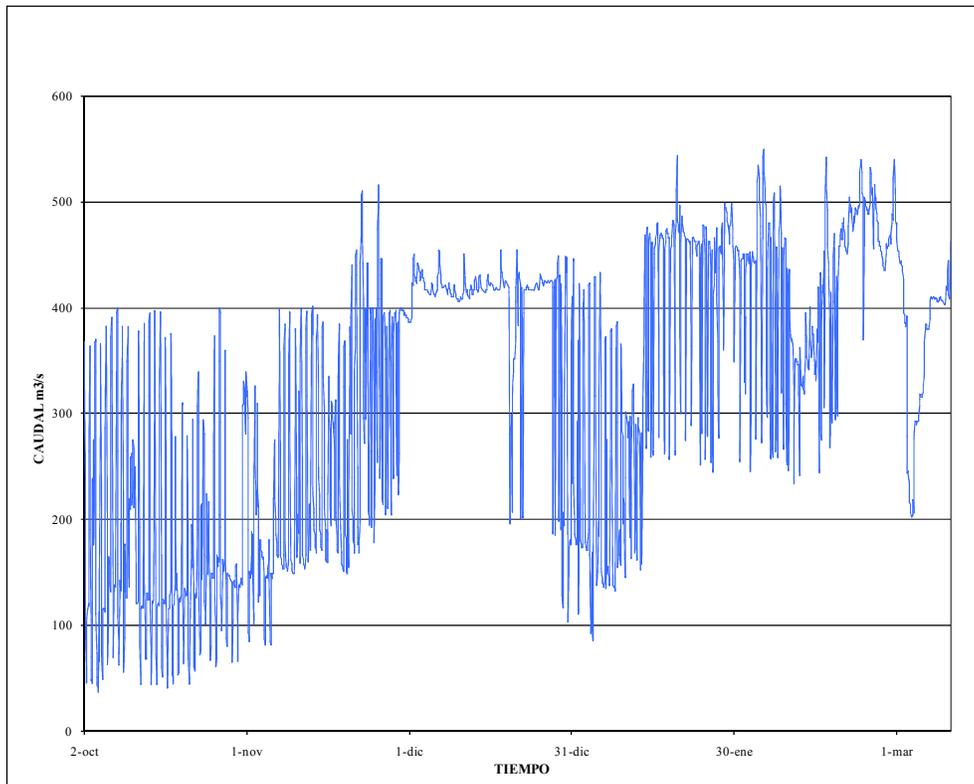
Las fronteras del modelo correspondieron a los límites superior (frontera aguas arriba), e inferior (frontera aguas abajo) de la zona de estudio, los afluentes esquematizados como brazos laterales y fuentes puntuales y los canales a través de los cuales se representaron las llanuras de inundación. En el

Cuadro 3.1 se presentan las fronteras empleadas en la modelación.

Frontera Aguas Arriba

La frontera superior o aguas arriba del modelo se localizó en la estación hidrométrica de La Balsa, la cual se encuentra en la abscisa K 27 + 385. La abscisa K0+000 corresponde al eje de la presa de Salvajina. Para las diferentes simulaciones en esta frontera superior se introdujo, como condición hidrodinámica, la serie de caudales diarios (ver Figura 3.2).

Figura 3.2 Condición hidrodinámica en la frontera aguas arriba
Serie de caudales Estación: La Balsa Período: Octubre 1998 - Marzo 1999



Fronteras Internas

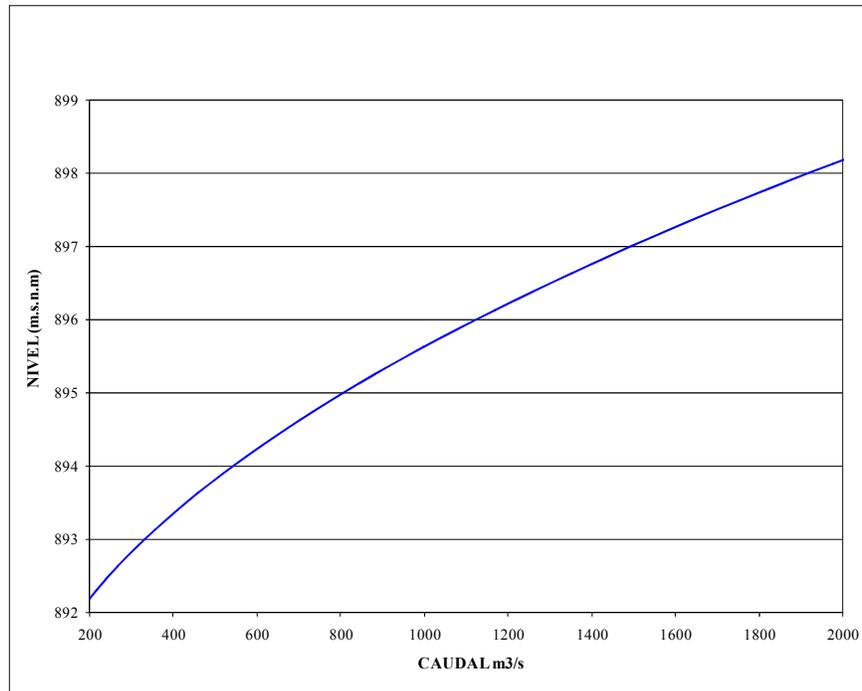
En el modelo del sistema río Cauca – tributarios – humedales – planicie aluvial se consideraron 124 fronteras internas distribuidas de la siguiente manera:

- 12 brazos laterales: Los 12 ríos tributarios principales se representaron como brazos laterales. El modelo realiza el tránsito de los caudales introducidos en la frontera superior de cada uno de estos cauces.
- 69 fuentes puntuales: A través de esta alternativa se representaron 26 tributarios y descargas menores y 43 extracciones de agua de los canales en la planicie aluvial.
- 43 fronteras cerradas: Esta alternativa fue utilizada para representar los extremos finales de los canales en la planicie aluvial.

Frontera Aguas Abajo

La frontera inferior o aguas abajo del modelo del río Cauca se localizó en la estación hidrométrica de La Virginia. Como condición hidrodinámica de frontera se utilizó la curva de calibración nivel – caudal de esta estación (ver Figura 3.3).

Figura 3.3 Condición hidrodinámica en la frontera aguas abajo curva de calibración Nivel – Caudal Estación: La Virginia Periodo: Octubre 1998 – Marzo 1999



3.1.2 Malla computacional

El espaciamiento máximo admisible entre secciones transversales del río Cauca, Δx , adoptado fue de 1000 m, en tanto que el espaciamiento máximo entre secciones de los tributarios fue definido igual a 200 m. El intervalo de tiempo computacional entre soluciones sucesivas de las ecuaciones, Δt , se definió igual a 2 minutos. Estos valores de Δx y Δt permitieron describir adecuadamente el sistema modelado, garantizaron la estabilidad del modelo y arrojaron tiempos computacionales razonables.

Debe destacarse que mallas computacionales más refinadas (menores valores de Δx y Δt) no permitieron mejorar en forma significativa la precisión de los cálculos, pero incrementaron considerablemente el tiempo computacional.

3.1.3 Parámetros de calibración

La calibración del modelo fue alcanzada a través de un proceso riguroso de ajuste de diferentes parámetros numéricos y físicos que permitió alcanzar una adecuada representación del comportamiento del río. El procedimiento implementado fue el siguiente:

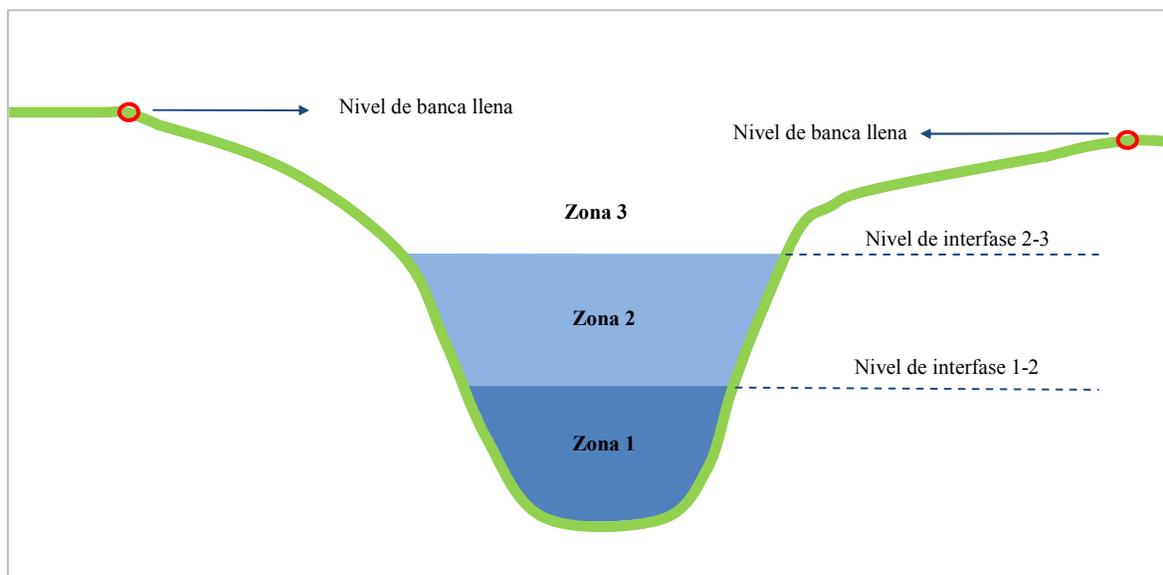
Cuadro 3.3 Factores de rugosidad de Manning – Strickler ($m^{1/3}/s$) del río Cauca definidas durante la calibración del modelo hidrodinámico

ZONA/ FACTOR DE RESISTENCIA	ESTACIÓN								
	La Balsa	La Bolsa	Hormiguero	Juanchito	Mediacanoa	Guayabal	La Victoria	Anacaro	La Virginia
Zona 1	20	20	20	37	34	39	35	39	35
Zona 2	29	29	23	37	34	39	35	39	35
Zona 3	38	38	25	37	34	39	35	39	35

Cuadro 3.4 Niveles de Interfase definidos del río Cauca durante la Calibración del Modelo Hidrodinámico

NIVEL INTERFASE		ESTACIÓN								
		La Balsa	La Bolsa	Hormiguero	Juanchito	Mediacanoa	Guayabal	La Victoria	Anacaro	La Virginia
Nivel interfase	Zona 1 - Zona 2	982,50	958,00	950,00	944,00	930,50	908,00	903,00	897,00	892,00
Nivel interfase	Zona 2 - Zona 3	985,00	959,50	951,80	946,00	932,00	910,00	905,00	899,50	897,00
Nivel banca llena	-	985,30	960,00	952,46	946,72	932,02	911,10	907,85	902,84	-

Figura 3.4. Zonas y niveles de interfase en una sección típica del río Cauca



- Se realizaron varias simulaciones tomando como punto de partida las rugosidades encontradas a través de modelaciones anteriores. Estas rugosidades fueron definidas utilizando la herramienta del modelo que permite dividir las secciones transversales en tres zonas (triple zona) y asignarle a cada una de ellas un valor diferente. Los cálculos del modelo reprodujeron razonablemente las características hidrodinámicas del río en

algunos sectores, pero en otros se observó una diferencia importante entre los valores medidos en campo y los calculados por el modelo.

- Se modificaron los valores de la rugosidad y los niveles de los límites de la triple zona en aquellos sectores en los que el modelo no describía adecuadamente el comportamiento hidrodinámico del sistema, alcanzando de esta manera respuestas aceptables en varias zonas. Sin embargo, en algunos sectores persistían diferencias apreciables.
- Se revisaron las secciones transversales y las conductancias en los sectores donde se mantenían las diferencias significativas entre los niveles de agua y los caudales medidos y calculados. Este análisis permitió remplazar algunas secciones transversales consideradas no representativas del cauce del río Cauca; luego se ajustaron nuevamente las rugosidades y los límites de la triple zona hasta obtener diferencias aceptables entre las series calculadas por el modelo y las registradas en campo para caudales y niveles inferiores a los de banca llena. En el Cuadro 3.3 se presentan los valores de rugosidad y los límites de la triple zona finalmente obtenidos.

Debe destacarse que los valores de rugosidad se variaron entre límites físicamente válidos de acuerdo con las características del sistema río Cauca – humedales.

En las Figuras 3.5 a 3.18 se presentan los resultados de la calibración finalmente alcanzada. Estas gráficas indican que el modelo representa en forma aceptable el comportamiento hidrodinámico del río, tanto para caudales altos como para caudales bajos.

3.2 EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DEL EMBALSE DE SALVAJINA

Con el fin de estimar el impacto que la regulación de caudales del río Cauca ejerce sobre la hidrodinámica del cauce durante las crecientes, se simularon las avenidas del año 2010 sin considerar el efecto del embalse y del año 1971 considerando una regulación hipotética.

3.2.1 Modelación de la creciente ocurrida en el año 2010 sin considerar el efecto del embalse de Salvajina

Con el objetivo de estimar la contribución del embalse de Salvajina a la gestión de la creciente y las inundaciones, se modeló el comportamiento que hubiera presentado el río Cauca si no existiera el embalse de Salvajina durante la creciente del año 2010, es decir si por la estación La Bolsa (frontera aguas arriba del modelo) hubieran circulado los caudales “naturales” o sin regulación. Los caudales de los ríos tributarios se conservaron sin modificaciones.

Los caudales “naturales” en la estación La Balsa fueron calculados utilizando la siguiente expresión:

$$Q_{\text{natural est. La Balsa}} = Q_{\text{registrado est. La Balsa}} - Q_{\text{efluente embalse}} + Q_{\text{afluente embalse}}$$

donde:

$Q_{\text{natural est. La Balsa}}$ = Caudal “natural” calculado en la estación La Balsa del año 2010

$Q_{\text{registrado est. La Balsa}}$ = Caudal registrado en la estación La Balsa

$Q_{\text{efluente embalse}}$ = Caudal liberado por el embalse de Salvajina

$Q_{\text{afluente embalse}}$ = Caudal afluente al embalse de Salvajina

Los resultados obtenidos al simular esta creciente con las condiciones hidrodinámicas descritas se presentan en las Figuras 3.19 – 3.32. Del análisis de estas gráficas puede concluirse lo siguiente:

- En términos generales el embalse permitió disminuir en forma importante los caudales y niveles que circularon por el río Cauca durante la creciente presentada en el año el año 2010, lo cual contribuyó a disminuir el impacto que hubiera tenido esta creciente de no existir la regulación realizada por el embalse.
- En el período de tiempo previo a la creciente los caudales y niveles del río Cauca calculados por el modelo son inferiores a los valores registrados en campo, lo cual es una consecuencia de la regulación impuesta por el embalse de Salvajina.
- Los mayores efectos de la regulación se presentan en el tramo comprendido entre las estaciones La Balsa y Juanchito, donde, de acuerdo con los resultados del modelo, los caudales que circularon por el río experimentaron disminuciones inclusive superiores a los 200 m³/s y los niveles llegaron a disminuir hasta en más de 1.0 metro.
- En la estación Juanchito el caudal máximo de la creciente calculado por el modelo ($Q = 908 \text{ m}^3/\text{s}$) fue 192 m³/s superior al caudal realmente registrado en campo ($Q = 908 \text{ m}^3/\text{s}$), en tanto que el nivel máximo calculado por el modelo ($h = 949.39 \text{ msnm}$) fue 1.38 metros superior al nivel máximo registrado ($h = 948.01 \text{ msnm}$). A partir de estas reducciones en los parámetros hidrodinámicos del flujo, es posible concluir que de no haber existido la regulación de caudales los efectos de esta creciente hubieran sido mucho más marcados en el tramo La Balsa – Juanchito
- En la estación Mediacanoa se observa una reducción importante en los caudales durante la creciente (llegando a ser superior a los 200 m³/s en algunas fechas) y un poco menos significativa en los niveles, debido probablemente a la baja capacidad a banca llena de la sección, por lo cual se generan desbordamientos con caudales relativamente bajos.
- En el tramo comprendido entre las estaciones Guayabal y Anacaro la regulación de caudales realizada por el embalse de Salvajina tiene un impacto menos marcado que el tramo cercano al embalse, lo cual se debe al importante aporte de caudales que realizan los afluentes que tributan al río Cauca aguas abajo del embalse.

3.2.2 Modelación de la creciente ocurrida en el Año 1971 considerando una hipotética regulación de caudales del Río Cauca

Con el propósito de determinar los niveles y caudales que se hubieran presentado en el río Cauca durante la creciente del año 1971 si hubiese existido el embalse de Salvajina en ese momento, se realizó la modelación de esta creciente generando una serie de caudales regulada hipotética en la estación La Balsa (frontera aguas arriba del modelo). Para la creación de esta serie de caudales regulados (correspondientes a los que habría liberado el embalse) se modificaron los caudales registrados en la estación Salvajina mediante la implementación de los siguientes criterios:

- El caudal máximo regulado que habría liberado el embalse es de 300 m³/s. Cuando el caudal afluente sea mayor a este valor, el caudal excedente (diferencia entre el Caudal afluente y los 300 m³/s) sería almacenado en el embalse.
- El volumen almacenado por la regulación de caudales sería liberado cuando el caudal afluente sea inferior a 250 m³/s después de haberse presentado un pico de la creciente (caudal superior a 300 m³/s). En este caso el embalse liberaría un caudal efluente de 250 m³/s.

Los caudales “regulados” en la estación La Balsa fueron calculados utilizando la siguiente expresión:

$$Q_{\text{regulado est. La Balsa}} = Q_{\text{registrado est. La Balsa}} - Q_{\text{estación Salvajina}} + Q_{\text{efluente hipotético}}$$

donde:

$Q_{\text{regulado est. La Balsa}}$	=	Caudal regulado calculado en la estación La Balsa
$Q_{\text{registrado est. La Balsa}}$	=	Caudal registrado en la estación La Balsa
$Q_{\text{estación salvajina}}$	=	Caudal registrado en la estación Salvajina
$Q_{\text{efluente hipotético}}$	=	Caudal efluente hipotético que habría liberado el embalse

En las Figuras 3.70 a 3.83 se presentan los resultados obtenidos al realizar la modelación de esta creciente bajo las condiciones descritas. Estas gráficas permiten concluir lo siguiente:

- En general los caudales y los niveles de agua durante los picos de la creciente se verían reducidos ostensiblemente a lo largo del río Cauca, especialmente en el tramo La Balsa y Juanchito. En el tramo Estación Mediacanoa – Estación Anacaro también se presentarían cambios en los niveles de agua y en los caudales, aunque de menor intensidad que en el tramo superior.
- En la estación Juanchito los caudales pico presentan una reducción que hubiera llegado a ser superior a los 400 m³/s y los niveles de agua una reducción superior a 2.0 metros.

Esto indica que si Salvajina hubiera estado en operación en ese momento, esta creciente hubiera tenido un efecto mucho menor al que realmente tuvo dado que por el cauce hubieran circulado caudales muy inferiores a los registrados.

- A partir de la estación Mediacanoa, el efecto de la regulación de caudales en la hidrodinámica del cauce es menor que en el tramo superior debido a los aportes de caudales que realizan los ríos tributarios. En la estación La Victoria, por ejemplo la reducción de caudales y de niveles durante los picos de las crecientes fueron del orden de 200 m³/s y 0.9 m respectivamente.
- En los períodos comprendido entre los picos de la creciente (zonas valles de la onda de flujo) los caudales y los niveles de agua a lo largo del río hubieran sido superiores a los registrados. Debido a esto y la reducción en los caudales y niveles máximos, la onda de flujo durante esta creciente hubiera tenido una menor amplitud.

Figura 3.5 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: La Bolsa Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Caudal calculado vs Caudal medido

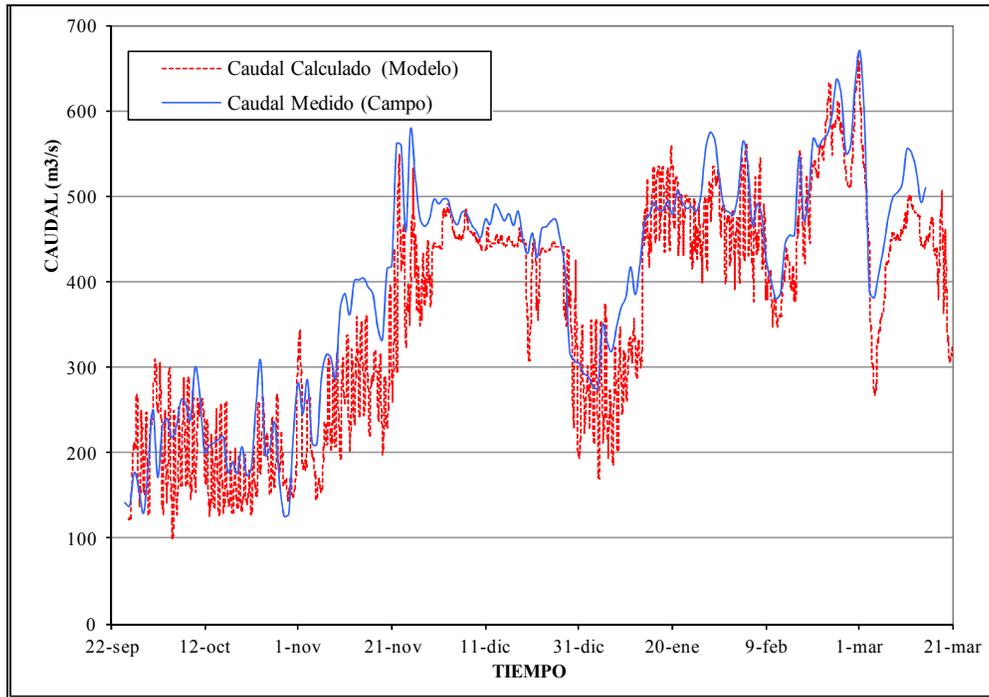


Figura 3.6 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: La Bolsa Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Nivel calculado vs Nivel medido

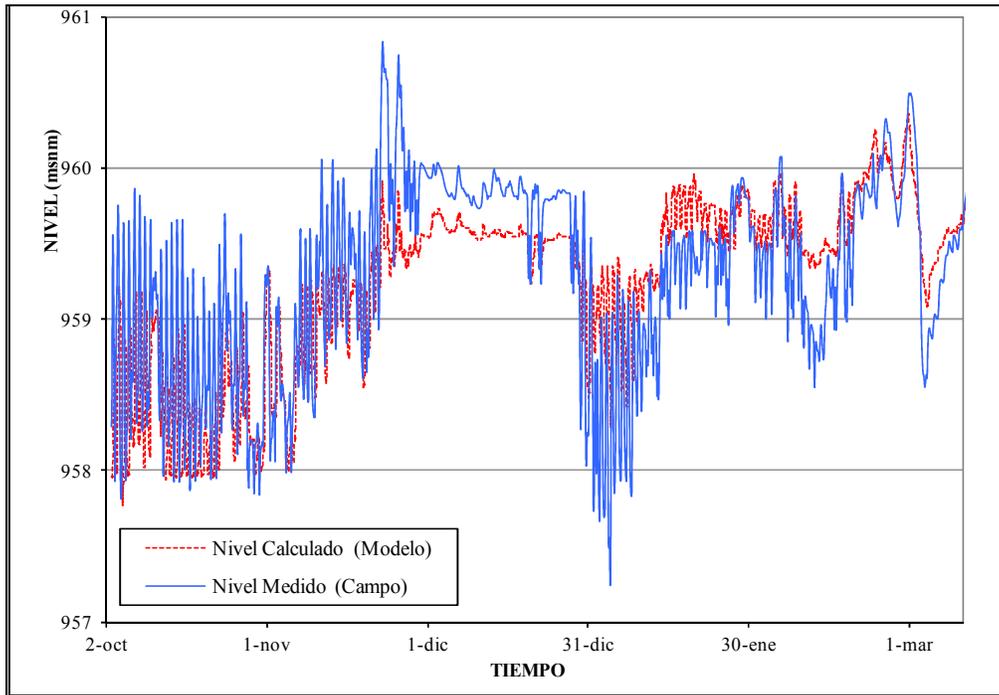


Figura 3.7 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Hormiguero Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Caudal calculado vs Caudal medido

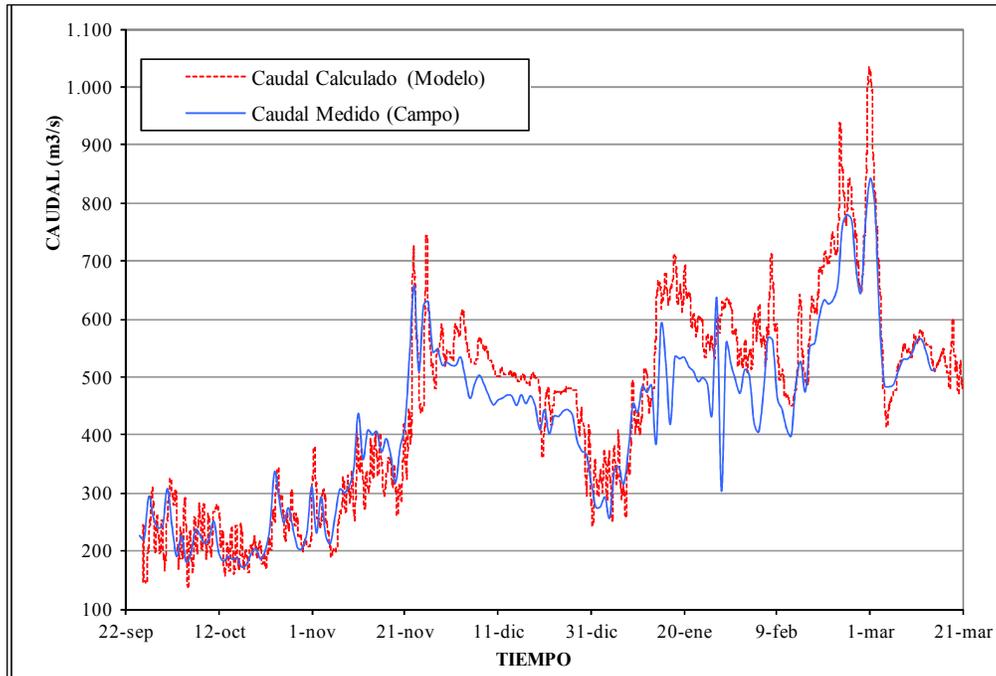


Figura 3.8 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Hormiguero Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Nivel calculado vs Nivel medido

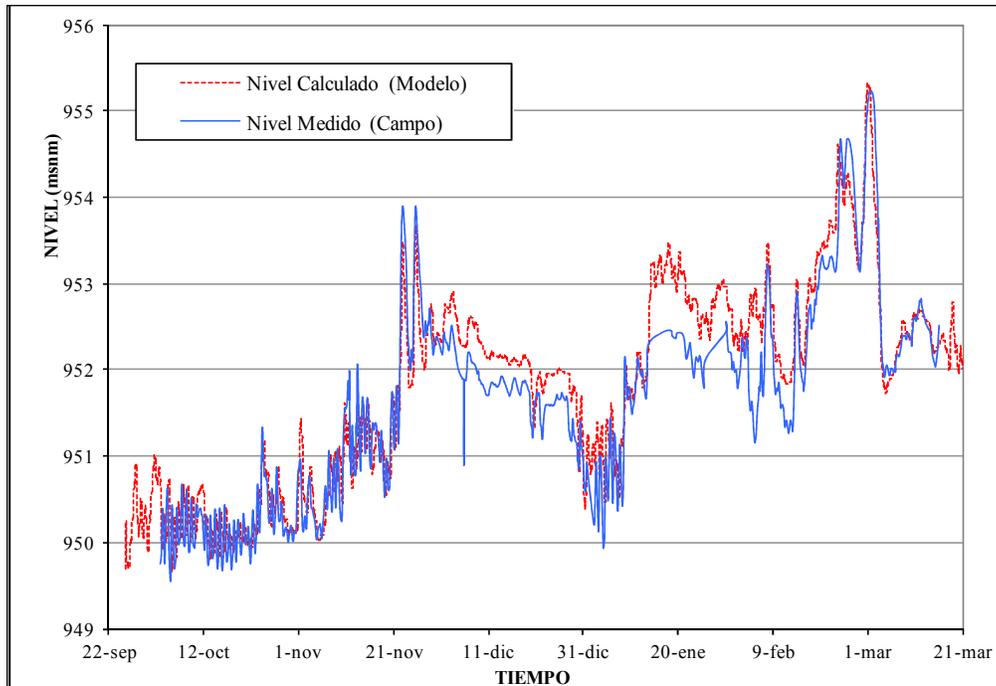


Figura 3.9 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Juanchito Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Caudal calculado vs Caudal medido

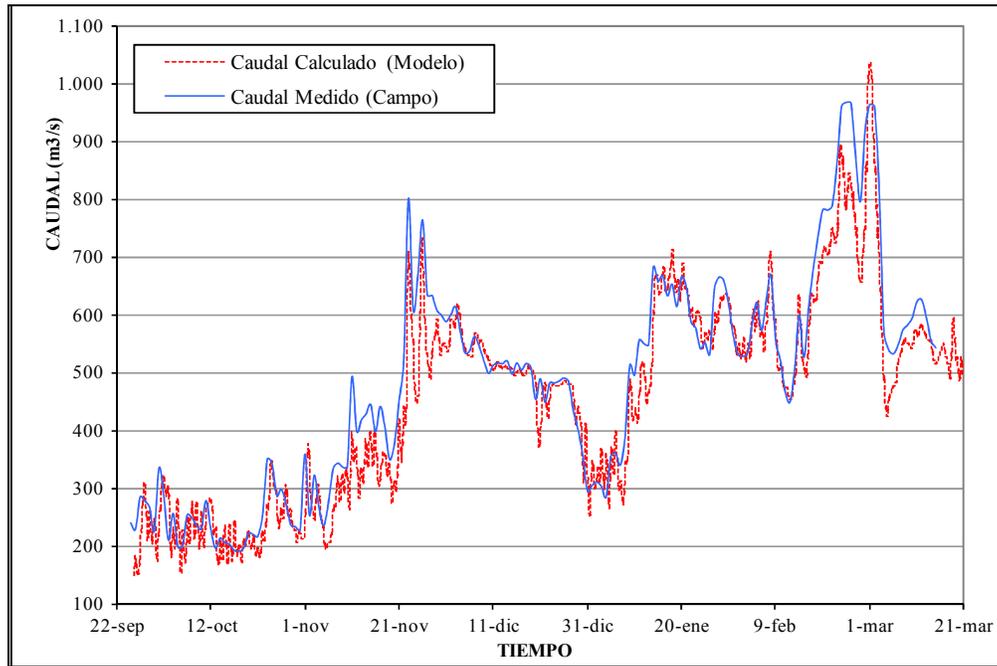


Figura 3.10 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Juanchito Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Nivel calculado vs Nivel medido

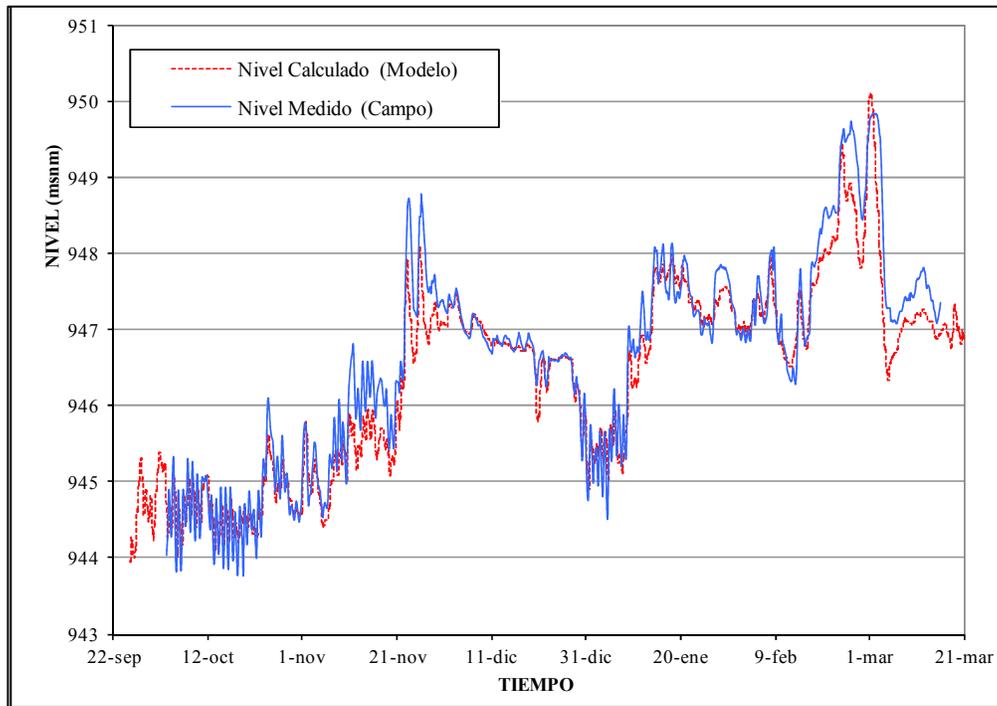


Figura 3.11 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Mediacanoa Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Caudal calculado vs Caudal medido

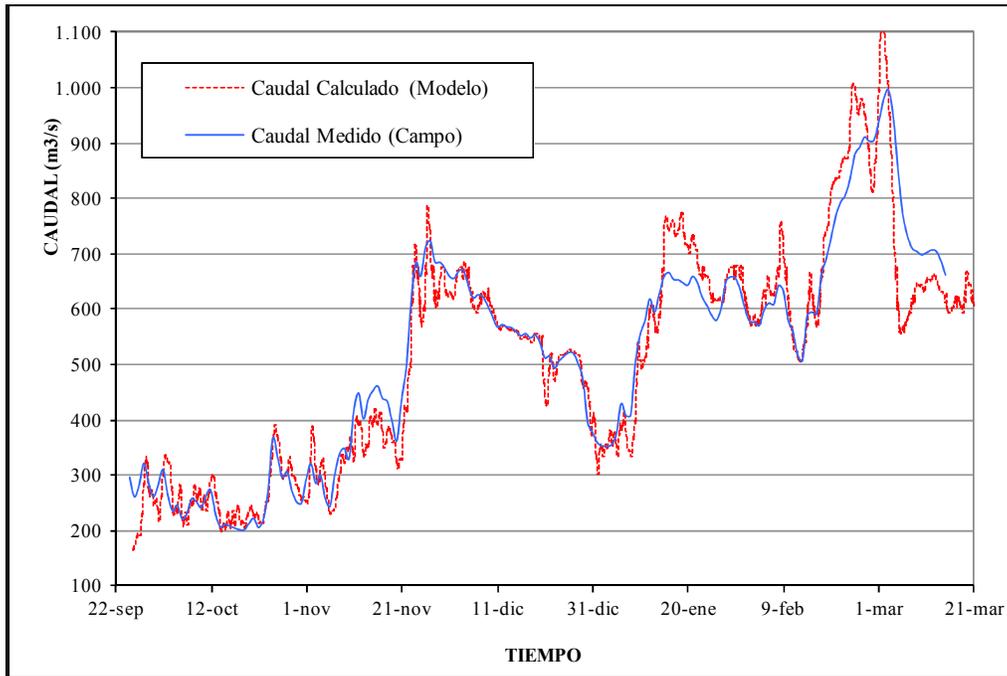


Figura 3.12 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Mediacanoa Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Nivel calculado vs Nivel medido

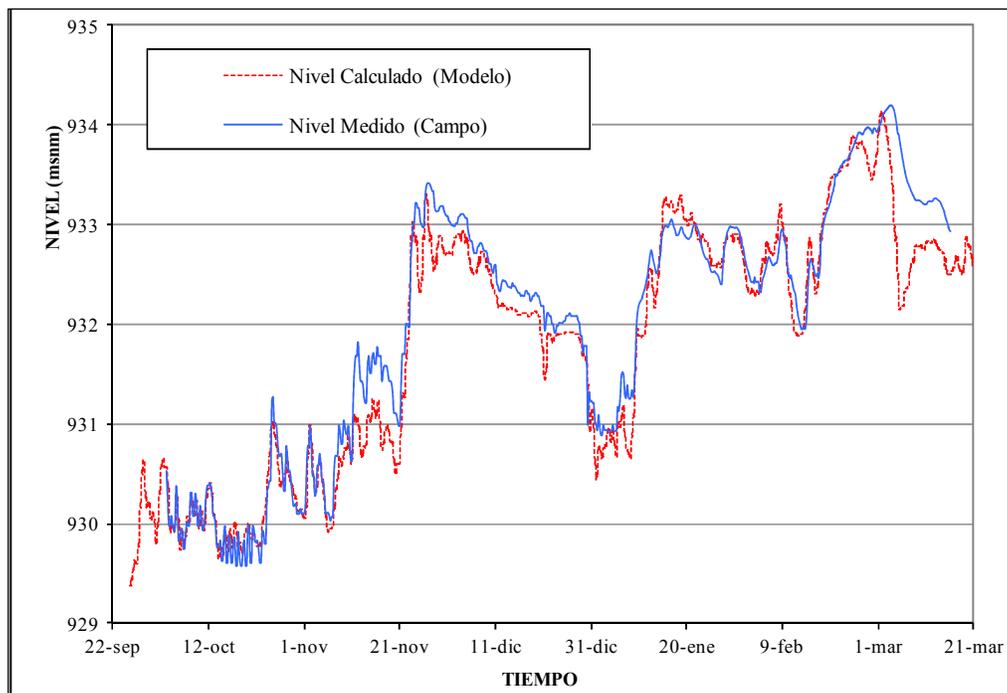


Figura 3.13 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Guayabal Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Caudal calculado vs Caudal medido

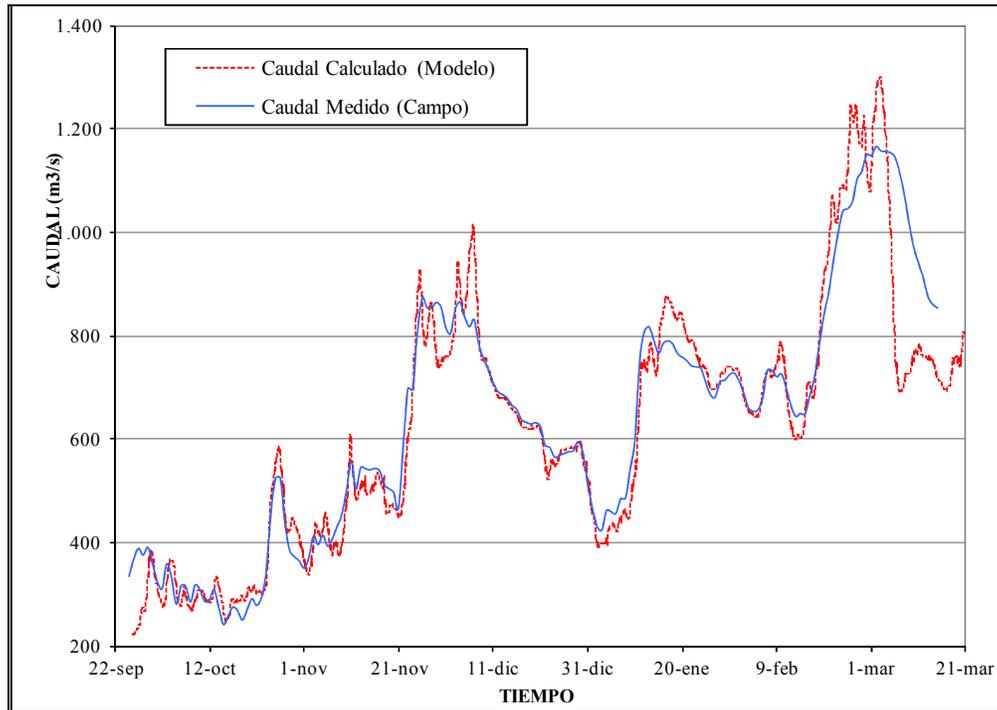


Figura 3.14 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Guayabal Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Nivel calculado vs Nivel medido

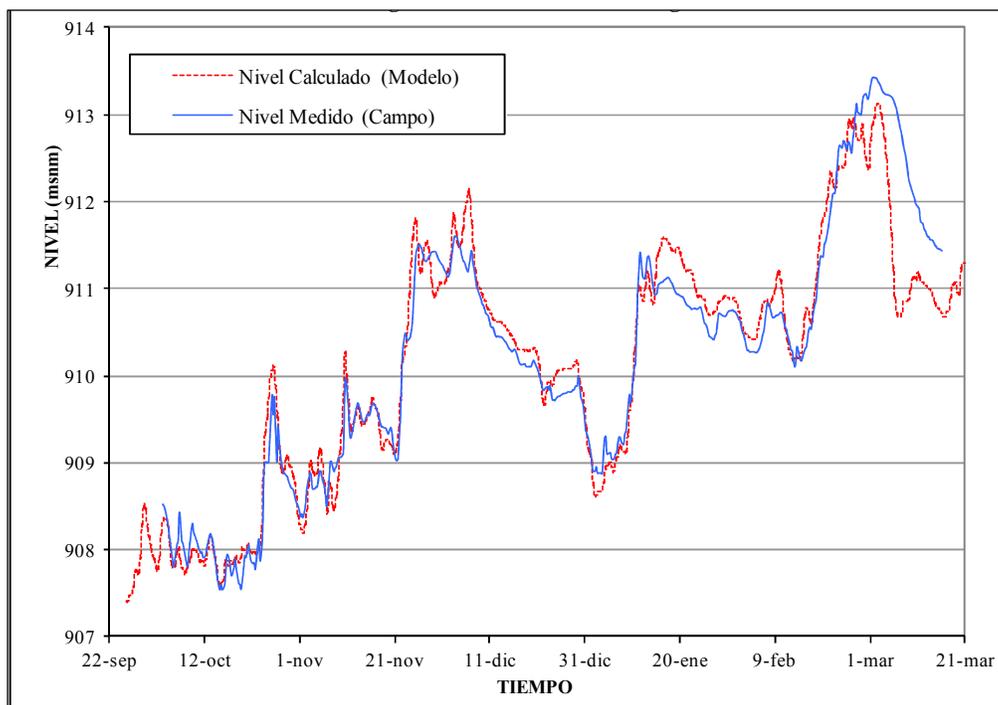


Figura 3.15 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: La Victoria Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Caudal calculado vs Caudal medido

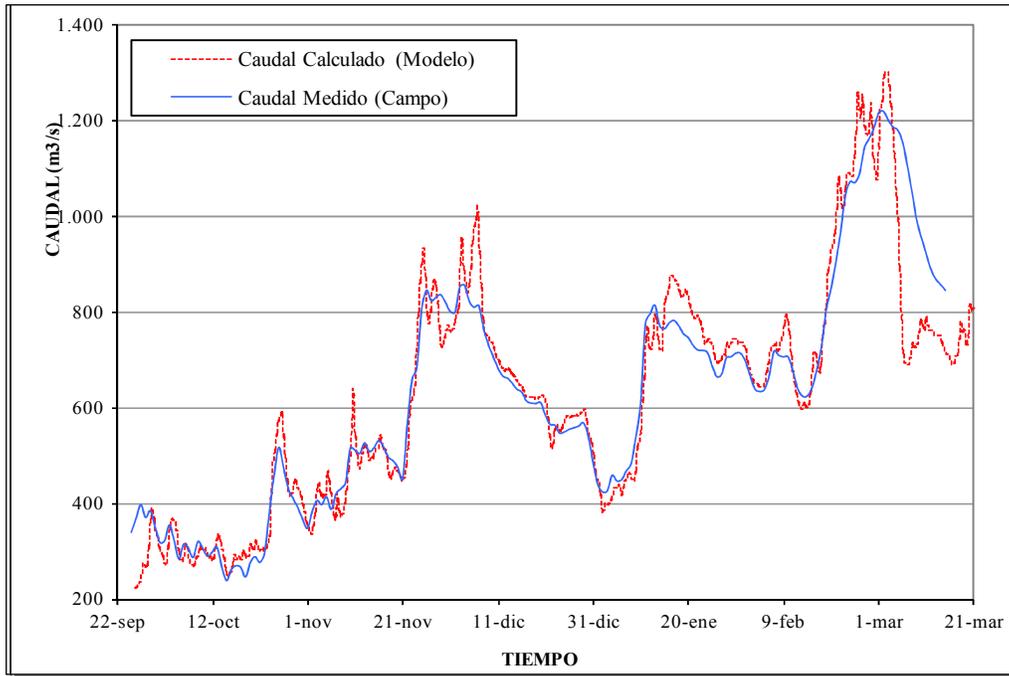


Figura 3.16 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: La Victoria Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Nivel calculado vs Nivel medido

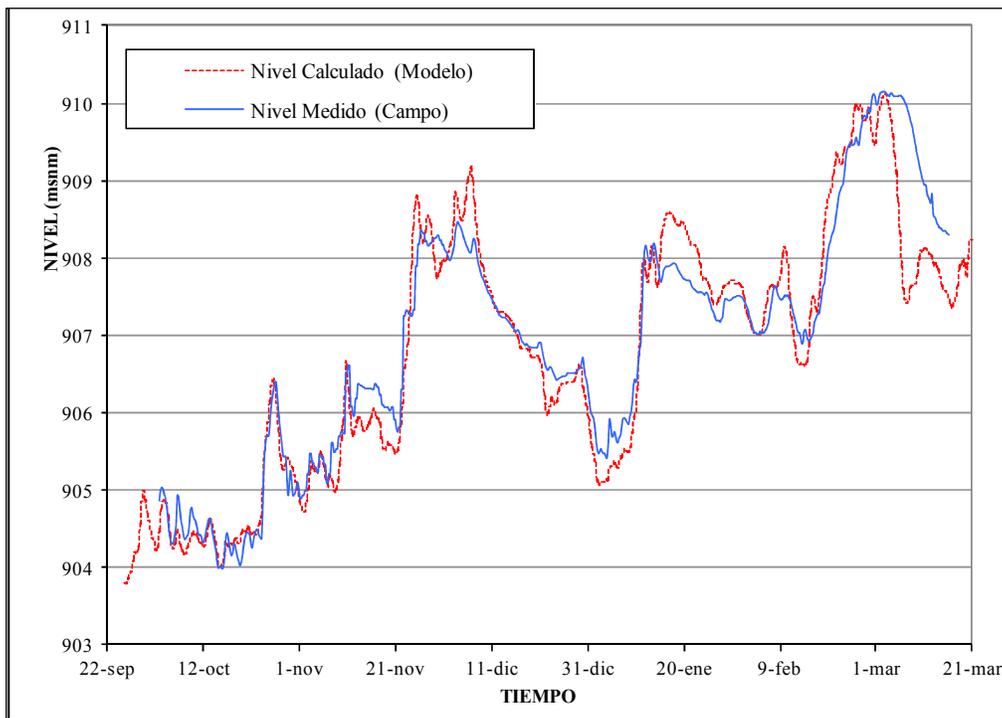


Figura 3.17 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Anacaro Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Caudal calculado vs Caudal medido

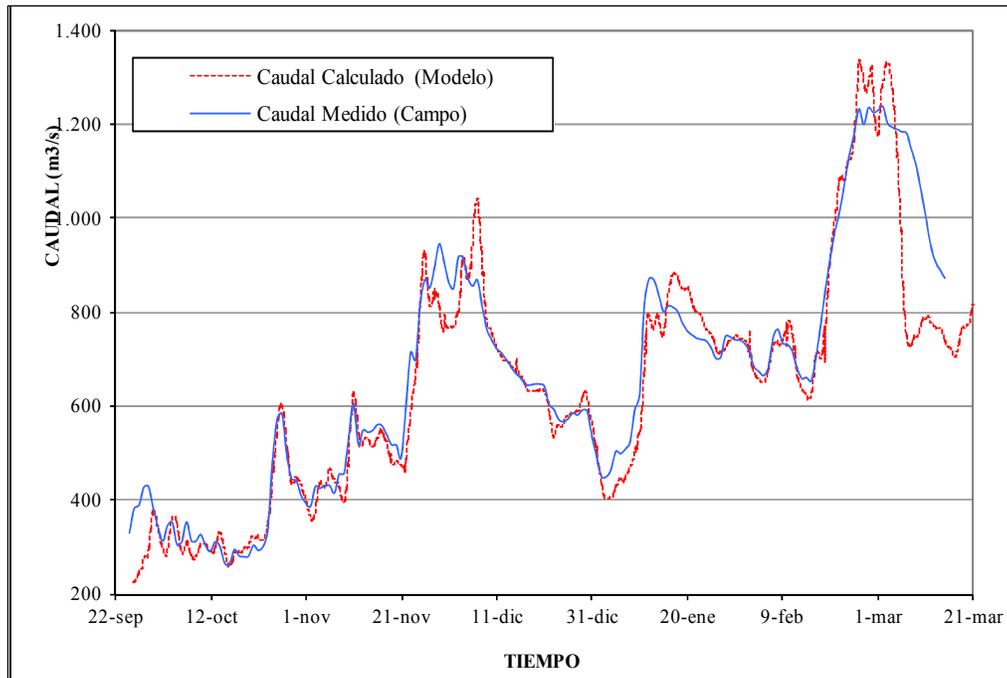


Figura 3.18 Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Anacaro Periodo Octubre 1998 – Marzo 1999. Nivel calculado vs Nivel medido

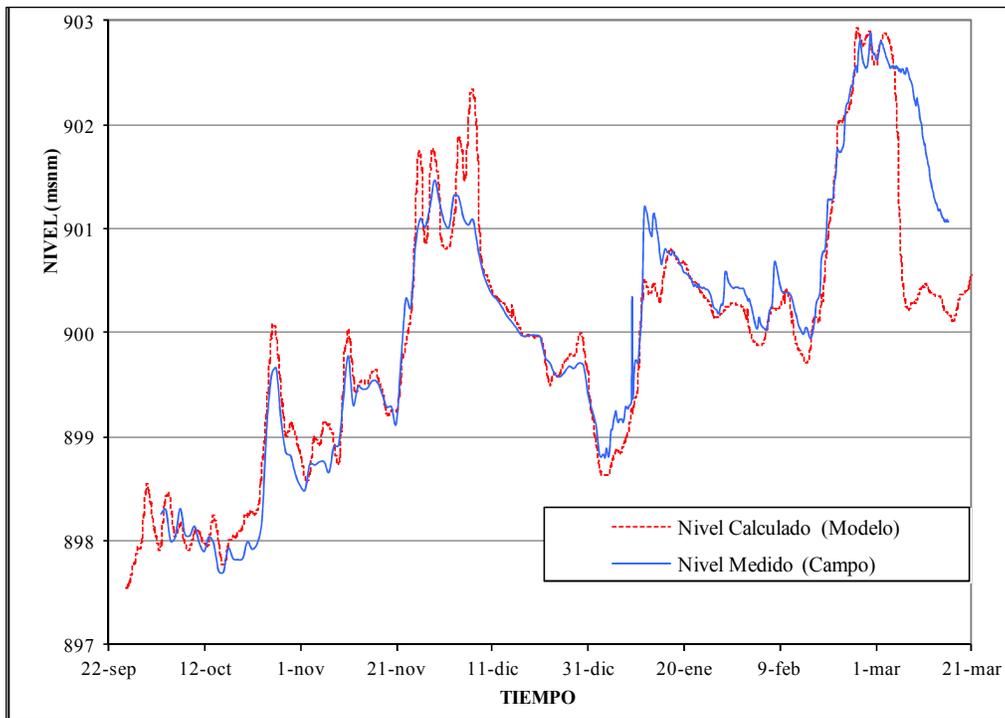


Figura 3.19 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: La Bolsa

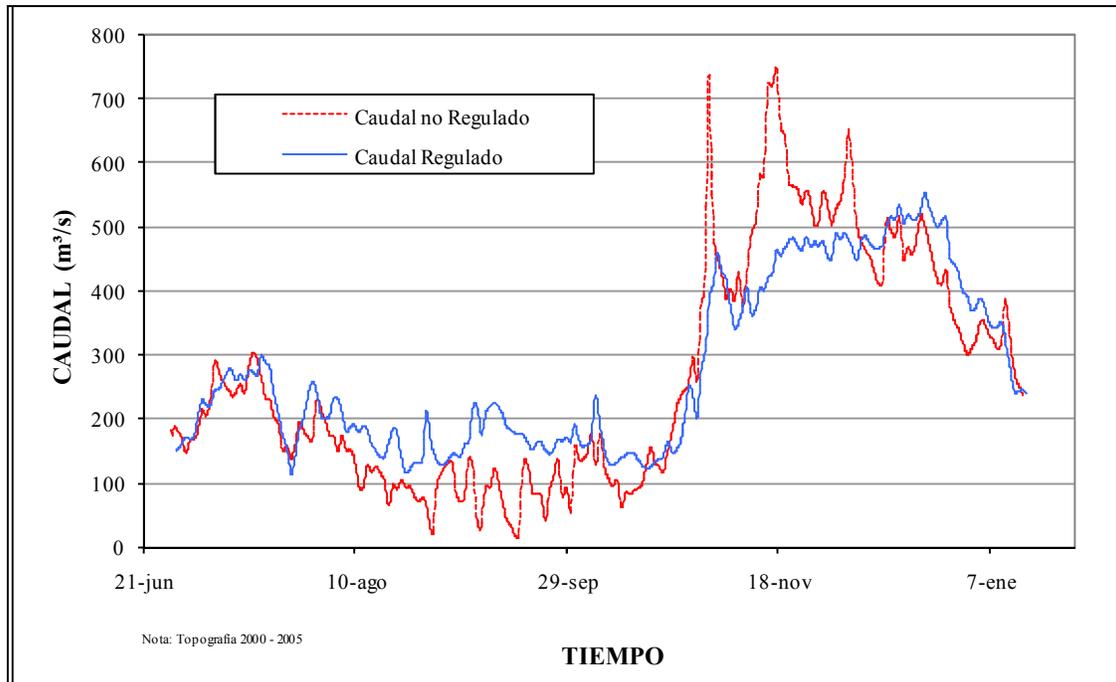


Figura 3.20 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: La Bolsa

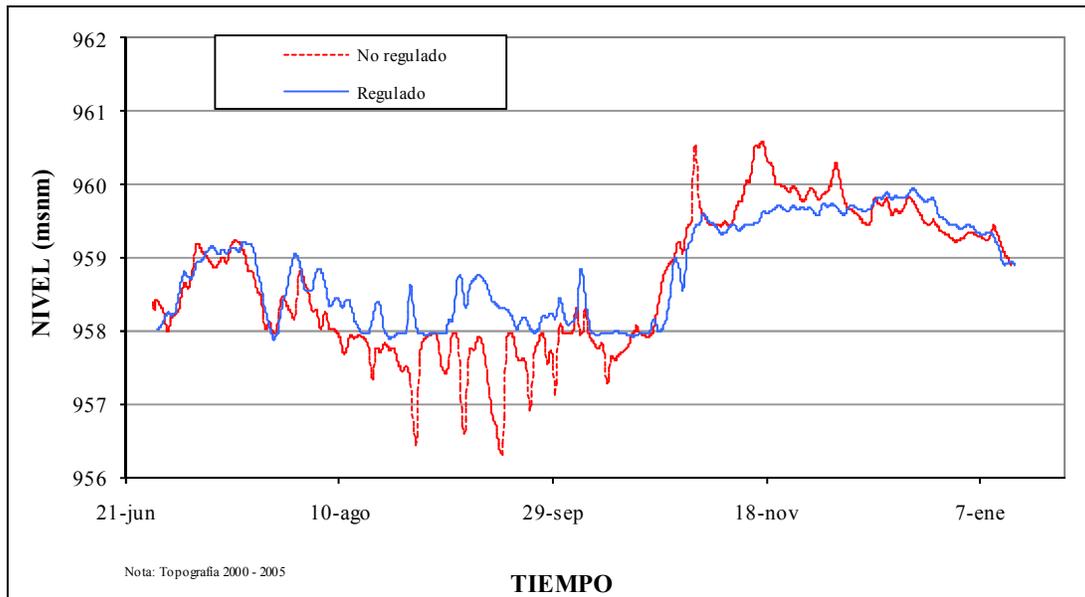


Figura 3.21 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciete del año 2010. Estación: Hormiguero

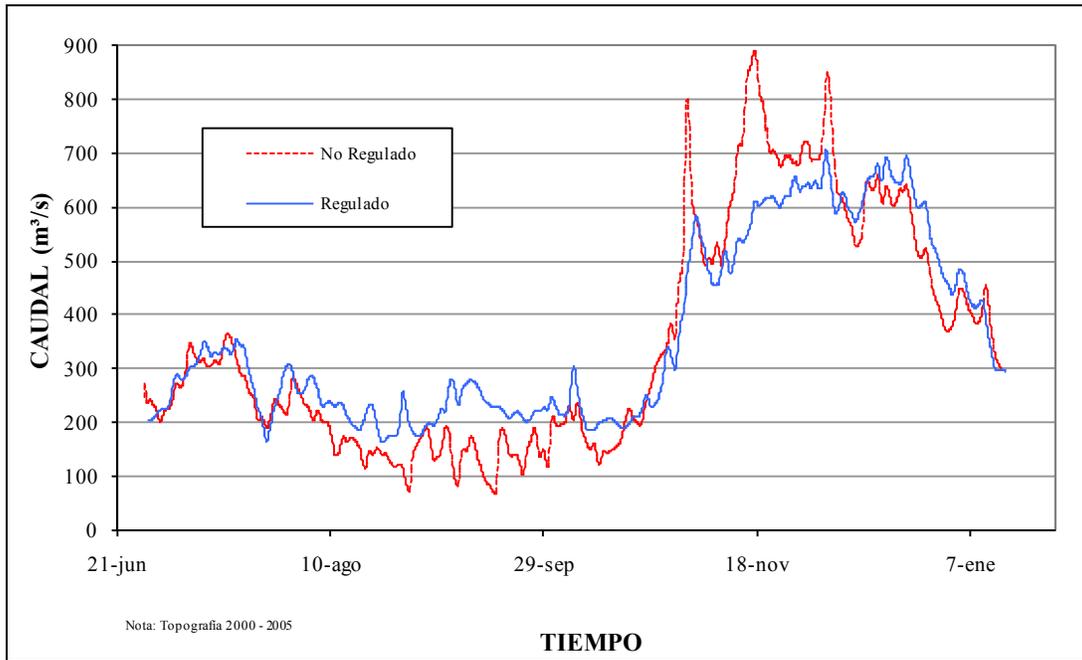


Figura 3.22 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciete del año 2010. Estación: Hormiguero

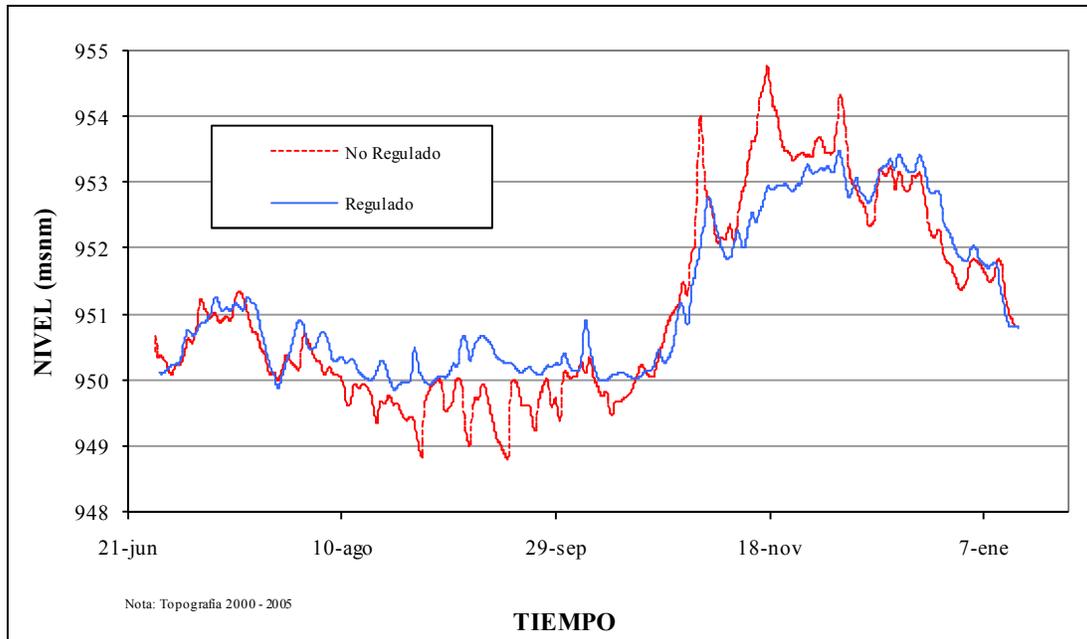


Figura 3.23 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: Juanchito

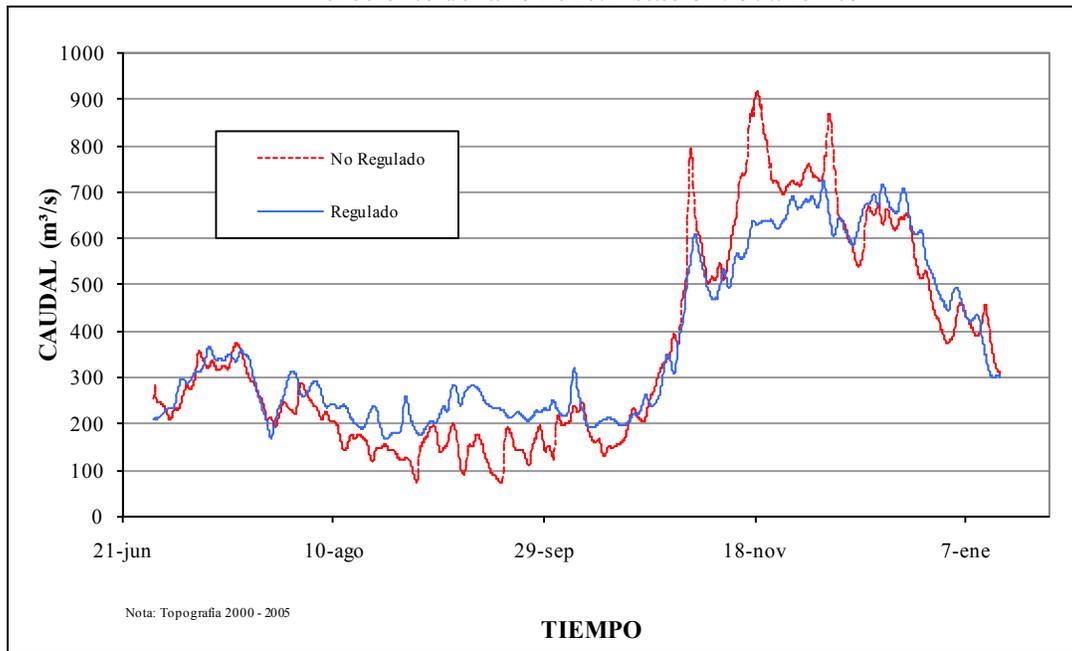


Figura 3.24 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: Juanchito

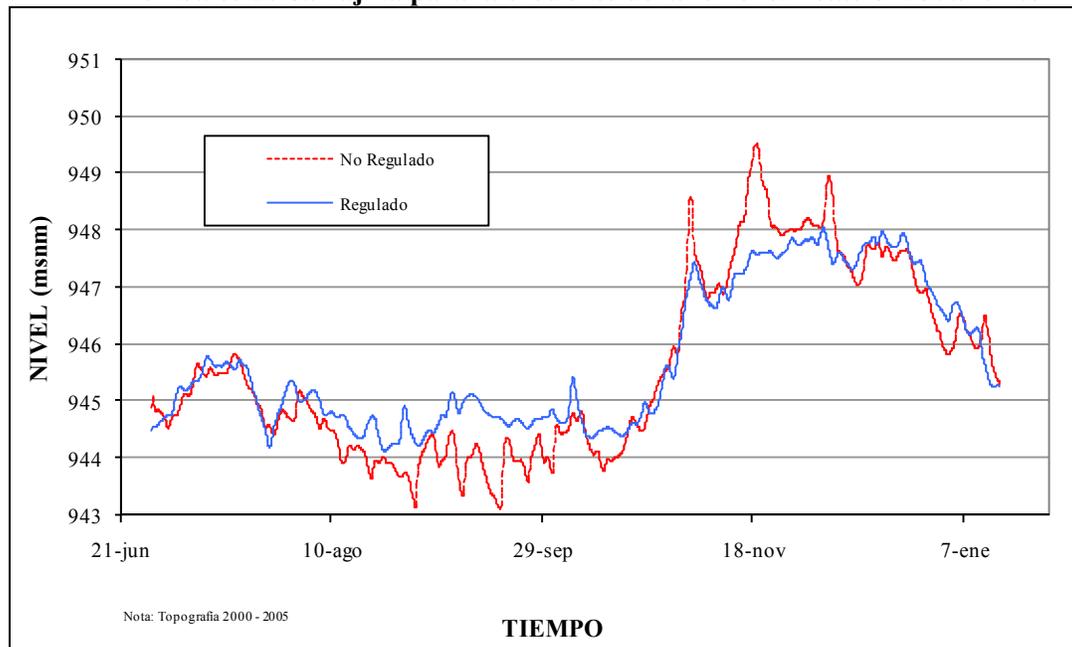


Figura 3.25 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la crecida del año 2010. Estación: Mediacanoa

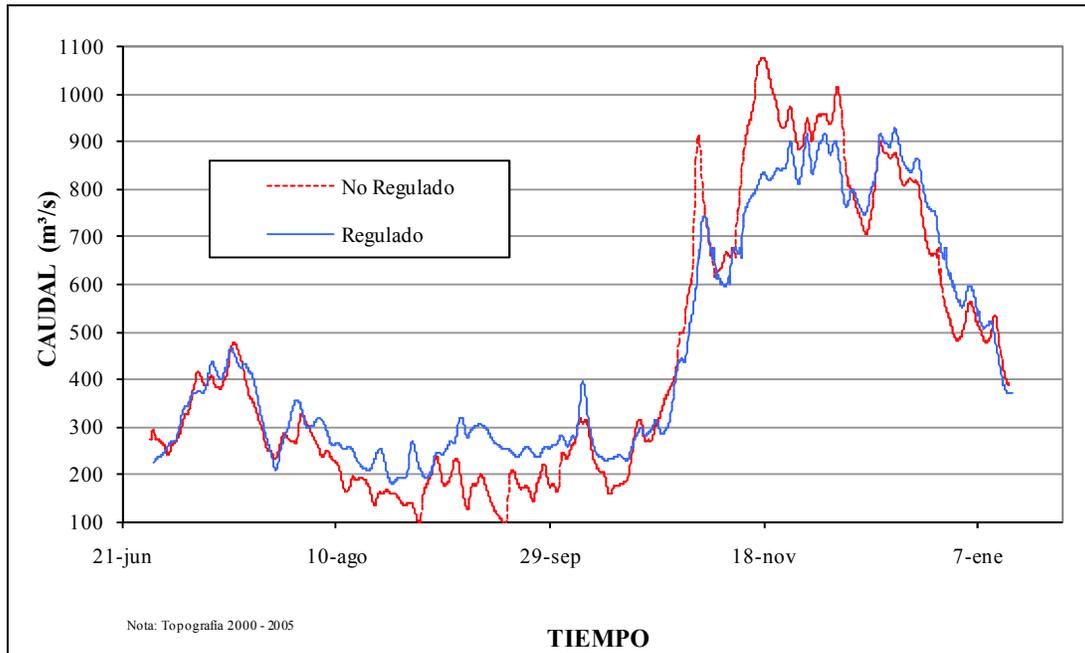


Figura 3.26 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la crecida del año 2010. Estación: Mediacanoa

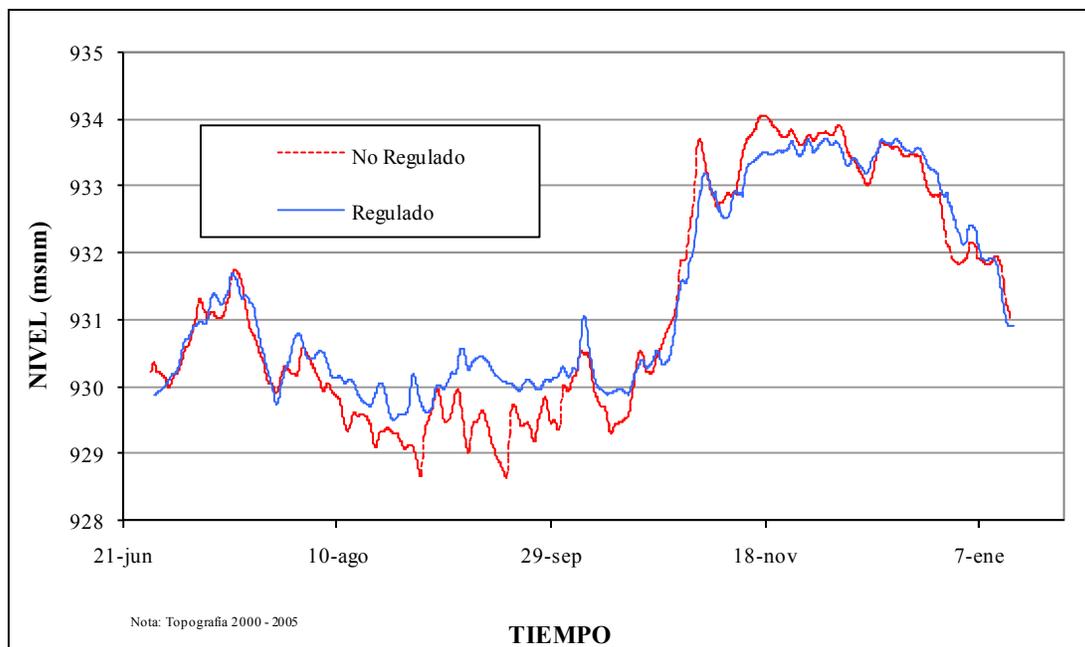


Figura 3.27 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: Guayabal

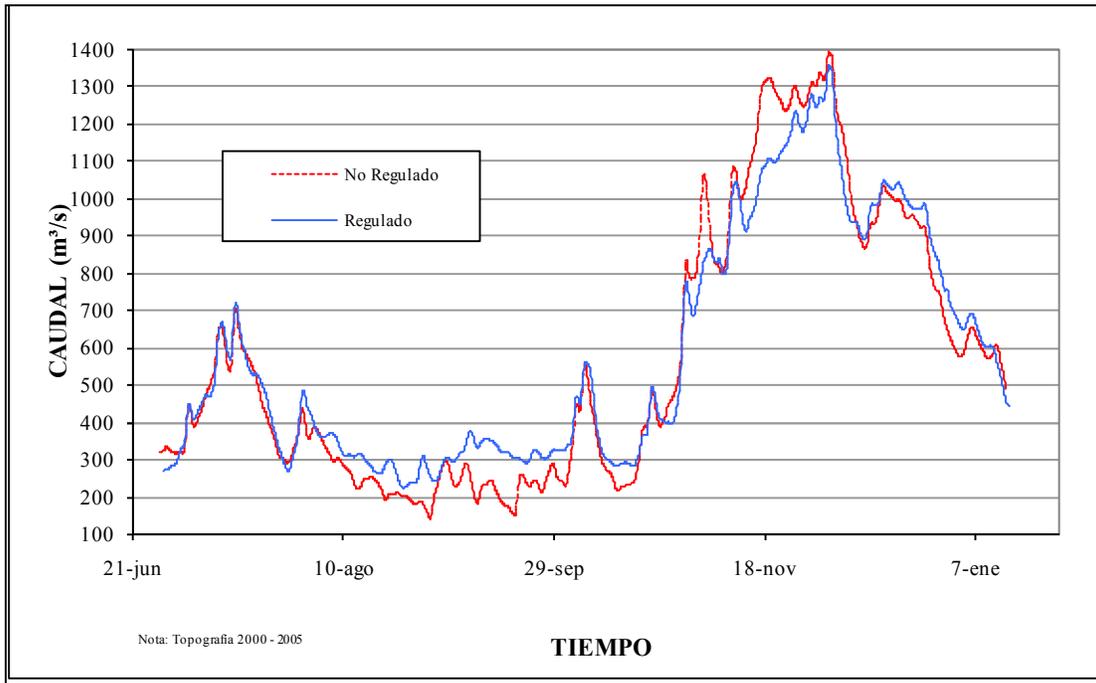


Figura 3.28 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: Guayabal

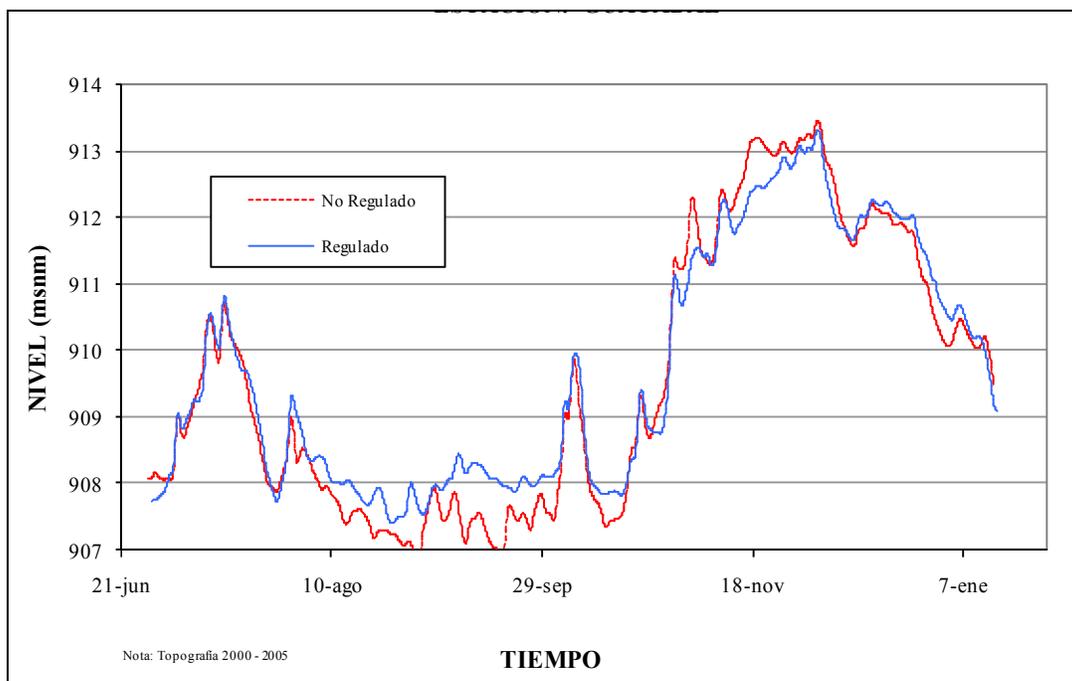


Figura 3.29 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: La Victoria

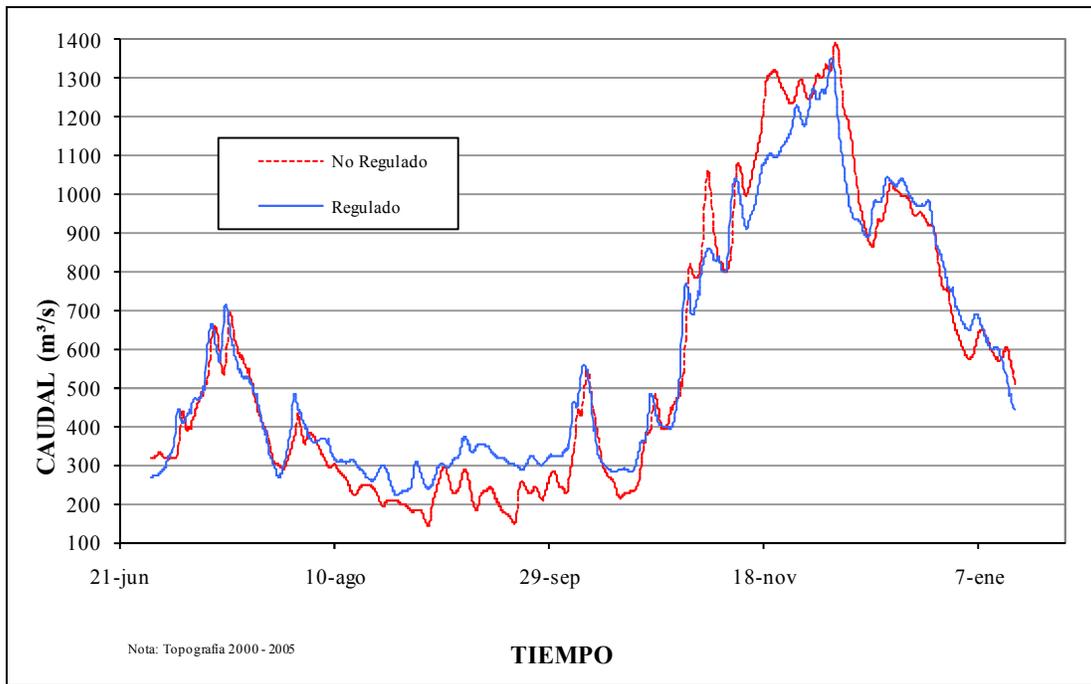


Figura 3.30 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: La Victoria

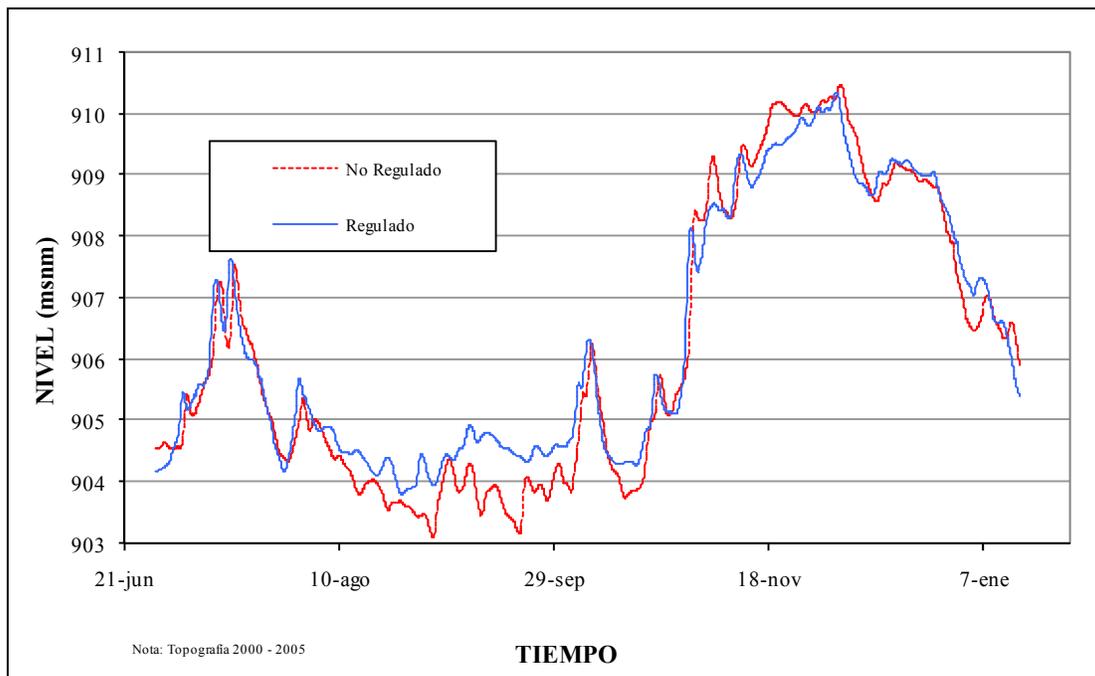


Figura 3.31 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: Anacaro

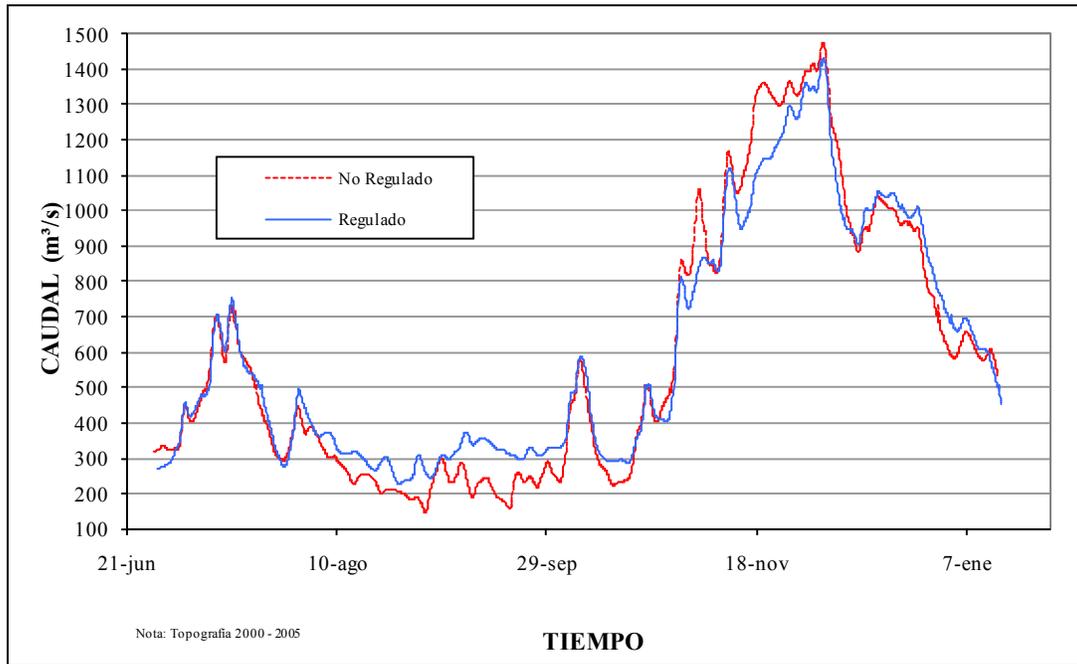


Figura 3.32 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente del año 2010. Estación: Anacaro

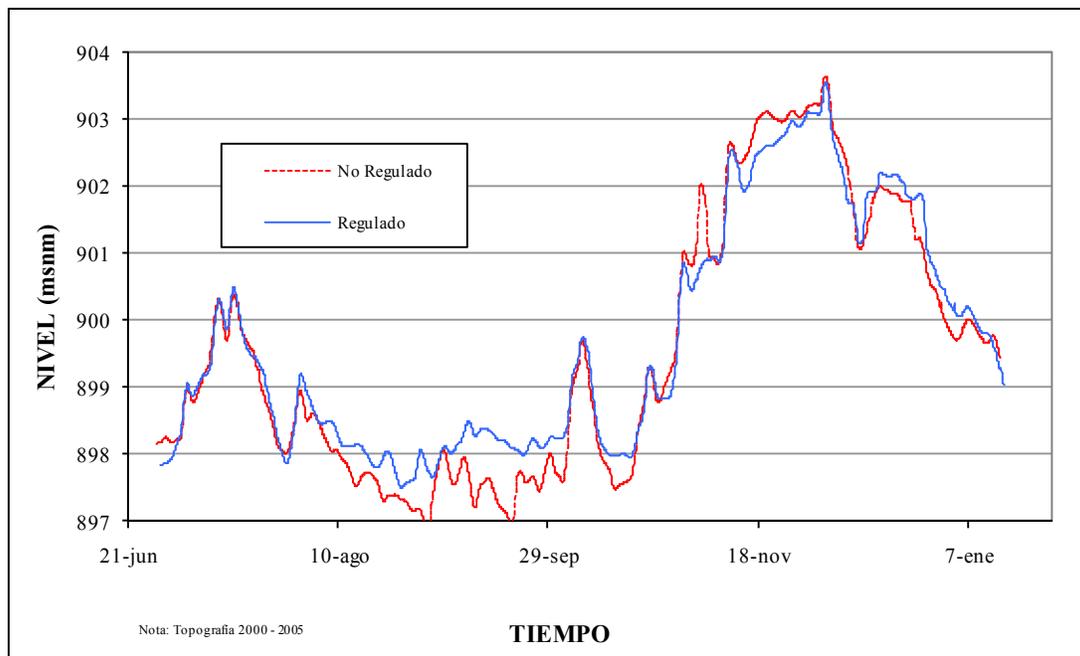


Figura 3.33 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la crecida ocurrida entre 1970 y 1971 2010. Estación: La Bolsa

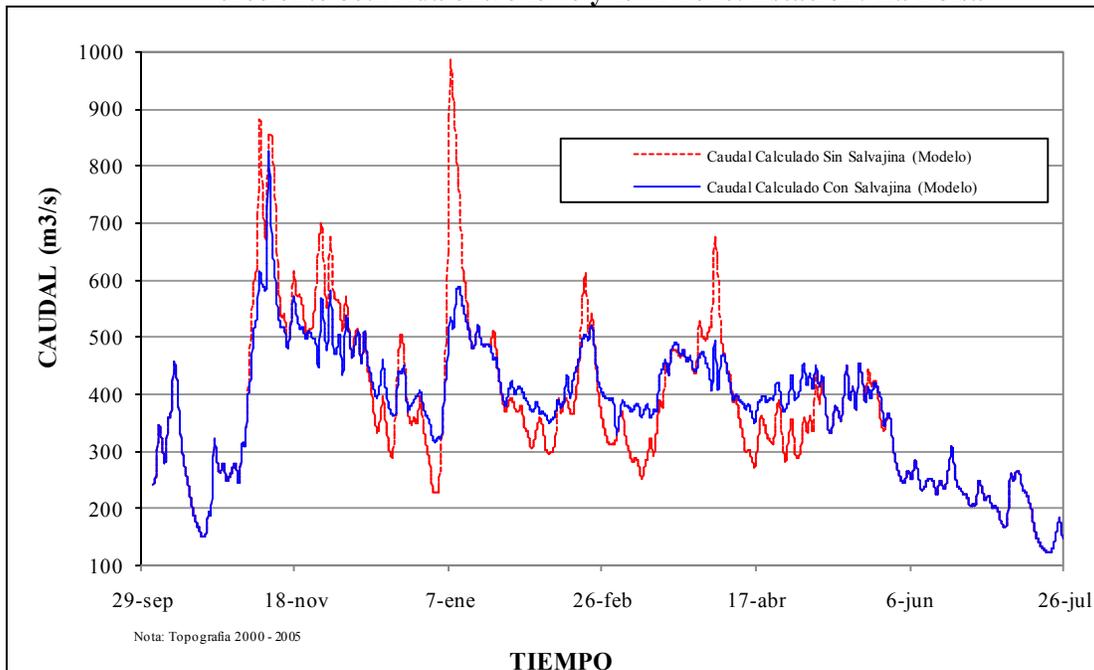


Figura 3.34 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la crecida ocurrida entre 1970 y 1971. Estación: La Bolsa

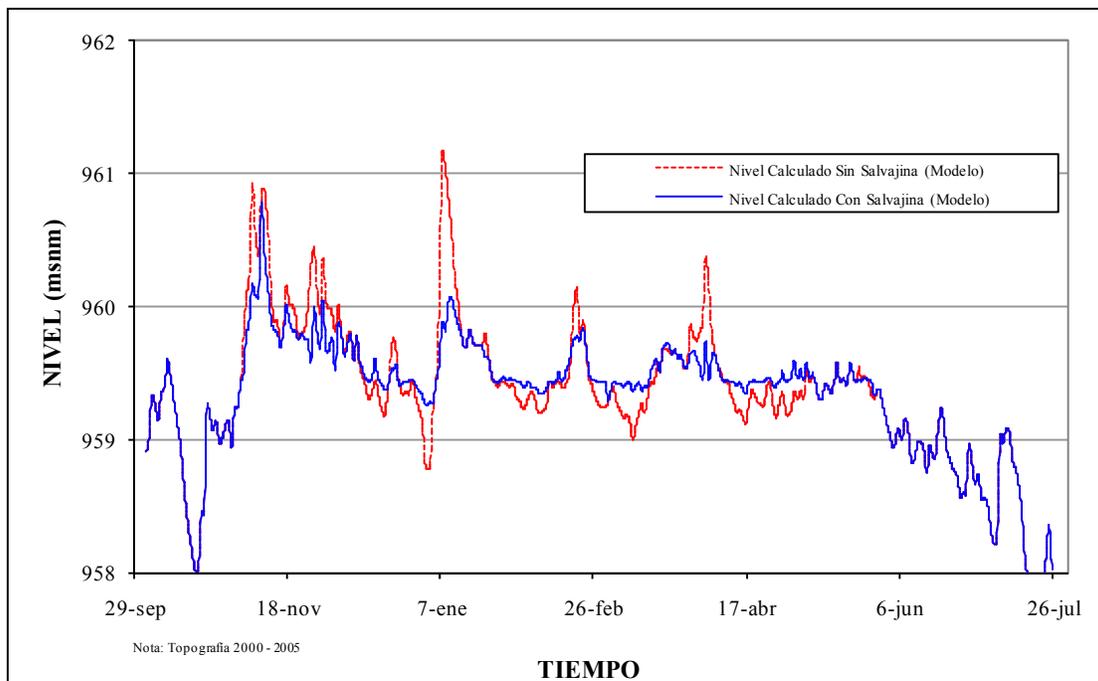


Figura 3.35 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la crecida ocurrida entre 1970 y 1971 2010. Estación: Hormiguero

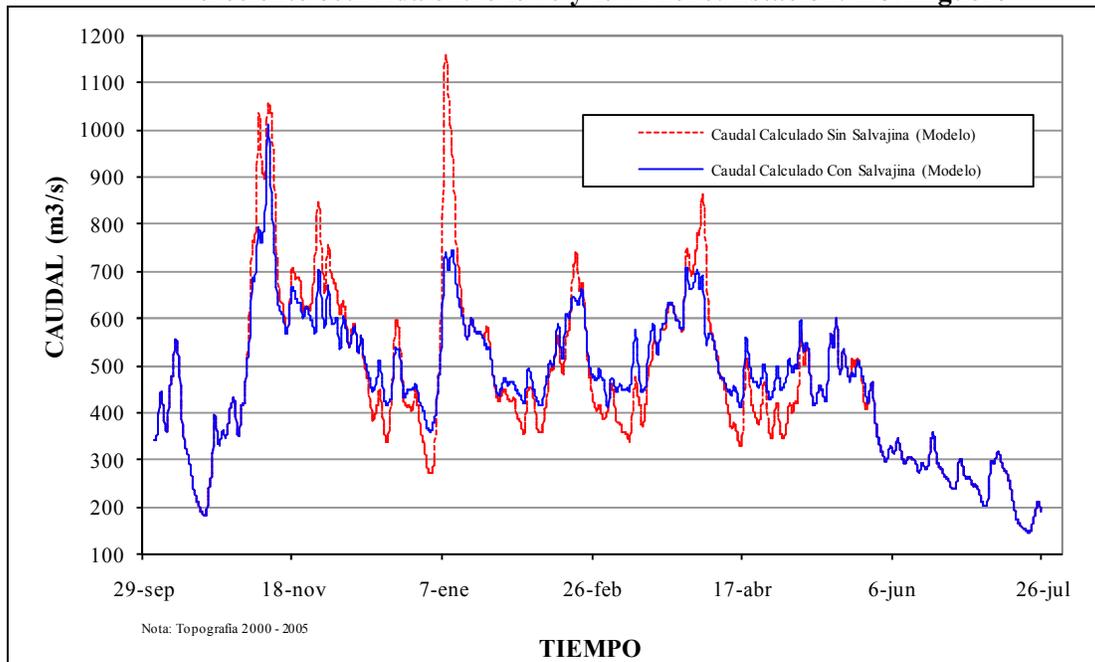


Figura 3.36 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la crecida ocurrida entre 1970 y 1970. Estación: Hormiguero

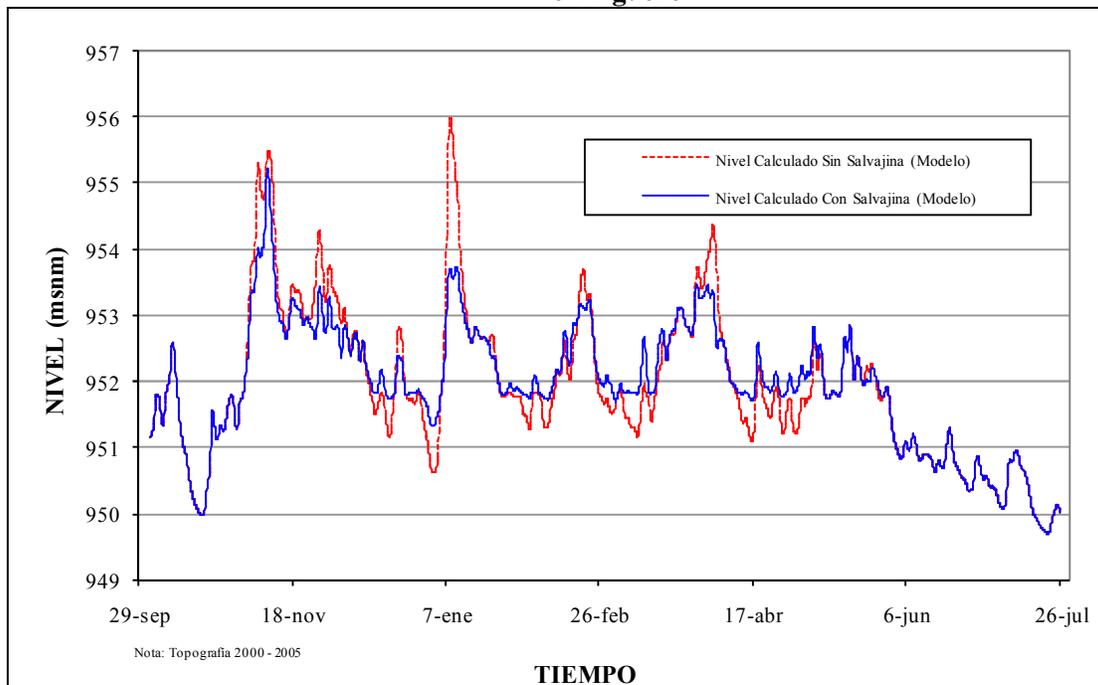


Figura 3.37 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la crecida ocurrida entre 1970 y 1971 2010. Estación: Juanchito

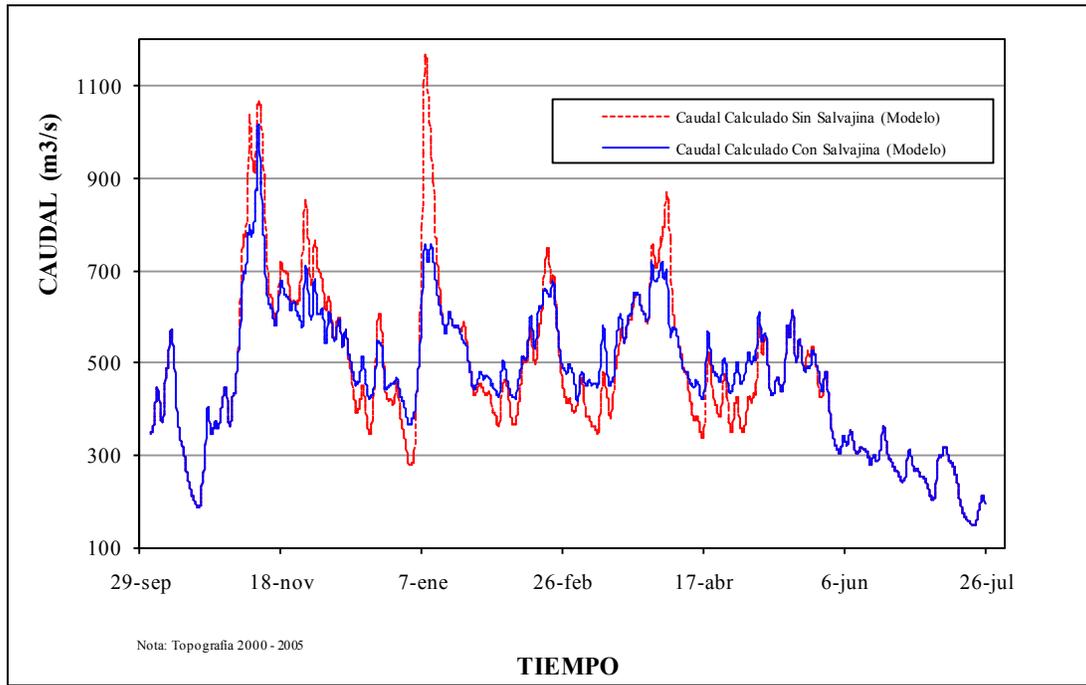


Figura 3.38 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la crecida ocurrida entre 1970 y 1970. Estación: Juanchito

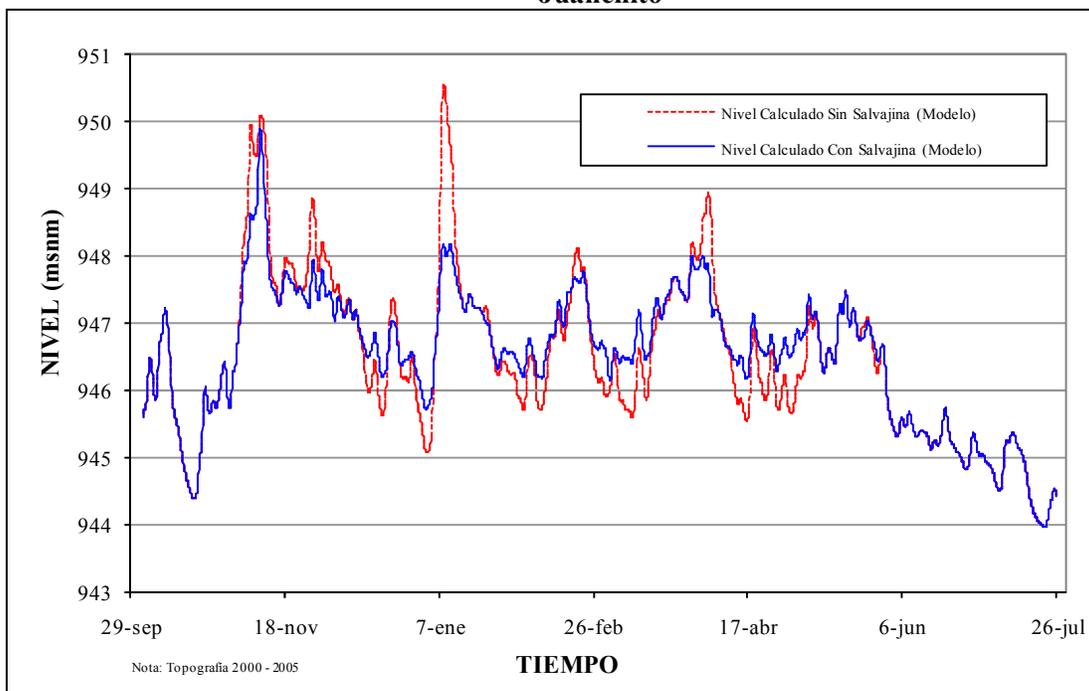


Figura 3.39 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente ocurrida entre 1970 y 1971 2010. Estación: Mediacanoa

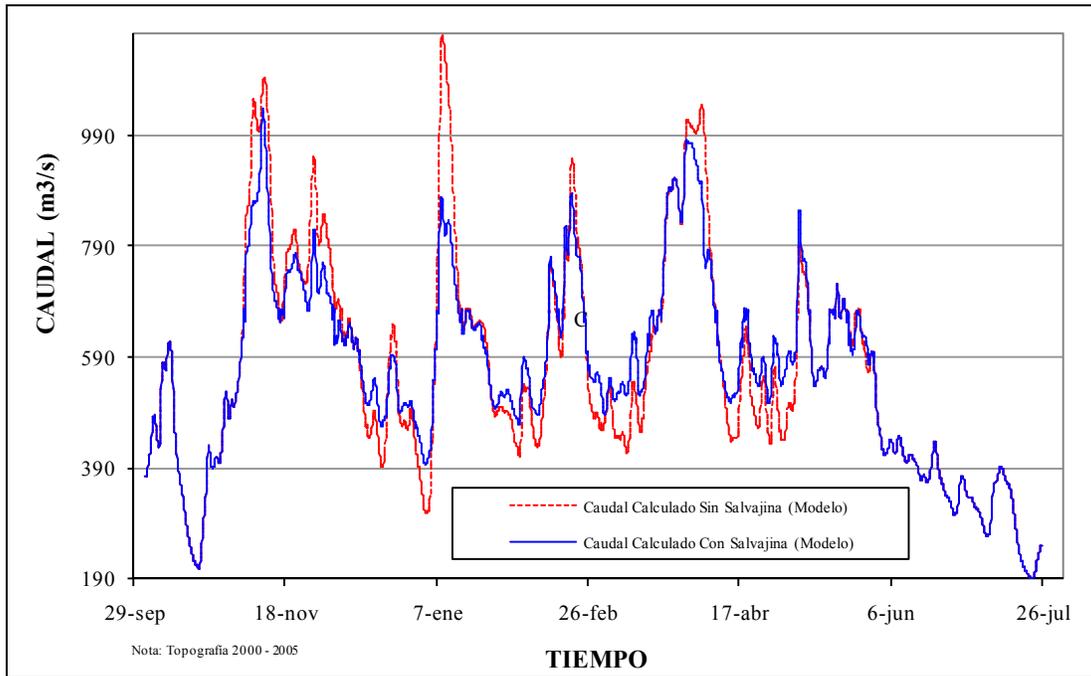


Figura 3.40 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente ocurrida entre 1970 y 1970. Estación: Mediacanoa

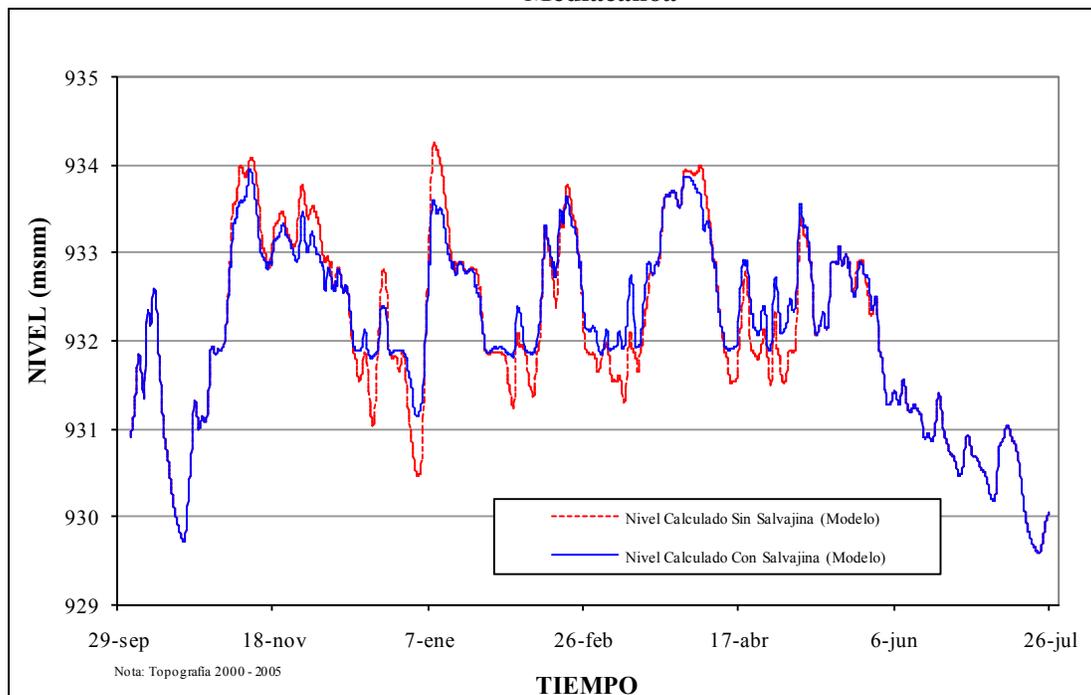


Figura 3.41 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la crecida ocurrida entre 1970 y 1971 2010. Estación: Guayabal

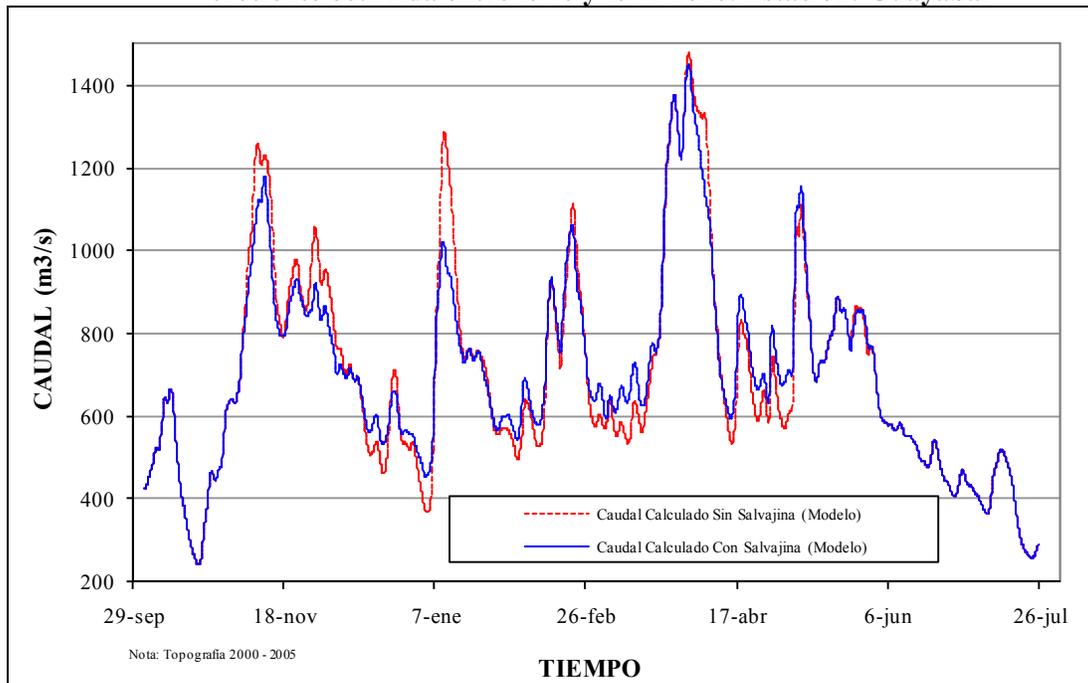


Figura 3.42 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la crecida ocurrida entre 1970 y 1970. Estación: Guayabal

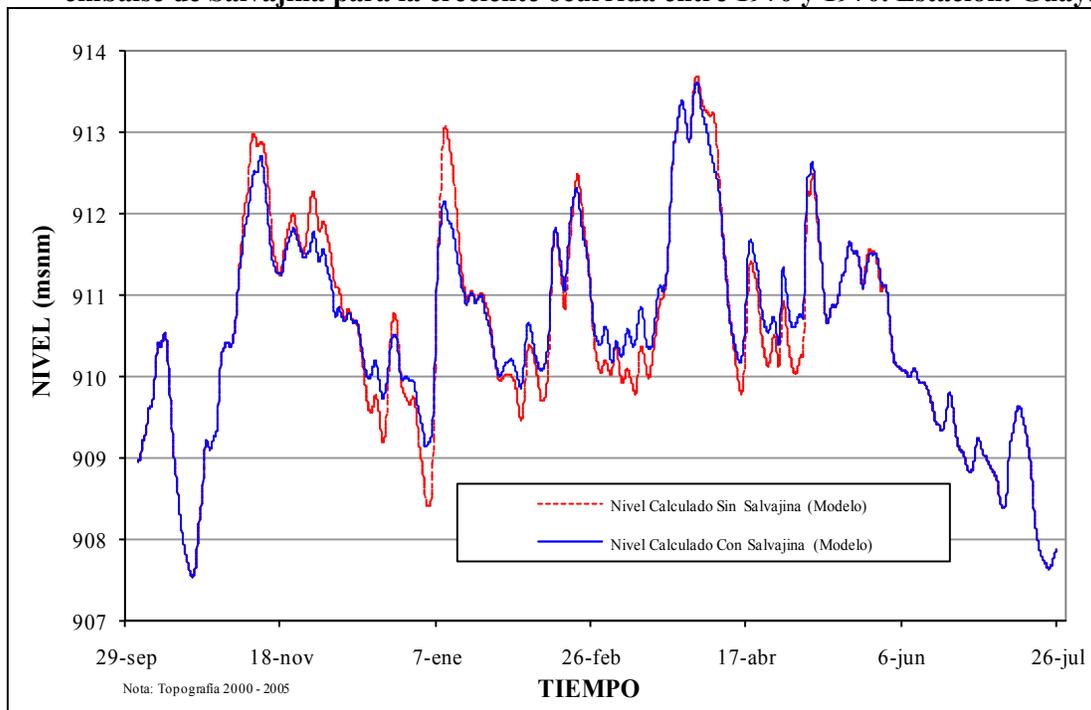


Figura 3.43 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente ocurrida entre 1970 y 1971 2010. Estación: La Victoria

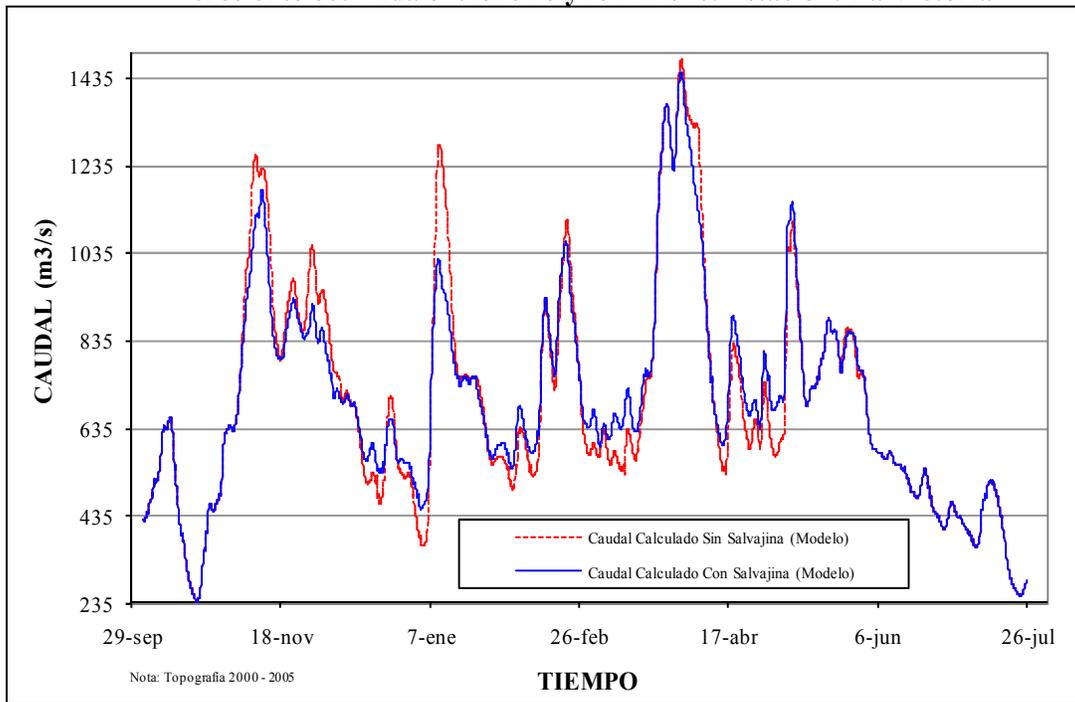


Figura 3.44 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la creciente ocurrida entre 1970 y 1970. Estación: La Victoria

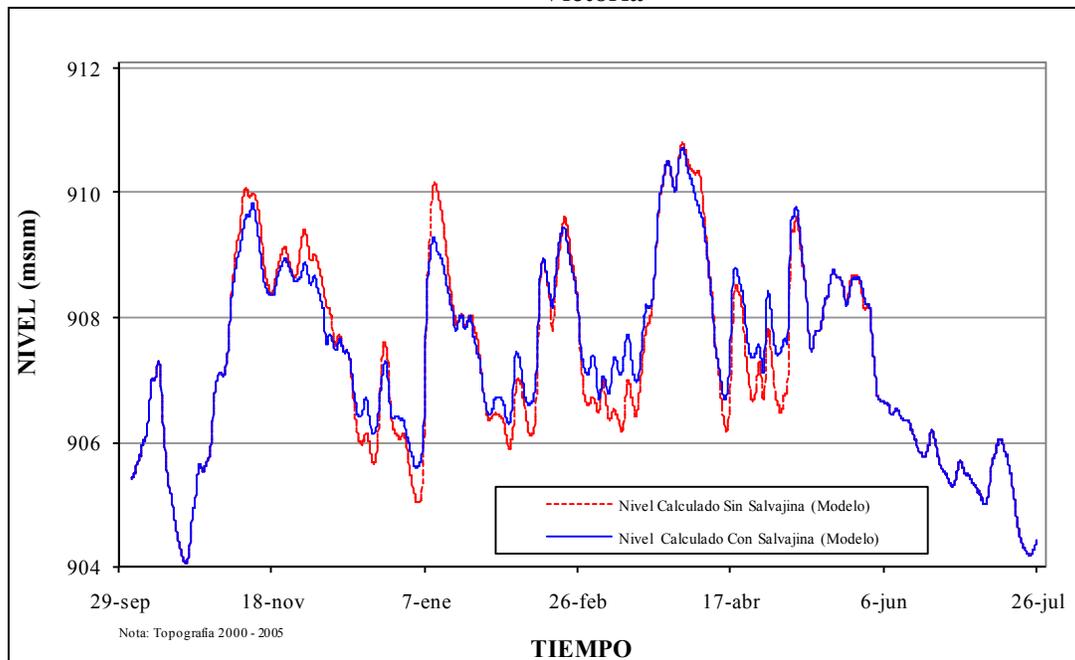


Figura 3.45 Caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la crecida ocurrida entre 1970 y 1971 2010. Estación: Anacaro

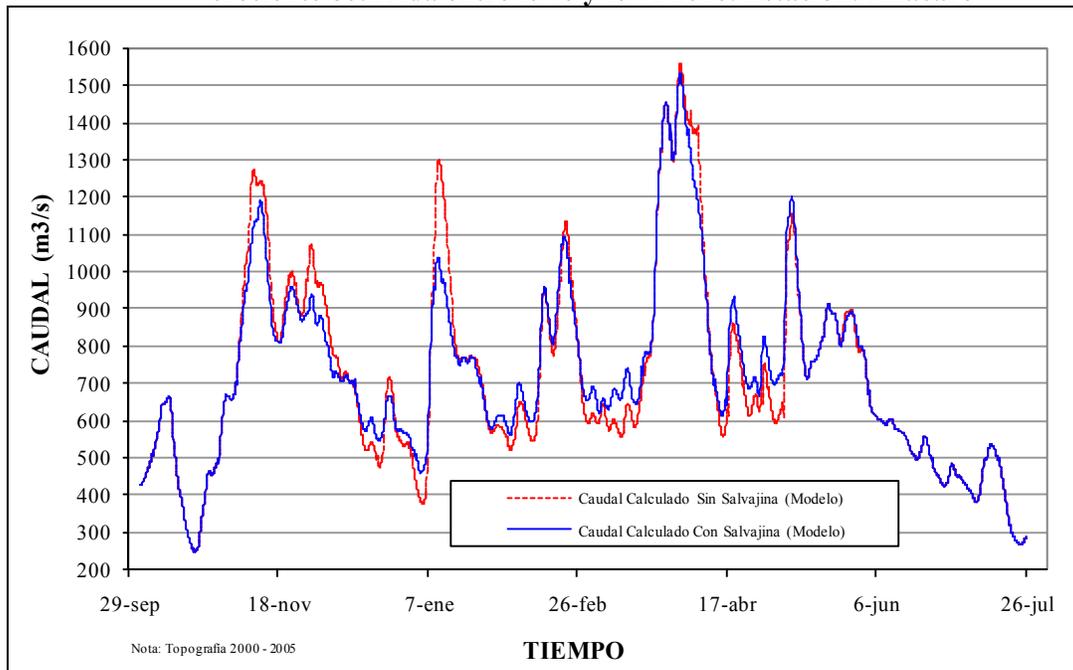
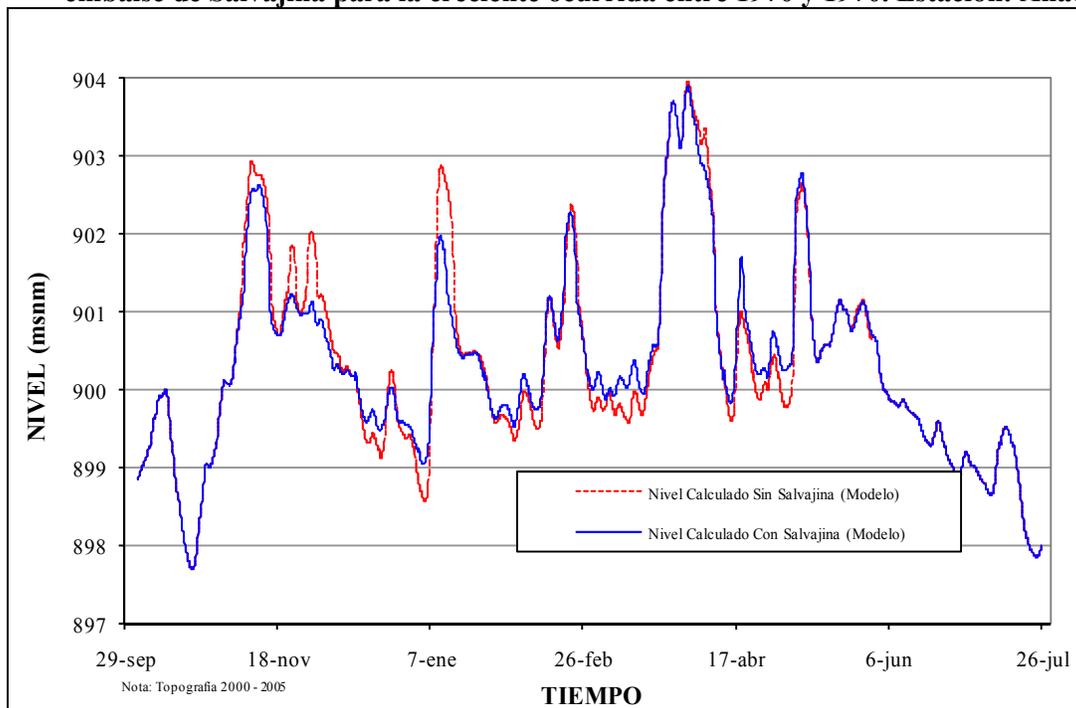


Figura 3.46 Niveles correspondientes a caudales calculados regulados y no regulados por el embalse de Salvajina para la crecida ocurrida entre 1970 y 1970. Estación: Anacaro



3.3 ESQUEMATIZACIÓN Y AJUSTES DEL MODELO PARA LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS

Para la realización de la modelación matemática de las alternativas propuestas presentadas en el capítulo 2.4, se tomó como base el modelo matemático implementado por la CVC y la Universidad del Valle en el desarrollo del proyecto de Modelación del río Cauca PMC (ejecutado en el periodo comprendido entre los años 1997 y 2007) y el proyecto de Estudio de la Dinámica de Humedales en el Valle Alto del río Cauca (ejecutado en el año 2009). Sobre el modelo base se realizaron modificaciones respecto a la rugosidad empleada en la berma comprendida entre la banca llena y la pata del dique, y las condiciones hidrodinámicas de fronteras del río Cauca y los ríos tributarios. Adicionalmente para las alternativas propuestas donde se contemplaban la integración de humedales y lagunas de laminación se establecieron diferentes rugosidades de Manning.

3.3.1 Rugosidad

Los factores de rugosidad del cauce principal del río Cauca y los ríos tributarios adoptados para el estudio de las alternativas estructurales corresponden a los factores de rugosidad de Manning-Strickler, obtenidos en la primera parte de este capítulo orientada a la revisión y ajuste del modelo disponible del río Cauca. En el Cuadro 3.5 se presentan los valores de la rugosidad de los cauces en términos del coeficiente de rugosidad de Manning. Debido a la limitada información de campo disponible en cuanto a aforos líquidos durante las condiciones de caudales y niveles altos en el río no fue posible realizar una calibración apropiada de los factores de rugosidad en las bermas, por lo cual se adoptó un factor de rugosidad de Manning para éstas igual a $0.1 \text{ s/m}^{1/3}$. A partir de este coeficiente de rugosidad se calcularon los factores de resistencia para las bermas de los diferentes tramos o sectores del río Cauca. En el archivo de las secciones transversales de los cauces en el modelo Mike 11 el factor de resistencia es multiplicado por el coeficiente de rugosidad definido previamente en el archivo de parámetros hidrodinámicos. En el Cuadro 3.5 también se incluyen los valores del factor de resistencia estimado para las bermas de los diferentes tramos del río Cauca. Estos factores de resistencia se introducen en el archivo de las secciones transversales del cauce, pero solamente en la parte correspondiente a las bermas, es decir, en las fracciones de la sección transversal que se encuentran a la izquierda de la banca llena y a la derecha de la banca llena derecha del cauce principal del río.

Para la modelación de las diferentes alternativas que contemplan la integración de humedales y lagunas de laminación se adoptó la misma rugosidad de Manning empleada para las bermas del río Cauca, es decir, un coeficiente igual a $0.1 \text{ s/m}^{1/3}$.

3.3.2 Hidrógrafas de caudales

Para la modelación hidrodinámica del río Cauca fue necesario estimar los caudales máximos o picos en las estaciones para un periodo de retorno de 30 años. Los caudales picos en las estaciones del tramo La Balsa - Juanchito fueron estimados a partir de los registros disponibles de las series de caudales máximos del período Post-Salvajina, es decir, después del año 1985, debido a la influencia marcada del embalse de Salvajina sobre los caudales hasta la estación Juanchito. Para las estaciones hidrométricas existentes en el tramo Mediacanoa - La Virginia, donde la influencia de la operación del embalse es

mínima (en especial durante las crecientes en el río), se tomaron las series completas de caudales máximos disponibles durante todo el periodo de operación de las estaciones. (es decir, las series incluyen los registros de los periodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina). Los caudales máximos estimados para una creciente en el río Cauca con un período de retorno de 30 años fueron calculados y suministrados por el grupo IREHISA de la Universidad del Valle en desarrollo de los estudios hidrológicos realizados en desarrollo del proyecto. Los resultados se presentan en el Cuadro 3.6.

Cuadro 3.5 Rugosidad, niveles de interface y factores de resistencia del río Cauca y ríos tributarios definidos para el modelo hidrodinámico

Estación	Factor de Rugosidad de Manning ($s/ m^{1/3}$)			Nivel de interfae (msnm)		Nivel de banca llena (msnm)	Factor de Resistencia	
	Zona1	Zona2	Zona3	Zona1-2	Zona 2-3		Cauce	Berma
La Balsa	0.050	0.034	0.026	982.5	985.0	985.3	1.0	3.85
La Bolsa	0.050	0.034	0.026	958.0	959.5	960.0	1.0	3.85
Hormiguero	0.050	0.043	0.04	950.0	951.8	952.5	1.0	2.5
Juanchito	0.027	0.027	0.034	944.0	946.0	946.7	1.0	2.95
Mediacanoa	0.029	0.029	0.029	930.5	932.0	932.2	1.0	3.35
Guayabal	0.025	0.025	0.025	908.0	910.0	911.1	1.0	3.85
La Victoria	0.028	0.028	0.028	903.0	905.0	907.85	1.0	3.57
Anacaro	0.025	0.025	0.025	897.0	899.5	902.84	1.0	3.85
La Virginia	0.028	0.028	0.028	892.0	897.0	901.37	1.0	3.55
Tributarios	0.040	0.033	0.028	-	-	-	1.0	2

Después de definir los caudales picos en las estaciones hidrométricas del río Cauca para un periodo de retorno de 30 años fue necesario definir las hidrógrafas de caudales que se debían ingresar en las fronteras abiertas superiores del modelo matemático, tanto en el río Cauca (La Balsa, abscisa K27+385) como en los ríos tributarios.

Para ello se seleccionaron las hidrógrafas de caudales registradas durante el período noviembre - diciembre de 2011, por corresponder a una de las crecientes más intensas registradas en el valle alto del río Cauca en toda la historia y, además, en un período muy reciente. Se seleccionó el periodo más crítico de esta creciente, que presentó una duración de 20 días. Las hidrógrafas de caudales se obtuvieron mediante un proceso, en el cual primero se adimensionalizaron las hidrógrafas al dividir cada caudal registrado en la creciente entre el caudal pico de la misma, y luego los resultados adimensionales obtenidos se multiplicaron por el caudal máximo estimado para la creciente de período de retorno de 30 años. En el Cuadro 3.7 se presentan los caudales máximos estimados para un periodo de retorno de 30 años en la estación La Balsa sobre el río Cauca y en los ríos tributarios del río Cauca.

3.3.3 Modelo alternativo de sólo diques distanciados 60, 90 y 120 m del cauce del río Cauca

Para la esquematización de las alternativas que consideran como medida estructural sólo diques localizados a 60 m, 90 m y 120 m del cauce principal del río Cauca se realizaron las modificaciones descritas en los numerales 3.3.1 (rugosidad y factor de resistencia) y 3.3.2 (hidrógrafas de caudales). Para ello se requirió construir tres archivos diferentes con

teniendo cada uno de ellos la topografía correspondiente a cada uno de los tres modelos. En las secciones topográficas ingresadas al modelo se modificaron las distancias de los diques al cauce principal, adoptando anchos de berma de 60, 90 y 120 m, respectivamente, para cada uno de los modelos construidos.

Todos los humedales y las llanuras de inundación que se encontraban en el modelo base fueron retirados para simular solamente el confinamiento del río Cauca ocasionado por la presencia de los diques propuestos en todo el tramo a modelar. Las únicas conexiones directas que se dejaron entre el río Cauca y los humedales fueron la Laguna de Sonso (conectada a través del canal Caño Nuevo) y los humedales Burro y La Marina, que se hallan en el mismo sector de la laguna de Sonso. En el Cuadro 3.4 se presentan como se ilustra en el Cuadro 3.8.

Cuadro 3.6 Caudales Máximos estimados en las estaciones hidrométricas del río Cauca para una creciente con un periodo de retorno de 30 años

Río	Estación	Abscisa (Km)	Caudales Máximos Estimados (m ³ /s)
			Tr = 30 años
Cauca	La Balsa	27+385	656
	La Bolsa	79+547	804
	Hormiguero	115+443	875
	Juanchito	140+895	1172
	Mediacanoa	223+602	1189
	Guayabal	350+187	1265
	La Victoria	372+006	1272
	Anacaro	418+246	1350
	La Virginia	444+928	1893

Cuadro 3.7 Caudales Máximos estimados en las Fronteras del Modelo Hidrodinámico para un periodo de retorno de 30 años.

Frontera	Abscisa (km)	Caudales Máximos Estimados (m ³ /s)
		Periodo de Retorno 30 años
La Balsa (Río Cauca)	27+385	654.8
Quinamayo	46+351	12.37
Teta	42+412	11.02
Aporte Adicional 1	50+000	40.00
La Quebrada	65+342	28.24
Aporte Adicional 2	70+000	41.00
Río Claro	79+171	41.28
Río Palo	99+291	272.07
Río Jamundí	110+219	86.26
Aporte Adicional 3	116+000	60.00
Río Desbaratado	121+504	19.90
Aporte Adicional 4	126+000	64.00
Canal Sur	129+988	21.57
Aporte Adicional 5	133+000	64.00
Canal General	143+730	12.98
Canal Oriental	146+856	1.95
Río Cali	148+475	6.99
Río Guachal	167+866	57.76
Río Amaimé	182+356	40.00

Frontera	Abscisa (km)	Caudales Máximos Estimados (m ³ /s)
		Periodo de Retorno 30 años
Río Zabaletas	193+829	4.16
Río Guabas	199+245	19.00
Río Sonso	205+957	11.09
Río Yotoco	214+105	2.00
Río Mediacanoa	221+907	10.4
Canal sonso	220+845	2.00
Río Guadalajara	225+115	7.05
Quebrada La Negra	248+304	2.60
Río Piedras	267+466	12.06
Río Riofrio	285+903	33.77
Río Tuluá	291+711	47.95
Río Morales	295+852	14.43
Quebrada Robledo	310+910	6.41
Río Bugalagrande	325+208	50.30
Río Pescador	332+694	11.25
Río Paila	333+371	31.06
Quebrada Las Cañas	341+831	10.25
Aportes Adicionales 6	360+000	3.00
Quebrada Los Micos	378+426	53.33
R.U.T	393+378	42.40
Río San Francisco	411+754	15.86
Río Obando	414+813	13.73
Río Chanco	416+988	6.18
Río Catarina	424+672	81.97
Río La Vieja	427+455	694.00
Río Risaralda	437+000	8.09

Cuadro 3.8 Conexiones directas al río Cauca en los modelos de sólo diques a 60 m, 90 m y 120 m del río Cauca

Cuerpo de Agua	Identificación	Abscisa (km)	Nivel de Banca Llena (msnm)	Nivel de Conexión (msnm)
Humedal Burro	H218-218D	218+400	934.396	934.396
Humedal La Marina	H222-222D	222+414	933.100	933.100
Laguna de Sonso	LAGSONSO	223+037	932.017	928.850

3.3.4 Modelo de la alternativa estructural de diques a 60 m del río Cauca con integración de los humedales al sistema fluvial

El modelo de la alternativa estructural que contempla la localización de los diques marginales a 60 m del río Cauca incluyendo la integración de los humedales al sistema fluvial representa o acoge las directrices del Acuerdo CVC 052 del año 2011. Para la construcción del modelo de esta alternativa se adoptó como punto de partida el modelo construido para la alternativa de solo diques localizados a 60 m del río Cauca, y posteriormente se le incluyeron o adicionaron los humedales del sistema fluvial indicados en el Cuadro 3.9.

Todos los humedales ingresados al modelo se conectaron por medio de la herramienta disponible en el modelo Mike 11 denominada Canal de Conexión (Link Channel), considerando que el nivel de conexión de los humedales con el río Cauca coincide justamente con el nivel de banca llena del cauce del río en el sitio donde se halla el humedal. Para los canales que representan a los humedales en el modelo se adoptó una coeficiente de rugosidad igual a $0.1 \text{ s/m}^{1/3}$, teniendo en cuenta la vegetación normalmente presente en muchos de ellos.

Cuadro 3.9 Humedales incluidos en la alternativa modelada de diques a 60 m con integración de humedales al sistema fluvial

Humedal	Identificación en el modelo	Abscisa (km)	Nivel a Banca Llena (msnm)
Guinea	H Guinea	34+582	978.926
La Teta	H043-044D	43+155	973.267
Avispal	H Avispal	45+467	971.732
Humedal 1	H046-047D	46+790	971.136
La Ventura	H068-069I	67+000	965.410
Cauca Haya	H069-070I	69+864	962.200
Cabezón	H099-100I	99+088	956.014
Bocas del Palo	H100-102I	100+989	954.171
Bocas del Palo	H102-104I	102+999	955.786
Colindres	H104-105I	104+966	956.567
Higuerón	H162-164I	163+084	944.691
Villa Ines	H174-175D	173+900	942.04
La Carambola	H185-185I	185+182	940.446
Vidal	H187-187I	187+191	939.544
El Conchal	H190-190D	190+210	939.534
Videles	H Videles	198+237	938.014
Maizena	H203-203I	204+200	937.435
Chiquique	H Chiquique	212+326	935.620
La Bolsa	H216-219I	216+364	934.770
Burro	H218-218D	218+400	934.396
La Marina	H222-222D	222+414	933.100
La Trozada	H226-229D	226+600	932.079
Canta Claro	H237-237D	237+100	929.508
El Cedral	H251-251D	250+468	928.200
El Jardín	H261-262D	261+475	926.848
El Tibet	H261-262I	261+475	926.651
Bocas de Tuluá	H292-292D	292+600	921.035
Madrigal	H297-297I	297+657	921.143
La Bolsa	H301-301D	301+733	917.334
El Pital	H305-307D	306+900	917.262

Humedal	Identificación en el modelo	Abscisa (km)	Nivel a Banca Llena (msnm)
La Herradura	H Herradura	317+636	916.589
Las Playas	H354-355I	355+590	907.772
Remolino	H363-364I	364+100	906.752

3.3.5 Modelo de la alternativa estructural de diques a 60 m del río Cauca con embalses de regulación en tributarios

Para la esquematización y modelación de la alternativa que considera la construcción de diques a 60 m del cauce del río Cauca más los embalses de regulación en ríos tributarios, se estimó la disminución de los caudales requeridos para caracterizar la regulación de los caudales por la implementación de los embalses en los ríos Timba, Riofrío y Bugalagrande como se describió previamente en el Capítulo 2.

Como la frontera aguas arriba del río Cauca modelado se localizó en la estación La Balsa (K27+385), el río Timba no se encuentra en la red de modelación, por lo que el caudal que disminuye por la implementación del embalse en Timba se ingresó al modelo como una fuente puntual aguas abajo de la estación La Balsa.

Para caracterizar los caudales regulados por los embalses en los ríos Riofrío y Bugalagrande también se ingresaron como fuentes puntuales en las fronteras internas localizadas en los sitios donde los ríos Riofrío y Bugalagrande desembocan al río Cauca. En el Cuadro 3.10 se presentan los caudales constantes ingresados al modelo para representar la disminución de los caudales aportados por los ríos Timbas, Riofrío y Bugalagrande al río Cauca debido a la operación de los embalses correspondientes.

Cuadro 3.10 Caudales estimados para representar la disminución en los aportes de caudales de los ríos Timba, Riofrío y Bugalagrande al río Cauca por la implementación de embalses

Embalse	Tipo de frontera	Abscisa (km)	Caudal Introducido (m ³ /s)
Timba	Fuente puntual	28+000	-42.44
Riofrío	Fuente puntual	286+500	-10.8
Bugalagrande	Fuente puntual	326+000	-16.2

3.3.6 Modelo de la alternativa estructural de diques a 60 m del río Cauca con integración de los humedales y lagunas de laminación al sistema fluvial

Partiendo del modelo de la alternativa de diques a 60 m con integración de humedales se incluyeron las lagunas de laminación propuestas en el estudio “*Planteamiento de Alternativas Estructurales para la Gestión de Inundaciones en el Valle Alto del Río Cauca*”, desarrollado en el marco de este proyecto.

Para la esquematización e implementación de esta alternativa en el modelo fue necesario utilizar nuevamente la herramienta Canal de Conexión (Link Channel), permitiendo simular la conexión del río Cauca a las lagunas de laminación sobre los diques marginales. Las entradas a las lagunas de laminación se consideraron fijas y no representan estructurales móviles como compuertas.

Se construyeron en total doce (12) modelos diferentes para simular diferentes configuraciones de la conexión río Cauca-lagunas de laminación. La simulación de la comunicación entre el cauce del río Cauca y las lagunas de laminación se a través de los canales de conexión, éstos realmente representan vertederos que permiten la descarga o vertimiento de las aguas desbordadas del río Cauca hacia las lagunas de laminación durante el ascenso de la creciente y el retorno de éstas nuevamente al río durante el descenso de la creciente. Estos vertederos se localizan sobre los diques marginales, a manera de diques fusibles, considerando diferentes niveles de la cresta de los mismos. Las configuraciones esquematizadas y simuladas de la conexión río-laguna incluyeron niveles con alturas sobre la banca llena del cauce del río de 0.0 m, 0.5 m, 1.0 m y 2.0 m, y anchos de los vertederos de 30 m, 60 m y 100 m. La esquematización de las lagunas de laminación implementadas en el modelo se presenta en el Cuadro 3.11.

3.3.7 Modelo de la alternativa estructural de diques a 60 m del río Cauca con lagunas de laminación

Para la esquematización de esta alternativa estructural se adoptó como base el modelo de la alternativa de sólo diques a 60 m, al cual luego se le adicionaron las lagunas de laminación, siguiendo el mismo procedimiento descrito previamente, y considerando las diferentes configuraciones de las conexiones entre el río y las lagunas de laminación.

3.3.8 Modelo de la alternativa estructural de diques a 60 m del río Cauca con integración de humedales y embalses de regulación

Para la esquematización de esta alternativa estructural se adoptó como base el modelo de la alternativa de diques a 60 m del río Cauca con integración de humedales y luego se le adicionaron los embalses de regulación en tributarios, siguiendo el mismo procedimiento indicado en el numeral 3.3.5.

3.3.9 Modelo de la alternativa estructural de diques a 60 m del río Cauca con lagunas de laminación y embalses de regulación

Para la esquematización de esta alternativa estructural se adoptó como base el modelo de la alternativa de diques a 60 m del cauce del río Cauca con lagunas de laminación y luego se le adicionaron los embalses de regulación en tributarios, siguiendo el mismo procedimiento indicado en el numeral 3.3.5.

Cuadro 3.11 Identificación de lagunas de laminación esquematizadas en el modelo

Laguna de Laminación	Identificación	Abscisa (km)	Altura a Banca Llena			
			Altura 0 m (msnm)	Altura 0.5 m (msnm)	Altura 1 m (msnm)	Altura 2 m (msnm)
Cauca Seco	LAM120-129I	120+173	954	-	-	956
Dolores	LAM147-155D	150+135	944.259	944.759	945.259	946.259
Guachal	LAM162-168D	163+084	943.7	944.2	944.7	945.7
Yumbo	LAM179-181I	180+159	942.449	942.949	943.449	944.49
Vidal	LAM186-189I	187+125	939.968	940.468	940.968	941.968
Zabaleta	LAM191-194D	191+241	939.425	939.925	940.425	941.425
Videles- Cocal	LAM195-199D	196+238	938.056	938.556	939.056	940.056
	LAM197-202I	197+245	937.953	938.453	938.953	939.953
	LAM200-204D	201+180	937.462	937.962	938.462	939.462
	LAM204-206I	204+233	937.347	937.847	938.347	939.347
Yocambo	LAM213-221I	213+355	935.033	935.533	936.033	937.033
Burrigá	LAM251-258D	253+501	927.809	928.309	928.809	929.809
	LAM260-264D	260+484	926.55	927.05	927.55	928.55
	LAM264-270D	266+527	925.618	926.118	926.618	927.618
	LAM269-272I	269+478	925.049	925.549	926.049	927.049
	LAM271-283D	276+563	923.906	924.406	924.906	925.906
	LAM276-279I	276+563	924.457	924.957	925.457	926.457
Charco de Oro	LAM297-300D	298+807	917.553	918.053	918.553	919.553
San Antonio	LAM308-312D	309+826	916.319	916.819	917.319	918.319
La Cañada	LAM314-321D	317+636	916.399	916.899	917.399	918.399
Guare	LAM339-342I	339+660	912.117	912.617	913.117	914.117
Zarzal	LAM342-348D	345+634	912.121	912.621	913.121	914.121
Ansermanuevo	LAM405-412I	405+900	901.338	901.838	902.338	903.338

3.3.10 Modelo de la alternativa estructural total de diques a 60 m del río Cauca con integración de humedales, lagunas de laminación y embalses de regulación de tributarios

Para la modelación de esta alternativa estructural se adoptó como modelo base el modelo de la alternativa de diques a 60 m del cauce del río Cauca con integración de humedales y lagunas de laminación y posteriormente se le incluyeron los embalses de los ríos Timba, Riofrío y Bugalagrande, tal como se describió anteriormente. La modelación de esta alternativa se efectuó solamente para 5 de las 12 diferentes configuraciones geométricas de la conexión entre el río Cauca y las lagunas de laminación que se plantearon en el modelo de alternativa de diques a 60 m con integración de humedales y lagunas de laminación (ver Cuadro 3.12).

Cuadro 3.12 Diferentes configuraciones simuladas y evaluadas de la conexión entre el río Cauca y las lagunas de laminación en la alternativa estructural total

Configuración geométrica de la conexión río-laguna	Altura sobre el nivel de Banca Llena del cauce (m)	Ancho de la conexión (m)
Propuesta 1	1	100
Propuesta 2	1	60
Propuesta 3	1	30
Propuesta 4	0.5	60
Propuesta 5	0	30

4 DETERMINACIÓN DE NIVELES DE AGUA EN EL RÍO CAUCA A SU PASO POR LA CIUDAD DE CALI MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA

4.1 CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS PARA LA MODELACIÓN MATEMÁTICA, CON BASE EN ESTACIÓN JUANCHITO (TR: 500 AÑOS)

En el estudio “Análisis hidrológico de las crecientes históricas en el río Cauca”, realizado por el grupo IREHISA de la Universidad del Valle en desarrollo de este proyecto, se determinó, por medio de un análisis de frecuencia, el caudal corresponde a un periodo de retorno de 500 años. El análisis efectuado permitió establecer que la función de distribución Log-Pearson III es la de mejor ajuste para la serie de caudales máximos anuales en la estación hidrométrica de Juanchito, por cuanto presenta el menor EEA y el CCG más cercano a 1 (ver Cuadro 4.1)

Cuadro 4.1. Caudales Máximos estimados para un periodo de retorno de 500 años en la estación Juanchito de acuerdo con las distribuciones de Gumbel, LogNormal y Log-Pearson III.

PRUEBA DE AJUSTE	DISTRIBUCIÓN		
	GUMBEL	LOGNORMAL	LOGPEARSON III
CCG	0.98	0.98	0.99
EEA	52.30	43.80	31.10
Caudal para Tr =500 Años (m ³ /s)	1643	1780	1355

Fuente: CVC – IREHISA (2013)

A partir de la curva de calibración Nivel-Caudal de la estación hidrométrica de Juanchito (ver Figura 4.1) se determinó el nivel de agua en el río Cauca correspondiente al caudal estimado para el periodo de retorno de 500 años (1355 m³/s), el cual es igual a 951.77 msnm.

Después de establecer el caudal para un período de retorno de 500 años en la estación Juanchito se procedió a estimar los niveles de agua en el río Cauca a su paso por la ciudad de Cali considerando diques a 60 m de la banca en la margen derecha, en el tramo comprendido entre la descarga del Canal Interceptor-Sur y la confluencia del río Cali, utilizando para ello el modelo matemático hidrodinámico implementado en estudios anteriores en el Proyecto de Modelación del Río Cauca PMC (CVC – Universidad del Valle, 2001, 2005, 2007, 2009) y la batimetría realizada en los años 2000 y 2005. En este modelo se esquematizó el río Cauca entre las estaciones hidrométricas La Balsa (K27+385) y La Virginia (K444+928) con 416 secciones transversales separadas entre sí 1 km, en promedio. La condición de frontera definida en el modelo aguas arriba fue en la estación hidrométrica La Balsa y como fronteras internas se utilizaron 12 ríos tributarios como brazos laterales y 26 ríos tributarios como fuentes puntuales.

En el Cuadro 4.2 se presentan los resultados de los niveles de agua y los caudales obtenidos de la modelación matemática en el tramo comprendido entre las descargas del Canal Interceptor- Sur (K129+998) y el río Cali (K148+475).

Cuadro 4.2. Resultados de la Modelación Matemática, Tramo Canal Interceptor –Río Cali para un Tr de 500 años

ABSCISA BATIMETRIA 2000 y 2005 (Km)	NIVEL TR 500 AÑOS (msnm)	CAUDAL TR 500 AÑOS (m ³ /s)
128.20	954.55	1343.94
129.17	954.45	1358.93
129.67	954.38	1358.93
130.18	954.28	1358.93
131.18	954.14	1358.93
132.16	953.96	1358.93
133.14	953.70	1358.92
133.64	953.55	1358.92
134.14	953.43	1358.92
134.64	953.36	1358.92
135.15	953.30	1358.92
135.67	953.21	1358.91
136.20	953.05	1358.91
137.17	952.64	1358.91
137.67	952.47	1358.91
138.17	952.34	1358.90
138.68	952.26	1358.90
139.18	952.20	1358.90
140.13	952.01	1358.89
140.64	951.91	1358.89
141.15	951.78	1358.89
142.15	951.54	1359.88
143.13	951.11	1359.88
144.11	950.81	1359.88
145.10	950.43	1359.87
146.10	950.00	1360.97
147.10	949.80	1352.56
147.62	949.71	1352.56
148.13	949.61	1352.55
149.12	949.37	1352.55
149.63	949.24	1352.54

Adicionalmente se realizó una modelación correspondiente al mismo periodo de retorno y con las mismas condiciones anteriormente mencionadas, pero con el caudal máximo del intervalo de confianza del 90%, $Q = 1704 \text{ m}^3/\text{s}$ (ver Cuadro 4.3).

En la Figura 4.2 se presentan los niveles de agua calculados en el sector indicado para un Tr de 500 años, el nivel de agua para un intervalo de confianza del 90%, los niveles de la corona del dique o Jarillón Aguablanca según Haskoning – Corporación OSSO (ver Cuadro 4.4) y los niveles del thalweg (ver Cuadro 4.5).

**Cuadro 4.3. Resultados Modelación Matemática, Tramo Canal Interceptor-Río Cali
Q= 1704 m³/s en Juanchito Intervalo de confianza del 90%**

ABSCISA BATIMETRIA 2000 y 2005 (Km)	NIVEL TR 500 AÑOS (msnm)	CAUDAL TR 500 AÑOS (m ³ /s)
128.20	955.56	1688.91
129.17	955.46	1703.91
129.67	955.39	1703.91
130.18	955.30	1703.91
131.18	955.16	1703.91
132.16	954.98	1703.91
133.14	954.72	1703.91
133.64	954.58	1703.90
134.14	954.46	1703.90
134.64	954.40	1703.90
135.15	954.35	1703.90
135.67	954.27	1703.90
136.20	954.11	1703.90
137.17	953.71	1703.90
137.67	953.54	1703.90
138.17	953.42	1703.90
138.68	953.34	1703.89
139.18	953.29	1703.89
140.13	953.11	1703.89
140.64	952.99	1703.89
141.15	952.85	1703.89
142.15	952.58	1704.89
143.13	952.14	1704.89
144.11	951.83	1704.88
145.10	951.44	1704.88
146.10	951.02	1705.98
147.10	950.80	1714.38
147.62	950.70	1714.38
148.13	950.60	1714.38
149.12	950.34	1714.37
149.63	950.21	1714.37

En la Figura 4.2 igualmente se presentan las abscisas correspondientes a las batimetrías de los años 2000-2005 y 2012. Adicionalmente, en la Figura 4.3 se incluye el perfil hidráulico estimado por Haskoning – Corporación OSSO en el año 2012 y el nivel de la banca correspondiente a la margen izquierda (ver Cuadro 4.5 y 4.6).

En la Figura 4.4 se presenta el nivel requerido del dique para $Tr = 500$ años - $Q = 1355 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando un Borde Libre = 1 m. Igualmente se presenta el nivel de agua calculado para $Q = 1704 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde al límite superior del intervalo de confianza del 90 %. Como se puede apreciar en la figura, este nivel es bastante similar al nivel requerido del dique para $Tr = 500$ años - $Q = 1355 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual indica que el borde libre de 1 m permite contener justamente el caudal máximo del intervalo de confianza del 90 % ($Q = 1704 \text{ m}^3/\text{s}$).

En la Figura 4.5 se presenta el realce requerido para el dique correspondiente a un $Tr = 500$ años con un $Q = 1355 \text{ m}^3/\text{s}$ con borde libre de 1 m y para un $Q = 1704 \text{ m}^3/\text{s}$ sin borde libre. En este gráfico se observa que el realce del dique en promedio es de 1 m.

Cuadro 4.4. Nivel del Dique Tr 500 años – Haskoning y Corporación OSSO

NIVEL (msnm)	ABSCISA BATIMETRÍA 2000 Y 2005 (Km)
954.28	129.47
954.72	129.72
954.23	129.97
954.28	130.22
953.70	130.47
954.70	130.97
954.40	131.22
954.40	131.47
954.60	131.72
954.06	131.97
954.23	132.22
953.91	132.47
954.05	132.72
953.99	132.97
953.71	133.22
954.00	133.72
953.80	133.92
953.15	134.22
953.31	134.47
953.15	134.72
953.15	134.97
953.60	135.22
952.81	135.47
952.06	135.72
952.50	135.97
952.55	136.22
953.50	136.47
952.76	136.72
952.60	136.97
952.24	137.22
952.50	137.47
952.20	137.72
951.60	137.97
955.00	138.22
952.10	138.47
952.20	138.72
952.14	138.97

NIVEL (msnm)	ABSCISA BATIMETRÍA 2000 Y 2005 (Km)
952.06	139.22
952.00	139.47
951.80	139.67
952.50	139.92
953.00	140.17
953.10	140.42
952.00	140.67
952.25	140.92
951.75	141.15
951.70	141.17
951.41	141.42
951.40	141.67
951.20	141.92
951.29	142.17
951.67	142.42
950.60	142.67
951.00	142.92
951.06	143.17
950.90	143.42
950.90	143.67
950.70	143.92
950.50	144.17
950.80	144.42
950.60	144.67
950.60	144.92
950.00	145.17
950.20	145.42
950.50	145.67
950.25	145.92
952.00	146.17
954.40	146.47
950.70	146.72
951.57	146.97
951.45	147.22
951.40	147.47
951.10	147.72
951.10	148.22
951.10	148.22

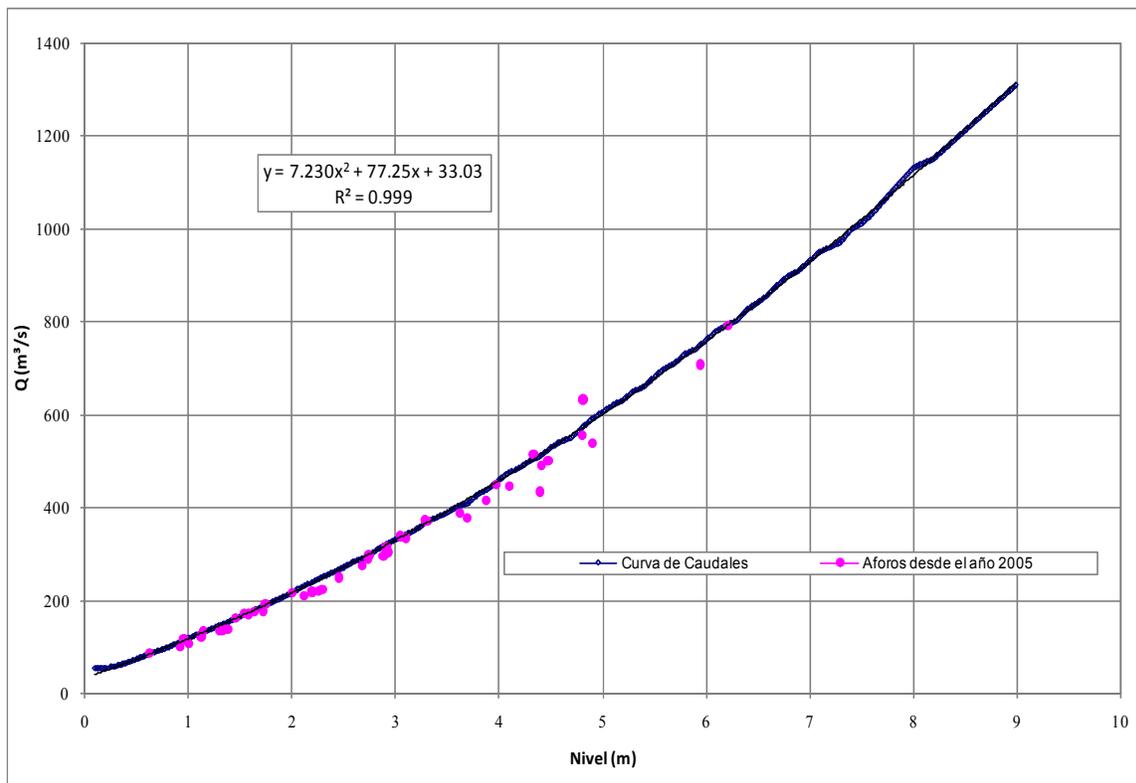
Cuadro 4.5 Niveles del Thalweg y de la Banca Llena de la margen izquierda del río Cauca, tramo Canal Interceptor –Río Cali, obtenido de la batimetría realizada por la CVC en el año 2012

ABSCISADO (Km)		COTA THALWEG (msnm)	NIVEL BANCA IZQUIERDA (msnm)
BATIMETRIA 2000 y 2005	BATIMETRIA 2012		
129.17	128.94	941.58	954.06
129.52	129.30	942.92	953.35
129.72	129.49	939.01	953.30
CANAL INTERCEPTOR SUR 130.00	129.77	937.25	954.32
130.43	130.20	937.58	954.31
130.97	130.74	935.95	954.18
131.51	131.28	944.28	954.58
131.92	131.69	939.18	950.81
132.83	132.60	943.05	951.21
133.17	132.95	937.56	952.80
133.45	133.22	941.60	951.83
133.88	133.65	935.28	952.56
134.27	134.04	938.50	953.54
134.69	134.46	939.45	951.43
135.29	135.06	941.30	953.48
135.81	135.58	939.84	955.40
136.36	136.14	935.27	952.44
136.95	136.72	940.90	954.00
137.42	137.19	939.20	953.19
137.94	137.71	937.90	951.43
138.34	138.11	939.96	953.00
138.68	138.45	939.05	953.11
139.16	138.93	938.45	952.92
139.62	139.39	939.57	952.18
139.89	139.66	936.24	954.04
140.33	140.10	934.81	955.23
140.82	140.59	937.99	947.80
141.15	140.92	940.28	951.60
ESTACIÓN JUANCHITO 141.51	141.29	935.36	949.46
142.40	142.17	941.32	950.66
143.05	142.82	933.96	951.87
143.32	143.09	935.52	944.87

Cuadro 4.5. (Continuación) Niveles del Thalweg y de la Banca Llena de la margen izquierda del río Cauca, tramo Canal Interceptor –Río Cali, obtenido de la batimetría realizada por la CVC en el año 2012

ABSCISADO (Km)		COTA THALWEG (msnm)	NIVEL BANCA IZQUIERDA (msnm)
BATIMETRIA 2000 y 2005	BATIMETRIA 2012		
143.98	143.75	938.66	949.88
144.37	144.14	940.09	949.29
144.79	144.56	933.70	944.79
145.14	144.91	938.71	949.81
145.47	145.24	939.01	948.80
145.87	145.64	939.65	950.88
146.32	146.09	937.62	951.66
146.83	146.60	938.85	948.41
147.49	147.26	938.89	948.99
CONFLUENCIA RÍO CALI 148.06	147.83	937.40	949.04
148.51	148.28	940.27	949.29

Figura 4.1. Curva de Calibración Nivel-Caudal en la Estación Juanchito



Cuadro 4.6. Nivel de agua Tr 500 años – Haskoning y Corporación OSSO

NIVEL (msnm)	ABSCISA BATIMETRÍA 2000 Y 2005 (Km)
953.72	129.62
953.70	129.89
953.67	130.19
953.64	130.49
953.61	130.79
953.58	131.09
953.53	131.39
953.47	131.69
953.40	131.99
953.34	132.29
953.30	132.59
953.25	132.89
953.20	133.19
953.14	133.49
953.08	133.79
953.02	134.09
952.92	134.39
952.83	134.69
952.73	134.99
952.66	135.29
952.55	135.59
952.47	135.89
952.40	136.19
952.36	136.49
952.32	136.79
952.28	137.09
952.20	137.39
952.11	137.69
951.99	137.99
951.89	138.29
951.80	138.59
951.71	138.89
951.64	139.19
951.58	139.49
951.54	139.79
951.51	140.09
951.50	140.39
951.49	140.69

NIVEL (msnm)	ABSCISA BATIMETRÍA 2000 Y 2005 (Km)
951.46	140.99
951.44	141.15
951.42	141.29
951.36	141.59
951.30	141.89
951.24	142.19
951.20	142.49
951.11	142.79
951.01	143.09
950.89	143.39
950.78	143.69
950.66	143.99
950.54	144.29
950.42	144.59
950.30	144.89
950.20	145.19
950.12	145.49
950.03	145.79
949.99	146.09
949.80	146.39
949.66	146.69
949.53	146.99
949.41	147.29
949.29	147.59
949.17	147.89
949.08	148.19

4.2 RESULTADOS

La modelación matemática realizada con TR 500 años para una distribución Log Pearson III y la realizada con un intervalo de confianza, arrojó los resultados presentados en las Figuras 4.2 a 4.5. De lo cual se puede concluir lo siguiente:

- El nivel de agua generado con la Función Log Pearson III fue menor que el nivel de agua generado por la modelación con nivel de confianza 90%, por casi 1 m de diferencia. Aunque ambas modelaciones arrojaron niveles por encima de los diques en casi todo el tramo desde el Canal Interceptor – Río Cali, la modelación con intervalo de confianza 90%, arrojó niveles de agua mucho más altos que los niveles del dique, por lo tanto se requiere evaluar los niveles de los diques en este tramo, para garantizar que no hayan incrementos de nivel a este periodo de retorno.
- En la Figura 4.3 se muestra el nivel de agua propuesto por Haskoning y Corporación OSSO para TR 500 años, además de los niveles de agua modelados y presentados anteriormente. Lo que esto muestra, es que los niveles propuestos por Haskoning y Corporación OSSO en la mayor parte del tramo Canal Interceptor – Río Cali no superan el nivel de los diques, diferente a lo que sucede con los modelos generados y explicados anteriormente. Por lo anterior, según Haskoning y Corporación OSSO no es necesario hacer un incremento al nivel del dique en la mayor parte del tramo, mientras con la modelación con niveles TR 500 con intervalo de confianza 90% y Log Pearson III, si es necesario evaluar incrementos de más de 1 m a los diques.
- En la Figura 4.4 se puede observar como al incrementar 1 m de borde libre a la modelación con función Log Pearson III, los niveles de agua logran ser similares a los presentados con la modelación con intervalo de confianza 90%, con lo que de esta forma se podría evaluar el nivel requerido del dique para un periodo de retorno de 500 años.
- En la Figura 4.5 se observan que los niveles requeridos del dique, tanto para la modelación con función Log Pearson III ($Q=1355 \text{ m}^3/\text{s}$) con borde libre de 1m, como para la modelación con un intervalo de confianza 90% sin borde libre ($Q=1704 \text{ m}^3/\text{s}$) son similares a lo largo del tramo evaluado, por lo que la viabilidad de incrementar los niveles de los diques 1m, sería la opción más favorable para estas modelaciones con un periodo de retorno de 500 años.

Figura 4.2. Niveles de agua en el río Cauca, tramo Canal Interceptor - Río Cali para un evento con un período de retorno de 500 años Obtenidos mediante la modelación matemática (modelo MIKE 11)

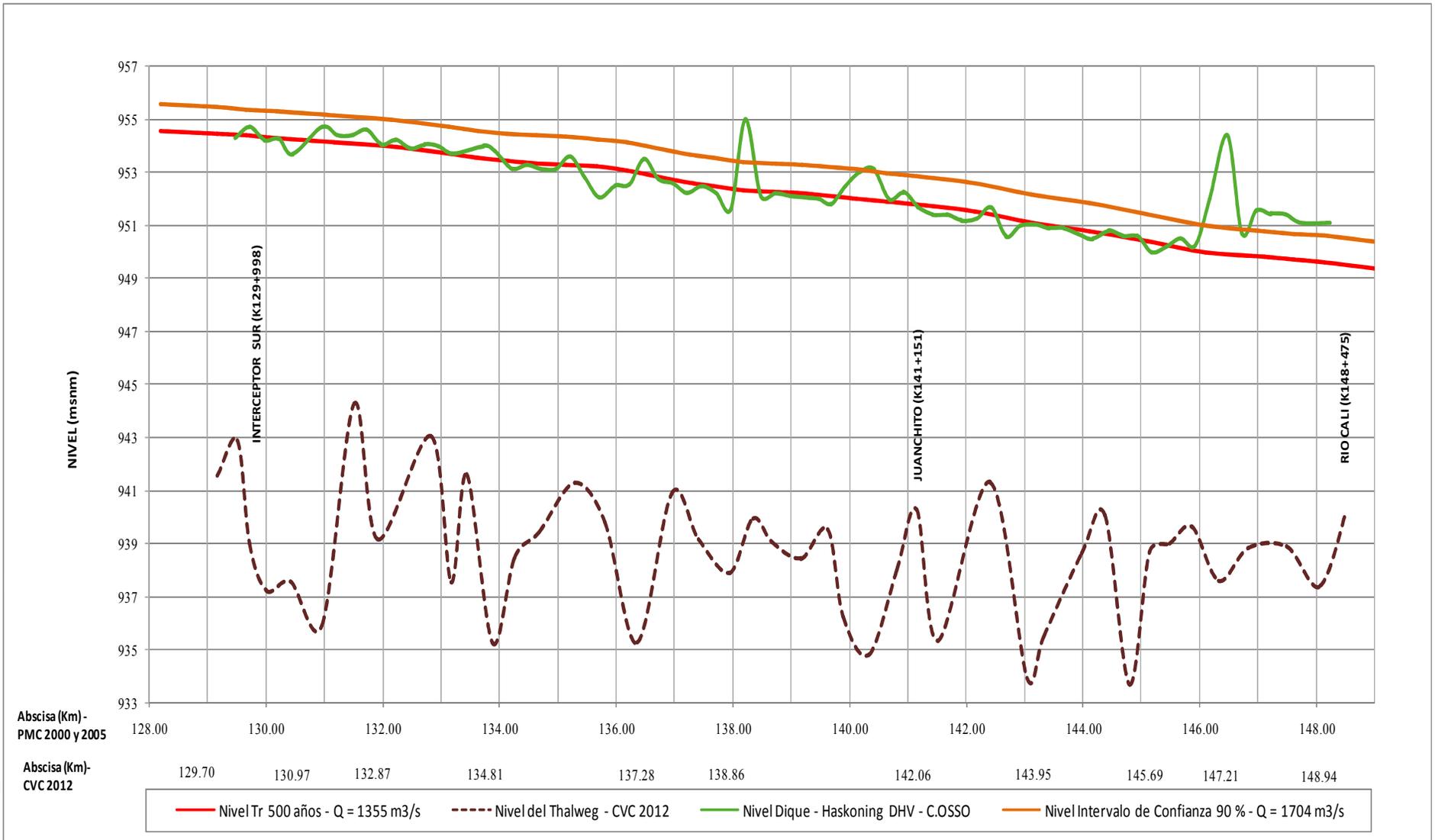


Figura 4.3. Niveles de agua en el río Cauca, tramo Canal Interceptor - Río Cali para un evento con un período de retorno de 500 años Obtenidos mediante la modelación matemática (modelo MIKE 11)

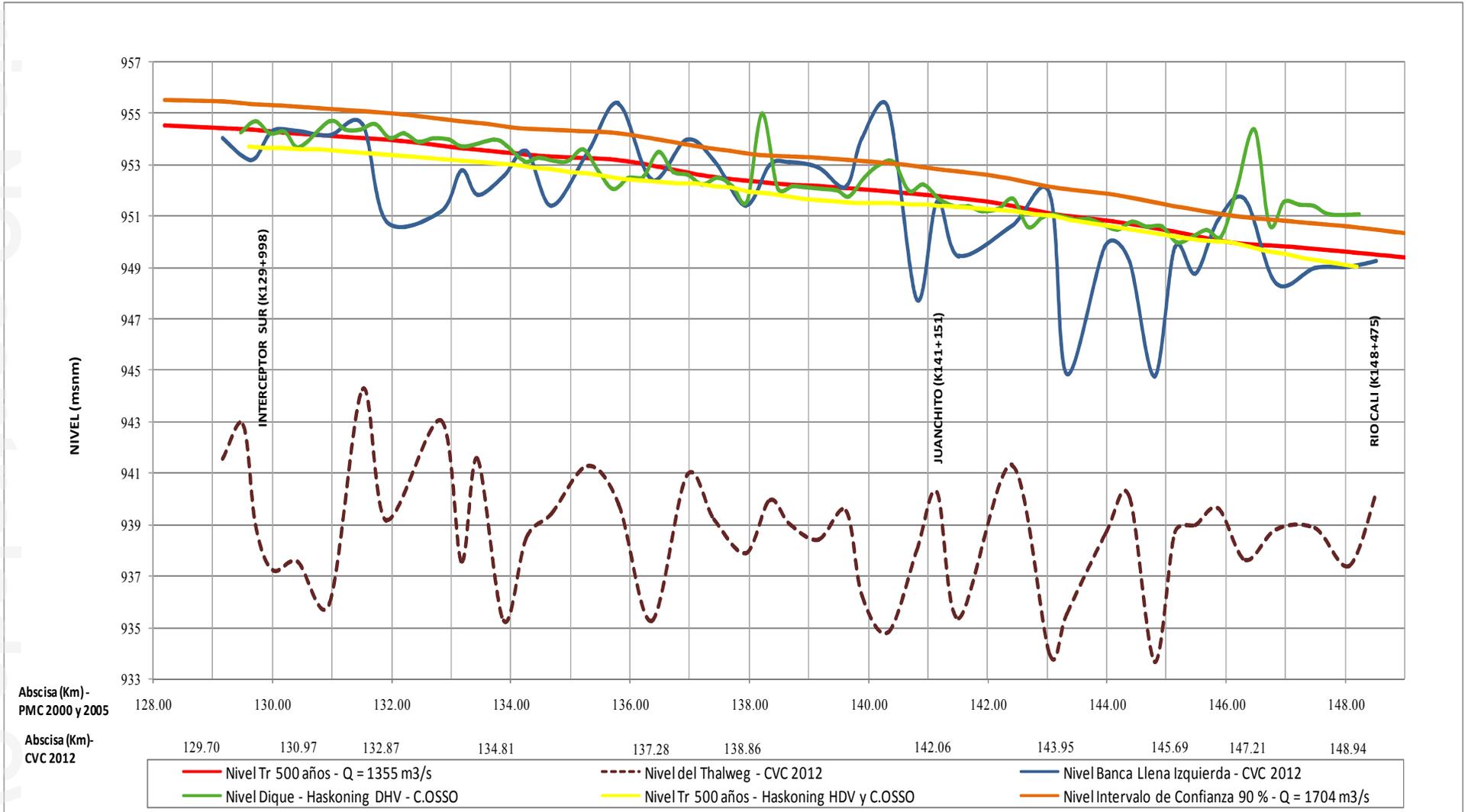
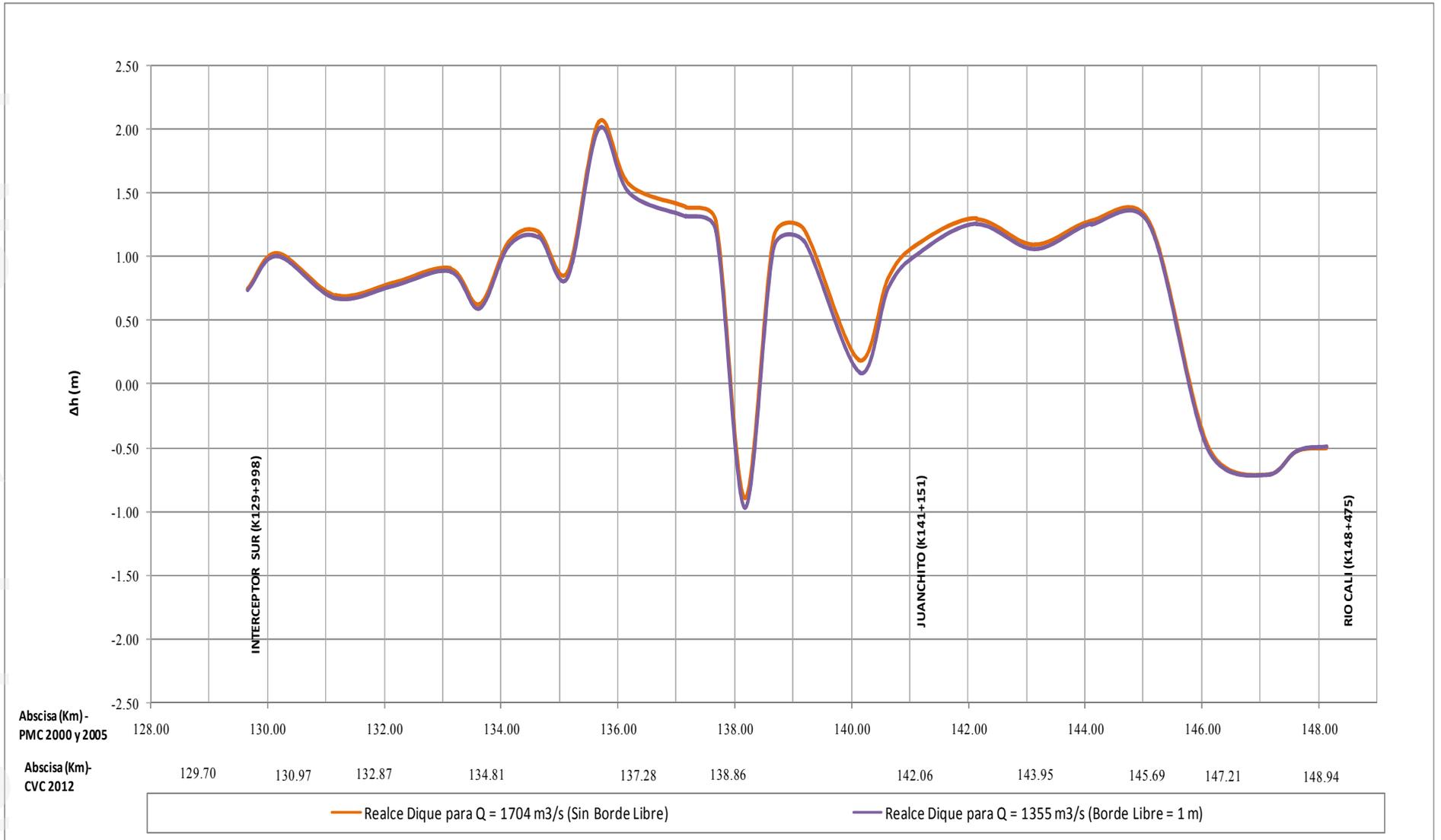


Figura 4.4 Nivel Requerido Dique para $Tr = 500$ años – $Q = 1355$ m³/s, Borde Libre = 1 m



Copia NO controlada CVC

Figura 4.5. Realce Dique de protección de la ciudad de Cali para la creciente de $T_r = 500$ años



5 DETERMINACIÓN DE LA RONDA HÍDRICA DEL RIO CAUCA EN SU VALLE ALTO

5.1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años la Universidad del Valle y la CVC han venido trabajando en el desarrollo de medidas no estructurales para el manejo de inundaciones en el Valle del Cauca. Entre estas medidas se tiene la generación de mapas de inundación y de amenaza de inundación. Para ello se ha construido e implementado un modelo matemático hidrodinámico del río Cauca y sus tributarios en su valle alto. El modelo matemático implementado ha permitido calcular los niveles de agua a lo largo del río y estimar el comportamiento hidráulico que presentaría el río considerando diferentes alternativas de intervención y diversos escenarios, entre los que se tienen la construcción de diques faltantes, relocalización de diques (cuando los existentes se hallan a menos de 60m del cauce) y lagunas de laminación de la creciente (Bocanegra, 2013).

En este capítulo se construyó un modelo matemático del río Cauca y su llanura aluvial, considerando que no existieren diques marginales de protección a lo largo del mismo y sus ríos tributarios, con el fin de determinar la extensión de la ronda hídrica, es decir, determinar las áreas de la planicie aluvial que serían inundadas durante una creciente del río Cauca con un período de retorno de 15 años.

5.2 RONDA HÍDRICA

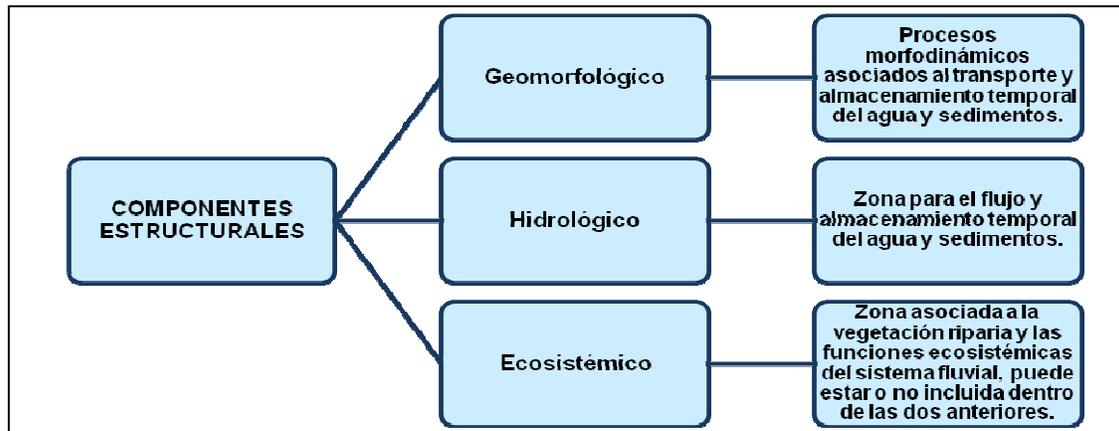
La “Ronda Hídrica” es fiel a los lineamientos planteados en la “Guía para el acotamiento de las rondas hídricas de los cuerpos de agua de acuerdo a lo establecido en el artículo 206 de la ley 1450 del 2011 – Plan Nacional de Desarrollo” de diciembre de 2012.

La ronda hídrica es el espacio necesario requerido para que el sistema fluvial cumpla con sus funciones hidrológicas, geomorfológicas y ecosistémicas propias del mismo, entendiéndose como las zonas o franjas de terrenos aledaños a los cuerpos de agua. Por tal razón su delimitación o acotamiento parte del entendimiento de la dinámica natural de la corriente o cuerpo de agua a la cual se va a delimitar la ronda hídrica (CVC, 2014).

5.2.1 Componentes de la ronda hídrica

El cauce y su ronda hídrica constituyen un sistema con un funcionamiento dinámico, que conforma una zona que no es estática en el tiempo ni en el espacio puesto que varían según el comportamiento de los factores que las componen, presentando una dinámica natural del sistema fluvial, y continúan realizando las funciones de flujo y almacenamiento temporal de agua y sedimentos, así como sus funciones ecosistémicas. Los factores que determinan las componentes de la ronda hídrica se ilustran en la Figura 5.1 (CVC, 2014).

Figura 5.1 Componentes de la ronda hídrica



Fuente: Guía para el acotamiento de las rondas hídricas (U. Nacional, 2012)

5.2.1.1 Componente geomorfológico

Está asociado a la zona o faja necesaria para que se presenten los procesos morfodinámicos que permiten la función de transporte y almacenamiento temporal de agua y sedimentos. Estas funciones presentan una gran variabilidad temporal y a distintas escalas de tiempo, afectando el cauce, la pendiente y los patrones de alineamiento del río.

La pérdida de continuidad, anchura, estructura, naturalidad y conectividad de las riberas producen también efectos negativos sobre la geomorfología del Río Cauca, impidiendo que ésta cumpla con su función de transporte y almacenamiento temporal de agua y sedimentos. (CVC, 2014)

5.2.1.2 Componente hidrológico

Es la zona requerida para el transporte y almacenamiento temporal del agua y los sedimentos que produce la cuenca para las distintas escalas de tiempo. Cualquier uso u ocupación de esta zona debe garantizar que no se afecte las capacidades de transporte y almacenamiento de agua y sedimentos (CVC, 2014).

Esta zona también permite mitigar los eventos extremos. En esta franja de terreno, dada que la amenaza por inundaciones es alta, se restringe el uso del suelo.

La ronda hidrológica, se define a partir de las cotas de inundación para diferentes periodos de retorno, y se reserva para que la corriente transcurra sin ocasionar problemas tanto en condiciones normales como en crecientes. Dentro de esta faja, se incluye el cauce principal y el cauce mayor. El primero corresponde al nivel del agua del caudal promedio del periodo de retorno de 2,33 años y el segundo a los niveles de aguas máximas, que en Colombia generalmente están asociados a la presencia de la fase fría del ENSO conocido como fenómeno de la niña y sus efectos son importantes sobre el clima y la hidrología sobre casi todo el territorio nacional (Universidad Nacional, 2012).

El fenómeno ENSO es un fenómeno complejo que no es periódico ni alternado en sus fases fría y cálida. Para la fase fría en los registros históricos se ha documentado una cuasi periodicidad de 7 años. El nivel medio de las aguas máximas debe corresponder al nivel de los cauces promedio durante el fenómeno de la niña. Asumiendo que los máximos tienen distribución de probabilidad asimétrica y que el medio ocurre con una frecuencia cercana a dos veces la periodicidad o la cuasi periodicidad (2.33 años cuando se considera la distribución de Gumbel), el nivel medio de aguas máximas se debe asociar a un valor cercano al doble de la cuasi periodicidad, que en este caso resulta en 15 años (Universidad Nacional, 2012).

En síntesis, el componente hidrológico de la ronda hídrica “está determinado por el nivel medio de aguas máximas del caudal correspondiente a un periodo de retorno de 15 años, que se reserva para que la corriente transcurra sin ocasionar problemas tanto en condiciones normales como en crecientes” (Universidad Nacional, 2012).

5.2.1.3 Componente ecosistémica

Está compuesta por la vegetación ribereña y las funciones ecosistémicas del cuerpo de agua, conformado por la vegetación natural o plantas que se extienden a lo largo del cauce (AMVA et al, 2007), constituyéndose en un corredor para el tránsito y dispersión de numerosas especies que migran o se desplazan en su interior, donde se mantienen los requerimientos de su hábitat.

Además de la función de conectividad, esta zona cumple otras funciones como son: retener contaminantes, controlar la erosión favorece la conectividad del paisaje, constituye refugio y zonas de tránsito para diversas especies (AMVA et al, 2007).

5.2.2 Delimitación de la ronda hídrica

La ronda hídrica se determina a partir de la envolvente que se genera por la superposición de los tres polígonos definidos por los componentes hidrológico, geomorfológico y ecosistémico (CVC, 2014). Dependiendo del tipo de cuerpo de agua, el tipo de corriente y la intensidad de uso urbano, predomina uno de los componentes. Para corrientes de montaña y piedemonte, el componente geomorfológico determina la ronda hídrica, mientras que en la llanura aluvial y zonas urbanas donde la corriente de agua ha perdido su naturalidad, es definida por el componente hidrológico. Debido a esto en este estudio se consideró solamente el componente hidrológico para establecer la extensión de las áreas de la ronda hídrica.

5.3 CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS PARA LA MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DE LA RONDA HÍDRICA

En el Capítulo 3 de este informe se presenta la metodología adoptada e implementada para la modelación hidrodinámica realizada con el modelo MIKE 11. Por lo tanto para este caso, fue tomado como consideración principal el componente hidrológico. Adicionalmente, para

la modelación de la ronda hídrica se tomaron en consideración aspectos adicionales que se describen a continuación.

5.3.1 Modelación Hidráulica

Tal como lo establece la *Guía para el acotamiento de las rondas hídricas de los cuerpos de agua de acuerdo a lo establecido en el Artículo 206 de la Ley 1450 de 2011- Plan Nacional de Desarrollo* la ronda hídrica se determina por el nivel medio de aguas máximas del caudal correspondiente a un periodo de retorno de 15 años, que se reserva para que la corriente transcurra sin ocasionar problemas tanto en condiciones normales como en crecientes. Por tanto se generó la modelación para un periodo de retorno de 15 años, delimitando la ronda hídrica.

5.3.2 Consideración del factor de resistencia y coeficiente de rugosidad

En el modelo matemático Mike 11 la variación de la resistencia al flujo en la llanura de inundación de una sección transversal del río y su planicie adyacente, puede definirse mediante un coeficiente denominado Factor de resistencia (FR). Este factor afecta el coeficiente de rugosidad definido por el cauce principal en el archivo de parámetros hidrodinámicos.

El factor de resistencia se introduce al modelo en el archivo de las secciones transversales, definiendo un valor en cada abscisa (a lo ancho de la sección transversal). El factor o coeficiente de rugosidad para cada abscisa resulta de multiplicar el coeficiente de rugosidad por el factor de resistencia.

Normalmente los coeficientes de rugosidad se estiman inicialmente teniendo en cuenta los diferentes factores que lo determinan, tales como, los tamaños de los sedimentos del lecho, las formas de fondo del cauce, la vegetación, los obstáculos y obstrucciones, entre otros. Posteriormente, durante el proceso de calibración del modelo matemático, estos coeficientes pueden ajustarse gradualmente (dentro de rangos físicamente aceptables para el cauce en consideración) hasta alcanzar valores de los niveles de agua y caudales muy próximos a los valores registrados en campo (dentro del margen de error admisible preestablecido).

Para establecer los factores de rugosidad del cauce principal del río Cauca y sus tributarios se siguió dicho procedimiento (Ver capítulo 3), obteniéndose los coeficientes de rugosidad de Manning que se presentan en el Cuadro 5.1, para los diferentes tramos del río Cauca (comprendidos entre las diferentes estaciones hidrométricas). Sin embargo, para definir la ronda hídrica en el modelo construido no se disponen de registros de campo que permitan realizar el ajuste de los coeficientes de rugosidad de la llanura de inundación, debido a que la ronda hídrica no considera los diques marginales de protección de los cauces. Por esta razón, para la planicie aluvial se estimó un factor de rugosidad de Manning igual a 0.2, $s/m^{1/3}$, teniendo en cuenta la diversidad de obstáculos, vegetación e intervenciones existentes en ella. A partir de este coeficiente de rugosidad se calcularon los factores de

resistencia para los diferentes tramos o sectores del río Cauca, los cuales se presentan en el Cuadro 5.1.

Cuadro 5.1 Rugosidad, niveles de interfase y factores de resistencia del río Cauca definidas para el modelo hidrodinámico de la ronda hídrica

Estación	Factor de Rugosidad de Manning (s/ m ^{1/3})			Nivel de interfase (msnm)		Nivel de banca llena (msnm)	Factor de Resistencia	
	Zona1	Zona2	Zona3	Zona1-2	Zona 2-3		Cauce	Llanura
La Balsa	0.05	0.034	0.026	982.5	985.0	985.3	1.0	7.7
La Bolsa	0.05	0.034	0.026	958.0	959.5	960.0	1.0	7.7
Hormiguero	0.05	0.043	0.04	950.0	951.8	952.5	1.0	5
Juanchito	0.027	0.027	0.034	944.0	946.0	946.7	1.0	5.9
Mediacanoa	0.029	0.029	0.029	930.5	932.0	932.2	1.0	6.7
Guayabal	0.025	0.025	0.025	908.0	910.0	911.1	1.0	7.7
La Victoria	0.028	0.028	0.028	903.	905.0	907.85	1.0	7.14
Anacaro	0.025	0.025	0.025	897.0	899.5	902.84	1.0	7.7
La Virginia	0.028	0.028	0.028	892.0	897.0		1.0	7.1

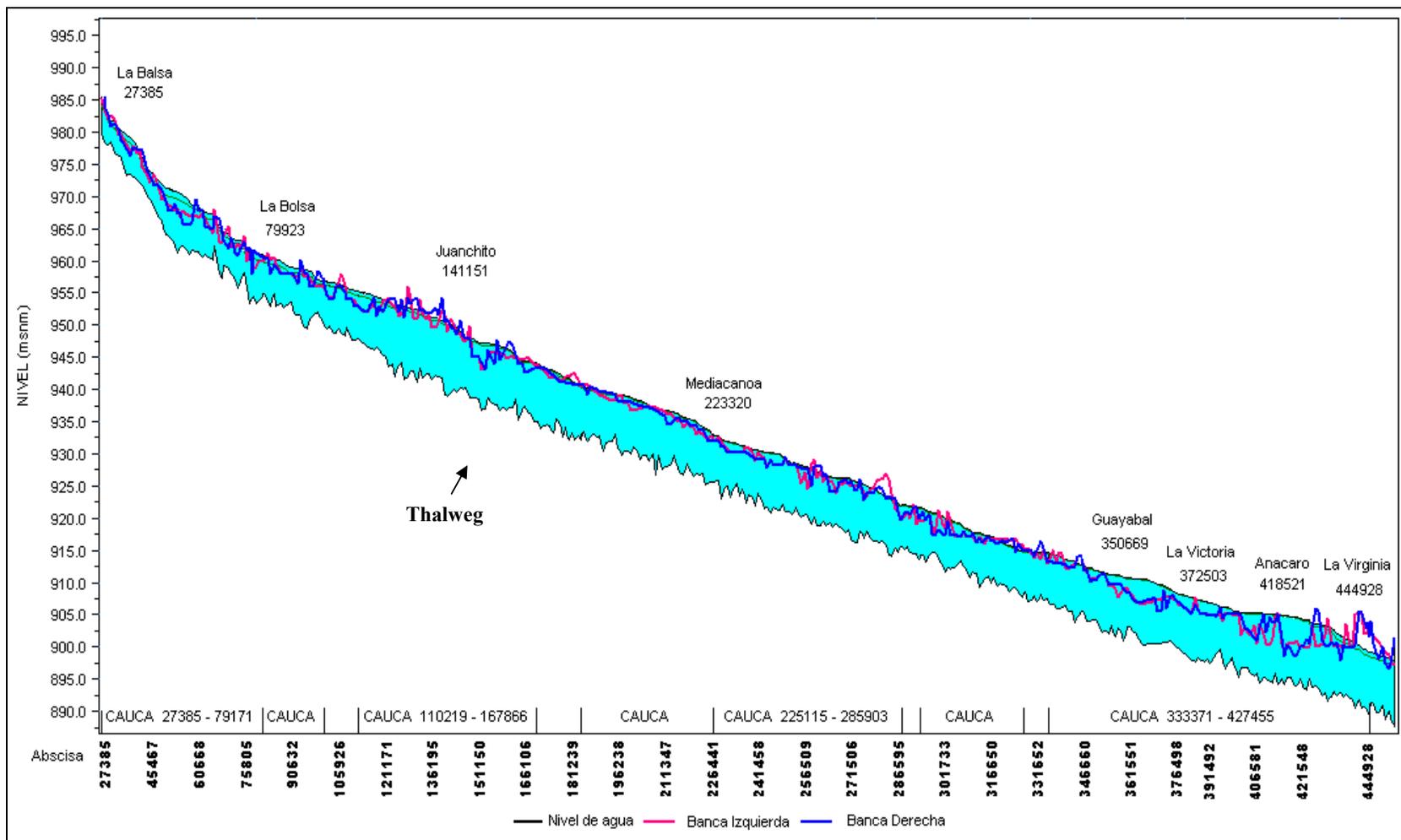
5.4 RESULTADOS

La ronda hídrica fue elaborada con el propósito de conocer la hidrodinámica del río Cauca, sin tomar en cuenta las medidas estructurales existentes y propuestas para el control del aumento de nivel y de las zonas de inundación. La simulación ha sido desarrollada sin tener en cuenta las medidas estructurales y por tanto, los resultados en general han arrojado inundaciones de gran calibre. Los resultados obtenidos mediante la modelación matemática se presentan en las Figuras 5.2 a 5.6. El análisis de la información consignada en estas gráficas, permite concluir lo siguiente:

- En la modelación de ronda hídrica con periodo de retorno de 15 años, se determinó que en gran parte del río Cauca, la creciente simulada sobrepasa el nivel de banca llena. Lo anterior se debe a que no se cuenta con medidas estructurales de protección en las riberas del río; es necesario señalar que las crecientes de los ríos y las inundaciones originadas sobre la planicie aluvial son parte de la dinámica natural de los ríos y, además, son necesarias para el buen estado ecológico de los mismos. Durante los desbordamientos e inundación de la planicie se produce un aporte significativo de sedimentos y nutrientes, contribuyendo a la fertilización de las tierras de cultivo.
- En el tramo de la estación La Victoria y la estación Anacaro se observan los mayores niveles de desbordamiento, lo que podría deberse a las condiciones topográficas del lugar. En La Victoria el nivel de la creciente simulada, supera el nivel de banca llena por aproximadamente 80 cm de diferencia.
- Sería ideal y óptimo recuperar las “rondas de los ríos” o las zonas ribereñas a lado y lado de las márgenes del río Cauca, de tal forma que exista una zona adecuada para la amortiguación de las crecidas y así propiciar que los niveles en los mismos alcancen niveles tan altos, que generen desbordamientos aguas abajo.

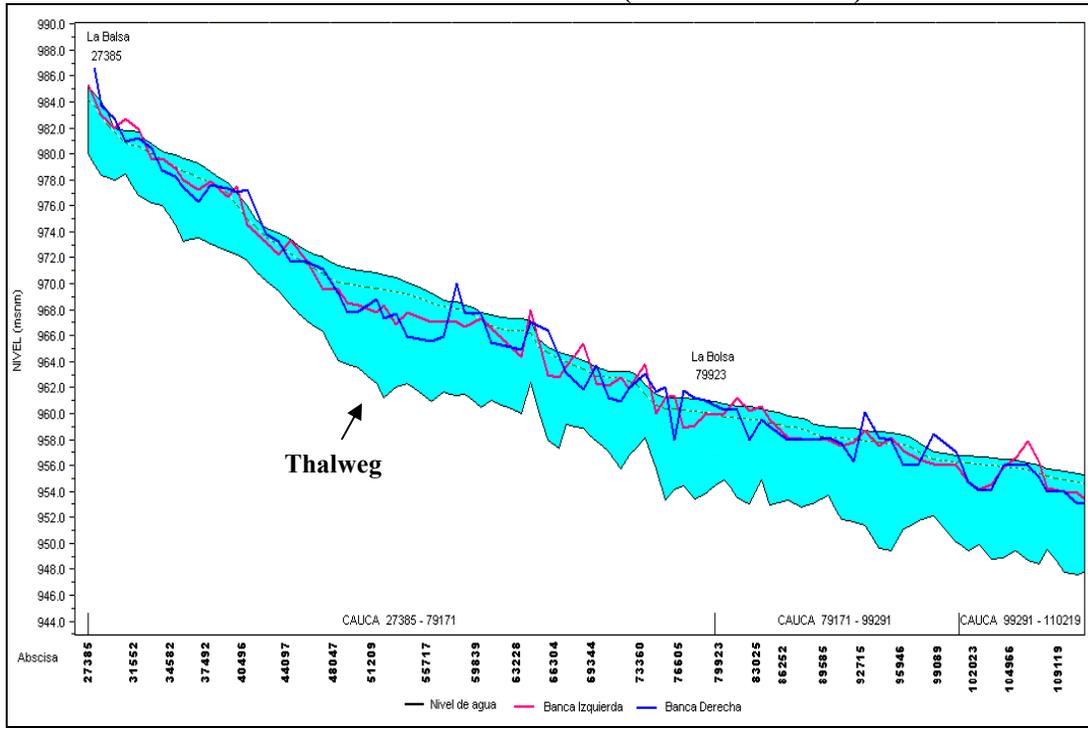
- En términos generales se ha encontrado que las medidas estructurales adoptadas a lo largo del Valle Alto del río Cauca, han permitido mitigar el impacto de las crecientes, pues al no existir, la llanura de inundación se incrementaría y por tanto crecientes como la del 2011 hubiese generado mayores impactos a los sucedidos.

**Figura 5.2. Niveles de agua en el Rio Cauca para la alternativa de ronda hídrica (TR=15 años)
Tramo: La Balsa – La Virginia (k27385 – k444928)**

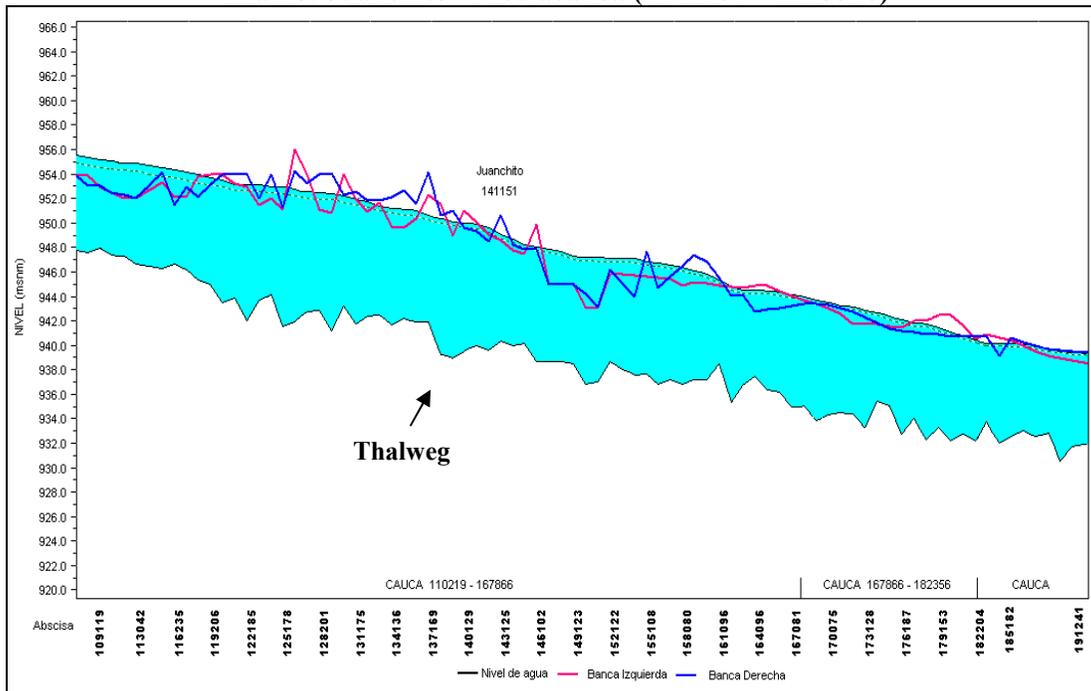


Copia NO controlada CVC

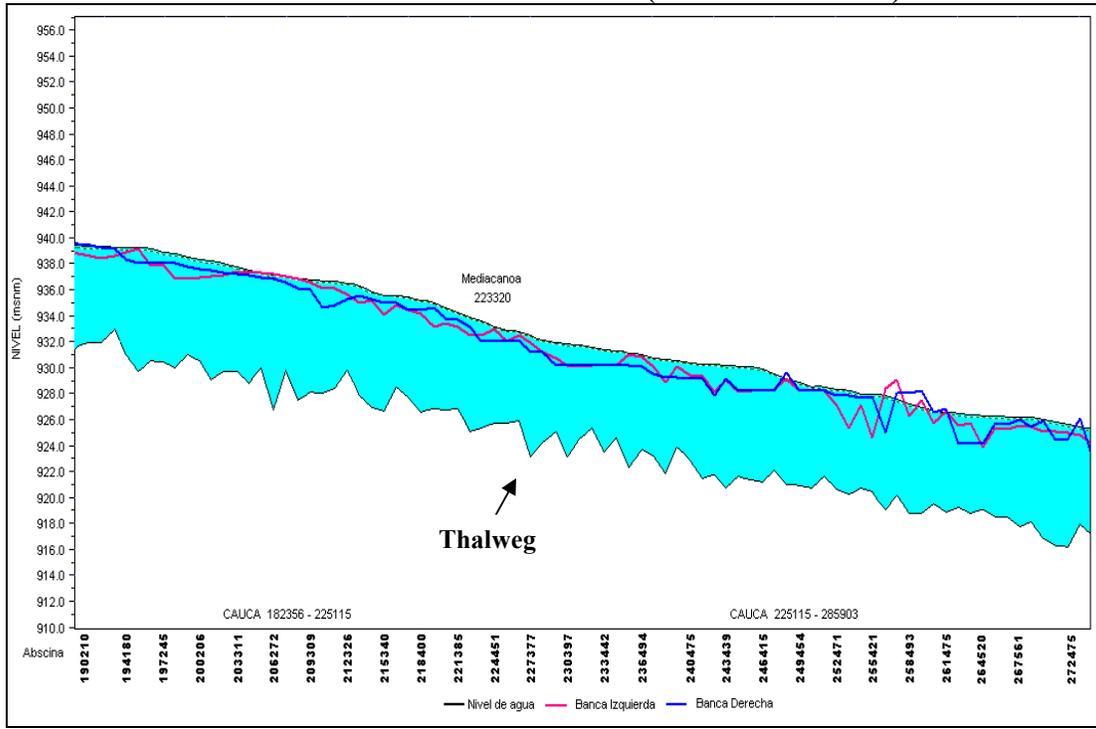
**Figura 5.3. Niveles de agua en el Río Cauca para la alternativa de ronda hídrica (TR=15 años)
Tramo: La Balsa – Juanchito (k27385 – k141151)**



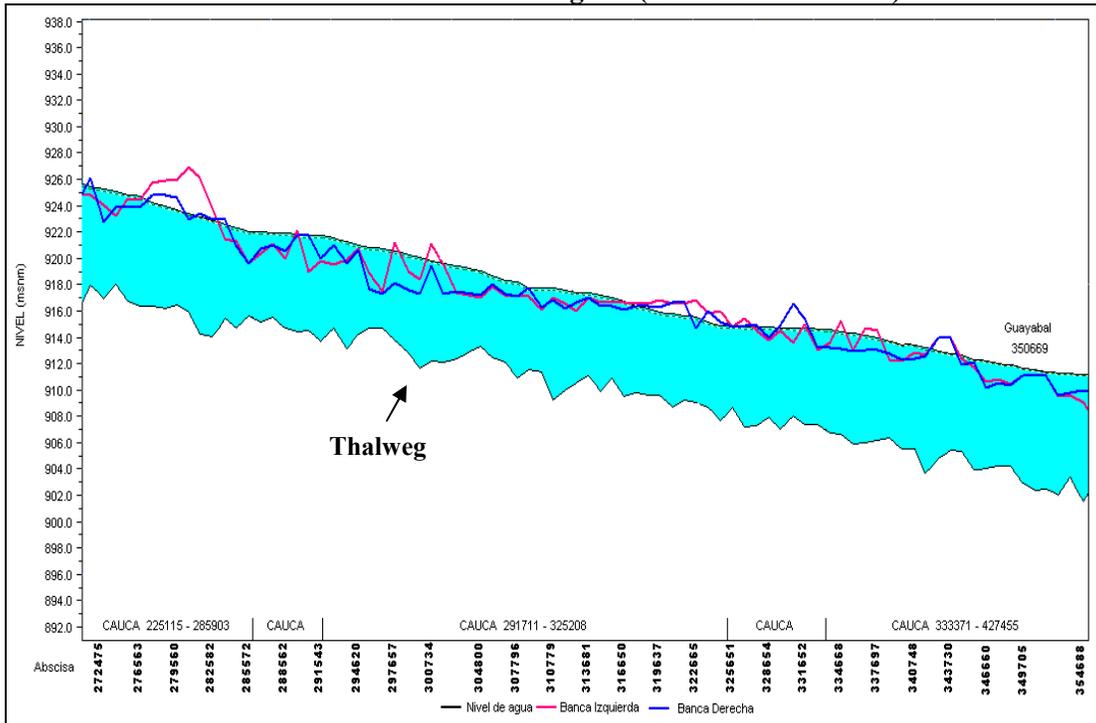
**Figura 5.4 Niveles de agua en el Río Cauca para la alternativa de ronda hídrica (TR=15 años)
Tramo: Juanchito - Mediacanoa (k141151 – k223320)**



**Figura 5.5. Niveles de agua en el Rio Cauca para la alternativa de ronda hídrica (TR=15 años)
Tramo: Mediacañoa – La Victoria (k223320 – k372543)**



**Figura 5.6 Niveles de agua en el Rio Cauca para la alternativa de ronda hídrica (TR=15 años)
Tramo: La Victoria – La Virginia (k372543 – k 444928)**



6 ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR INUNDACIONES EN EL VALLE ALTO DEL RIO CAUCA

6.1 INTRODUCCIÓN

Las inundaciones causadas por el desbordamiento de ríos y canales durante los períodos invernales son uno de los fenómenos naturales que mayores daños causan a nivel mundial. El conocimiento adecuado de la amenaza por inundaciones a la cual está expuesta una determinada región, representa una medida no estructural para la gestión integral del riesgo por inundaciones y se constituye en uno de los primeros pasos imprescindibles para enfrentar este problema. En la actualidad se dispone de diversas metodologías para establecer y clasificar la amenaza por inundaciones provocadas por el desbordamiento de ríos, las cuales han sido aplicadas en muchas regiones alrededor del mundo. Los estudios hidrológicos e hidráulicos, soportados en herramientas hidroinformáticas, permiten determinar la extensión de las inundaciones y las características de los flujos en las áreas afectadas. Para las autoridades y organismos competentes resulta conveniente la clasificación cualitativa de la amenaza en diferentes grados o niveles para facilitar la toma de decisiones y el ordenamiento territorial y, en general, para la gestión integral del riesgo por inundaciones.

Las metodologías disponibles clasifican la amenaza en función de la magnitud de la inundación (de una o más características del flujo en el área afectada, como profundidad, velocidad, caudal unitario) y de su frecuencia (en términos de los períodos de retorno de los caudales de las crecientes en los ríos). No obstante, algunas metodologías clasifican la amenaza solamente en función de la magnitud o de la frecuencia. Otras metodologías, incluso, denominan como mapas de riesgo a los mapas de amenaza, a pesar de que tales mapas sólo consideran la intensidad de la inundación y no los elementos expuestos y sus vulnerabilidades.

En este capítulo se presenta una metodología general para determinar y clasificar la amenaza por inundaciones causadas por el desbordamiento de ríos y canales, en la cual los expertos, según su conocimiento y experiencia, pueden definir: (i) los parámetros hidráulicos (y los límites y rangos correspondientes) que mejor describen la magnitud de la inundación y (ii) los períodos de retorno para establecer los caudales de las avenidas en los cauces que se utilizarán para los estudios hidrológicos e hidráulicos. Los expertos definen los períodos de retorno de las crecientes en los ríos después de un análisis costo-beneficio, teniendo en cuenta las características socioeconómicas y ambientales en la zona de estudio. La metodología propuesta está basada principalmente en los estudios realizados por Ayala (2009), Ayala *et al.* (2009) y CVC-Univalle (2010). La metodología se aplicó satisfactoriamente para zonificar y clasificar la amenaza por inundaciones causadas por el desbordamiento del río Cauca a su paso por el departamento del Valle del Cauca.

Generalmente se define la amenaza como la posibilidad de ocurrencia de un evento natural o antrópico potencialmente desastroso (sobre el hombre o sus actividades), al cual se le puede determinar su probabilidad, magnitud, intensidad y ubicación geográfica.

Las inundaciones causadas por el desbordamiento de los ríos pueden ser de dos tipos: (i) dinámicas o rápidas y (ii) estáticas o lentas. Las inundaciones dinámicas se presentan en ríos o tramos de ríos de pendiente fuerte, donde las lluvias intensas en la cuenca originan aumentos drásticos de los caudales en periodos cortos de tiempo, causando crecientes intensas pero de corta duración, donde los niveles de agua ascienden rápidamente, pudiendo causar grandes daños debido a que el tiempo de respuesta disponible resulta muy reducido. Las inundaciones estáticas o lentas se presentan en tramos de ríos de pendientes muy pequeñas –ríos de valles- a causa de las lluvias continuas y prolongadas en la cuenca aferente, las cuales generan el incremento gradual de los caudales y los niveles de agua hasta desbordarse, causando el anegamiento de la planicie adyacente (llanura o planicie de inundación).

En las últimas décadas se han puesto en marcha a nivel mundial numerosos planes, programas, proyectos y sistemas para la elaboración y el análisis de la cartografía de amenaza por inundaciones; sin embargo, casi ninguna de estas iniciativas sigue una metodología estandarizada que permita homogeneizar los mapas resultantes. Generalmente estas metodologías se fundamentan en la selección y determinación de valores límites (umbrales) de algunas características hidrodinámicas de los flujos en las zonas inundadas, tales como, la profundidad del agua, la velocidad del flujo y el caudal unitario, generando así una diferencia entre las metodologías al seleccionar diferentes parámetros hidrodinámicos y distintos umbrales en cada una de ellas.

Se establece en este capítulo una metodología para la clasificación y zonificación de la amenaza por inundaciones causadas por el desbordamiento de un río aluvial. Esto se plantea con el objetivo de crear herramientas que permitan llevar a cabo una mejor planeación y un adecuado control del territorio por parte de las autoridades. También debe precisarse que los mapas de amenaza son dinámicos y deben actualizarse periódicamente. Esto debido, tanto a las diferentes intervenciones que se realicen sobre el río y la planicie para propósitos de control, mitigación y aprovechamiento, como a la misma dinámica de los sistemas fluviales (erosión de orillas, corte de curvas, procesos de agradación y degradación del lecho, variación del régimen de caudales, etc.) debido a la dinámica misma de los sistemas fluviales.

Posteriormente se realiza la simulación hidrodinámica que permitirá obtener los parámetros hidráulicos (niveles, velocidades y caudales) en el río Cauca para la alternativa sin considerar diques y los tres eventos hidrológicos correspondientes a periodos de retorno de 15, 30 y 100 años. Luego, con base en los resultados de la modelación hidrodinámica y el Modelo Digital de Elevaciones del Terreno, MDT, se genera los mapas de inundaciones causadas por el desbordamiento del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca. Finalmente considerando la metodología de zonificación de amenazas adoptada para el presente estudio, se generan los mapas de amenaza por inundaciones en el valle alto del río Cauca.

6.2 METODOLOGÍA DE ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR INUNDACIONES

Para generar los mapas de amenaza por inundaciones en una zona determinada por el desbordamiento de un río aluvial se deben realizar primero los estudios hidrológicos e hidráulicos correspondientes (incluyendo la modelación matemática), los cuales permitirán, determinar las características de los flujos en el cauce y en la planicie de inundación. Con base en los resultados de estos estudios se generan los mapas de inundaciones, los cuales suministran la información espacial sobre las características hidrodinámicas de los flujos en las áreas inundadas, tales como, la profundidad de inundación, la velocidad del flujo y el caudal unitario (velocidad del flujo x profundidad de inundación). Los eventos hidrológicos deben seleccionarse teniendo en cuenta las características. Los resultados obtenidos para los diferentes eventos considerados permitirán construir los mapas de amenaza. Finalmente se establece el mapa global de amenaza que integra las condiciones más críticas de los diferentes escenarios considerados. A continuación se describen los pasos a seguir para determinar la amenaza por inundación en un río aluvial:

6.2.1 Selección y delimitación del área de estudio

Se selecciona el área de acuerdo con los requerimientos y objetivos del problema. El área a seleccionar incluye no sólo la zona de objeto directo del estudio para la cual se requiere determinar los mapas de amenaza por inundación, sino también el área o las áreas de las cuencas aferentes hasta la zona objeto de estudio.

6.2.2 Recopilación de información de la zona de estudio

Se recopila información general, cartográfica, fisiográfica de la cuenca, batimétrica de los cauces, topográfica de la planicie, hidrológica, hidráulica, sedimentológica, geológica, geomorfológica, socioeco-nómica, histórica sobre inundaciones y causas y efectos, intervenciones en el cauce y en la planicie inundable, etc.

6.2.3 Estudio hidrológico

Los análisis y estudios hidrológicos tienen como objetivo principal determinar los caudales máximos y las hidrógrafas de las crecientes correspondientes a los diferentes periodos de retorno seleccionados en los cauces con influencia en el área de interés principal del estudio. Cuando se dispone de información de caudales máximos anuales en los cauces se pueden obtener los caudales máximos para los diferentes periodos de retorno seleccionados mediante un análisis estadístico, considerando las diferentes funciones de distribución de probabilidades (Gumbel, LogNormal, Pearson III, Log-Pearson III, etc.) aplicadas a las series de caudales máximos, seleccionando aquella que presenta el mejor ajuste. Debe precisarse que las secciones, en las cuales se cuenta con registros de caudales deben estar localizadas en sitios próximos a las fronteras abiertas superiores de los cauces seleccionados para incluir en la posterior modelación hidráulica.

Cuando no se dispone de caudales en los ríos aferentes a la zona de interés del estudio se debe adelantar un estudio hidrológico completo a partir de la información disponible de los registros de las precipitaciones en las estaciones climatológicas existentes en las cuencas así como de las diferentes características fisiográficas de las cuencas hidrográficas, concluyendo con la modelación hidrológica, la cual permitirá generar los caudales máximos en las secciones de frontera en los cauces para la posterior hidráulica de los mismos. En este caso, en primer lugar se debe seleccionar y delimitar el área de estudio, la cual comprende todos los sectores potencialmente inundables en el municipio o la zona de interés, al igual que las cuencas aferentes o aportantes de los cauces que contribuyen a las inundaciones en la zona de principal interés del estudio. Luego se efectúa la recolección de la información meteorológica disponible en las estaciones climatológicas existentes en la cuenca, principalmente las series de tiempo de las precipitaciones.

En primer lugar, se debe seleccionar y delimitar el área de estudio, la cual comprende todos los sectores potencialmente inundables en el municipio o la zona de interés, al igual que las cuencas aferentes o aportantes de los cauces que contribuyen a las inundaciones en la zona de principal interés del estudio. Luego se efectúa la recolección de la información meteorológica disponible en las estaciones climatológicas existentes en la cuenca, principalmente las series de tiempo de las precipitaciones.

Identificadas las estaciones que se encuentran en la cuenca, se procede a identificar la distribución espacial de precipitación, tanto anual como mensual, en zona de estudio. Posteriormente se realiza un análisis temporal de la precipitación, que comprende la estimación del régimen de humedad, por medio del cual se puede observar el comportamiento de las precipitaciones a lo largo del año. También se incluye generación de las curvas de variación estacional que permiten identificar la distribución de la precipitación en el tiempo y la probabilidad de que esta se presente. Además se calculan los valores de precipitaciones máximas, teniendo como base las series de datos de las estaciones en el área de estudio y las metodologías de distribución que se determine utilizar (Gumbel, Pearson, Normal y, Log-Normal). Finalmente, se construyen las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia, a partir de las cuales se pueden estimar las alturas máximas de precipitación.

Paralelamente a esta evaluación, teniendo punto de partida la delimitación de la zona de estudio, se debe realizar un trabajo de reconocimiento en sitio que permita determinar con ayuda de información existente, como imágenes aéreas, planos y/o documentos, el tipo de cobertura de suelo presente en la zona de estudio, de tal manera permitiendo de esta manera estimar la capacidad de infiltración y escurrimiento en los diferentes sectores de la zona de estudio. Una de las metodologías más utilizadas para determinar este parámetro, es el desarrollado por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos, la cual permite calcular valores de Número de Curva (CN) de escurrimiento.

Con los datos obtenidos se procede a realizar la modelación hidrológica, por medio de la cual se estiman los hidrogramas, para los diferentes periodos de retorno definidos por los expertos (correspondientes a crecientes frecuentes, ocasionales y excepcionales), que va a ser utilizados como insumo en las fronteras del modelo hidráulico.

6.2.4 Estudio hidráulico

Los análisis y estudios hidráulicos tienen como objetivo principal determinar las condiciones hidrodinámicas (profundidad y velocidad) de los flujos en el cauce y la planicie de inundación para los eventos hidrológicos correspondientes a los periodos de retorno seleccionados. En primera instancia se deben seleccionar los tramos de los cauces, canales y zanjones que pueden contribuir a generar las inundaciones en la zona objeto del estudio. Luego, se deberá realizar un estudio hidráulico básico y una modelación hidráulica de los cauces y las planicies adyacentes. Los hidrogramas de caudales y niveles en las fronteras de los cauces que contribuyen a las inundaciones, obtenidos previamente del estudio hidrológico, servirán como condiciones de borde para la modelación hidráulica. Los estudios hidráulicos comprenden las siguientes actividades:

6.2.4.1 Estudio hidráulico básico

recopilación y análisis de información disponible: (i) geométrica: batimetría de los cauces y topografía de la llanura de inundación, niveles y geometría de estructuras en el cauce y en la planicie (diques, puentes, espolones, obras de protección de orillas y encauzamientos, construcciones en la llanura); (ii) hidráulica: registros de aforos líquidos, incluyendo niveles de agua, velocidades del flujo y caudales en las diferentes estaciones hidrométricas existentes en los cauces de la zona de estudio, series de niveles y caudales horarios o diarios, curvas de calibración nivel-caudal, determinación de caudales a banca llena, características de los sedimentos del cauce, usos del suelo y cobertura vegetal en la llanura de inundación, estimación de la rugosidad tanto del cauce como de la planicie, movilidad horizontal, cálculo de formas de fondo y sinuosidad). El análisis y procesamiento de la información recopilada permitirá establecer si se requiere o no diseñar y ejecutar un programa de mediciones de campo para fines de complementar y actualizar la información existente.

6.2.4.2 Selección del modelo hidráulico

La selección del modelo o los modelos hidráulicos más apropiados para describir los flujos en los cauces y las planicies adyacentes requiere especial atención. Para seleccionar el modelo más conveniente se deberán tener en cuenta diferentes factores, tales como, cantidad y calidad de la información existente, definición conceptual del esquema hidráulico y configuración o comportamiento de los flujos en el área de estudio (flujos unidimensionales y/o bidimensionales, flujos permanentes o no permanentes). En la literatura técnica se encuentran estudios en los cuales han optado por considerar el flujo como permanente en los diferentes cauces. Sin embargo, es preciso señalar que durante las crecientes en los ríos se presentan flujos no permanentes y al ocurrir los primeros desbordamientos las hidrógrafas de caudales y niveles en los cauces se deforman, a causa de los volúmenes y caudales que transitan hacia la planicie, lo cual incide en la intensidad y duración de las inundaciones en otros sectores localizados más aguas abajo. Adicionalmente, al plantear alternativas para el manejo de las inundaciones por medio de

almacenamientos temporales en la llanura (a través de lagunas de laminación y humedales, por ejemplo), la duración de las crecientes y la magnitud de los volúmenes de agua transitados durante las mismas son determinantes para establecer la conveniencia o no de alguna (s) de las alternativa (s) propuestas. Por lo anterior, es altamente recomendable seleccionar un modelo matemático hidráulico que permita simular flujos no permanentes.

Para simular el tránsito de crecientes en los cauces y los correspondientes procesos de inundación en las llanuras adyacentes generalmente se emplean modelos unidimensionales y, en algunos casos, una combinación de modelos unidimensionales y bidimensionales, simulando los flujos en los cauces mediante un modelo unidimensional y los flujos desbordados en la planicie mediante un modelo bidimensional. Es preciso indicar que los flujos en las llanuras se pueden simular bien sea por medio de modelos unidimensionales o bidimensionales, aunque para la modelación bidimensional se requiere información topográfica más detallada, muchas veces no disponible con el grado de resolución o detalle requerido. Cuando las longitudes de los cauces son relativamente cortas (hasta de unas pocas decenas de kilómetros) y las áreas de las llanuras son relativamente pequeñas se puede utilizar un modelo bidimensional. En el caso de tramos de cauces muy largos y áreas de la planicie muy extensas, un modelo bidimensional puede demandar esfuerzos computacionales muy grandes, es decir, tiempos computacionales muy largos, y los archivos de datos y resultados pueden resultar muy grandes. Finalmente, debe tenerse en cuenta que a mayor dimensionalidad del modelo mayor la exigencia en cuanto a la resolución de la información requerida para propósitos de esquematización y calibración del mismo.

Finalmente se debe señalar que cada modelo matemático tiene un conjunto de requerimientos, facilidades, herramientas y limitaciones particulares que deben ser analizadas y tenidas en cuenta por el modelador durante todo el proceso de construcción y aplicaciones del modelo.

6.2.4.3 Modelación hidráulica

Las actividades dentro del proceso de modelación hidráulica se pueden resumir en las siguientes: esquematización del sistema fluvial (cauces y planicie), implementación en el modelo, análisis de sensibilidad, calibración, verificación y modelación de alternativas de protección y manejo de inundaciones para diferentes escenarios hidrológicos.

6.2.4.4 Esquematización

Consiste en definir y precisar la representación del sistema fluvial en el modelo. En un modelo unidimensional se seleccionan tanto el espaciamiento como las secciones transversales del cauce y la planicie que mejor representan la batimetría y la topografía, respectivamente, mientras que en un modelo bidimensional se define el tamaño de las celdas de la malla computacional para representar convenientemente la topografía de toda el área de estudio. Para ello primero se definen las longitudes de los cauces a modelar y se delimita de manera precisa la extensión del área a modelar. Es conveniente señalar aquí la necesidad de ubicar los extremos o fronteras de los cauces suficientemente alejados de la

zona principal de interés del estudio; esto con el fin de que los cambios que se requieran introducir posteriormente en el modelo para estudiar los posibles efectos de diferentes alternativas estructurales que se puedan plantear en procura de un mejor manejo de las inundaciones no lleguen a afectar las condiciones hidrodinámicas previamente establecidas en las fronteras del modelo, lo cual generaría un conflicto.

También se definen en la etapa de esquematización las condiciones hidrodinámicas en las fronteras del modelo; igualmente se definen los valores de la rugosidad de los cauces y de la llanura de inundación y, en modelos bidimensionales, la viscosidad turbulenta o alguna ecuación para determinarla, según los recursos disponibles en el mismo modelo.

6.2.4.5 Implementación o construcción del modelo

Consiste en introducir al modelo toda la información física esquematizada anteriormente según los requerimientos y herramientas disponibles en el mismo. Para representar la topografía de la planicie es conveniente generar un modelo digital de elevaciones del terreno (MDT), el cual facilitará los procesos de definición de la topografía en el modelo, tanto en un modelo unidimensional como en uno bidimensional. Para un modelo unidimensional la topografía de las secciones transversales seleccionadas puede obtenerse al interceptar las líneas de las secciones con el MDT. En un modelo bidimensional, generalmente los niveles de terreno en las celdas de la malla computacional que representa el área de estudio son obtenidos mediante interpolación a partir de la información contenida en el MDT. En el modelo se debe incluir la información de las obras existentes (coordenadas o abscisas y cotas topográficas), tales como, diques, puentes, canalizaciones, alcantarillas, etc. Posteriormente se introducen los valores de los parámetros físicos (rugosidad, viscosidad turbulenta (modelos bidimensionales)) en todos los tramos y celdas del modelo. Luego se introducen las condiciones hidrodinámicas en las fronteras del modelo, generalmente las hidrógrafas de caudales en las fronteras superiores de los diferentes cauces en el área de estudio, y la curva de calibración nivel-caudal o las hidrógrafas de niveles en las fronteras inferiores o de salida del modelo.

Finalmente se seleccionan los parámetros numéricos del modelo. Principalmente el intervalo de tiempo computacional y el espaciamiento máximo en los cauces. Estos parámetros se establecen teniendo en cuenta diferentes aspectos, tales como, el grado de detalle o resolución requerido en los resultados del modelo, el tiempo computacional (no debe ser excesivamente grande) y especialmente, garantizar la estabilidad numérica del modelo y la precisión de los resultados. En este sentido, cada modelo matemático define, dependiendo del tipo de esquema numérico adoptado para resolver las ecuaciones hidrodinámicas, las condiciones que deben cumplirse para garantizar su estabilidad numérica; por ello, siempre debe chequearse el estricto cumplimiento de las mismas. Una vez concluido este proceso se realizan la primeras corridas o simulaciones en el modelo, siguiendo, preferiblemente y en su orden, las etapas de análisis de sensibilidad, calibración, verificación y explotación o aplicaciones del modelo para generar finalmente los niveles de agua y las condiciones hidrodinámicas para los eventos hidrológicos de interés del estudio, es decir, las crecientes correspondientes a los diferentes periodos de retorno seleccionados.

6.2.4.6 Análisis de sensibilidad

Consiste en realizar pruebas sistemáticas del comportamiento del modelo en respuesta a los cambios en los datos de entrada, las condiciones iniciales y los parámetros físicos (rugosidad, viscosidad turbulenta) y numéricos (ΔX , ΔT). Es decir, se trata de establecer qué tanto cambian los niveles de agua, las profundidades, las velocidades del flujo y los caudales cuando se varía sistemáticamente algún parámetro de entrada del modelo. Este análisis de sensibilidad suministra información valiosa para diferentes fines, tales como: (i) establecer la precisión y detalle requeridos para los datos de entrada del modelo, las condiciones iniciales y los parámetros físicos, (ii) determinar los parámetros que ejercen mayor influencia sobre las respuestas del modelo y (iii) realizar la calibración del modelo.

6.2.4.7 Calibración del modelo

Es el proceso de ajuste de los elementos geométricos simplificados (batimetría, topografía, contornos de estructuras, etc.) y de los valores de los parámetros físicos y numéricos que aparecen en las diferentes ecuaciones (hidrodinámicas), de tal manera que los eventos simulados en el modelo reproduzcan de la manera más precisa los eventos de la naturaleza. Es una de las fases más importantes dentro del proceso de implementación del modelo. El objetivo de la calibración es, entonces, reproducir los procesos hidrodinámicos (niveles, velocidades, caudales, profundidades) en el sistema para una condición dada (real, disponiendo de datos e información de campo) a través del ajuste o modificación de los parámetros físicos y numéricos (rugosidad, viscosidad turbulenta (modelo bidimensional), batimetría, topografía, esquematización topológica) dentro de rangos físicamente válidos. Para fines de calibración y ajuste de los parámetros físicos y numéricos del modelo se utiliza la información y los registros disponibles de crecientes e inundaciones históricas (niveles de agua, caudales, áreas inundadas). Cuando esta información es escasa o no existe se debe recurrir a la experiencia del modelador y, en especial, al conocimiento que se puede tener del comportamiento del sistema fluvial en estudio o de sistemas de características similares a éste.

Muchas veces resulta necesario revisar, ajustar o sustituir alguna información batimétrica y/o topográfica procurando una mejor representación de la configuración de los niveles del lecho de los cauces y/o de la topografía de la planicie. Siempre los ajustes o modificaciones de los parámetros deberá hacerse con base en la física de los datos y en el conocimiento de los procesos hidrodinámicos en el sistema o área de estudio. Se debe hacer mayor énfasis o esfuerzo en lograr un buen ajuste en las hidrógrafas de los niveles de agua y luego en los caudales. La calidad de la calibración dependerá finalmente de la calidad y cantidad de los datos topográficos, batimétricos e hidrológicos disponibles para el sistema en estudio; igualmente dependerá de la esquematización topológica que se realice del sistema físico.

6.2.4.8 Verificación del modelo

Consiste en comprobar que el modelo reproduce razonablemente bien la hidrodinámica del sistema fluvial para otras condiciones hidrológicas, diferentes a las empleadas en el proceso de calibración. Algunas veces resulta necesario ajustar uno o más parámetros físicos o numéricos, lo cual obliga a revisar y afinar la calibración realizada previamente. En

síntesis, el modelo deberá calibrarse y verificarse para todos los periodos y condiciones hidrológicas que se consideren importantes en el estudio.

6.2.4.9 Aplicaciones del modelo

Una vez calibrado y verificado el modelo hidráulico, se procede a realizar las diferentes simulaciones que permitirán generar las condiciones hidrodinámicas en los cauces y en la planicie, especialmente los niveles y velocidades del agua y la extensión de las áreas inundadas, para los diferentes eventos hidrológicos asociados a los periodos de retorno preestablecidos. En Colombia generalmente se consideran eventos con periodos de retorno de 30 años para definir la protección de zonas agrícolas y de 100 años para definir la protección de centros poblados. Para cada periodo de retorno se introducen al modelo las hidrógrafas de caudales correspondientes.

6.2.5 Elaboración de los mapas de inundaciones

Los mapas de inundación indican la extensión y localización de las zonas que resultan inundadas al presentarse desbordamientos como consecuencias de lluvias intensas y prolongadas. A partir de estos mapas es posible obtener la variación de la profundidad de la columna de agua a lo largo del área inundada (CVC, 2007)

Con base en los resultados de la modelación matemática hidráulica se generan los mapas de inundaciones para cada una de las crecientes en el cauce, correspondientes a las frecuencias de ocurrencia o periodos de retorno de los diferentes eventos hidrológicos seleccionados. Estos mapas suministran la información sobre las características hidrodinámicas de los flujos en las áreas inundadas (profundidad, velocidad del flujo y caudal unitario (velocidad x profundidad)). Para cada evento hidrológico se pueden generar mapas de profundidades de inundación, mapas de velocidades del flujo y mapas de caudales unitarios. Generalmente, en zonas relativamente planas las velocidades de los flujos y los caudales unitarios son muy bajos, por lo cual es posible excluir para el análisis y determinación de la amenaza las variables hidrodinámicas de velocidad del flujo y caudal unitario.

Algunos modelos matemáticos cuentan con las herramientas y las facilidades para generar de una manera más ágil los mapas de inundaciones; para poder realizarlo se debe disponer del MDT del área de estudio, el cual deberá ser importado al modelo hidráulico. Por ejemplo, el modelo hidráulico HEC-RAS cuenta con la extensión para SIG (específicamente para ArcView) denominada HEC-GeoRAS, la cual consiste de un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades diseñadas para procesar datos georreferenciados que permiten, bajo el entorno de los SIG, facilitar y complementar el trabajo con el modelo hidráulico. HEC-GeoRAS crea un archivo para importar a HEC-RAS datos de geometría del terreno, incluyendo los cauces de ríos y canales, secciones transversales, etc. Posteriormente los resultados del modelo hidráulico, como profundidades y velocidades del flujo, se exportan desde HEC-RAS a ArcView y pueden ser procesados para obtener los mapas de inundaciones. Para cada simulación hidrodinámica, en HEC-GeoRAS se genera un modelo digital de la superficie libre del agua. Este modelo digital y el MDT se convierten a formato GRID (datos raster), los cuales se interceptan para generar los mapas de inundaciones.

Cuando el modelo hidráulico utilizado no dispone de este tipo de herramientas y utilidades, para generar los mapas de inundaciones se puede hacer uso de programas y herramientas de SIG, como puede ser el programa ArcGIS. Para ello los resultados de la modelación hidrodinámica deberán exportarse en un archivo y conjuntamente con el archivo del modelo digital de elevaciones del terreno son llevados al programa ArcGIS, por ejemplo, donde los niveles de agua obtenidos se cruzan con los niveles del terreno para obtener los mapas de profundidades de inundación.

6.2.6 Análisis y selección del método de clasificación de la amenaza por inundaciones

Con base en los resultados de los estudios hidrológicos e hidráulicos y teniendo en cuenta las características de las inundaciones históricas y las afectaciones correspondientes se selecciona el método de clasificación de la amenaza por inundaciones más apropiado para la zona de estudio. En este análisis se considerará tanto la magnitud y/o intensidad de la inundación como la frecuencia de ocurrencia (o periodo de retorno) del evento hidrológico. En el ítem 2.3 se describe la metodología de clasificación de la amenaza por inundaciones considerando estos dos factores.

6.2.7 Elaboración de los mapas de amenaza por inundaciones

Con base en los mapas de inundaciones generados anteriormente y considerando los criterios o métodos de clasificación de la amenaza adoptados (según los análisis y el criterio y el conocimiento de los expertos de la zona de estudio) se procede a generar los mapas de amenaza por inundaciones. Se genera un mapa de amenaza para cada evento hidrológico, es decir, para cada período de retorno definido inicialmente.

6.2.8 Mapa general o global de amenaza por inundaciones

Con base en los mapas de amenaza construidos para los diferentes períodos de retorno considerados se genera el mapa global de amenaza por inundaciones. Este mapa global contiene los resultados más críticos obtenidos, es decir, en cada subárea de la zona de estudio se asigna el nivel de amenaza más crítico establecido para los diferentes periodos de retorno considerados en el estudio. Este mapa global se realiza con el objetivo de facilitar los procesos de planificación territorial de la zona de estudio, teniendo como base un único mapa de amenaza.

6.2.9 Método de clasificación de la amenaza por inundaciones

6.2.9.1 Factores que determinan el nivel de amenaza

La amenaza por inundaciones ocasionadas por el desbordamiento de un cauce aluvial puede definirse teniendo en cuenta dos factores, que son: la magnitud o intensidad de inundación y la frecuencia de ocurrencia de la creciente que origina la inundación.

6.2.9.2 Magnitud o intensidad del evento de inundación

Para establecer la intensidad o magnitud del evento de inundación es posible considerar diferentes rangos de profundidades de inundación, velocidades del flujo y/o caudales

unitarios (velocidad x profundidad). En el Cuadro 6.1 se presentan algunas opciones de clasificación de la magnitud de la inundación planteando diferentes combinaciones de las variables hidrodinámicas, donde los umbrales o límites para tales variables son definidos según el juicio o criterio de los expertos.

Cuadro 6.1 Clasificación de la magnitud o intensidad de la inundación según la profundidad de agua, la velocidad del flujo y/o el caudal unitario en las zonas inundadas

Magnitud o intensidad de la inundación	OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3	OPCIÓN 4
	Rangos de profundidad de agua en el área inundada	Rangos de profundidades y velocidades de flujo en el área inundada	Rangos de profundidades y caudales unitarios en el área inundada	Rangos de profundidades, velocidades del flujo y caudales unitarios en el área inundada
Alto	$H \geq H_2$	$H \geq H_2$ ó $V \geq V_2$	$H \geq H_1$ ó $H*V \geq (H*V)_2$	$H \geq H_2$ ó $V \geq V_2$ ó $H*V \geq (H*V)_2$
Medio	$H_1 \leq H < H_2$	$H_1 \leq H < H_2$ ó $V_1 \leq V < V_2$	$H_1 \leq H < H_2$ ó $(H*V)_1 \leq H*V < (H*V)_2$	$H_1 \leq H < H_2$ ó $V_1 \leq V < V_2$ ó $(H*V)_1 \leq H*V < (H*V)_2$
Bajo	$H < H_1$	$H < H_1$ y $V < V_1$	$H < H_1$ y $H*V < (H*V)_1$	$H < H_1$ y $V < V_1$ y $H*V < (H*V)_1$

Nota: H = Profundidad de agua

V = Velocidad de flujo.

H_1, H_2 = Umbrales de profundidad de agua V_1, V_2 = Umbrales de velocidad de flujo.

6.2.9.3 Frecuencia de ocurrencia de la creciente que origina la inundación

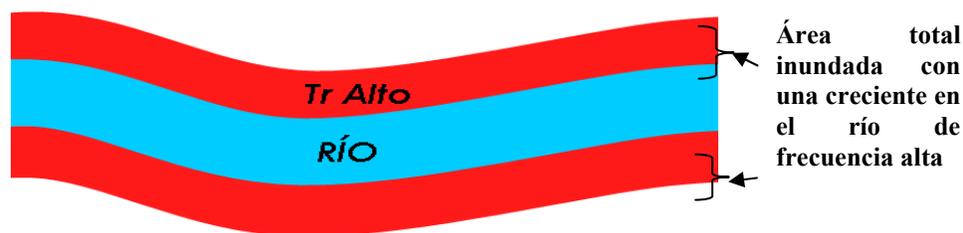
A cada escenario o evento hidrológico analizado se le asigna un nivel de frecuencia en términos cualitativos en función de la probabilidad de recurrencia (o el período de retorno) de la creciente en el río (ver Cuadro 6.2). Estos periodos de retorno pueden variar de acuerdo con el criterio de los expertos, teniendo en cuenta los diferentes aspectos sociales, económicos y ambientales en la zona de estudio.

Cuadro 6.2 Clasificación de la frecuencia de la inundación según el período de retorno de la creciente en el río

Frecuencia	Nivel de Frecuencia de la inundación
$Tr \leq Tr_1$ (Años)	Alto
Tr_1 (Años) < $Tr \leq Tr_2$ (Años)	Medio
Tr_2 (Años) < $Tr \leq Tr_3$ (Años)	Bajo

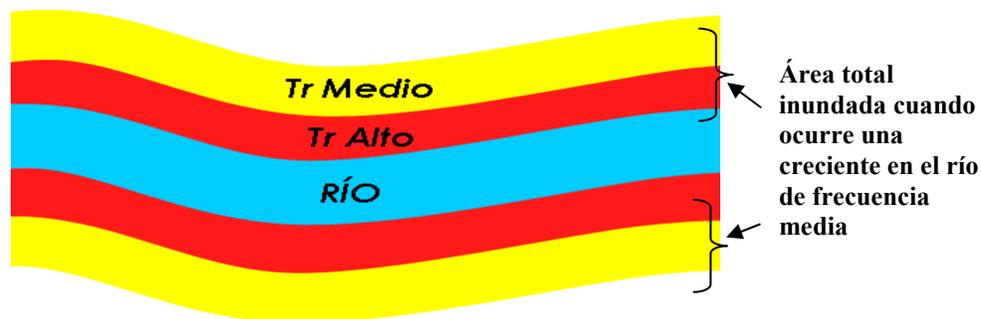
Cuando se presenta un evento hidrológico en el río con una frecuencia de ocurrencia alta se pueden inundar las áreas más próximas al río; se dice, entonces, que estas áreas inundadas corresponden o están asociadas a una frecuencia de inundación alta (período de retorno Tr_1)(ver Figura 6.1).

Figura 6.1 Área inundada en la planicie cuando se presenta en el río una creciente de frecuencia alta



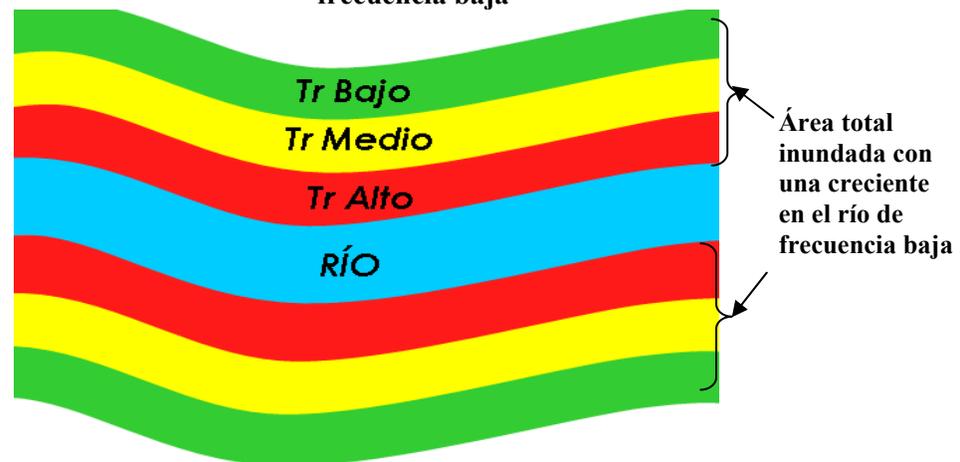
Cuando se presenta un evento con una frecuencia de ocurrencia media (la cual corresponde a unos caudales mayores en el río a los considerados anteriormente), se inunda un área de mayor extensión que en el caso anterior (para la frecuencia alta). En este caso una parte del área inundada tiene asociada una frecuencia de inundación alta (común a ambas frecuencias de ocurrencia alta y media) y la otra parte tiene asociada o corresponde solamente al evento de frecuencia media, tal como ilustra en la Figura 6.2.

Figura 6.2 Área inundada en la planicie cuando se presenta en el río una creciente de frecuencia media



De manera similar, cuando se presenta un evento con una frecuencia de ocurrencia baja (correspondiente a caudales en el río superiores a los considerados anteriormente, período de retorno Tr_3), se inundará un área superior a las inundadas en los dos casos anteriores. En este caso, una fracción del área inundada es común a los tres eventos de frecuencias de ocurrencia (alta, media y baja), por lo cual se puede decir que esta área está asociada o presenta una frecuencia de inundación alta; otra fracción del área inundada es solamente común a los eventos de frecuencias media y baja, por lo cual se puede afirmar que esta área corresponde o está asociada a un nivel de frecuencia de inundación media; y finalmente, el área restante es afectada únicamente por el evento de frecuencia baja, por lo cual esta área corresponde únicamente al nivel de frecuencia de inundación baja (ver Figura 6.3)

Figura 6.3 Área inundada en la planicie cuando se presenta en el río una creciente de frecuencia baja



6.2.10 Metodología de clasificación de la amenaza por inundaciones

La amenaza por inundaciones puede clasificarse de múltiples formas, considerando generalmente tanto la magnitud o intensidad de la inundación como la frecuencia de ocurrencia de la misma. Considerando estos dos factores se presentan a continuación varios métodos para clasificar la amenaza por inundaciones debido al desbordamiento de un río aluvial.

1. Según la magnitud o intensidad de la inundación.
2. Según la frecuencia de ocurrencia de la creciente que origina la inundación.
3. Según la magnitud o intensidad de la inundación y la frecuencia de ocurrencia de la creciente que origina la inundación. En este documento se presentan tres formas diferentes de clasificar o definir los niveles de amenaza de acuerdo con esta condición.

La clasificación de los niveles de amenaza, independiente de la metodología que se establezca para definirla, permite generar los mapas de amenaza por inundación para cada evento considerado mediante la implementación de un sistema de información geográfica. La selección de la metodología para determinar esta clasificación depende del juicio y el conocimiento que pueden tener los expertos sobre las características y los efectos de las crecientes históricas en la zona de estudio.

Las metodologías que se presentan en este documento, clasifican la amenaza por inundaciones en alta, media y baja; donde el nivel de amenaza alto corresponde a aquellos sectores en los que la ocurrencia de la inundación podría generar daños importantes en la infraestructura y los diferentes elementos expuestos, en el nivel de amenaza medio los daños que podrían ocurrir serían de una magnitud moderada y en el nivel de amenaza bajo la inundación podría generar daños menores. Las diferentes metodologías propuestas y aplicadas en diferentes regiones alrededor del mundo clasifican la amenaza según la

magnitud de la inundación, la frecuencia de ocurrencia de la misma o considerando los dos factores anteriores.

6.2.10.1 Nivel de amenaza según la magnitud o intensidad del evento de inundación

La clasificación de la amenaza de acuerdo con esta metodología depende únicamente de la magnitud de la inundación, por lo cual un evento de magnitud o intensidad de inundación alta tiene asociado el nivel de amenaza alto; de igual manera, los niveles de amenaza medio y bajo se asocian a las magnitudes o intensidades de inundación media y baja, respectivamente (ver Cuadro 6.3)

Cuadro 6.3 Metodología 1 para la clasificación de la amenaza según la magnitud de la inundación

Magnitud o intensidad de la inundación	NIVEL DE LA AMENAZA
Alta	Alta
Media	Media
Baja	Baja

6.2.10.2 Nivel de amenaza según la frecuencia de ocurrencia de la creciente que origina la inundación

La clasificación de la amenaza de acuerdo con esta metodología depende solamente de la frecuencia de la inundación. La totalidad del área inundada durante la creciente con una frecuencia de ocurrencia alta presenta un nivel amenaza alta (debido a que se inunda frecuentemente, independiente de la magnitud de la inundación). El área inundada durante el evento hidrológico de frecuencia media menos el área inundada durante el evento de frecuencia alta se considera que se encuentra en amenaza media. Finalmente, el área inundada durante la creciente con una frecuencia de ocurrencia baja menos el área inundada durante la creciente con una frecuencia de ocurrencia media presenta un nivel de amenaza bajo (ver Cuadro 6.4)

Cuadro 6.4 Metodología 2 para la clasificación de la amenaza según la frecuencia de ocurrencia del evento de inundación

Frecuencia de la inundación	NIVEL DE LA AMENAZA
Alta	Alta
Media	Media
Baja	Baja

6.2.10.3 Nivel de amenaza según la frecuencia de ocurrencia y la magnitud del evento de inundación

Las metodologías para definir el nivel de amenaza que tienen en cuenta tanto la frecuencia de ocurrencia como la magnitud del evento de inundación permiten establecer diferentes formas de clasificar y definir los niveles de amenaza, de acuerdo con el juicio de los expertos. Por ejemplo, una inundación asociada a una frecuencia de ocurrencia baja pero de una alta intensidad podría ser considerada por unos expertos como amenaza alta, debido a que los daños en los elementos expuestos pueden ser apreciables; sin embargo, otros expertos podrían el evento como amenaza media debido a que la frecuencia de ocurrencia es baja.

A continuación se presentan tres (3) metodologías de clasificación de la amenaza en función de los factores de frecuencia de ocurrencia e intensidad o magnitud de la inundación.

La primera metodología, que se presenta en el Cuadro 6.5 es una metodología que se puede considerar equilibrada, ya que presenta la misma cantidad de calificaciones para cada nivel de amenaza: tres (3) calificaciones de amenaza alta, tres (3) de amenaza media y tres (3) de amenaza baja.

La segunda metodología (ver Cuadro 6.6) corresponde a una metodología poco conservadora ya que se presentan más calificaciones de amenaza baja, siendo para este caso dos (2) de amenaza alta, tres (3) de amenaza media y cuatro (4) de amenaza baja. En consecuencia, esta metodología de clasificación de la amenaza resulta menos restrictiva para el uso del territorio que las otras dos metodologías.

La tercera y última metodología (ver Cuadro 6.7) corresponde a una metodología más conservadora ya que se presentan más calificaciones de amenaza alta, siendo para este caso cuatro (4) de amenaza alta, tres (3) de amenaza media y dos (2) de amenaza baja. Debido a esto, muy seguramente habrá mayores restricciones para el uso del territorio en esta metodología con respecto a las dos primeras.

Cuadro 6.5 Metodología 3 para la clasificación de la amenaza según la magnitud y la frecuencia de ocurrencia de la inundación

Magnitud de la inundación	NIVEL DE LA AMENAZA		
	Frecuencia de la inundación		
	Alta	Media	Baja
Alta	Alta	Alta	Media
Media	Alta	Media	Baja
Baja	Media	Baja	Baja

Cuadro 6.6 Metodología 4 para la clasificación de la amenaza según la magnitud y la frecuencia de ocurrencia de la inundación

Magnitud de la inundación	NIVEL DE LA AMENAZA		
	Frecuencia de la inundación		
	Alta	Media	Baja
Alta	Alta	Alta	Media
Media	Media	Media	Baja
Baja	Baja	Baja	Baja

Cuadro 6.7. Metodología 5 para la clasificación de la amenaza según la magnitud y la frecuencia de ocurrencia de la inundación

Magnitud de la inundación	NIVEL DE LA AMENAZA		
	Frecuencia de la inundación		
	Alta	Media	Baja
Alta	Alta	Alta	Alta
Media	Alta	Media	Media
Baja	Media	Baja	Baja

6.2.11 Metodología seleccionada para este proyecto

Para este Proyecto del Corredor de Conservación del Río Cauca en su valle alto se adoptó la metodología que se presenta y describe a continuación. Esta metodología clasifica la amenaza en alta, media y baja, considerando para ello tanto la magnitud de la inundación como la frecuencia de la misma. A continuación se presentan los umbrales adoptados en este proyecto para definir tanto la frecuencia como la magnitud de inundación.

6.2.11.1 Clasificación de la frecuencia de la inundación

Se definieron tres (3) frecuencias o periodos de retorno de los eventos en el río Cauca, como son: 15, 30 y 100 años. A partir de ellos se clasifica la frecuencia en tres niveles diferentes: Alta (Tr = 15 años), Media (Tr = 30 años) y Baja (Tr = 100 años) (ver Cuadro 6.8).

Cuadro 6.8 Clasificación de la frecuencia de la inundación según el período de retorno de la creciente en el río Cauca y adoptada en el proyecto

Frecuencia	Nivel de Frecuencia de la inundación
Tr = 15 Años	Alto
Tr = 30 Años	Medio
Tr = 100 Años	Bajo

6.2.11.2 Clasificación de la magnitud de la inundación

El río Cauca a su paso por el departamento del Valle del Cauca presenta unas velocidades relativamente bajas en su cauce principal y aún menores en la planicie de inundación cuando se presentan los desbordamientos. Además, las crecientes en el río Cauca son del tipo lentas, debido a que el incremento en los caudales y los niveles de agua durante la fase ascendente es gradual y no repentino o súbito. Por lo anterior, se adoptó como criterio para clasificar la magnitud o intensidad de la inundación en el valle alto del río Cauca la profundidad de agua en el área inundada. Los niveles de intensidad o magnitud de la inundación y los respectivos rangos de profundidades de agua establecidos se presentan en el Cuadro 6.9.

Cuadro 6.9 Clasificación de la magnitud de la inundación según la profundidad de agua en el área afectada por el desbordamiento del río Cauca y adoptada en el proyecto

Nivel de Intensidad de la Inundación	Rangos de H (m) en el área inundada
Alto	$H \geq 1$ m
Medio	$0.5 \text{ m} \leq H < 1$ m
Bajo	$H < 0.5$ m

Finalmente, con base en la frecuencia y la magnitud de la inundación se estableció la clasificación de la amenaza por inundaciones causadas por el desbordamiento del río Cauca a su paso por el departamento del Valle del Cauca, tal como se presenta en el Cuadro 6.10). Como puede apreciarse en este cuadro, cuando la frecuencia de inundación es alta (es decir, un periodo de retorno bajo), la amenaza puede ser alta o media, mas no baja. Por el contrario, cuando la frecuencia de inundación es baja (es decir, un periodo de retorno alto), la amenaza de inundación puede ser media o baja, pero no alta.

Cuadro 6.10 Clasificación de la amenaza por las inundaciones causadas por el desbordamiento del río Cauca

Magnitud de la inundación	NIVEL DE LA AMENAZA		
	Frecuencia de la inundación		
	Alta	Media	Baja
Alta	Alta	Alta	Media
Media	Alta	Media	Baja
Baja	Media	Baja	Baja

6.3 MODELACIÓN HIDRODINÁMICA

6.3.1 Consideraciones metodológicas para la modelación hidrodinámica

La metodología para desarrollar la modelación hidrodinámica de las alternativas sin diques marginales de protección en el río Cauca para periodos de retorno de 15, 30 y 100 años es similar a la empleada en la modelación de la Ronda Hídrica, adoptando los mismos coeficientes de rugosidad y factores de resistencia.

6.3.2 Escenarios considerados para la Modelación Hidráulica

Con el fin de determinar los mapas de inundación y los mapas de amenaza en el valle alto geográfico del río Cauca se simularon las crecientes en el río Cauca con periodos de retorno de 15, 30 y 100 años, para la alternativa sin diques.

Los umbrales de los periodos de retorno seleccionados fueron los siguientes: El primer umbral corresponde al periodo de retorno de los diseños de drenajes urbanos (15 años). El segundo umbral corresponde aproximadamente a los periodos que los diseños de las obras de infraestructura vial y de cultivos deben garantizar según la normatividad colombiana (30 años). El tercer umbral corresponde a la norma colombiana que estipula que cualquier comunidad aledaña a un cauce debe tener garantizada su integridad para una creciente con un periodo de retorno de 100 años.

En el Cuadro 6.11 se presentan los niveles de frecuencia de los eventos de inundaciones, en función de los periodos de retorno, establecidos en el presente estudio.

Cuadro 6.11. Nivel de frecuencia de los eventos de inundaciones

Frecuencia	Frecuencia de la inundación
Tr 15 años	Alta
Tr 30 años	Media
Tr 100 años	Baja

6.3.3 Determinación de Caudales Extremos

La extensión de las áreas inundadas durante un desbordamiento está asociada al caudal que genera la creciente. Entre mayor sea el caudal que discurre por el río mayores serán las áreas que resultarán anegadas. Los caudales que generan crecientes corresponden a eventos extremos que afectan eventualmente los sistemas hidrológicos. La magnitud de estos caudales está inversamente relacionada con su frecuencia de ocurrencia: caudales muy altos se presentan con una frecuencia muy baja. La magnitud de los caudales se relaciona con su frecuencia de ocurrencia a través de un análisis basado en distribuciones de probabilidad (CVC, 2007)

La determinación de los caudales máximos en el río Cauca se realizó utilizando las series completas de caudales máximos anuales registrados en las estaciones Mediacanoa, Guayabal, La Victoria, Anacaro y La Virginia (desde el año de inicio de operación de cada estación hasta el año 2012) y después de la puesta en operación del embalse de Salvajina para las estaciones La Balsa, La Bolsa, Hormiguero y Juanchito (1985-2012). Los caudales máximos registrados con los que se realizó la modelación se presentan en los Cuadros 6.12 y 6.13.

Cuadro 6.12. Caudales Máximos estimados para la creciente de 2011 en las Estaciones Hidrométricas del Río Cauca

Río	Estación	Abscisa (km)	Caudales Máximos Estimados (m ³ /s)		
			Período de Retorno (años)		
			15	30	100
Cauca	La Balsa	27.385	606	656	733
	La Bolsa	79.547	748	804	889
	Hormiguero	115.443	833	875	930
	Juanchito	140.895	1089	1172	1239
	Mediacanoa	223.602	1121	1189	1286
	Guayabal	350.187	1199	1265	1356
	La Victoria	372.006	1209	1272	1360
	Anacaro	418.246	1297	1350	1416
	La Virginia	444.928	1779	1893	2064

6.3.4 Condiciones hidrodinámicas de frontera

Las hidrógrafas de caudales para definir las condiciones hidrodinámicas en las fronteras abiertas del modelo matemático (estación La Balsa en el río Cauca y estaciones en los ríos tributarios) se generaron a partir de los caudales máximos estimados para los diferentes periodos de retorno establecidos anteriormente y de las hidrógrafas de caudales registradas durante la creciente del segundo semestre del año 2011 (noviembre-diciembre). Se seleccionó un periodo de veinte días de la creciente, el cual corresponde al periodo crítico de toda la creciente. Finalmente, los hidrogramas adimensionales se multiplicaron por los caudales máximos estimados para los diferentes periodos de retorno de 15, 30 y 100 años, permitiendo así obtener las hidrógrafas de caudales requeridas para las condiciones hidrodinámicas de frontera.

6.3.5 Simulación hidráulica

Los resultados obtenidos para las simulaciones hidrodinámicas correspondientes a los periodos de retorno de 15, 30 y 100 años bajo el supuesto de que no existiesen diques a lo largo del corredor río Cauca se presentan en las Figuras 6.4 a 6.30.

- En términos generales, se aprecia que a lo largo del corredor río Cauca los niveles máximos de agua superan los niveles de banca llena para las tres crecientes analizadas. En la estación Juanchito el nivel máximo no supera la banca llena en la creciente con periodo de retorno de 15 años; mientras que en las otras dos crecientes (Tr 30 y 100 años) sí se supera el nivel de banca llena. Los datos de banca llena y niveles de agua máximos calculados para las tres crecientes en las estaciones hidrométricas del río Cauca se presentan en el Cuadro 6.14.

Cuadro 6.13. Caudales Máximos estimados para la creciente de 2011 en los Tributarios del Río Cauca

Río Tributario	Caudales Máximos Estimados (m ³ /s)		
	Período de Retorno (años)		
	15	30	100
Quinamayó	12.37	12.37	12.37
Teta	11.02	11.02	11.02
La Quebrada	17.87	28.24	28.24
Claro	31.2742	41.2819	41.2819
Palo	272.007	272.007	272.007
Jamundí	86.2619	86.2619	86.2619
Desbaratado	9.95	19.9	19.9
Canal Sur	21.57	21.57	21.57
Canal General	12.98	12.98	12.98
Canal Oriental	1.95	1.95	1.95
Cali	17	6.99	6.99
Guachal	97.35	57.76	57.76
Amaime	78.77	40	40
Zabaletas	4.16	4.16	4.16
Guabas	26.98	19	19
Sonso	11.09	11.09	11.09
Yotoco	2	2	2
Mediacanoa	10.4	10.4	10.4
Guadalajara	14.09	7.045	14.09
Quebrada La Negra	2.6	2.6	6.5
Piedras	12.06	12.06	24.12
Riofrio	76.75	33.77	33.77
Tuluá	68.7	47.95	61.83
Morales	14.433	14.433	14.433
Quebrada Robledo	12.83	6.41	12.83
Bugalagrande	109.38	50.3	50.31
Pescador	22.51	11.25	22.51
Paila	62.12	31.06	31.06
Quebrada Las Cañas	20.5	10.25	20.5
Quebrada Los Micos	25.4	53.33	53.33
R.U.T	21.74	42.4	42.4
San Francisco	7.41	15.86	15.86
Obando	6.86	13.73	13.73
Chanco	3.09	6.18	6.18
Catarina	26.36	81.97	108.07
La Vieja	478	694	738.2
Risaralda	3.68	8.09	14.7
Aporte Adicional 1	40	40	40
Aporte Adicional 2	41	41	41
Aporte Adicional 3	60	60	60
Aporte Adicional 4	63	63	63
Aporte Adicional 5	63	63	63
Aporte Adicional 6	7	7	7

- Al comparar las diferencias de niveles de agua obtenidos entre las diferentes crecientes (ver Figura 6.31) se observa, como era previsible, que la mayor diferencia se presenta entre las crecientes de periodos de retorno de 100 y 15 años.
- La diferencia media entre los niveles de agua máximos calculados para las crecientes de periodo de retorno de 15 años y 100 años a lo largo del corredor río Cauca es de 0.39 m y la diferencia máxima es 0.69 m. Como se puede observar, a pesar del fuerte incremento en los caudales de estas dos crecientes los niveles de agua no presentan un aumento tan pronunciado; esto se debe a la gran extensión de la llanura de inundación, lo cual permite una mayor laminación de las crecientes.
- Las diferencias de niveles de agua máximos calculados para las crecientes con periodos de retorno de 30 y 15 años y las crecientes con periodos de retorno de 100 y 30 años presentan tendencias o comportamientos muy similares a lo largo del río Cauca en su valle alto (ver Figura 6.31), con promedios entre 0.15 m y 0.20 m.
- En los perfiles hidráulicos a lo largo del río Cauca se observa que las alturas de desbordamiento son muy variables, lo cual se debe a la gran irregularidad que presentan las bancas del cauce, característica muy común en un río aluvial como el Cauca.

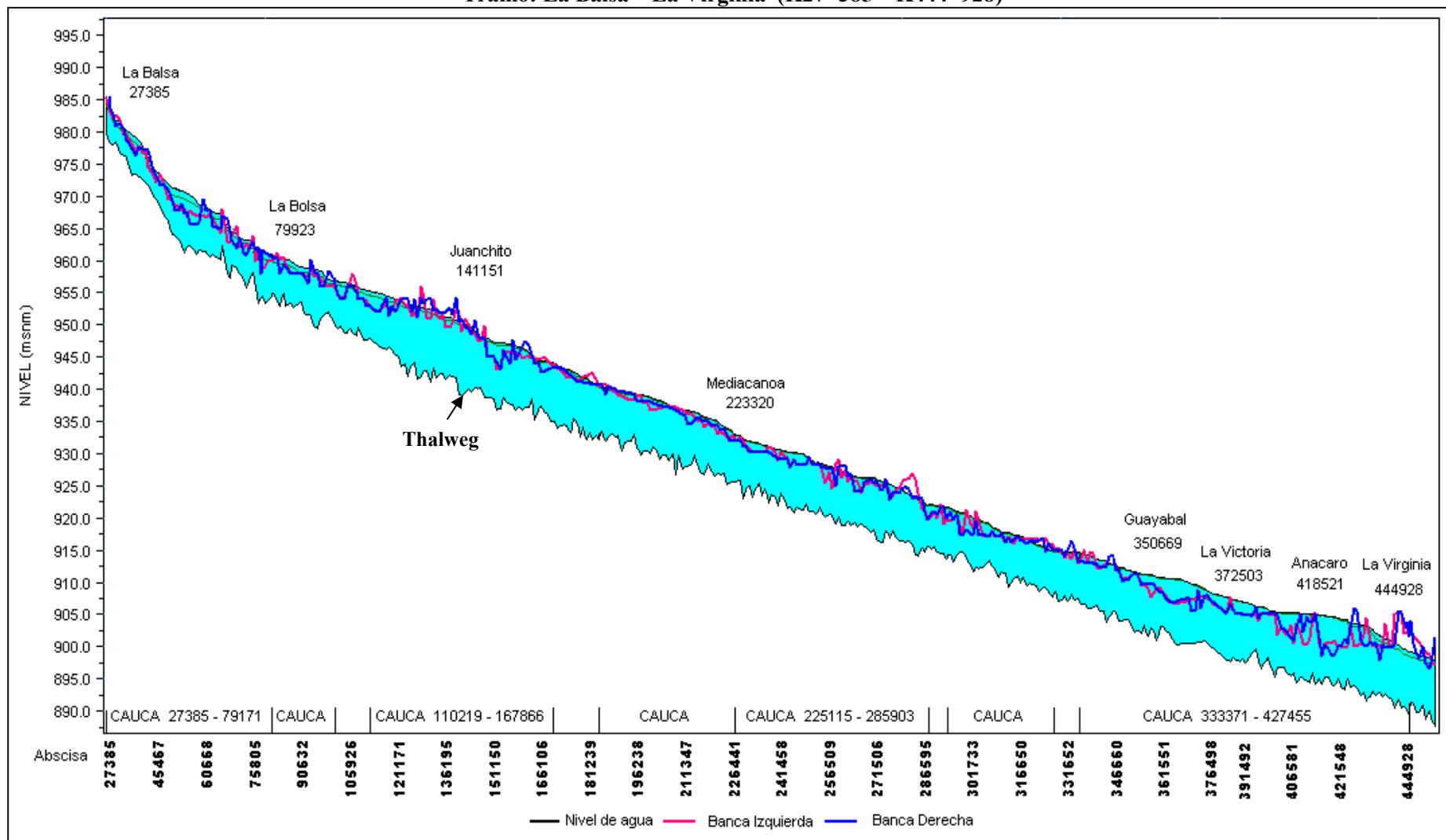
Cuadro 6.14 Niveles máximos y Niveles a banca llena por estación para los diferentes periodos de retorno

Abscisa	Niveles de agua máximos			Nivel Banca llena
	TR 15	TR 30	TR 100	
27385	985.15	985.197	985.267	989.2
79923.1	960.69	960.855	961.193	960.266
141151	949.88	950.087	950.281	950.042
223320	933.61	933.739	933.818	932.47
350669	911.57	911.69	911.894	911.1
372503	909.087	909.1	909.34	907.988
418521	903.55	903.869	904.169	903.287
444928	897.78	898.061	898.297	901.367

Figura 6.4 Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques

Escenario: creciente de Tr=15 años

Tramo: La Balsa – La Virginia (K27+385 – K444+928)



Copia NO controlada CVC

Figura 6.5. Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques
Escenario: creciente de Tr=15 años
Tramo: La Balsa – Juanchito (K27+385 – K141+151)

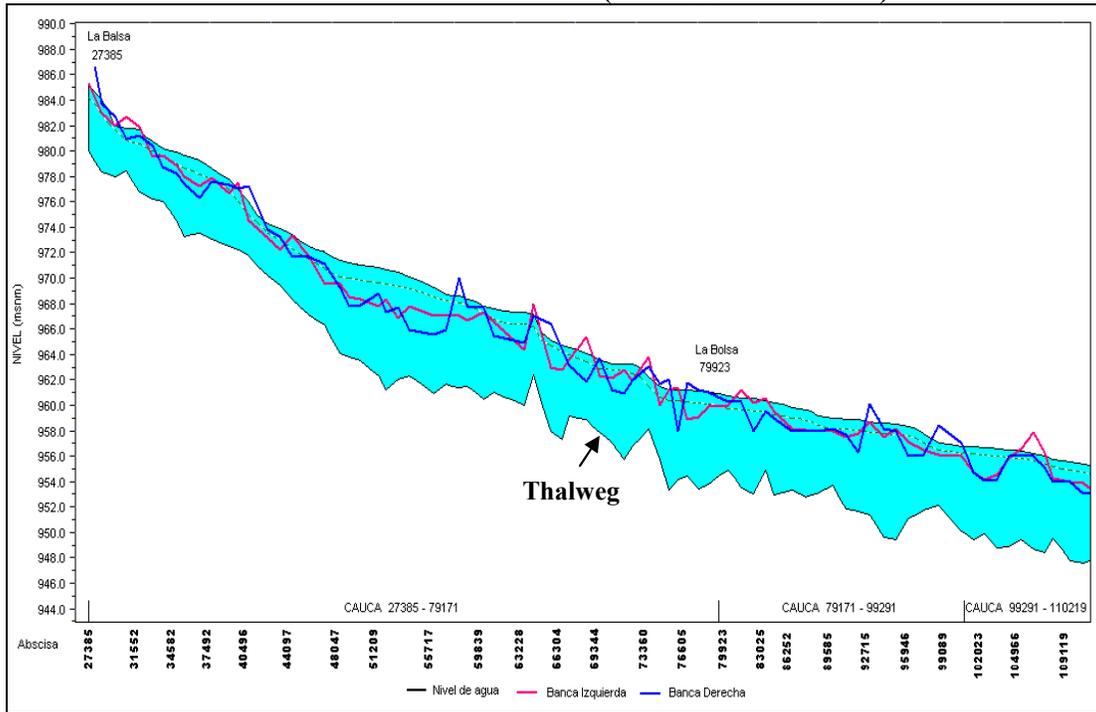


Figura 6.6 Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques
Escenario: creciente de Tr=15 años
Tramo: Juanchito - Mediacanoa (K141+151 – K223+320)

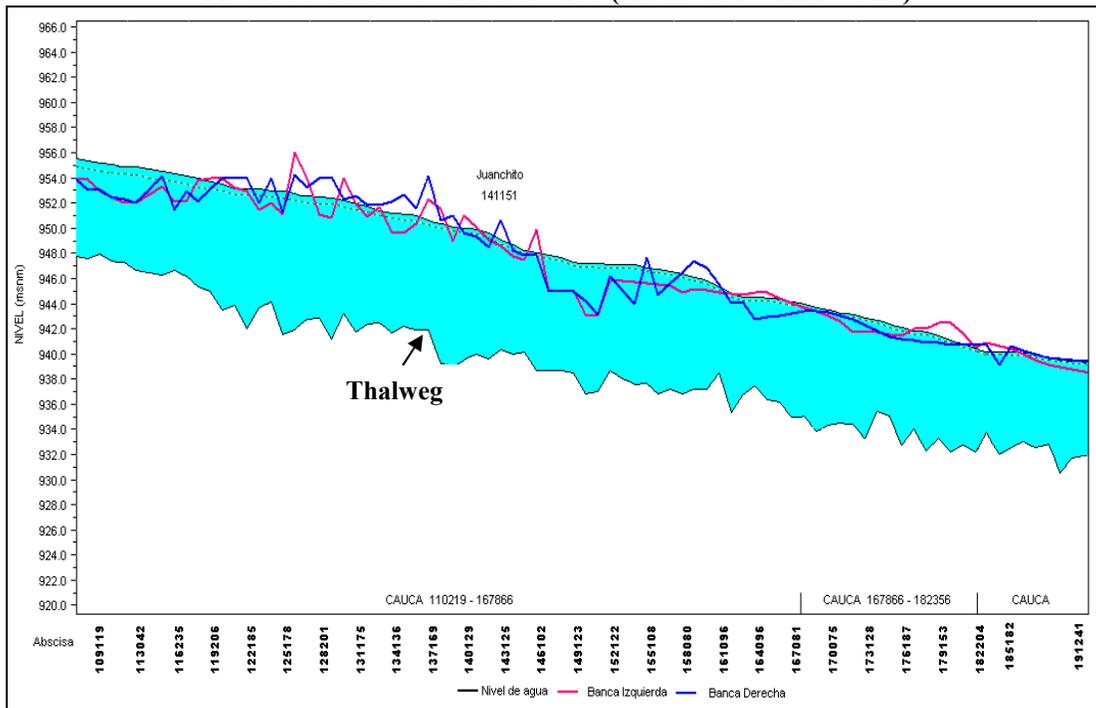


Figura 6.7. Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques
Escenario: creciente de Tr=15 años
Tramo: Mediacanóa – La Victoria (K223+320 – K372+543)

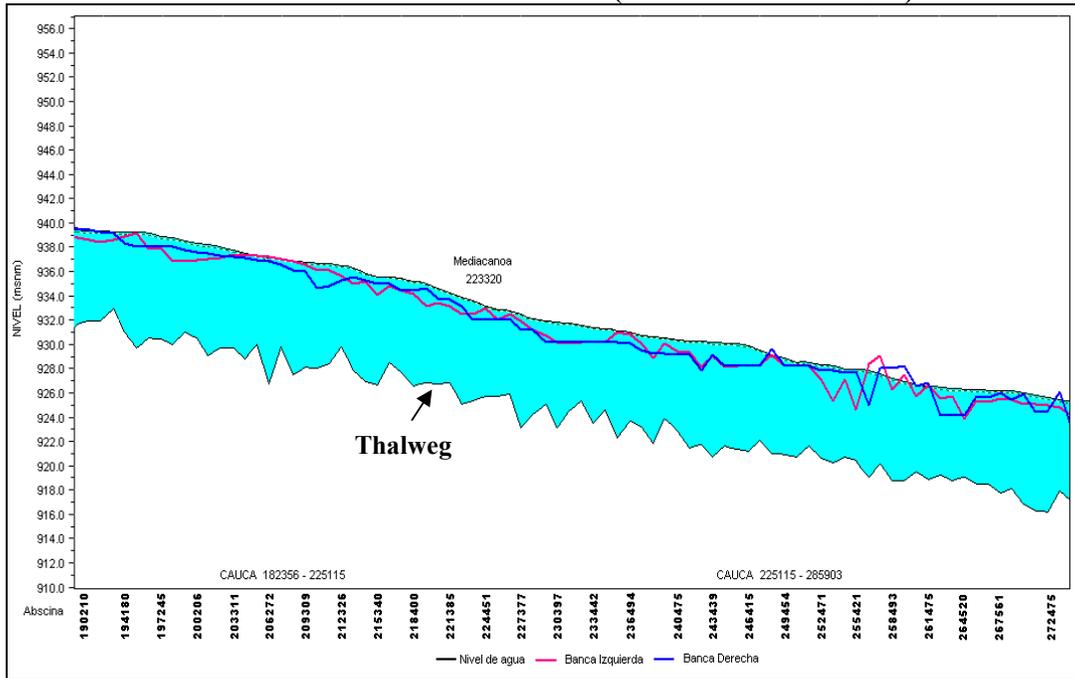


Figura 6.8 Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques
Escenario: creciente de Tr=15 años
Tramo: La Victoria – La Virginia (K372+543 – K444+928)

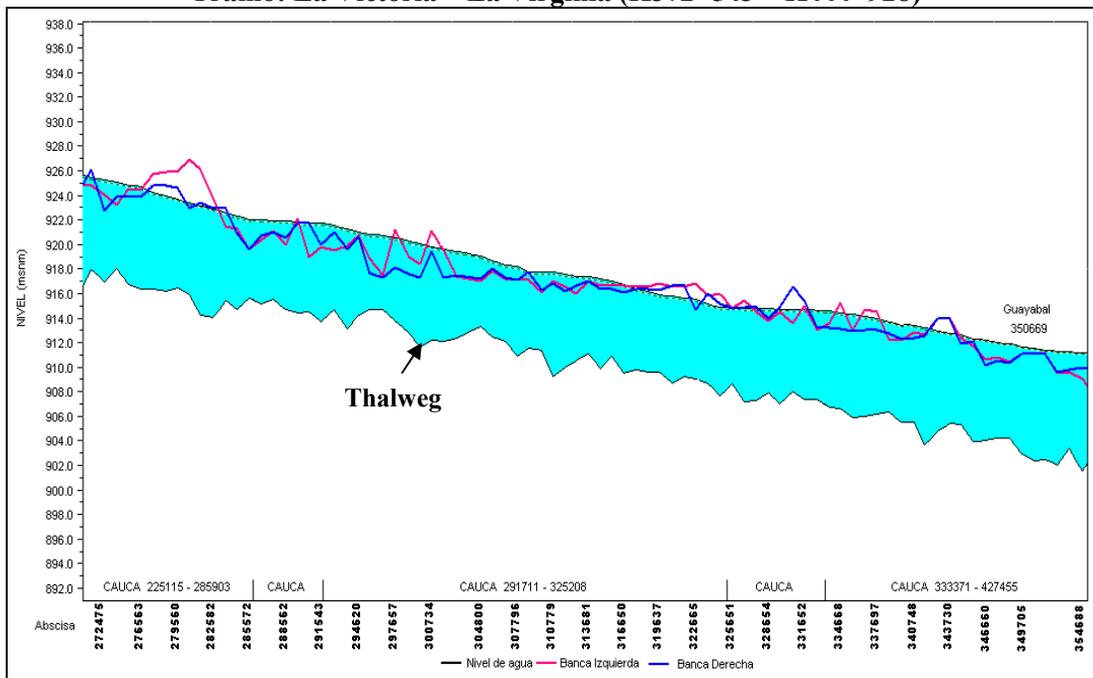
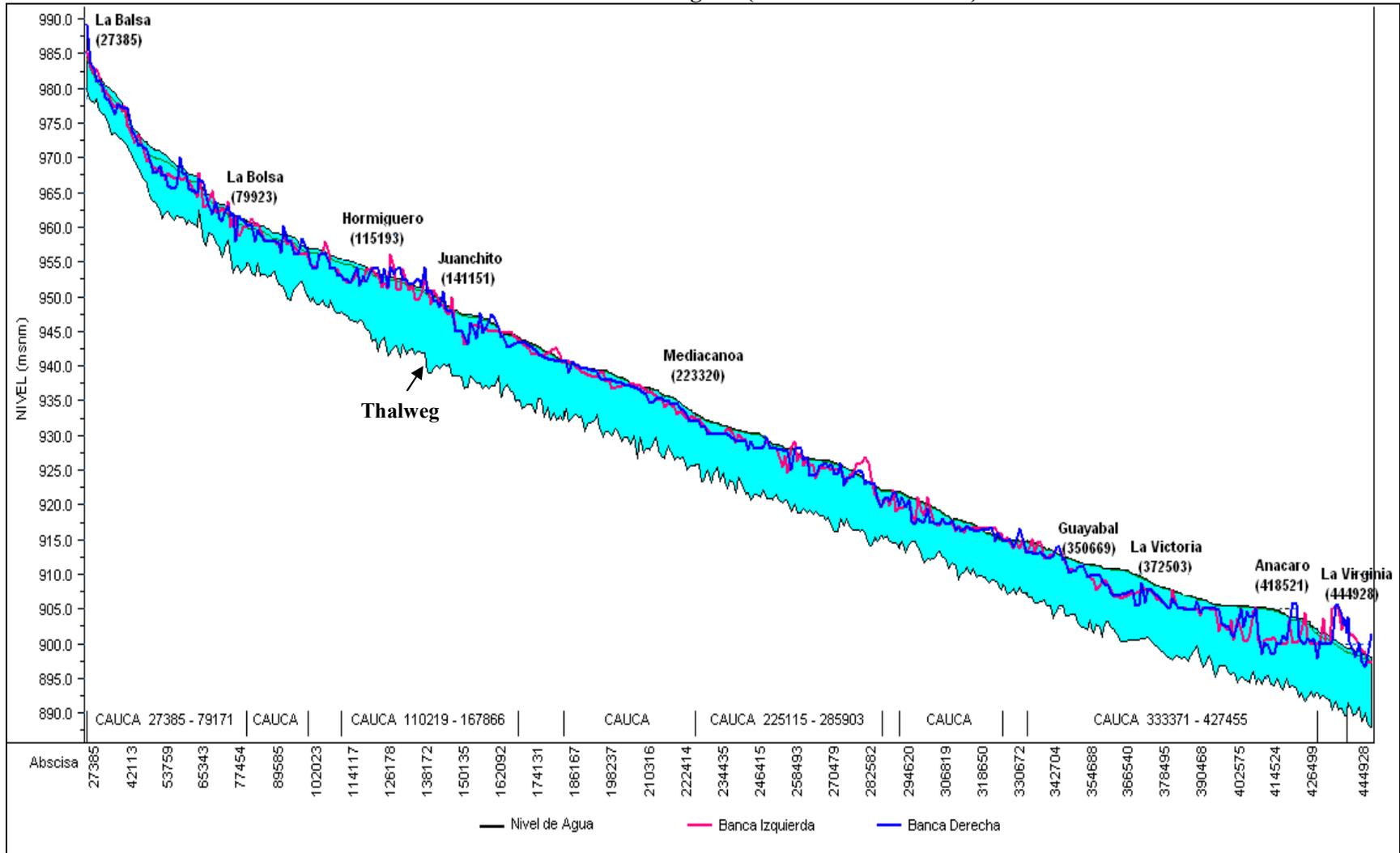


Figura 6.9. Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques
Escenario: creciente de Tr=30 años
Tramo: La Balsa – La Virginia (K27+385 – K444+928)



Copia NO controlada CVC

Figura 6.10. Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques
Escenario: creciente de Tr=30 años
Tramo: La Balsa – Juanchito (K27+385 – K141+151)

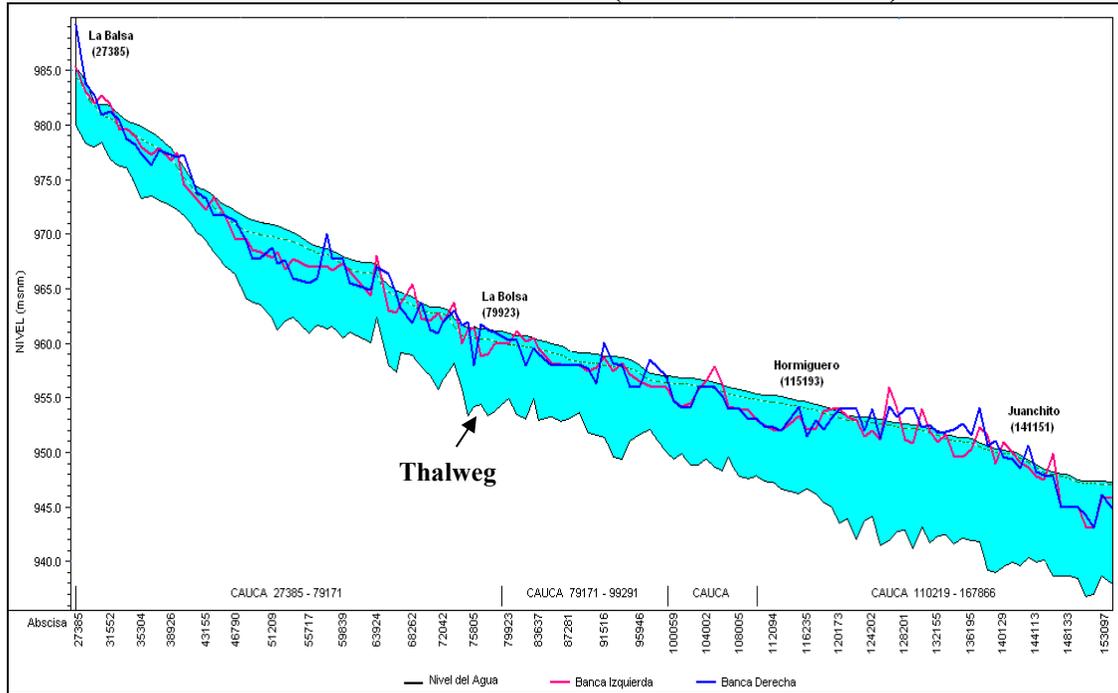


Figura 6.11. Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques
Escenario: creciente de Tr=30 años
Tramo: Juanchito - Mediacaño (K14+1151 – K223+320)

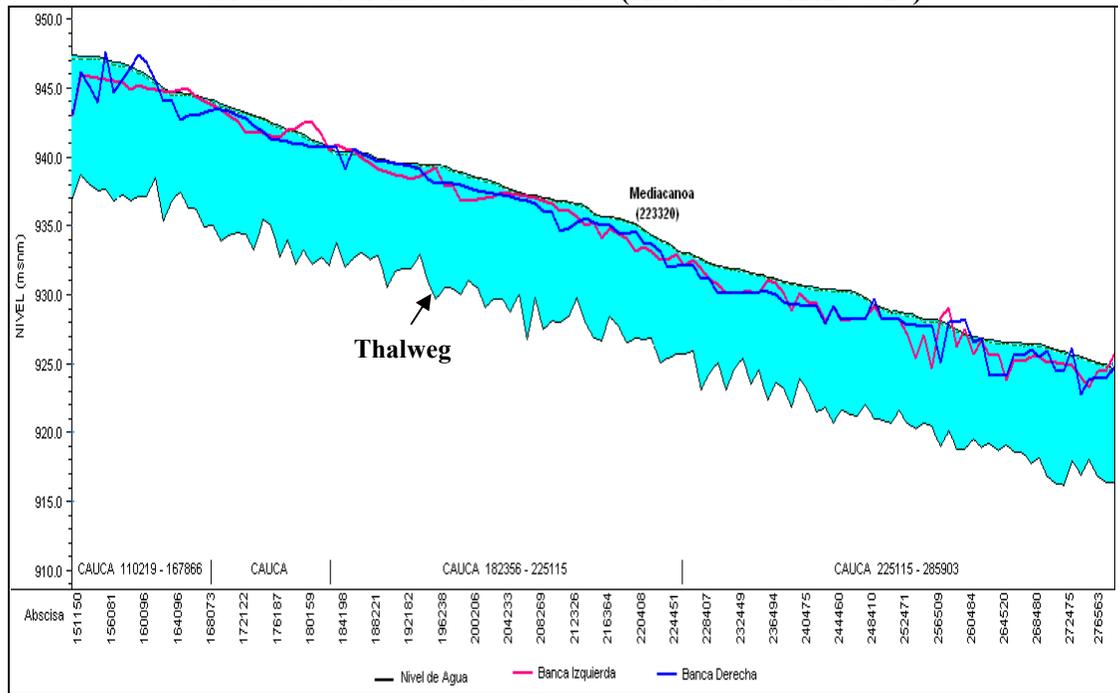


Figura 6.12. Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques
Escenario: creciente de Tr=30 años
Tramo: Mediacanoa – La Victoria (K223+320 – K372+543)

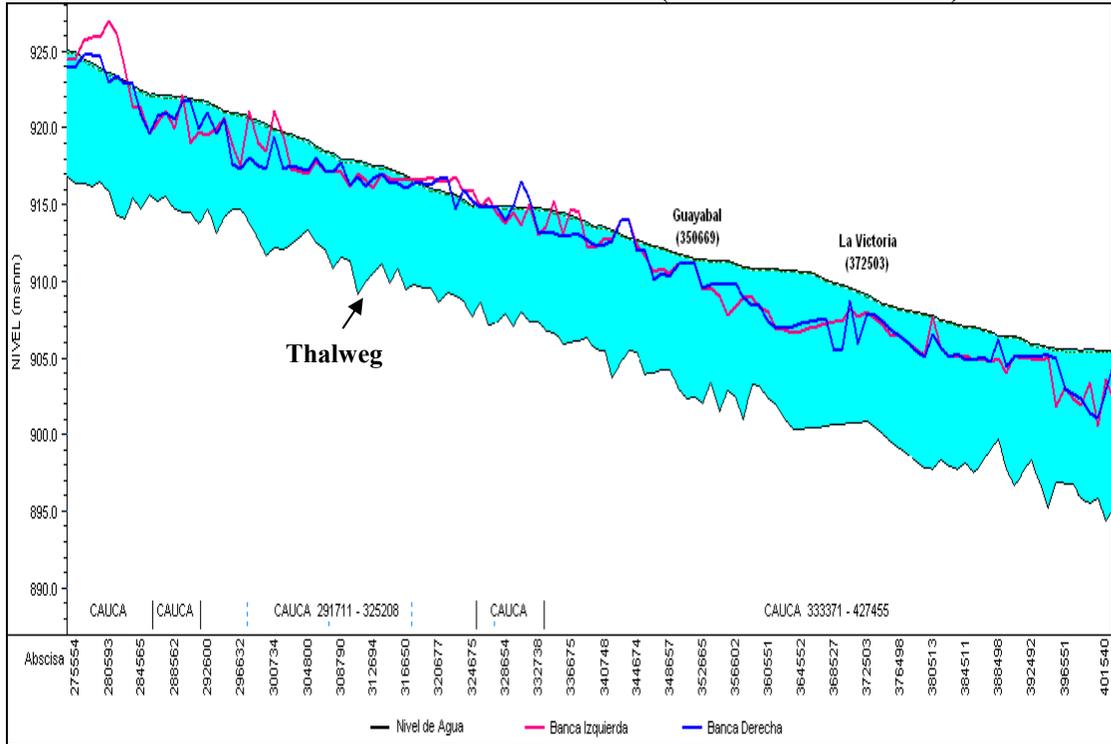


Figura 6.13 Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques
Escenario: creciente de Tr=30 años
Tramo: La Victoria – La Virginia (K372+543 – K444+928)

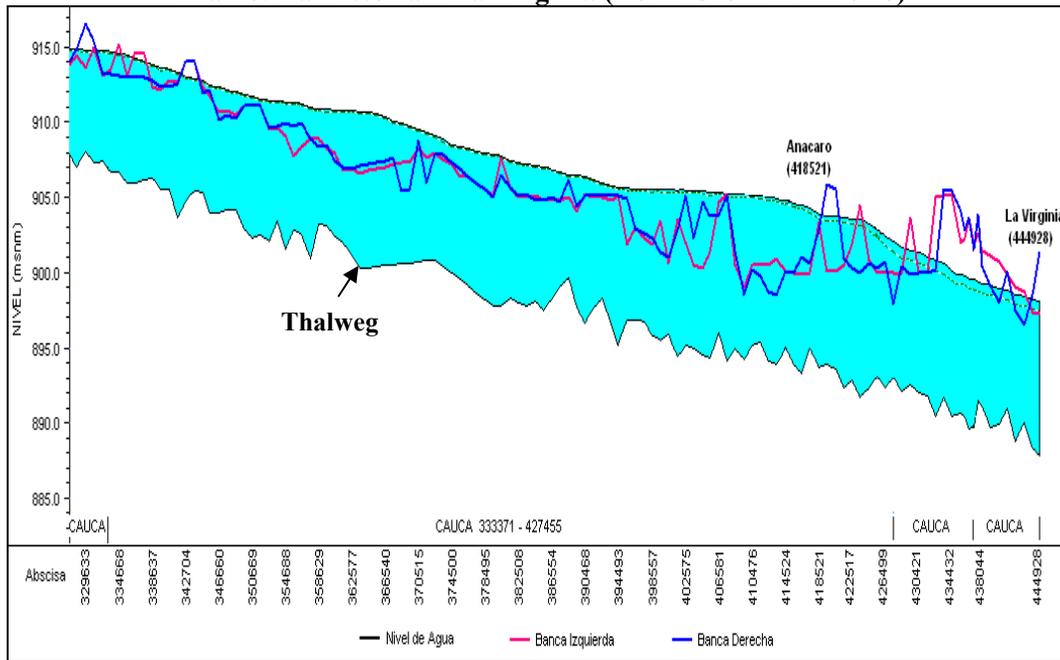
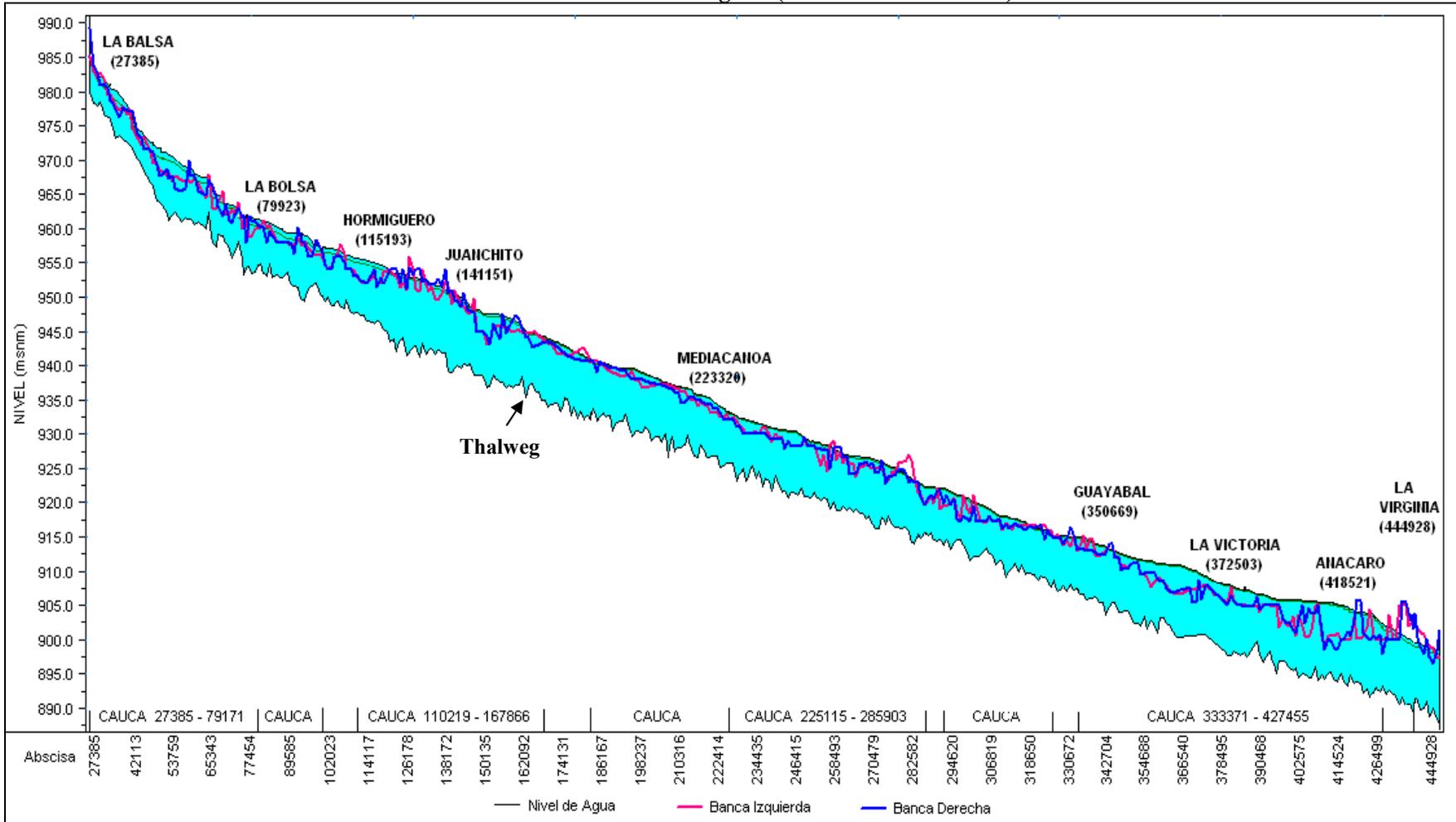


Figura 6.14 Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques
Escenario: creciente de Tr=100 años
Tramo: La Balsa – La Virginia (K27+385 – K444+928)



Copia No controlada CVC

Figura 6.15 Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques
Escenario: creciente de Tr=100 años
Tramo: La Balsa – Juanchito (K27+385 – K141+151)

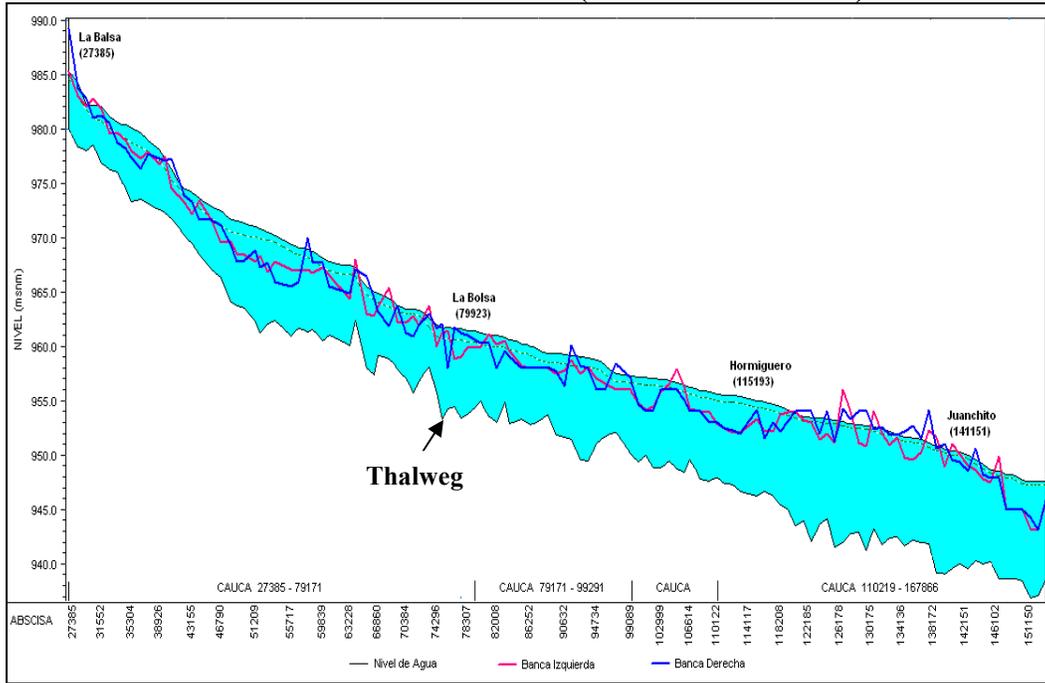


Figura 6.16 Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques
Escenario: creciente de Tr=100 años
Tramo: Juanchito - Mediacanoa (K141+151 – K223+320)

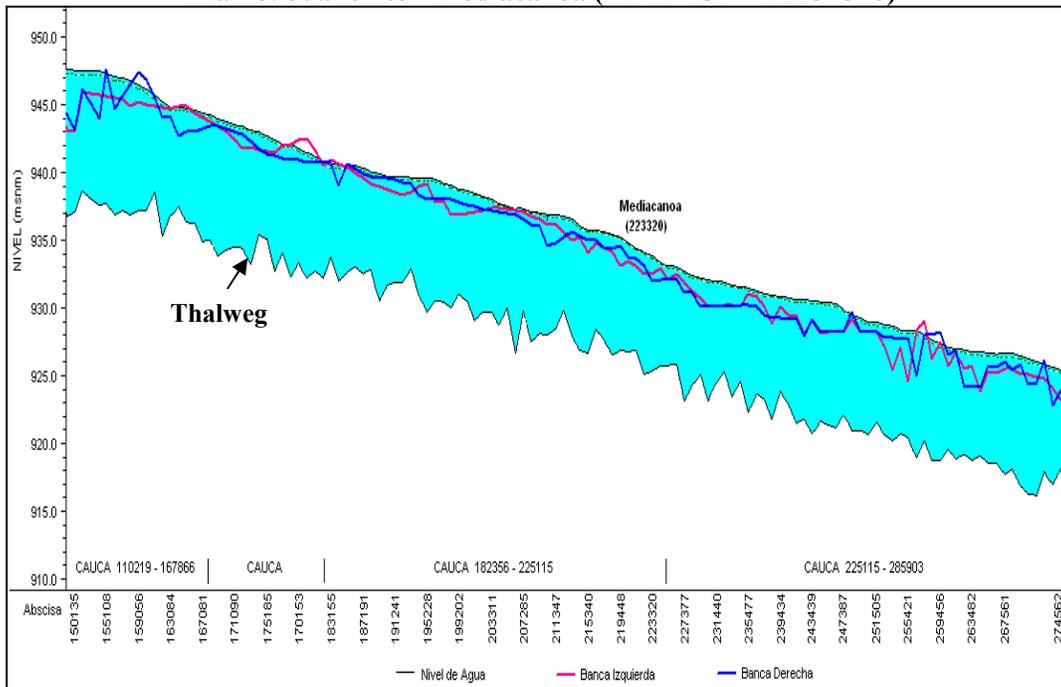


Figura 6.17 Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques
Escenario: creciente de Tr=100 años
Tramo: Mediacaño – La Victoria (K223+320 – K372+543)

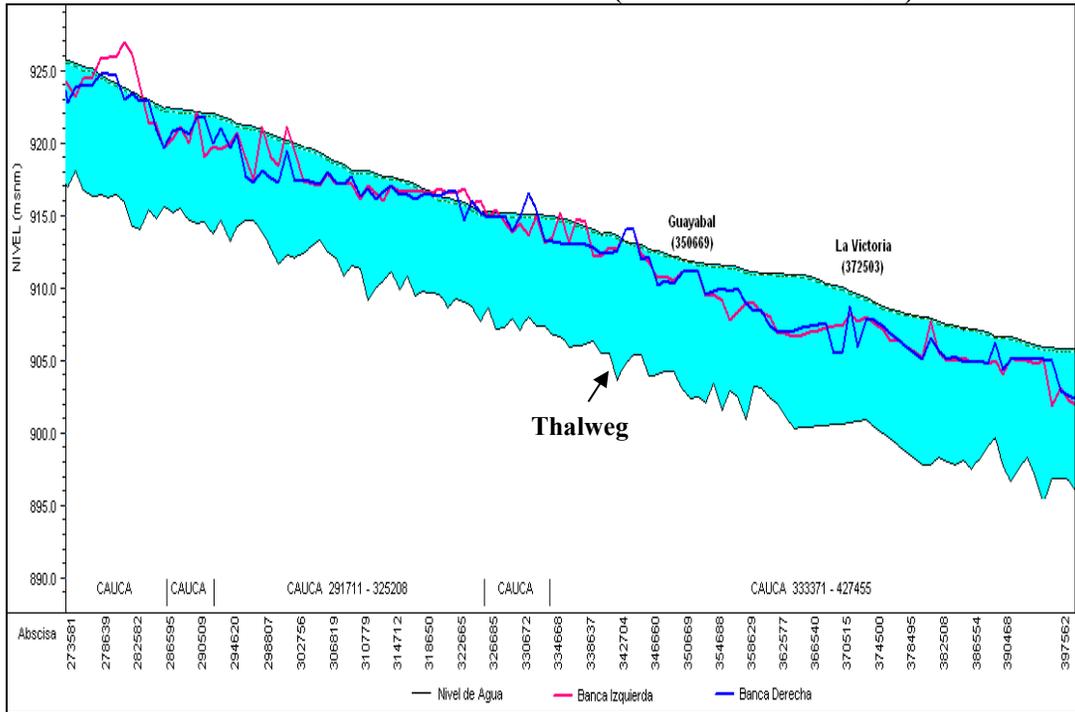


Figura 6.18 Niveles de agua en el Río Cauca para el escenario sin diques
Escenario: creciente de Tr=100 años
Tramo: La Victoria – La Virginia (K372+543 – K444+928)

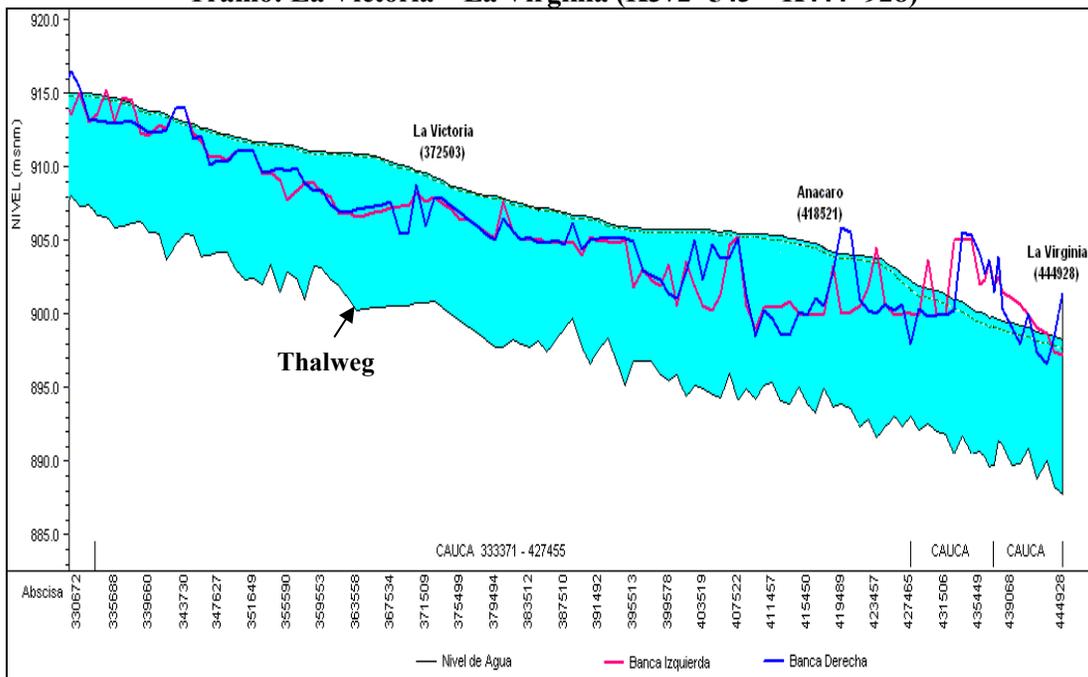


Figura 6.19 Caudal de agua calculado en el Río Cauca
Alternativa: sin diques marginales
Escenarios: Periodos de retorno 15, 30 y 100 años
Estación: La Bolsa

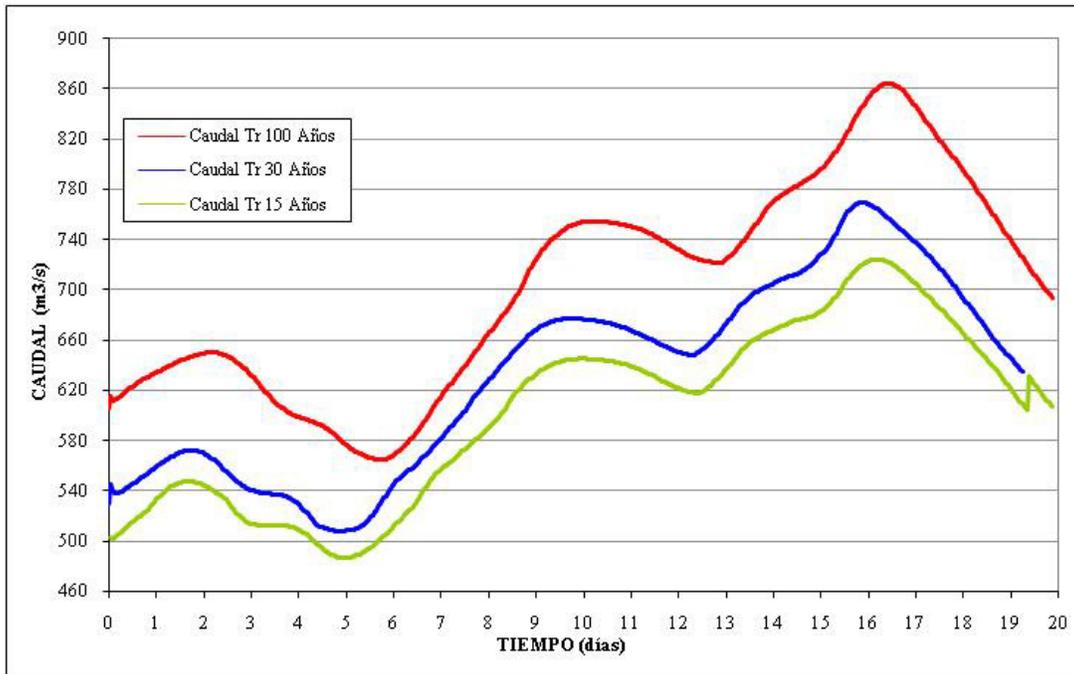


Figura 6.20 Niveles de agua calculados en el Río Cauca
Alternativa: sin diques marginales
Escenarios: Periodos de retorno 15, 30 y 100 años
Estación: La Bolsa

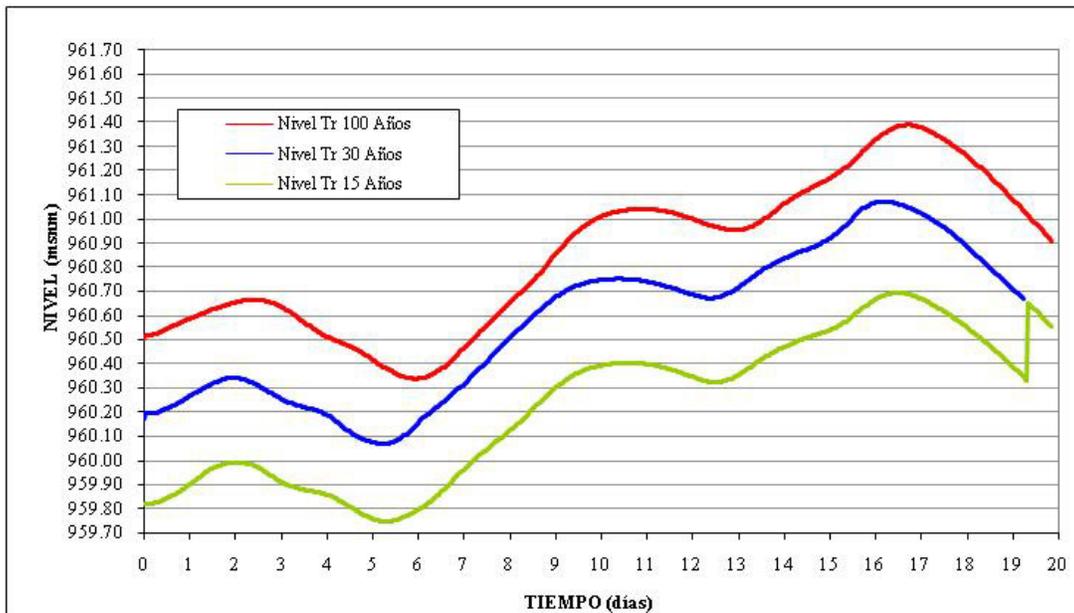


Figura 6.19 Caudales de agua calculados en el Río Cauca
Alternativa: sin diques marginales
Escenarios: Periodos de retorno 15, 30 y 100 años
Estación: Juanchito

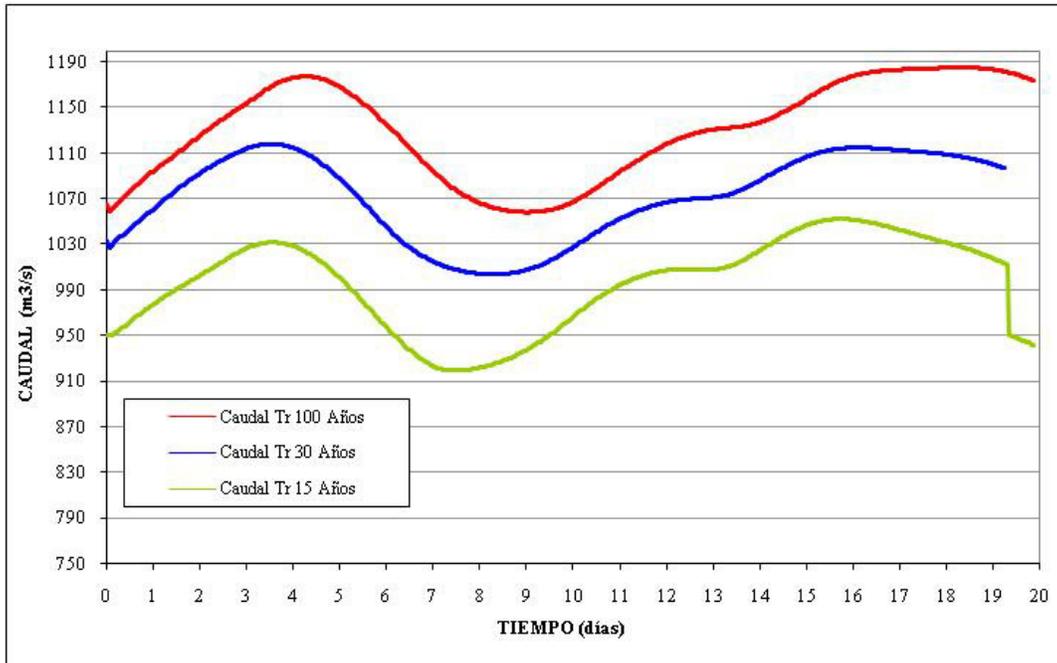


Figura 6.20 Niveles de agua calculados en el Río Cauca
Alternativa: sin diques marginales
Escenarios: Periodos de retorno 15, 30 y 100 años
Estación: Juanchito

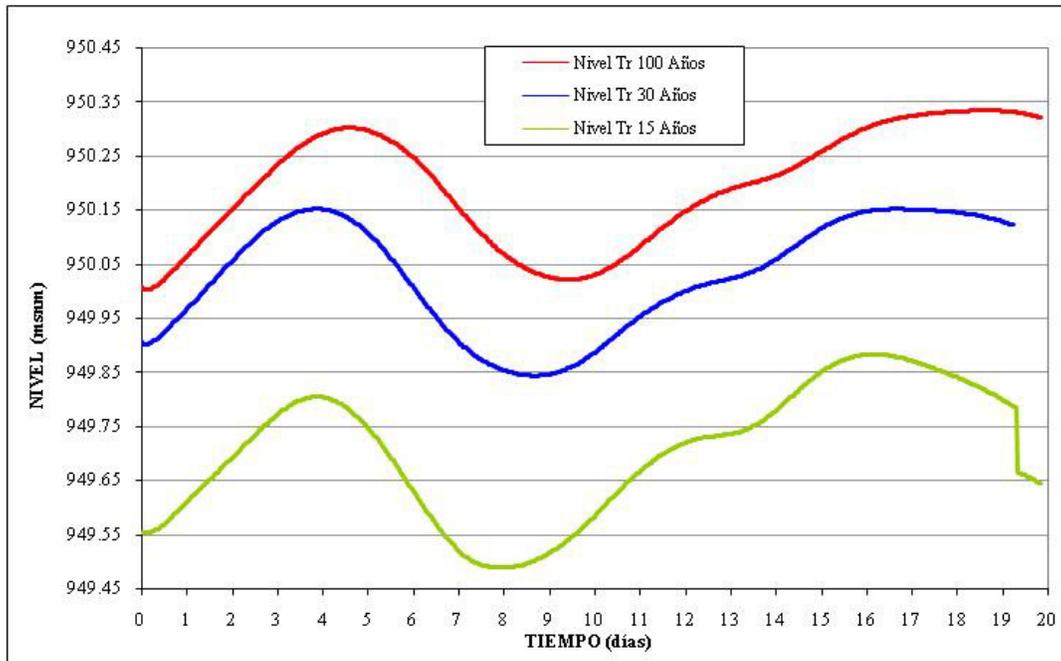


Figura 6.21 Caudales de agua calculados en el Río Cauca
Alternativa: sin diques marginales
Escenarios: Periodos de retorno 15, 30 y 100 años
Estación: Mediacanoa

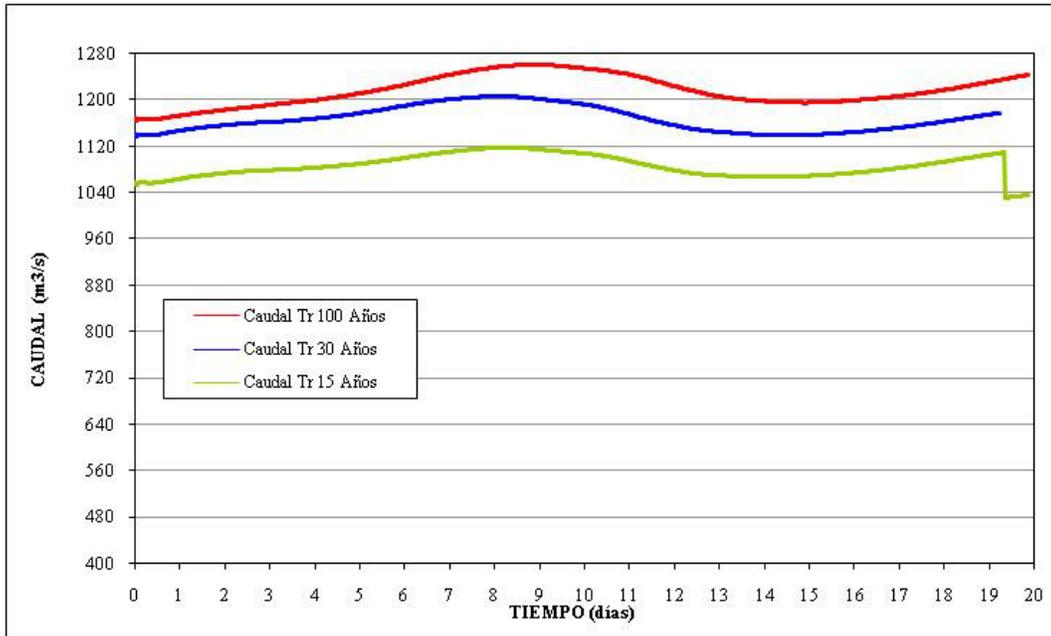


Figura 6.22 Niveles de agua calculados en el Río Cauca
Alternativa: sin diques marginales
Escenarios: Periodos de retorno 15, 30 y 100 años
Estación: Mediacanoa

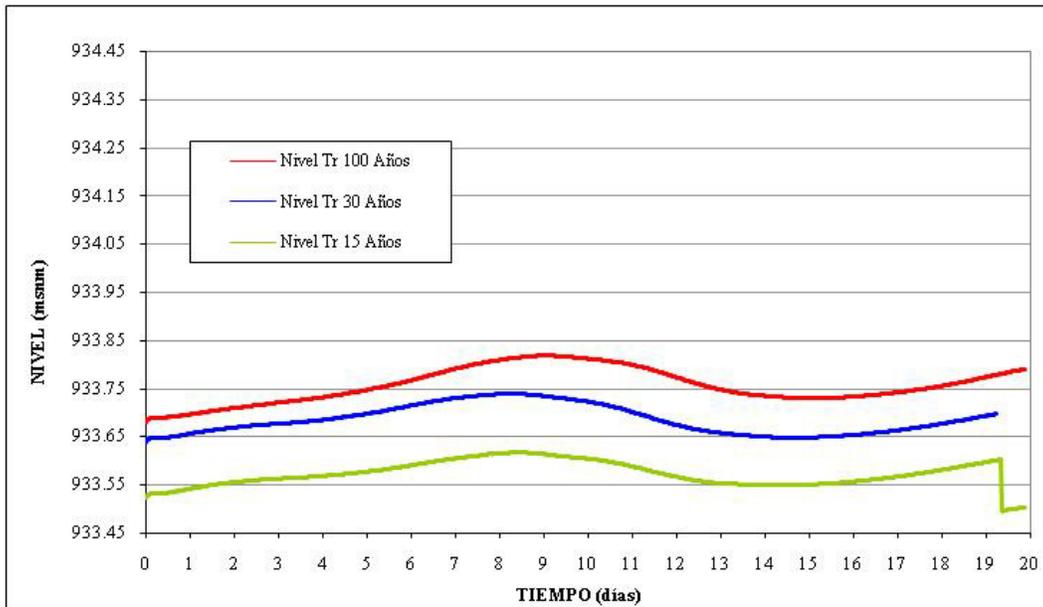


Figura 6.23 Caudales de agua calculados en el Río Cauca
Alternativa: sin diques marginales
Escenarios: Periodos de retorno 15, 30 y 100 años
Estación: Guayabal

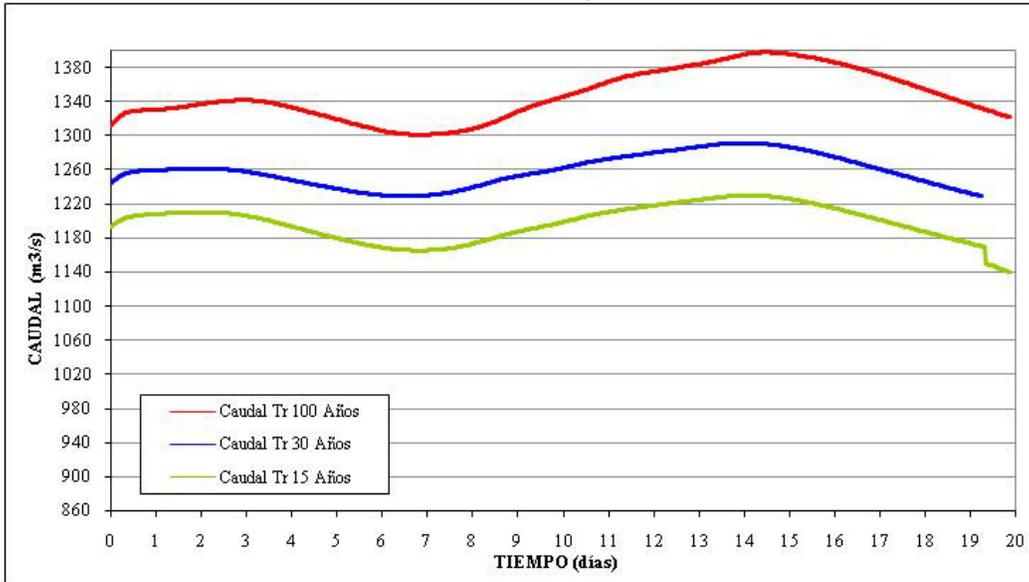


Figura 6.24. Niveles de agua calculados en el Río Cauca
Alternativa: sin diques marginales
Escenarios: Periodos de retorno 15, 30 y 100 años
Estación: Guayabal

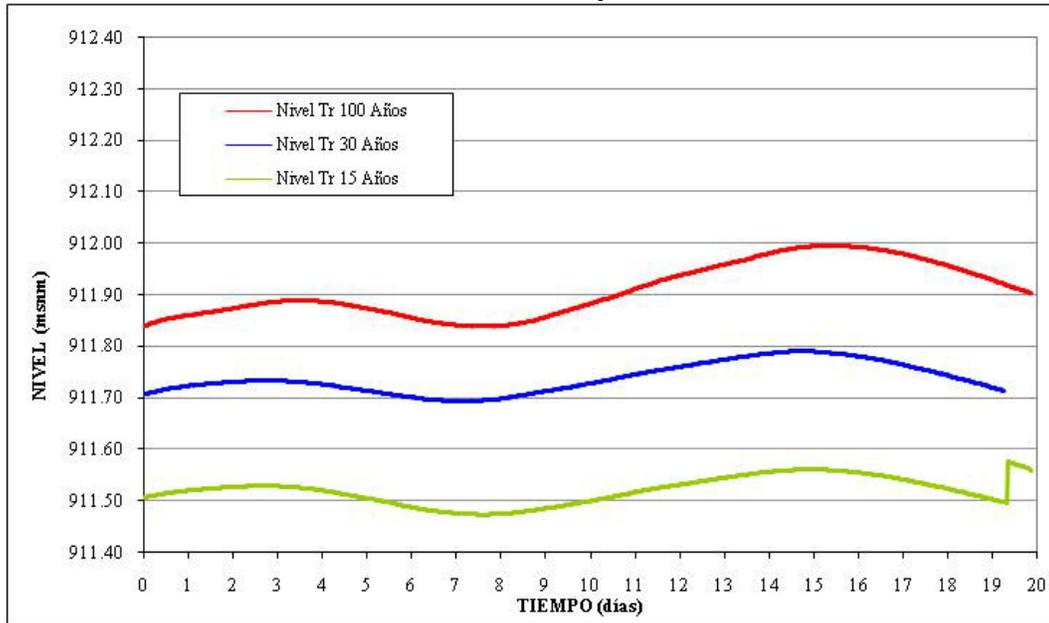


Figura 6.27 Caudales de agua calculados en el Río Cauca
Alternativa: sin diques marginales
Escenarios: Periodos de retorno 15, 30 y 100 años
Estación: La Victoria

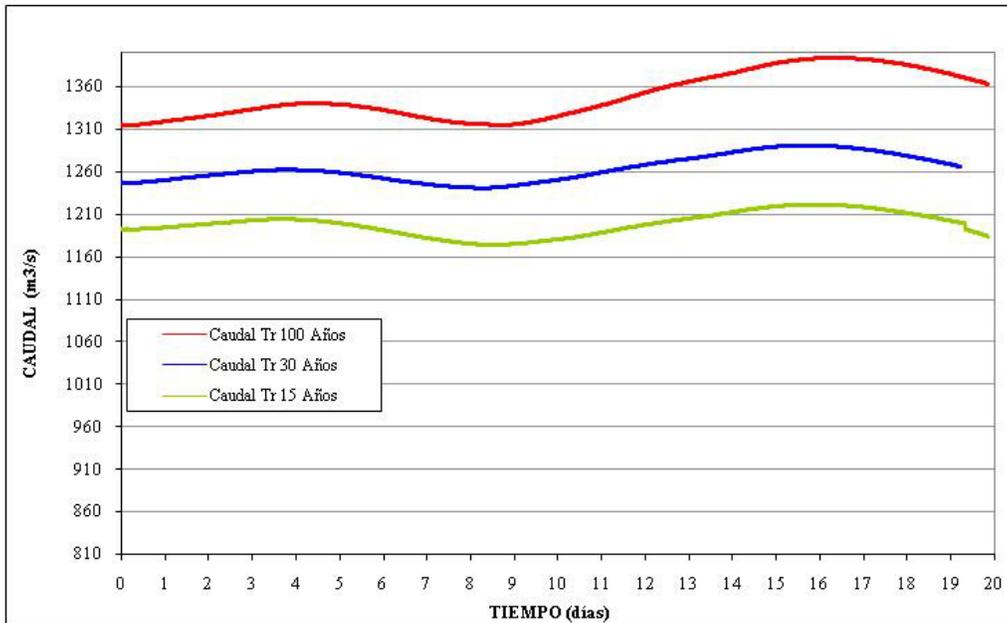


Figura 6.28 Niveles de agua calculados en el Río Cauca
Alternativa: sin diques marginales
Escenarios: Periodos de retorno 15, 30 y 100 años
Estación: La Victoria

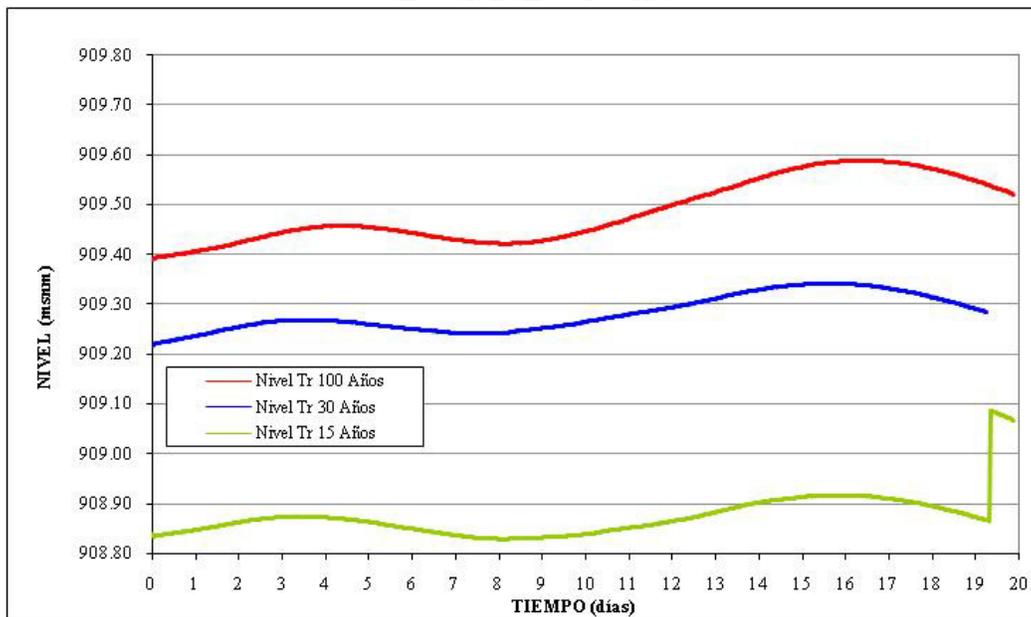


Figura 6.29 Caudales de agua calculados en el Río Cauca
Alternativa: sin diques marginales
Escenarios: Periodos de retorno 15, 30 y 100 años
Estación: Anacaro

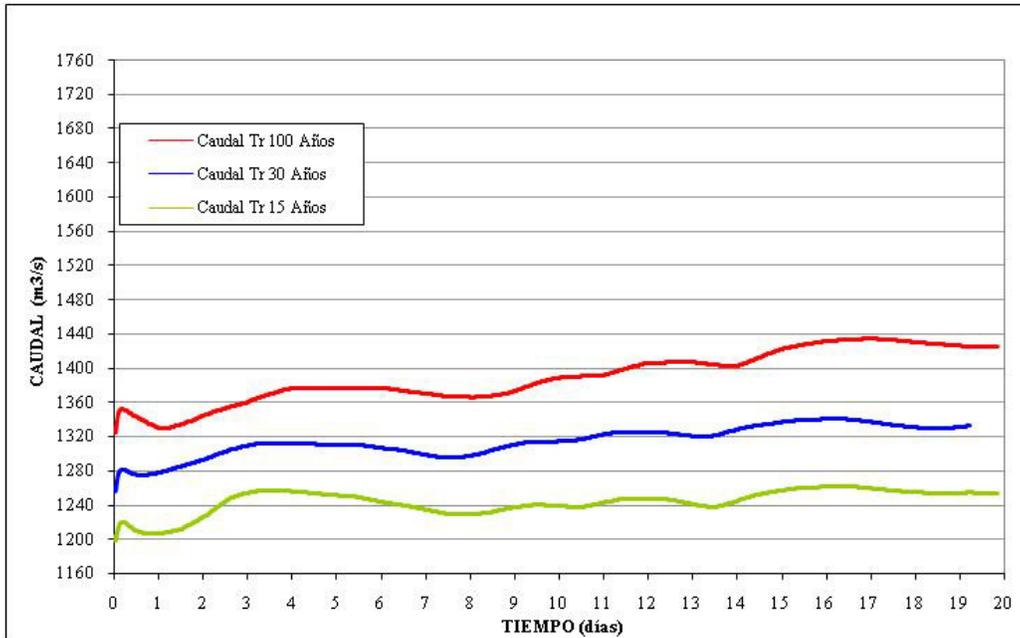


Figura 6.30 Niveles de agua calculados en el Río Cauca
Alternativa: sin diques marginales
Escenarios: Periodos de retorno 15, 30 y 100 años
Estación: Anacaro

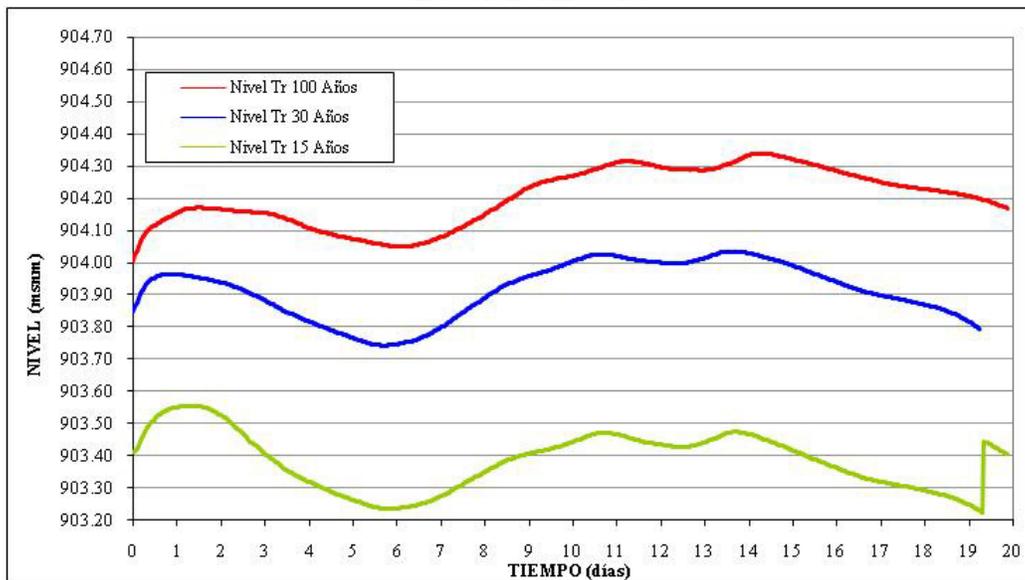
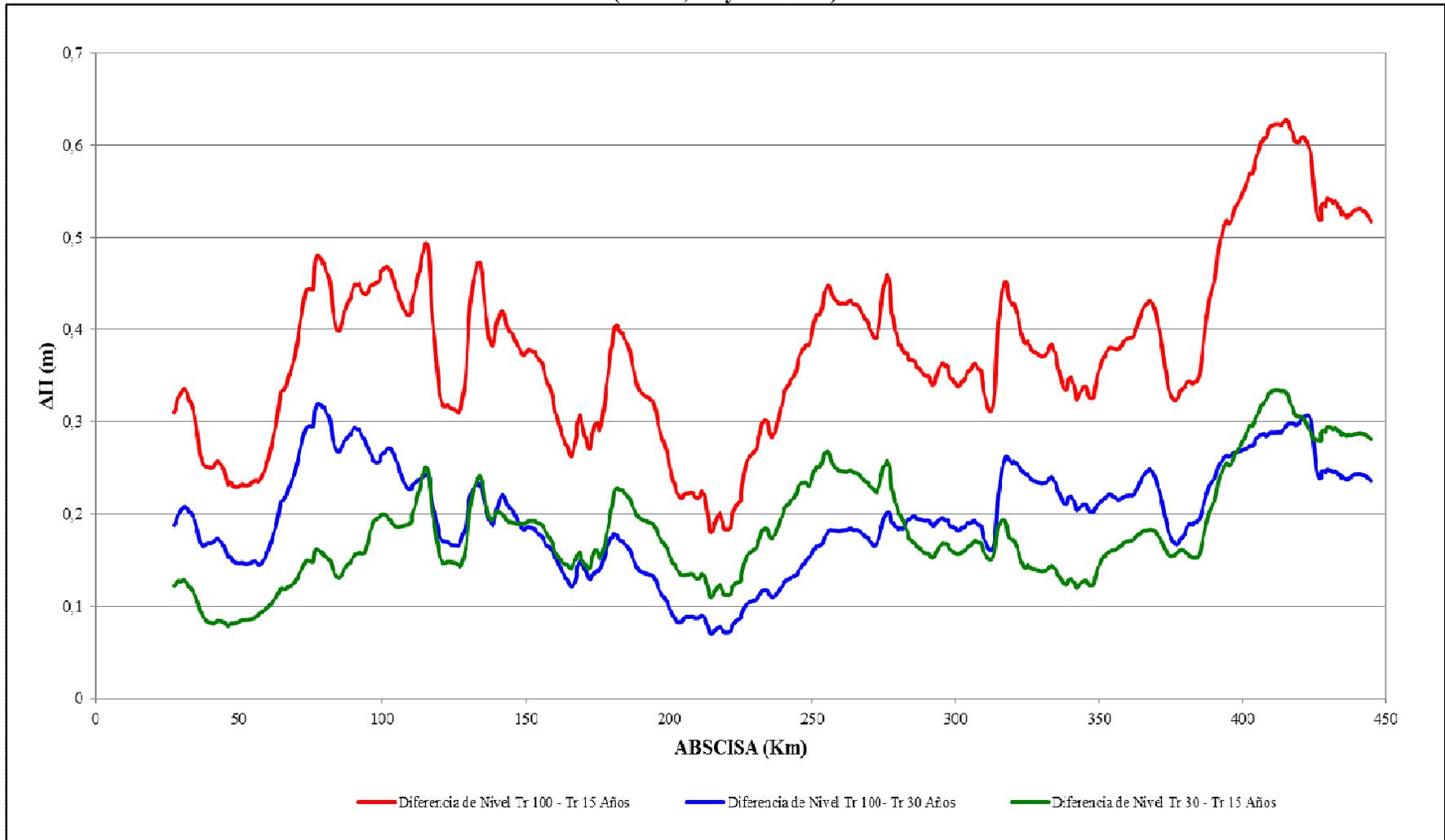


Figura 6.31 Variación máxima de los Niveles de agua calculados en el río Cauca para la alternativa sin diques marginales (TR 15, 30 y 100 años)



6.4 MAPAS DE INUNDACIONES

Con base en los resultados de la modelación matemática para las crecientes en el río Cauca con periodos de retorno de 15, 30 y 100 años (bajo el supuesto de que no existiesen diques marginales de protección) y en el modelo digital de elevaciones del terreno, se implementó la metodología descrita previamente para generar los mapas de inundaciones causadas por los desbordamientos del río Cauca. Los mapas de inundaciones generados para las distintas crecientes consideradas se presentan en los Planos anexos.

6.5 MAPAS DE AMENAZA

Los mapas de amenaza por inundaciones causadas por los desbordamientos del río Cauca durante las crecientes se generaron a partir de los mapas de inundaciones obtenidos anteriormente e implementando la metodología para la clasificación de la amenaza por inundaciones establecida en este capítulo, la cual considera los diferentes niveles de amenaza en función de la magnitud o intensidad de la inundación y la frecuencia o probabilidad de ocurrencia de la misma. Los mapas de zonificación de la amenaza por inundaciones causadas por los desbordamientos del río cauca en su valle alto se presentan en los Planos anexos.

7 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA LAGUNA DE SONSO EN LA HIDRODINÁMICA DEL RÍO CAUCA

7.1 INTRODUCCIÓN

La Laguna de Sonso ha sufrido en las últimas décadas diversas intervenciones antrópicas que han alterado su condición natural y sus diferentes funciones. Entre otras, se han modificado sus conexiones con el río Cauca y reducido su extensión superficial, afectando con ello una de sus más importantes funciones como es la de regular o laminar las crecientes del río. La construcción de diques perimetrales para la adecuación de tierras con fines agrícolas, el taponamiento de las acequias naturales, como el caso del caño Carlina que conectaba al norte la laguna con el río, para la construcción de la vía Buga – Mediacanoa y la descarga de aguas residuales son las transformaciones que han generado un rápido proceso de colmatación, proliferación de vegetación acuática y reducción en la velocidad del flujo al interior de la laguna; todas estas intervenciones han ocasionado la degradación de la calidad del agua y la reducción de su capacidad de almacenamiento (Bocanegra et al., 2008, ASOYOTOCO, 2007).

Todas estas intervenciones, además de influir en la hidrodinámica del río Cauca, alteraron la variabilidad y la diversidad del ecosistema de la laguna de Sonso. En 1978, la laguna fue declarada Reserva Natural mediante el Acuerdo 017 de la CVC y el Decreto Presidencial 2887 y en el año 2003 como una “zona importante para la conservación de aves” por el Instituto Von Humboldt y BirdLife International (AICA-IBA) (Gestión y Ambiente, 2005).

En este capítulo se realizó, mediante la modelación matemática, un análisis de los posibles efectos sobre la hidrodinámica de la laguna y los niveles de agua en el río Cauca de 34 alternativas diferentes, considerando tres tipos de conexiones río-laguna (con diferentes configuraciones de anchos y niveles de la estructura de entrada o conexión con la laguna), así: 1) El canal Caño Nuevo en la zona norte de la laguna (K223+037), 2) Una conexión en la zona sur de la laguna (en la abscisa K206+272) y 3) La combinación de estas dos conexiones, operando de manera simultánea y permanente. La modelación se realizó considerando que se tienen, a lo largo del corredor río Cauca, diques marginales de protección distanciados 60 m del cauce del río, tal como lo establece el Acuerdo 052 de 2011 de la CVC, y la ocurrencia de una creciente en el río con un periodo de retorno de 30 años.

7.2 CONDICIÓN ACTUAL DE LA INTERACCIÓN RÍO CAUCA – LAGUNA SONSO

Cuando no existía ninguna intervención antrópica en la laguna de Sonso, ésta laminaba de forma natural las crecientes del río Cauca, permitiendo el ingreso de las aguas desbordadas por su extremo sur y, luego, retornarlas por su parte norte a través del Caño Carlina (ver Figura 7.1). Sin embargo, estas condiciones comenzaron a modificarse por primera vez en el año 1955, cuando un propietario de tierras aledañas a la laguna y sin ningún permiso de la autoridad ambiental construyó un dique en el extremo sur de la laguna, el cual

interrumpió la comunicación natural río – laguna que existía durante las épocas de invierno. A finales de los años sesenta se construyó un canal, denominado Caño Nuevo, cerca al extremo norte de la laguna (ubicado unos doscientos metros aguas arriba del puente de Mediacanoa) para permitir el ingreso y salida de las aguas provenientes del río Cauca. En los años setentas, el Caño Carlina fue taponado para la construcción de la vía Buga – Mediacanoa, agravando aún más la situación (Gestión y Ambiente, 2005). Actualmente la única comunicación que tiene la laguna de Sonso con el río Cauca es a través del canal Caño Nuevo.

Con el fin de recuperar o mejorar las condiciones de la laguna, en los últimos años se han venido realizando diferentes estudios. El último fue elaborado por la firma Hidromecánicas Ltda. en los años 2011-2012 con la finalidad de mejorar sus condiciones hidrodinámicas. En este estudio se recomendó ampliar el ancho del canal Caño Nuevo a 10 m y establecer el nivel de conexión del canal con la laguna en la cota 930.65 msnm.

Figura 7.1 Comunicación actual entre el río Cauca y la Laguna de Sonso



7.3 ALTERNATIVAS PLANTEADAS

Con el fin de evaluar los posibles efectos sobre la hidrodinámica de la laguna y los niveles de agua en el río Cauca se plantearon y simulaban numéricamente 34 alternativas diferentes, en las cuales se consideraron diferentes tipos de conexiones río-laguna. Básicamente se analizaron tres posibles conexiones, así: (i) una conexión en el extremo norte (es decir, la conexión actual mediante el canal Caño Nuevo, en la abscisa K223+037), (ii) una conexión en el extremo sur de la laguna, en la abscisa K206+272; y, (iii) la combinación de las dos conexiones anteriores, operando de manera simultánea y permanente, buscando con ello mejorar la hidrodinámica al interior de la laguna.

La modelación se realizó considerando que a lo largo del corredor río Cauca se tienen los diques marginales de protección distanciados 60 m del cauce del río, tal como lo establece el Acuerdo 052 de 2011 de la CVC, y la ocurrencia de una creciente en el río con un periodo de retorno de 30 años. La batimetría utilizada corresponde a la información disponible al momento de realizar los estudios, es decir, las batimetrías realizadas en los años 2000 y 2005.

El resumen de las 34 alternativas planteadas y evaluadas se presenta en el Cuadro 7.1. Del primer al quinto escenario se consideró una sola conexión en la zona norte de la laguna, abscisa (K223+037) del río Cauca; esta conexión representa el canal actual de Caño Nuevo, el cual tiene una longitud de 2140 m. En estas cinco alternativas se modificó el ancho del canal de conexión, adoptando anchos de 30 m, 60 m, 100 m, 500 m y 1000 m.

De la alternativa 6 a la alternativa 26 se consideró la existencia de una sola conexión localizada en la zona sur de la laguna, en la abscisa (K206+272) del río Cauca, variando en todas ellas el ancho y el nivel del canal de entrada o conexión con la laguna. Estas alternativas se describen a continuación:

Las alternativas 6, 7 y 8 contempla un ancho en la entrada de la conexión sur de 10 m y tres niveles de fondo de la misma: 935.00 msnm (1.83 m por debajo del nivel banca llena), 936.83 msnm (justamente en el nivel de banca llena) y 938.16 msnm (1.33 m por encima del nivel de banca llena).

En las alternativas 9 a 17 se adoptó un nivel fijo en el canal de entrada a la laguna en la cota 935.00 msnm (es decir, 1.83 m por debajo del nivel de banca llena) y anchos del canal de entrada de 1 m, 5 m, 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 60 m, 100 m y 1000 m.

En las alternativas 18 a 26 se adoptó un nivel fijo en el canal de entrada a la laguna en la cota 936.83 (es decir, igual al nivel de banca llena) y anchos del canal de entrada de 1 m, 5 m, 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 60 m, 100 m y 1000 m.

En las alternativas 27 a 34 se consideraron las dos conexiones anteriores, operando simultáneamente, localizadas en los extremos sur y norte de la laguna (abscisas K206+272 y K223+037), considerando en todas ellas el canal Caño Nuevo en su condición actual (ampliado recientemente a 10 metros de ancho y nivel en su conexión con el río Cauca en la cota 928.85 msnm y en el otro extremo, en la conexión con la laguna, en la cota 930.65 msnm).

En las alternativas 27 a 30 se adoptó un nivel fijo en el canal de entrada a la laguna en la cota 938.33 msnm (es decir, 1.50 m sobre el nivel de banca llena) y anchos del canal de entrada de 10 m, 30 m, 60 m y 100 m.

Finalmente, en las alternativas 31 a 34 se adoptó un nivel fijo en el canal de entrada a la laguna en la cota 936.83 msnm (igual al nivel de banca llena) y anchos del canal de entrada de 10 m, 30 m, 60 m y 100 m.

7.4 ESQUEMATIZACIÓN E IMPLEMENTACIÓN EN EL MODELO DE LAS ALTERNATIVAS PLANTEADAS

Para realizar los diferentes análisis de las alternativas estructurales propuestas se tomó como base el modelo construido en desarrollo de este estudio y considerando la existencia de diques marginales de protección del río Cauca a una distancia de 60 m del cauce principal, como lo establece el Acuerdo 052 de 2011 de la CVC. La laguna de Sonso fue esquematizada mediante secciones transversales extraídas del modelo digital de terreno construido en desarrollo de la Fase III del Proyecto de Modelación del río Cauca (CVC-Universidad del Valle, 2007).

Las estructuras de conexión se incluyeron en el modelo del río Cauca mediante la herramienta disponible en el modelo Mike 11, denominada canal de conexión (Link Channel), teniendo en cuenta en cada una de ellas las configuraciones planteadas en relación con el ancho y el nivel de la conexión.

7.5 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE ALTERNATIVAS PLANTEADAS

7.5.1 Efectos de la conexión única en la zona norte de la Laguna (Caño Nuevo)

Inicialmente se evaluó la influencia de la Laguna de Sonso sobre los niveles de agua en el río Cauca en las condiciones actuales. Para ello se realizaron dos simulaciones diferentes: una sin incluir la laguna de Sondo y otra conectando la laguna al río Cauca en su conexión actual, es decir, a través de Caño Nuevo. Con base en los resultados obtenidos de los niveles de agua máximos en el río Cauca en las dos simulaciones se calculó la diferencia de estos niveles máximos, lo cual permite observar los efectos de laminación de la creciente que genera la laguna de Sonso. Como se aprecia en la Figura 7.2, la reducción máxima en los niveles de agua en el río Cauca, hacia aguas abajo de la laguna, es de 0.10 m, en promedio. Debe anotarse que en la simulación de la condición actual se consideró que el nivel de agua en la laguna se encuentra cerca del nivel mínimo establecido de 930.65 msnm (por consideraciones de tipo ambiental).

Las simulaciones de las diferentes alternativas planteadas se enfocaron primero en determinar los niveles máximos de agua en el río Cauca para la creciente con un periodo de retorno de 30 años. Con base en los resultados obtenidos de las simulaciones se calcularon las diferencias entre los niveles de agua máximos en el río Cauca de una determinada alternativa con respecto a los niveles máximos de otra alternativa de referencia. Generalmente se consideró como referencia la condición actual, es decir, conexión en la parte norte de la laguna a través del canal Caño Nuevo (de 10 m de ancho).

En las Figuras 7.3 y 7.4 se presentan respectivamente las disminuciones en los niveles de agua máximos y en los caudales máximos en el río Cauca considerando diferentes anchos del canal Caño Nuevo (30 m, 60 m, 100 m, 500 m y 1000 m) con respecto a la condición actual del canal Caño Nuevo (10 m de ancho). Los resultados indicados en estas figuras muestran que al aumentar el ancho de Caño Nuevo el efecto en la hidrodinámica del río Cauca es poco significativo, pues la variación en los niveles de agua no supera los 0.02 m y en los caudales es inferior a 6 m³/s.

Cuadro 7.1 Alternativas propuestas para la conexión río Cauca Laguna de Sonso

Alternativa	Conexiones con río Cauca	Abscisa río Cauca	Nivel de conexión (msnm)	Ancho (m)	
1	Una sola Conexión	Conexión Norte: K223+037	Río-Caño Nuevo: 928.85 Caño Nuevo-laguna: 930.65	30	
2				60	
3				100	
4				500	
5				1000	
6		Conexión Sur: K206+272		935.00	10
7				938.33	
8				936.83	
9		Conexión Sur: K206+272		935.00	1
10					5
11					10
12					20
13					30
14					40
15					60
16					100
17					1000
18					Conexión Sur: K206+272
19		5			
20		10			
21		20			
22		30			
23		40			
24		60			
25		100			
26		1000			
27	Dos Conexiones simultáneas (Sur y Norte)	Conexión Sur: K206+272	Conexión sur: 938.33	10	
28		Conexión Norte: K223+037	Río-Caño Nuevo: 928.85 Caño Nuevo-laguna: 930.65	30	
29				60	
30				100	
31		Conexión Sur: K206+272	Conexión sur: 936.83	10	
32		Conexión Norte: K223+037	Río-Caño Nuevo: 928.85 Caño Nuevo-laguna: 930.65	30	
33				60	
34				100	

Nota: la abscisa K000+000 se encuentra en el eje de la represa de Salvajina

Figura 7.2 Disminución máxima del Nivel de Agua en el río Cauca considerando la conexión actual Río – Laguna de Sonso a través de Caño Nuevo con respecto a la alternativa hipotética sin conexión río laguna. Escenario: Creciente Tr 30 años

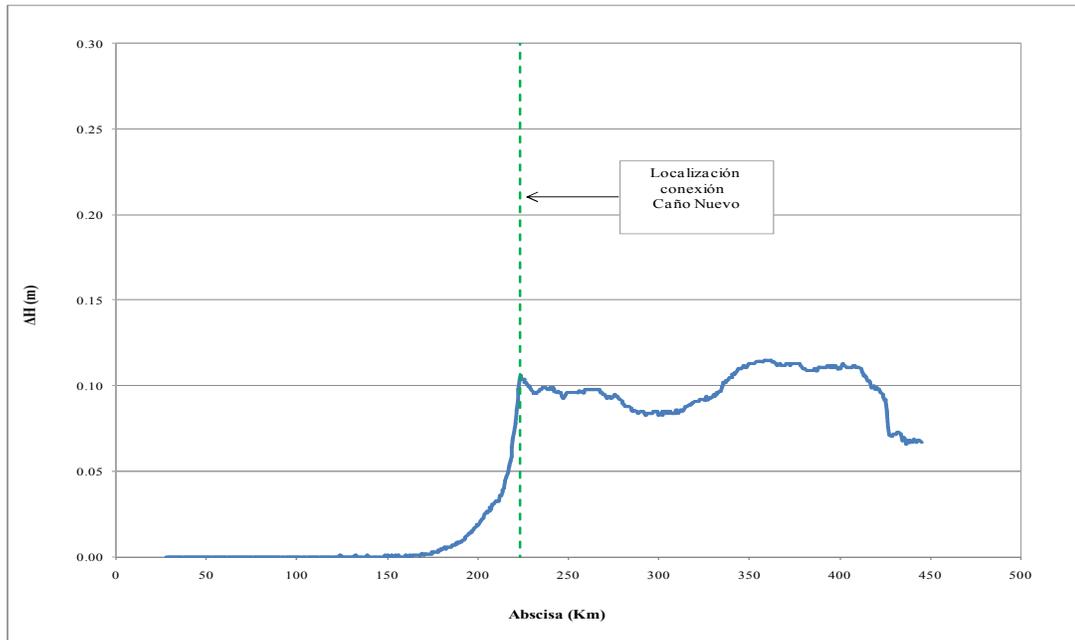


Figura 7.3 Disminución máxima de los Niveles de Agua en el río Cauca considerando diferentes anchos del canal Caño Nuevo con respecto a la conexión actual (Caño Nuevo de 10m de ancho) Escenario Creciente Tr 30 años

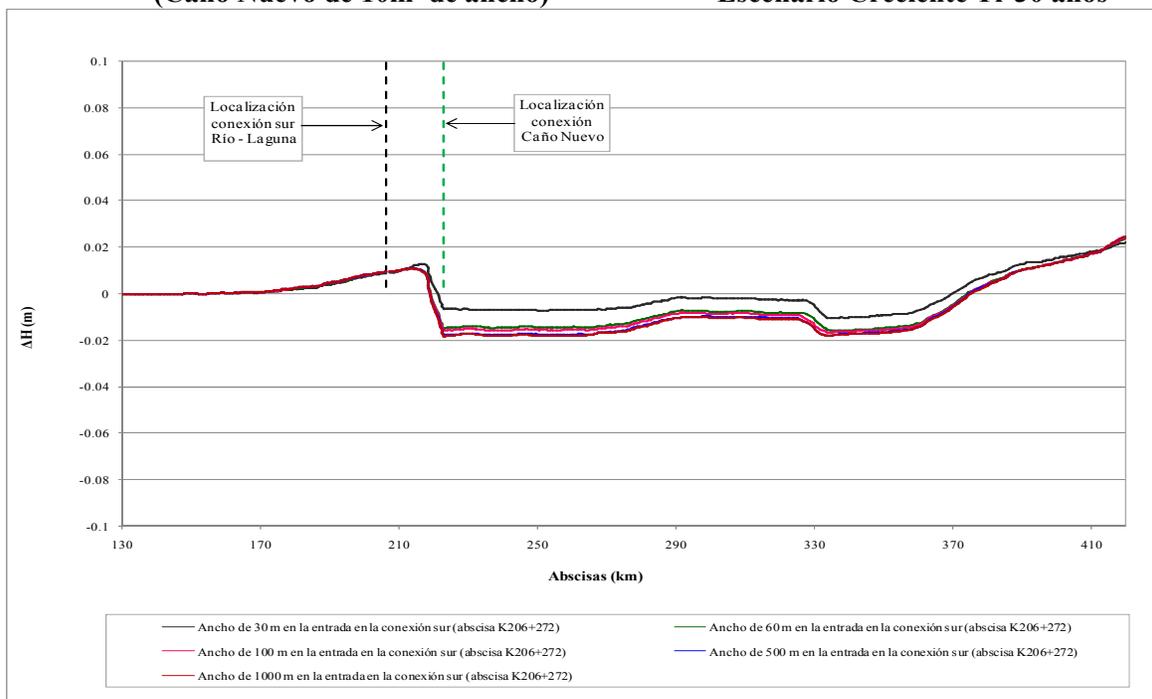
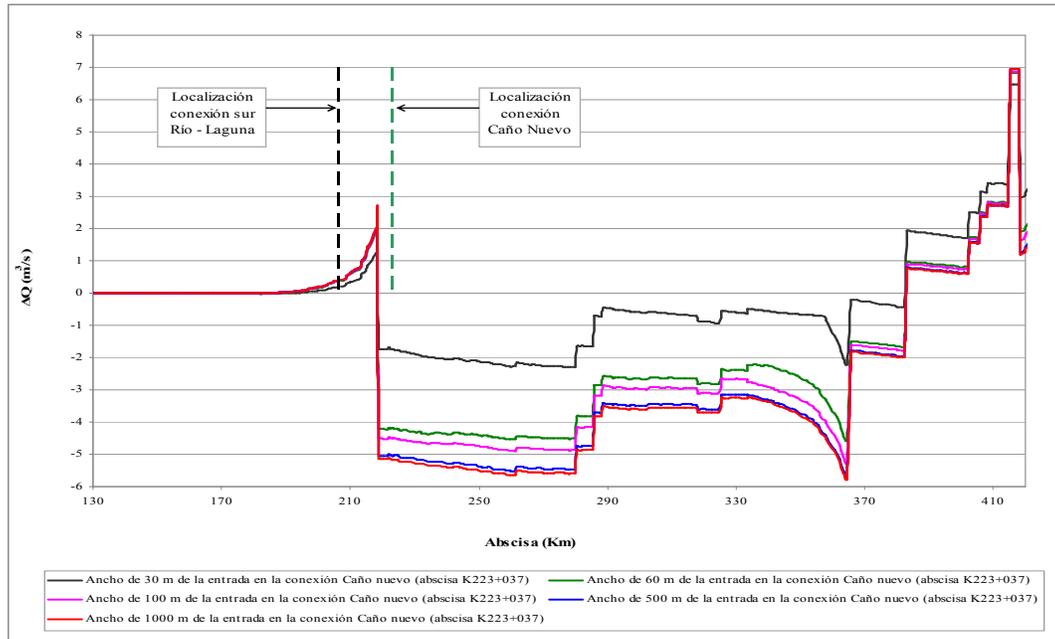


Figura 7.4 Disminución máxima de los Niveles de Agua en el río Cauca considerando diferentes anchos del canal Caño Nuevo con respecto a la conexión actual (Caño Nuevo de 10m de ancho) Escenario Creciente Tr 30 años



7.5.2 Efectos de una conexión única Río Cauca – Laguna de Sonso en la zona sur

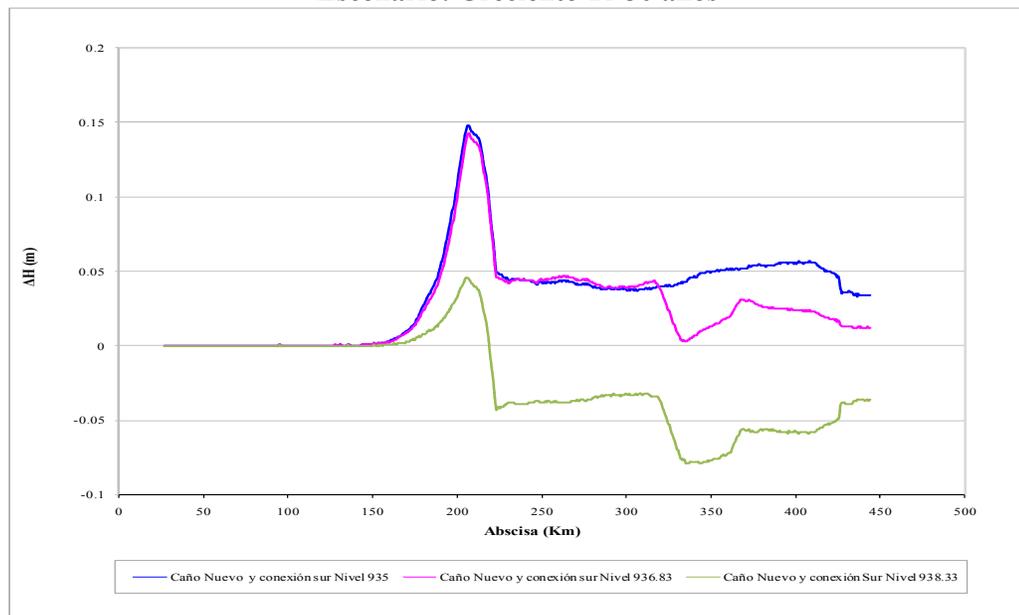
Con el fin de evaluar la influencia de una conexión con el río Cauca en la parte sur de la laguna de Sonso, se plantearon y analizaron mediante la simulación numérica diferentes alternativas. En primera instancia se analizaron los efectos sobre los niveles en el río al tener una conexión única en la parte sur, y posteriormente se evaluó el efecto de tener las dos conexiones, es decir, la conexión actual al norte en Caño Nuevo y una conexión nueva en el extremo sur de la laguna.

Se analizó la influencia de una conexión única Río Cauca – Laguna de Sonso por medio de un canal localizado en la zona sur de la laguna en la abscisa K206+272. Los resultados de todas las simulaciones numéricas efectuadas se compararon con los resultados de la simulación considerando la conexión actual por medio del canal único de Caño Nuevo, localizado al norte de la laguna. En las diferentes alternativas consideradas se varió la configuración geométrica del canal de conexión o canal de entrada a la laguna, considerando distintos anchos y niveles de fondo del canal.

En la Figura 7. 5 se presenta la disminución en los niveles de agua en el río Cauca cuando se varía sólo el nivel de fondo del canal de conexión sur con un ancho constante de 10 m y tres niveles de fondo diferentes: 935.00 msnm (1.83 m por debajo del nivel banca llena), 936.83 msnm (justamente en el nivel de banca llena) y 938.33 msnm (1.50 m por encima del nivel de banca llena).

Según se aprecia en la Figura 7.5, las mayores disminuciones en los niveles de agua en el río Cauca ocurren en un tramo relativamente corto de unos pocos kilómetros de longitud, justamente en el sector de la conexión sur (abscisa K206+272); esta reducción es ligeramente inferior a 0.15 m para las conexiones con niveles de fondo en las cotas 935.00 msnm (es decir, 1.83m por debajo del nivel de banca llena) y 936.83 msnm (justo en el nivel de banca llena del río), mientras que cuando el nivel de la conexión se halla 1.50 m por encima de la banca llena del cauce la reducción en los niveles de agua en el río no supera los 0.05m en el mismo sector. Aguas abajo de la laguna la reducción en los niveles de agua en el río es algo menor a los 0.05 m cuando el nivel de la conexión está 1.83 m por debajo de la banca llena y también cuando coincide con el nivel de la misma. Por el contrario, cuando la conexión sur se halla 1.50 m por encima de la banca llena los niveles de agua en el río Cauca aumentan unos 0.05m, en promedio, con respecto a la condición actual (conexión única al norte en Caño Nuevo), presentando un incremento máximo de unos 0.08 m cerca a la estación hidrométrica de Guayabal.

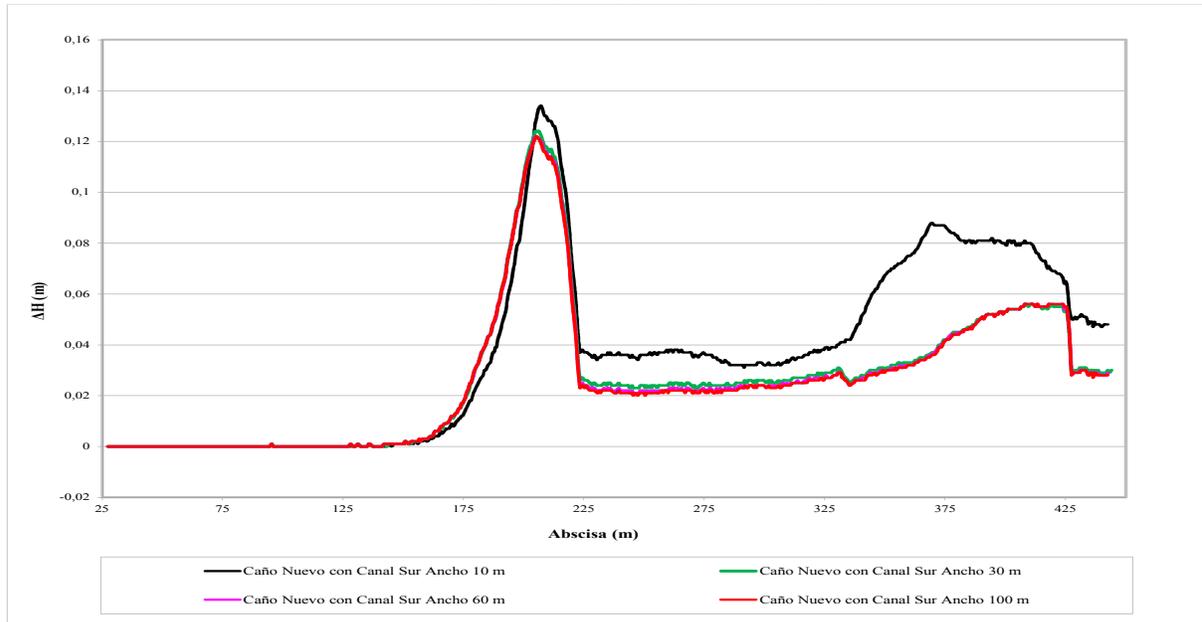
Figura 7.5 Disminución máxima de los caudales en el río Cauca considerando una conexión única al sur (abscisa K206 + 272) con diferentes niveles de fondo y ancho constante de 10 m con respecto a la conexión actual al norte en caño Nuevo
Escenario: Creciente Tr 30 años



Posteriormente se fijó el nivel del canal de conexión sur en la cota 935.00 msnm (esto es, 1.83m por debajo del nivel de banca llena del río) y se varió el ancho de la conexión (10 m, 30 m, 60 m y 100 m). Estas diferentes configuraciones se simularon y se determinaron los niveles de agua en el río Cauca; luego se calculó la diferencia con respecto a la condición actual de la conexión río Cauca – Laguna de Sonso a través del Canal Caño Nuevo (ver Figura 7.6). Los resultados muestran que cuando el ancho de la conexión es de 10m la reducción en los niveles de agua es algo ligeramente mayor que cuando se tiene una entrada más ancha (30m, 60 m y 100m). Se encontró igualmente que la máxima disminución en los niveles de agua en el río ocurre en la abscisa K206+272 (justamente en el sector de la

conexión sur), igual a 0.13 m cuando el ancho de la conexión es de 10m y 0.12m para los demás anchos de conexión evaluados. Aguas abajo de la laguna la reducción en los niveles de agua en el río Cauca fluctúa entre 0.02m y 0.08m en función del ancho de la entrada de la conexión río-laguna.

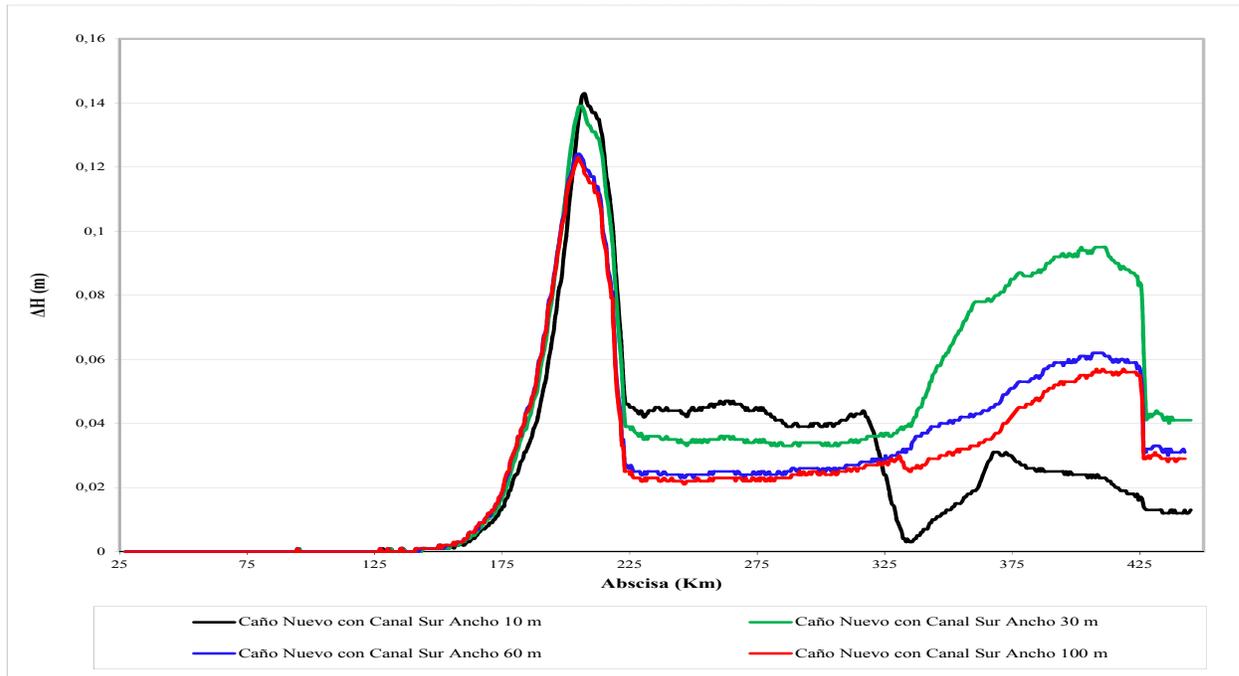
Figura 7.6 Disminución máxima de los niveles de agua en el río Cauca considerando una conexión única al sur con diferentes anchos y un nivel de fondo cte. de 935.00 msnm con respecto a la conexión actual al norte en caño Nuevo
Escenario: Creciente Tr 30 años



Finalmente se fijó el nivel del canal de conexión sur en la cota 936.83 (nivel de banca llena del río) y se varió el ancho de la conexión (10 m, 30 m, 60 m y 100 m). Estas diferentes configuraciones se simularon y se determinaron los niveles máximos de agua en el río Cauca; luego se calculó la diferencia de niveles con respecto a la condición actual de la conexión río – Laguna a través del Canal Caño Nuevo (ver Figura 7.7). Los resultados muestran comportamientos similares a los observados en el caso anterior cuando el nivel de la conexión estaba en la cota 935.00 msnm. La máxima disminución en los niveles de agua en el río ocurre en la abscisa K206+272 (en el sector de la conexión sur) y es igual a 0.14 m cuando el ancho de la conexión es de 10m y 30m, y 0.12 cuando el ancho de la conexión está entre 60m y 100m. Aguas abajo de la laguna la reducción en los niveles de agua en el río Cauca fluctúa entre 0.02m y 0.08m, dependiendo del ancho de la conexión a la entrada de la laguna.

En conclusión, los resultados anteriores muestran que si se tuviese una sola conexión en la parte sur de la laguna los niveles de agua en el río serían ligeramente más bajos que en la condición actual de una conexión única al norte a través de Caño Nuevo.

Figura 7.7 Disminución máxima de los niveles de agua en el río Cauca considerando una conexión única al sur con diferentes anchos y un nivel de fondo cte. de 936.83 msnm con respecto a la conexión actual al norte en caño Nuevo
Escenario: Creciente Tr 30 años



7.5.3 Efectos de una doble conexión Río Cauca – Laguna de Sonso localizadas en los extremos sur (abscisa K206+272) y norte (abscisa K223+037) de la Laguna

En este análisis se consideró una doble conexión de la laguna al río Cauca. Con ello se pretende, además de tratar de disminuir los niveles de agua en el río Cauca, mejorar la hidrodinámica de la laguna al permitir, en principio, la entrada de las aguas del río Cauca por su parte sur y y la salida de las mismas en el extremo norte. Al norte se consideró la conexión actual en Caño Nuevo (abscisa K223+037) y en el extremo sur se ubicó la segunda conexión (abscisa K206+272), para la cual se evaluaron diferentes configuraciones de anchos (10 m, 30 m, 60 m y 100 m) y niveles de fondo (938.33 msnm, que se halla 1.50 m por encima de banca llena, y 936.83 msnm, que coincide con el nivel de banca llena del río).

Se modelaron las diferentes configuraciones contempladas para la conexión sur y dejando fija la configuración de la conexión al norte en Caño Nuevo. Los resultados se enfocaron primero en analizar los efectos de esta conexión doble en los niveles de agua del río Cauca con relación a la condición actual de una conexión única en Caño Nuevo; y, luego, en analizar los efectos en la hidrodinámica de la laguna, principalmente la variación en los caudales y los niveles de agua en la laguna al paso de una creciente en el río Cauca con un periodo de retorno de 30 años. Los resultados de las diferentes simulaciones se presentan en los siguientes gráficos: (i) Figuras 7.8 y 7.9, mostrando la disminución en los niveles de agua cuando se tiene la doble conexión río-laguna con respecto a la condición actual (conexión única en Caño Nuevo); (ii) Figuras 7.10 a 7.13, donde se registran los caudales al

interior de la laguna; (iii) Figuras 7.14 y 7.15, en las cuales se presenta la variación de los niveles de agua en la laguna; y, (iv) Figuras 7.16 y 7.17, en las cuales se presenta la variación de los caudales en las entradas de las dos conexiones.

La Figuras 7.8 y 7.9 presentan la reducción que se presentaría en los niveles de agua en el río Cauca si existiese la doble conexión, con respecto a la condición actual de una conexión única en Caño Nuevo. Se observa que al existir esta doble conexión río-laguna, no se presentarían cambios significativos en los niveles del río Cauca aguas abajo de la laguna, generando una reducción en los niveles de hasta unos 0.05 m si la entrada sur se realiza al nivel de la banca llena del cauce y con un ancho entre 60 y 100m. Los mayores efectos en la reducción de los niveles del río son principalmente locales (en el sector de la laguna) y puede alcanzar valores que fluctúan entre 0.11m y 0.61m si el ancho de la conexión varía entre 10m y 100m y su nivel de fondo coincide con el nivel de la banca llena del cauce.

En las Figuras 7.10 a 7.13 se registran los caudales en la Laguna de Sonso en las secciones transversales K5+850 y K8+250 para los niveles de cota de conexión 936.83 msnm y 938.33 msnm, respectivamente. Estos caudales son cada vez mayores al aumentar el ancho de apertura del canal de conexión de la zona sur de la Laguna de Sonso. Estas gráficas igualmente permiten identificar el intercambio de caudal que ocurre al existir dos canales de conexión entre el río y la Laguna de Sonso. Para un nivel de cota de conexión de 936.83 msnm en la sección K5+850 el ancho de 10 m de apertura del canal de la zona sur de la laguna presenta un intercambio de caudal entre el río y la Laguna de Sonso pero para los anchos de 30 m, 60 m y 100 m sólo ocurre el ingreso de caudal a la laguna. Para un nivel de cota de conexión de 938.33 se genera un intercambio de caudal entre el río y la laguna en ambas secciones en todos los anchos evaluados.

Los niveles en la laguna de Sonso en la sección K5+700 (ver Figuras 7.14 y 7.15) con una cota de conexión correspondiente a un nivel de cota de conexión 936.83 msnm igualmente presentan incremento y disminución para los diferentes anchos de apertura establecidos en el canal de la zona sur lo cual, demuestra la interacción mencionada anteriormente entre el río y la laguna de sonso cuando existen dos canales de conexión. Cuando el nivel de cota de conexión es 938.33 msnm se observa el mismo comportamiento de niveles pero, además, se observa la poca variación de niveles entre los anchos de apertura de 10 m, 30 m, 60 m y 100 m.

Por último, se analizaron los caudales en los dos canales de conexión (ver Figuras 7.16 y 7.17); se observa que el canal ubicado en la zona sur de la laguna es el encargado de ingresar caudal a la laguna para los diferentes anchos de entrada evaluados y a su vez el canal Caño Nuevo ubicado en la zona norte de la Laguna se comporta como un canal que permite el ingreso y salida de caudal. Esto comprueba la importancia de establecer un segundo canal de conexión que comunique al río Cauca con la zona sur de la Laguna de Sonso ya que se generaría un incremento en los caudales que circularían al interior de la laguna, permitiendo un mayor recambio de las aguas en su interior.

Finalmente, debe señalarse que este análisis corresponde a un primer estudio hidráulico que se enfocó en analizar algunas de las posibles alternativas de intervención de la laguna con el doble propósito de reducir los niveles de agua en el río Cauca en procura de lograr un

mejor manejo de los niveles de agua y de otro lado en explorar opciones que permitan mejorar las condiciones hidrodinámicas al interior de la laguna. Cualquier estudio que se realice posteriormente debería incluir la información topográfica y batimétrica más reciente y detallada levantada por la CVC, y además, evaluar los volúmenes de sedimentos que se podrían derivar hacia la laguna, lo cual requeriría lógicamente el diseño de estructuras desarenadoras con el fin de evitar futuros problemas de colmatación de la laguna.

Figura 7.8 Disminución máxima de los niveles de agua en el río Cauca considerando una doble conexión río – laguna, con diferentes anchos en la conexión sur y un nivel de entrada en la cota 938.33 msnm, con respecto a la conexión actual al norte en caño Nuevo
Escenario: Creciente Tr 30 años

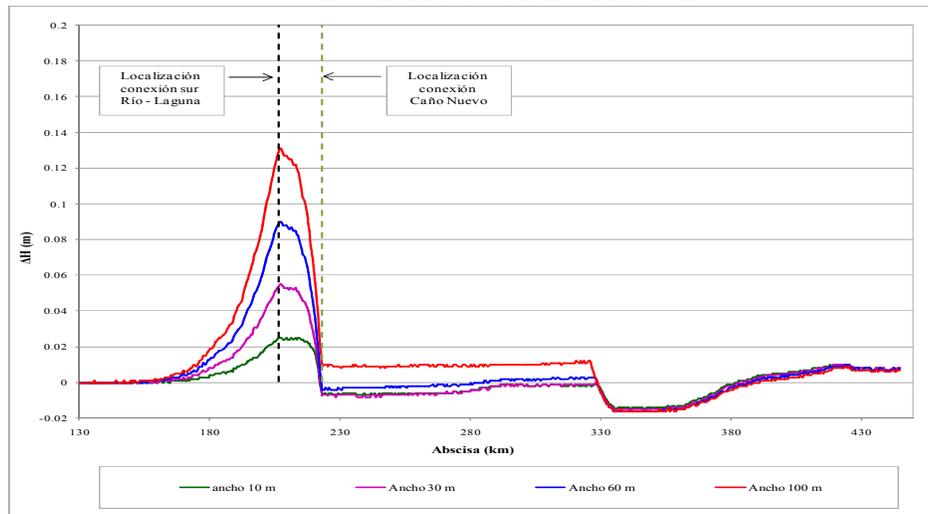
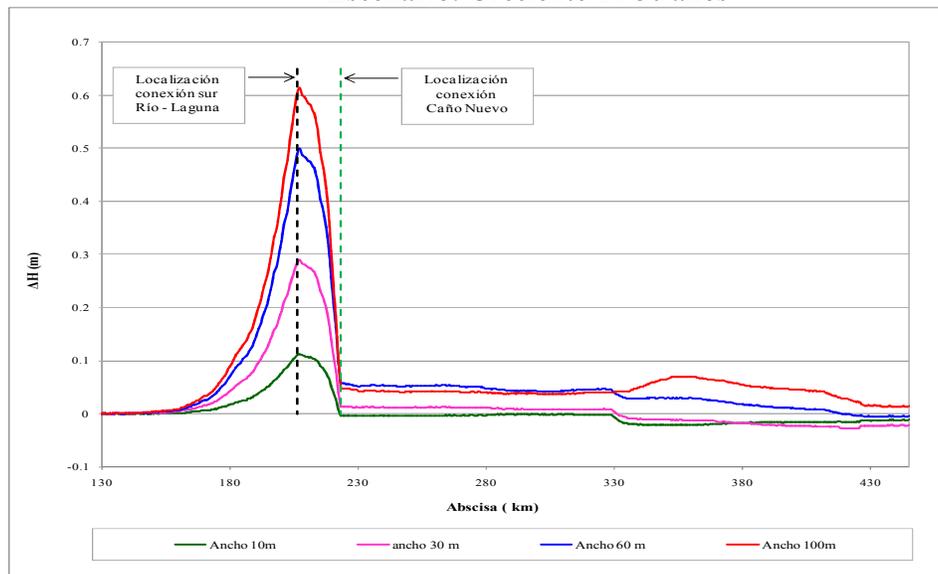
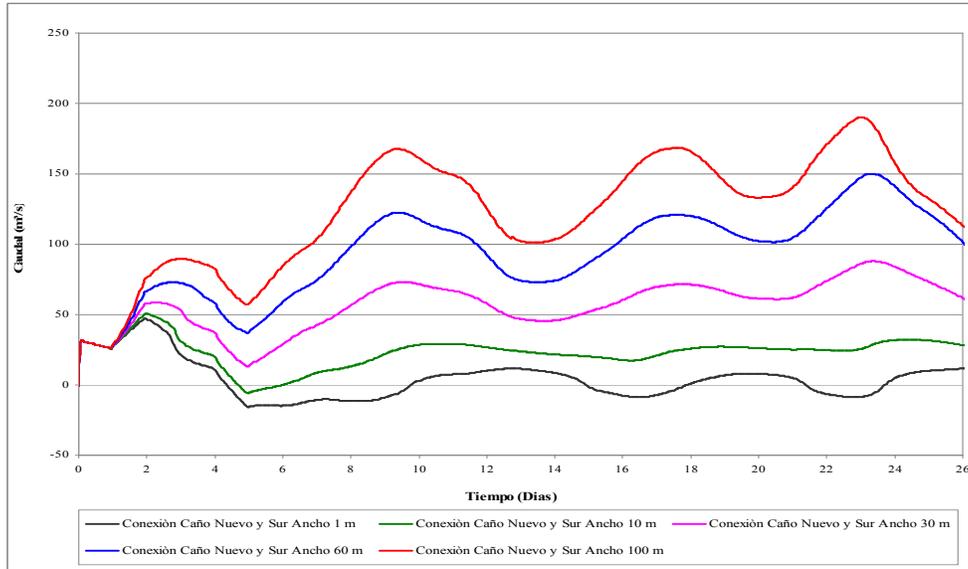


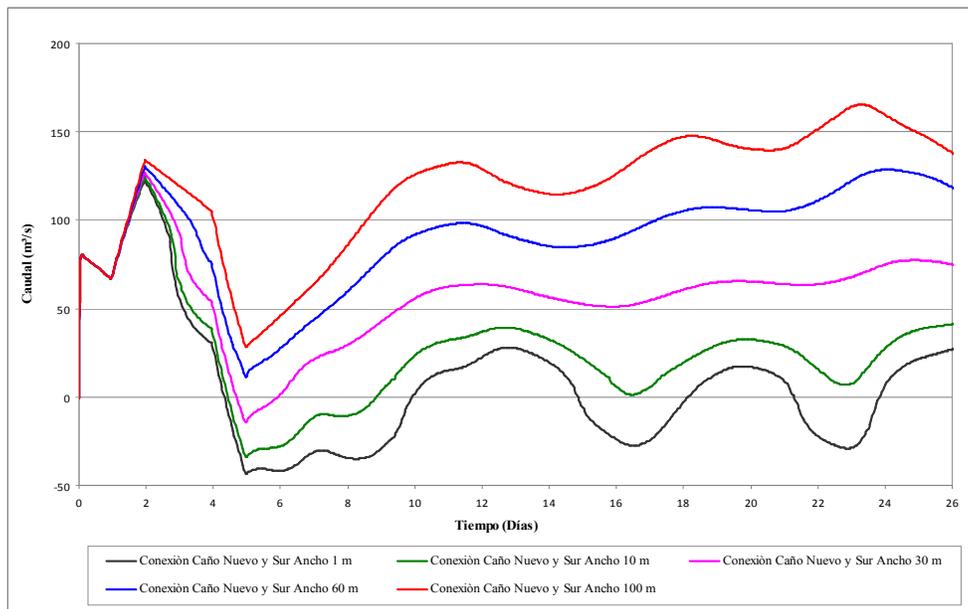
Figura 7.9 Disminución máxima de los niveles de agua en el río Cauca considerando una doble conexión río – laguna, con diferentes anchos en la conexión sur y un nivel de entrada en la cota 936.83 msnm, con respecto a la conexión actual al norte en caño Nuevo
Escenario: Creciente Tr 30 años



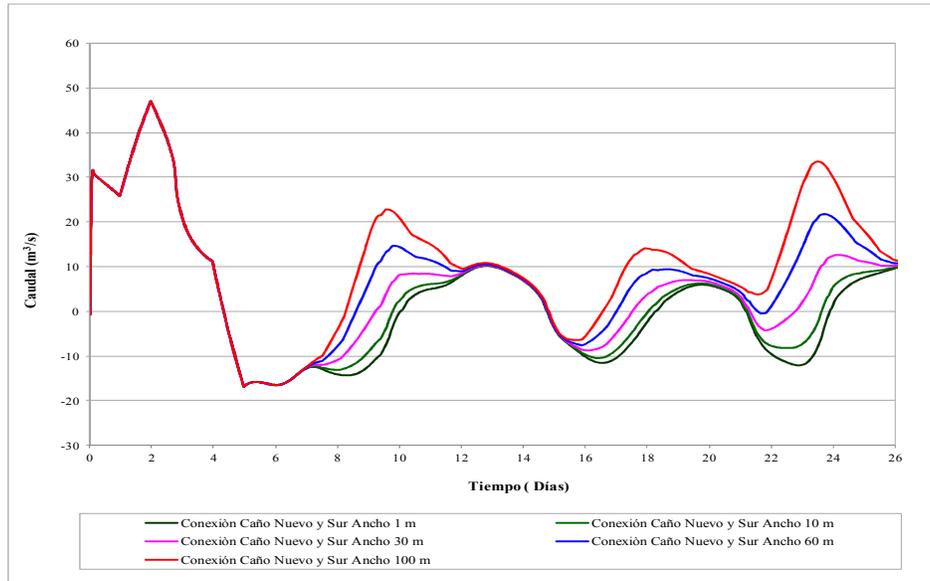
**Figura 7.10 Caudales en la Laguna de Sonso (sección k5+850) considerando una doble conexión río-laguna, con diferentes anchos en la conexión sur y un nivel de entrada en la cota 936.83 msnm, con respecto a la conexión actual al norte en Caño Nuevo
Escenario: Creciente de Tr 30 años**



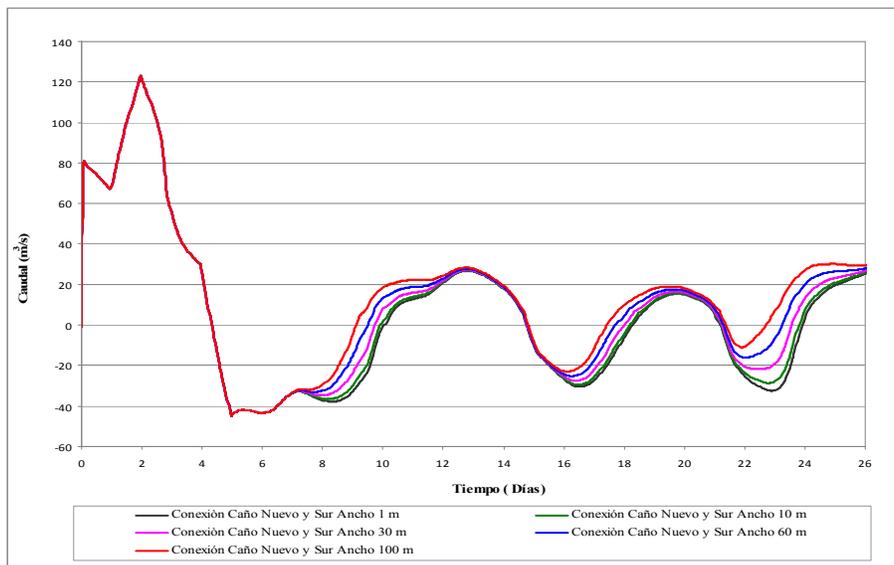
**Figura 7.11 Caudales en la Laguna de Sonso (sección k5+850) considerando una doble conexión río-laguna, con diferentes anchos en la conexión sur y un nivel de entrada en la cota 936.83 msnm, con respecto a la conexión actual al norte en Caño Nuevo
Escenario: Creciente de Tr 30 años**



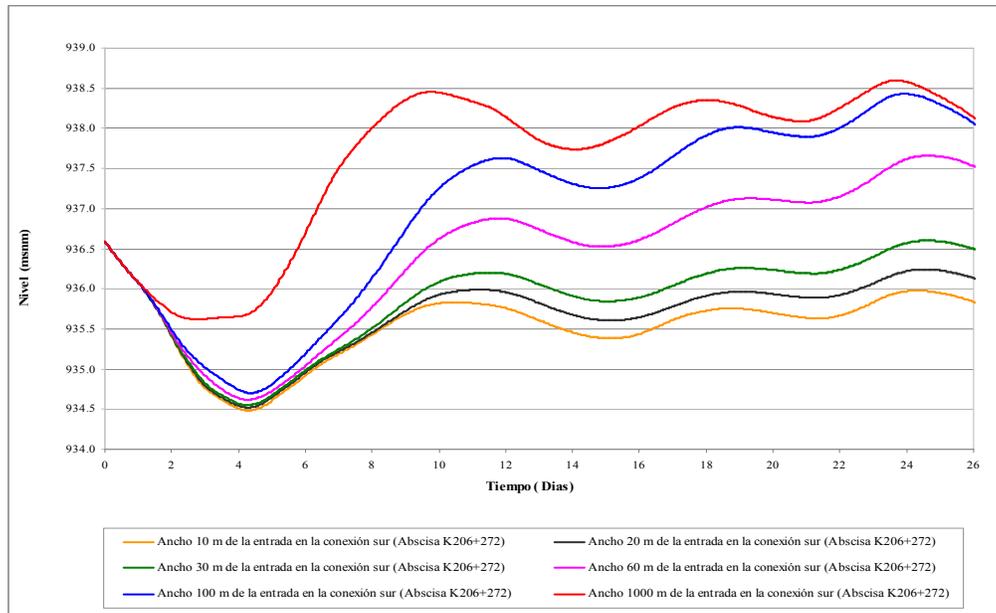
**Figura 7.12 Caudales en la Laguna de Sonso (sección k5+850) considerando una doble conexión río-laguna, con diferentes anchos en la conexión sur y un nivel de entrada en la cota 938.33 msnm, con respecto a la conexión actual al norte en Caño Nuevo
Escenario: Creciente de Tr 30 años**



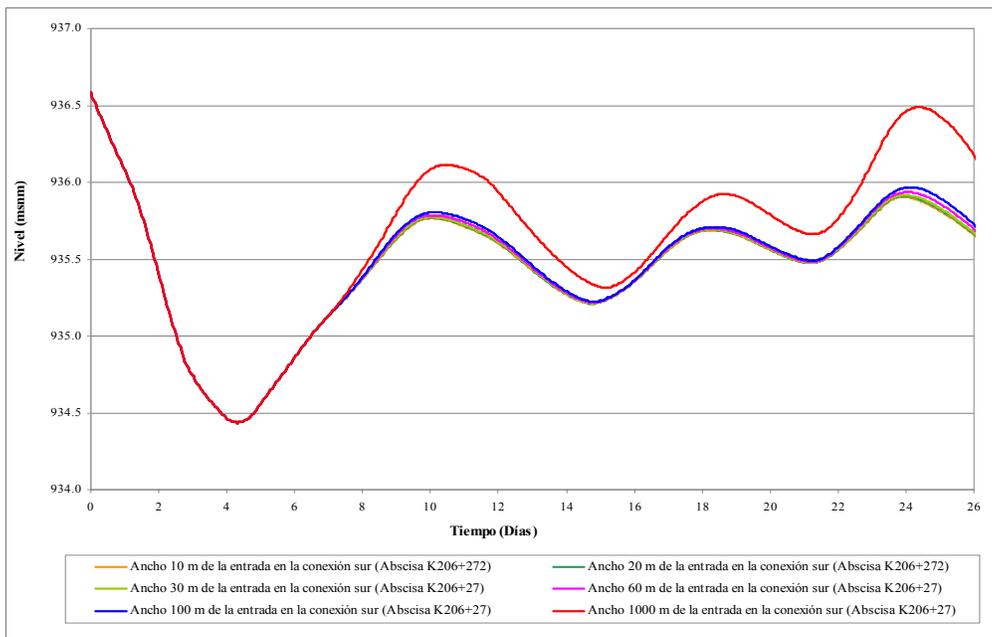
**Figura 7.13 Caudales en la Laguna de Sonso (sección k8+250) considerando una doble conexión río-laguna, con diferentes anchos en la conexión sur y un nivel de entrada en la cota 938.33 msnm, con respecto a la conexión actual al norte en Caño Nuevo
Escenario: Creciente de Tr 30 años**



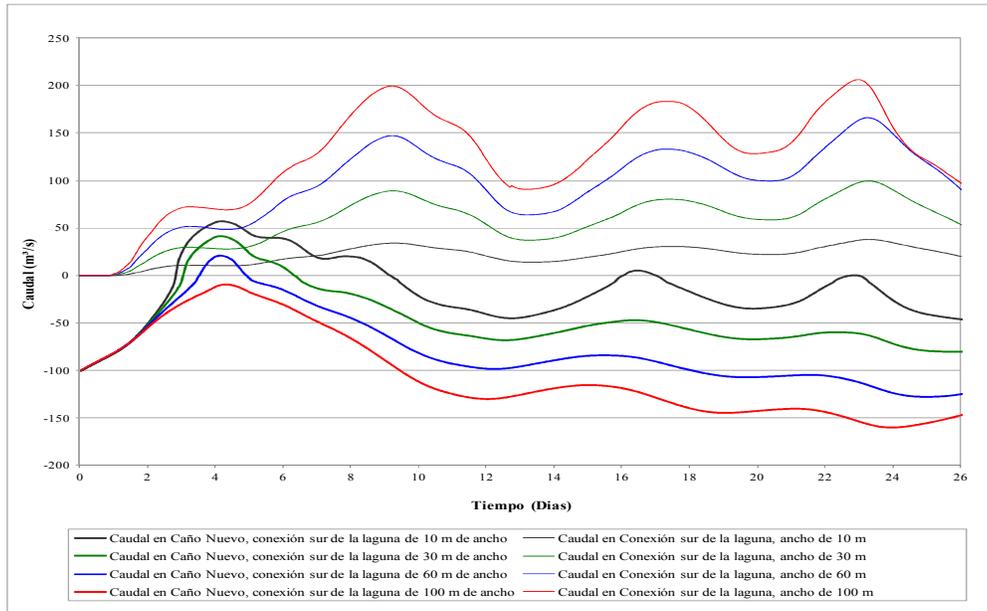
**Figura 7.14 Niveles en la Laguna de Sonso (sección k5+700) considerando una doble conexión río–laguna, con diferentes anchos en la conexión sur y un nivel d entrada en la cota 936.83 msnm
Escenario: Creciente Tr 30 años**



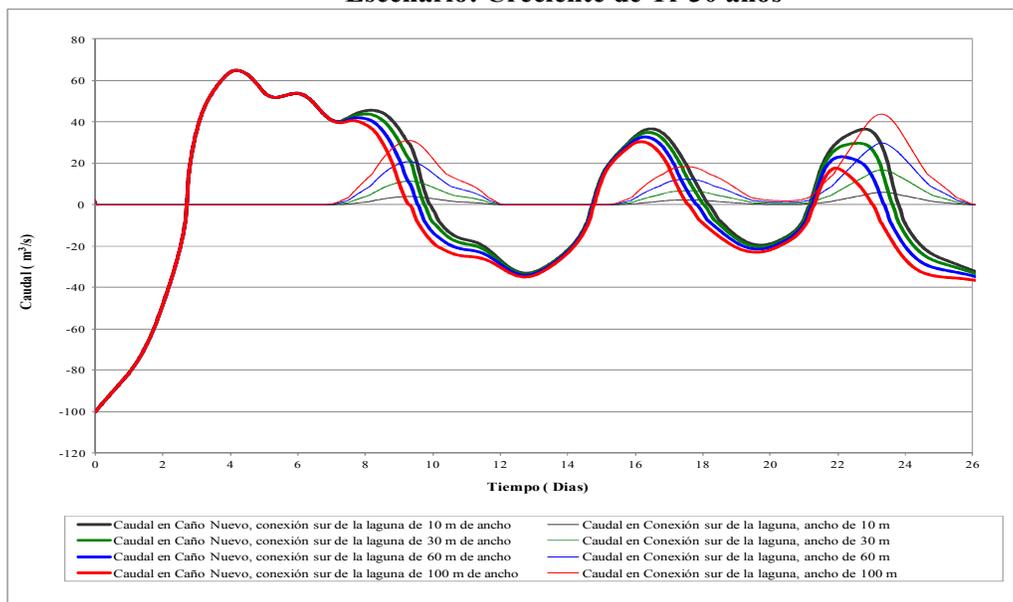
**Figura 7.15 Niveles en la Laguna de Sonso (sección k5+700) considerando una doble conexión río–laguna, con diferentes anchos en la conexión sur y un nivel d entrada en la cota 938.33 msnm
Escenario: Creciente Tr 30 años**



**Figura 7.16 Caudales en las dos conexiones río Cauca – Laguna de Sonso considerando diferentes anchos en la conexión sur y un nivel de entrada en la cota 936.83 msnm
Escenario: Creciente de Tr 30 años**



**Figura 7.17 Caudales en las dos conexiones río Cauca – Laguna de Sonso considerando diferentes anchos en la conexión sur y un nivel de entrada en la cota 938.33 msnm
Escenario: Creciente de Tr 30 años**



8 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA DE MEDIDAS ESTRUCTURALES

Con el propósito de estimar los impactos sobre la hidrodinámica del río Cauca, especialmente en los niveles de agua, se simularon las diferentes alternativas estructurales planteadas en el Capítulo 2 para un periodo de retorno de 30 años, como son: Relocalización de los diques de protección a 60, 90 y 120 metros del río, Integración de los humedales al sistema fluvial, Lagunas de laminación de crecientes ubicadas sobre la planicie aluvial y Construcción de embalses de regulación en algunos de los principales ríos tributarios del río Cauca. Las alternativas propuestas son las siguientes:

Alternativas estructurales propuestas para el manejo de inundaciones en corredor río Cauca

Alternativa	Descripción de la alternativa
1	Diques a 60 m de las bancas del cauce
2	Diques a 60 m de las bancas del cauce + Humedales
3	Diques a 60 m de las bancas del cauce + Embalses de regulación en tributarios
4	Diques a 60 m de las bancas del cauce + Lagunas de Laminación
5	Diques a 60 m de las bancas del cauce + Humedales + Lagunas de Laminación
6	Diques a 60 m de las bancas del cauce + Humedales + Embalses de regulación en tributarios
7	Diques a 60 m de las bancas del cauce + Lagunas de Laminación + Embalses de regulación en tributarios
8	Diques a 60 m de las bancas del cauce + Humedales + Lagunas de Laminación + Embalses de regulación en tributarios
9	Diques a 90 m de la banca
10	Diques a 120 m de la banca

A continuación se presentan los diferentes resultados obtenidos de las simulaciones de las diferentes medidas estructurales propuestas, al igual que los análisis correspondientes.

8.1 RELOCALIZACIÓN DE DIQUES

Con el fin de estimar, en primera instancia, la influencia de la ubicación de los diques marginales de protección del río Cauca en la función de laminar las crecientes, es decir, de reducir los niveles de agua, se simularon tres alternativas diferentes considerando el cauce del río como una sección compuesta con longitudes de bermas en la planicie de 60 m, 90 m y 120 m, respectivamente.

En las Figuras 8.1 a 8.12 se presentan los caudales y los niveles en el río Cauca obtenidos en las distintas estaciones hidrométricas para las 3 localizaciones de los diques y en los Cuadros 8.1 y 8.2 se presentan los niveles de agua máximos y los caudales máximos calculados en las estaciones. Igualmente en la Figura 8.13 se presenta la disminución en los niveles de agua máximos a lo largo del río al distanciar los diques de 60 m a 90 m, de 60 m a 120 m y de 90 m a 120 m del cauce principal del río Cauca. Del análisis de estos resultados se pueden destacar los siguientes aspectos:

- La relocalización de los diques y el consecuente aumento del ancho de la berma tendrían un impacto positivo en la disminución de los niveles de agua máximos en el río. En la medida en que se aumenta la separación de los diques del cauce principal del río Cauca se reducen cada vez más los niveles de agua. Por ejemplo, adoptando como referencia los niveles obtenidos para la localización de los diques a 60 m del cauce, en la estación Juanchito al distanciar los diques a 90 m y 120 m del cauce, entonces el nivel de agua máximo se reduce en 0.30 m y 0.35 m, respectivamente.; y en la estación La Victoria se reducen en 0.38 m y 0.54 m, respectivamente.
- Al distanciar los diques de 60 m a 120 m del cauce del río Cauca, la reducción en los niveles de agua máximos en el río es, en promedio, de unos 0.40 m; mientras que al mover los diques de 60 m a 90 m del cauce del río Cauca, la diferencia es, en promedio, de unos 0.20 m; tal y como pasa con mover los diques de 90 m a 120 m. Es preciso señalar que estas reducciones en los niveles de agua no es constante a lo largo del río Cauca en su valle, debido a la configuración morfológica variable del mismo cauce.
- Los resultados obtenidos muestran, como era de esperarse, que los diques construidos muy cerca del cauce principal originan mayores niveles de agua, lo cual, a su vez, obligará a diseñar y construir diques cada vez más altos, aumentando la presión sobre ellos y, por ende, el riesgo de falla o rotura. En consecuencia los diques marginales deberían ubicarse lo suficientemente distanciados del cauce principal para permitir que la planicie adyacente o llanura aluvial cumpla con sus funciones naturales (laminación de los caudales pico de las crecientes, soporte básico de flora y fauna, recarga de acuíferos subterráneos, etc.).

Cuadro 8.1 Caudales máximos en el río Cauca calculados para diferentes localizaciones de los diques marginales de protección Periodo de Retorno: 30 años

Río	Estación	Abscisa (km)	Caudal Máximo (m ³ /s)			
			Tr 30 Años	Diques 60 m	Diques 90 m	Diques 120 m
Cauca	La Balsa	27.385	656	654.4	654.3	654.3
	La Bolsa	79.547	804	803.5	802.3	799.4
	Hormiguero	115.443	875	967.9	958.1	948.5
	Juanchito	140.895	1172	1172.2	1159.3	1144.9
	Mediacanoa	223.602	1189	1247.3	1231.6	1219.0
	Guayabal	350.187	1265	1312.7	1296.7	1282.1
	La Victoria	372.006	1272	1312.9	1298.2	1283.2
	Anacaro	418.246	1350	1382.7	1357.3	1335.6
	La Virginia	444.928	1893	1919.7	1889.1	1896.0
Promedio			1164.0	1197.0	1183.0	1173.7

Figura 8.1 Caudales en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques
Periodo de Retorno: 30 años Estación: La Bolsa

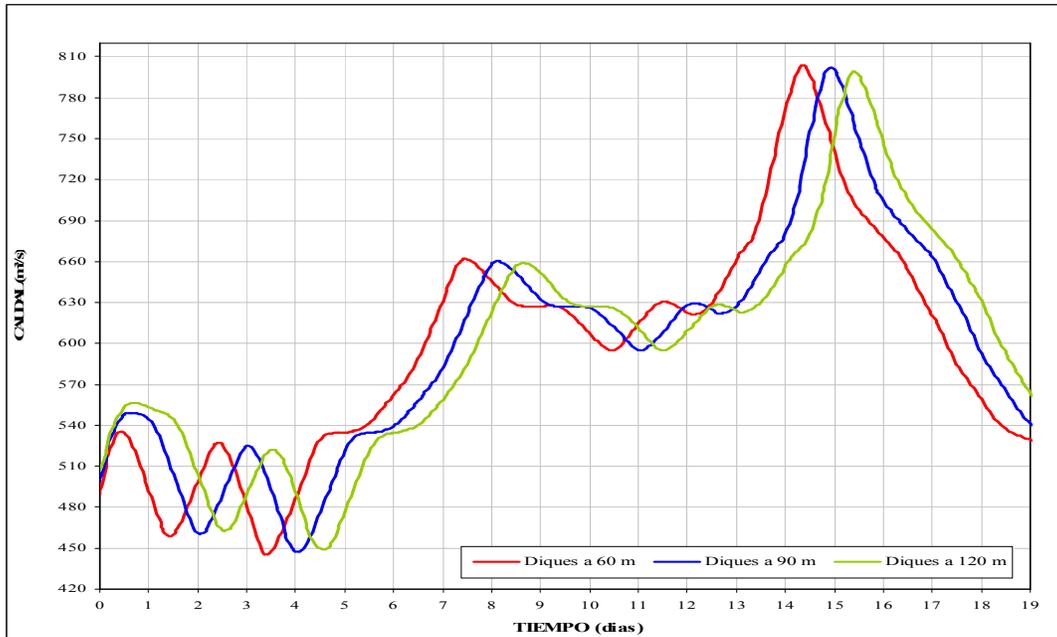
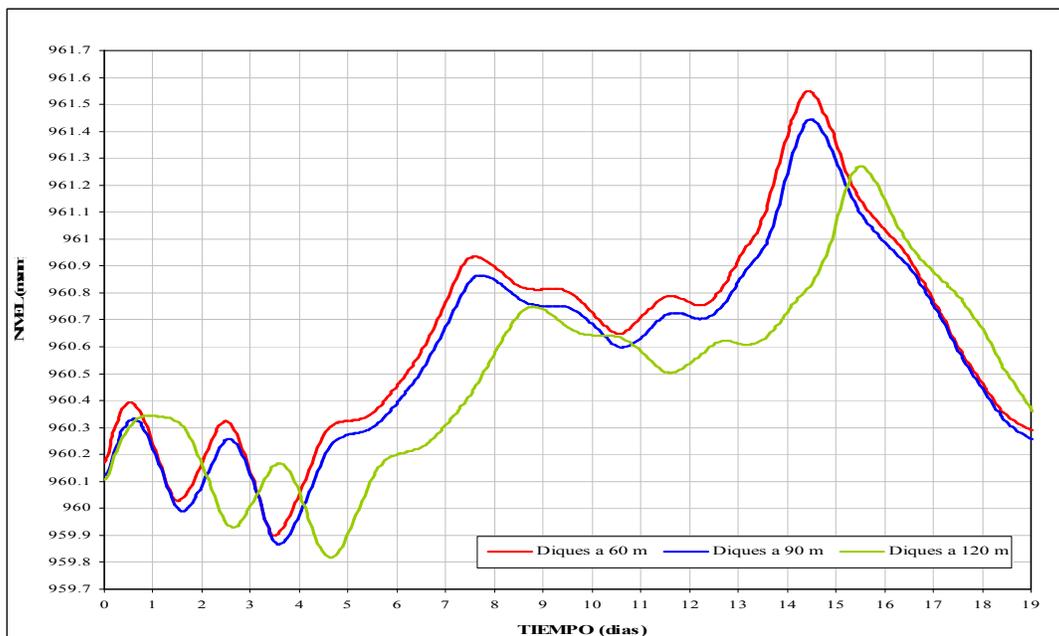
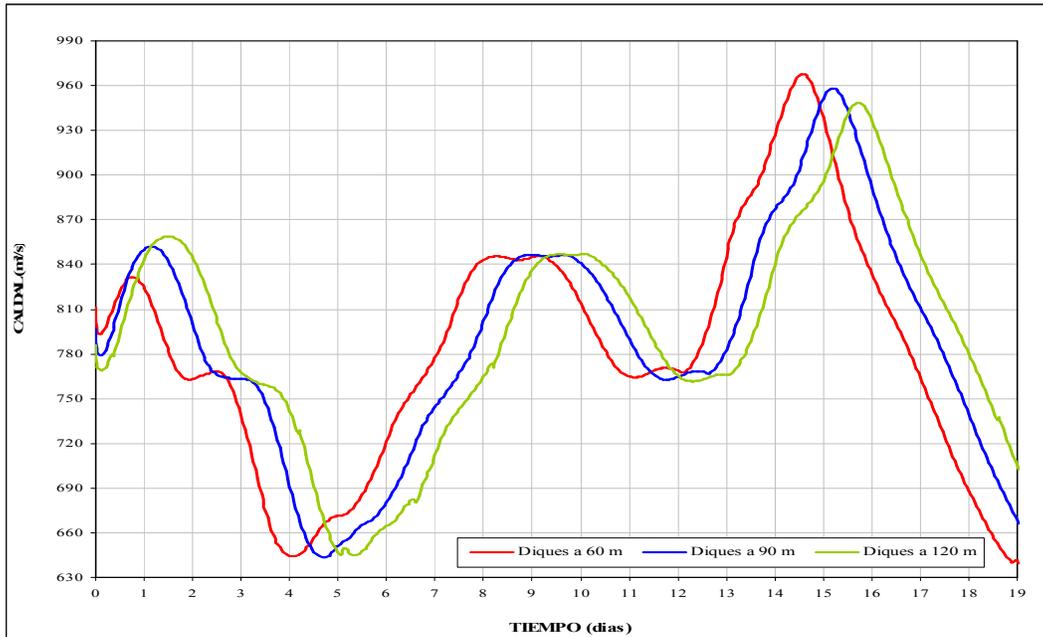


Figura 8.2 Niveles de agua en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques
Periodo de Retorno: 30 años Estación: La Bolsa



**Figura 8.3 Caudales en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques marginales
Periodo de Retorno: 30 años Estación: Hormiguero**



**Figura 8.4 Niveles de agua en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques
Periodo de Retorno: 30 años Estación: Hormiguero**

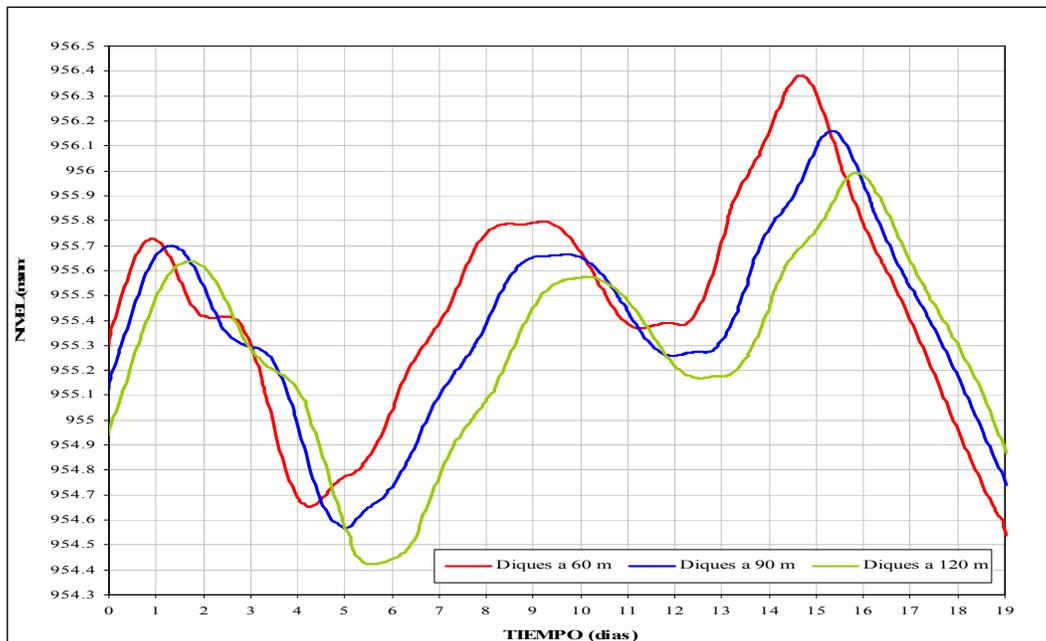


Figura 8.5 Caudales en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques
Periodo de Retorno: 30 años Estación: Juanchito

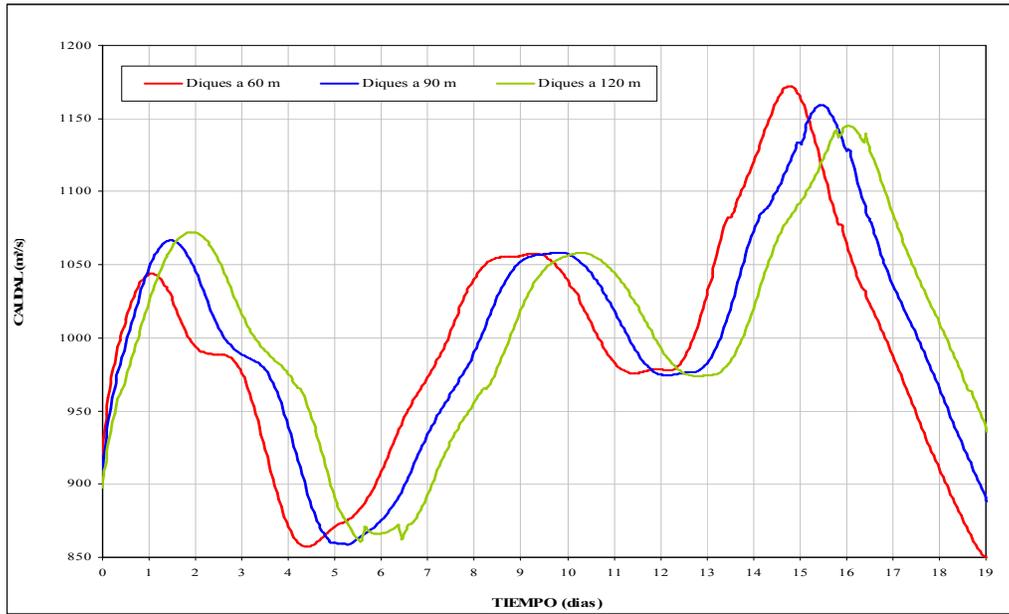


Figura 8.6 Niveles de agua en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques
Periodo de Retorno: 30 años Estación: Juanchito

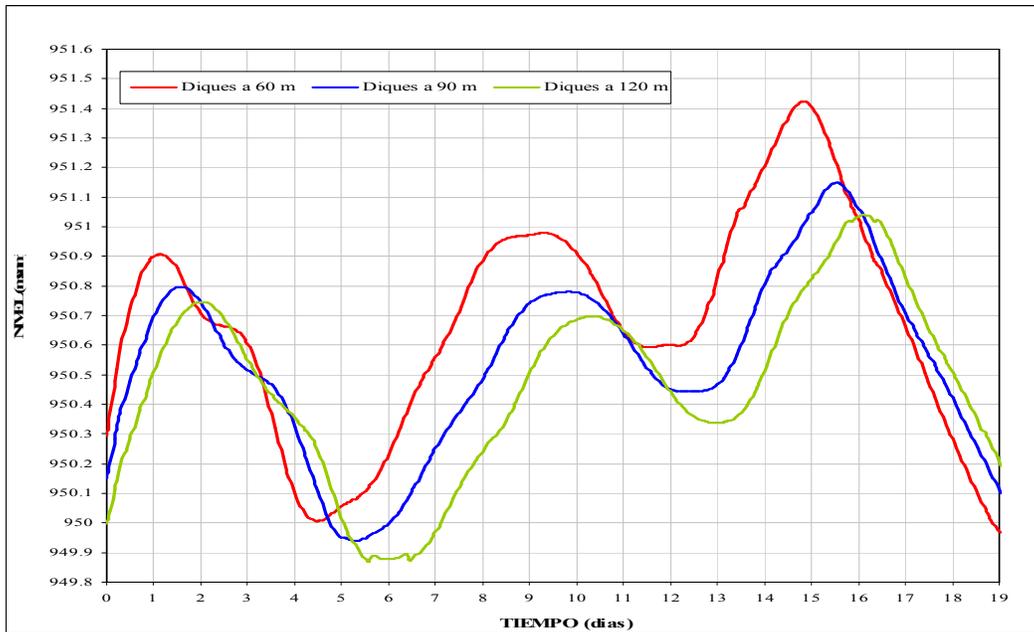


Figura 8.7 Caudales en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques
Periodo de Retorno: 30 años Estación: Mediacanoa

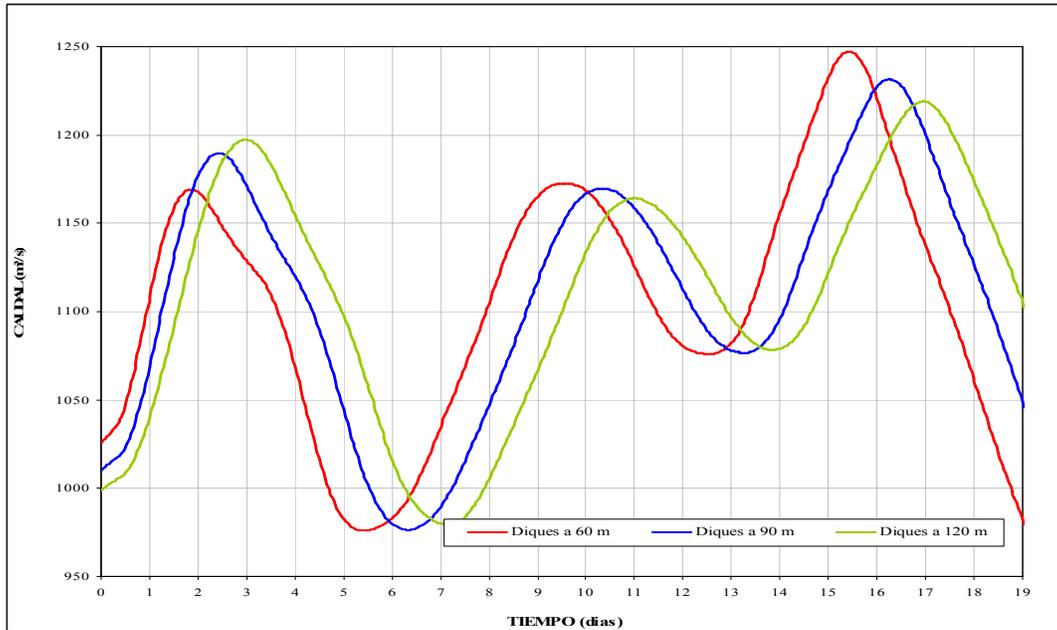


Figura 8.8 Niveles de agua en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques
Periodo de Retorno: 30 años Estación: Mediacanoa

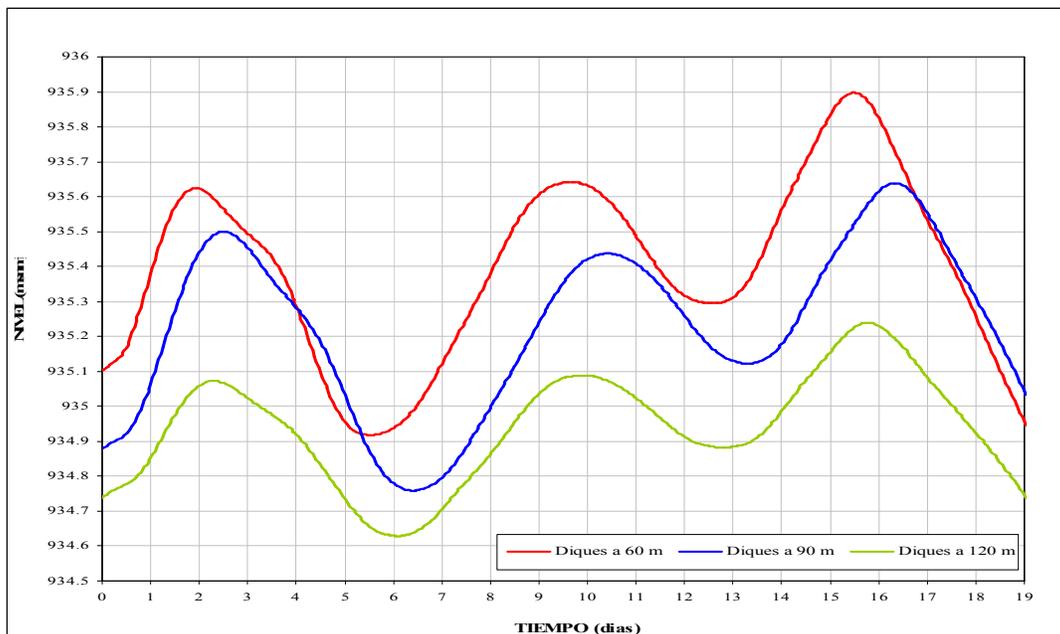


Figura 8.9 Caudales en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques
Periodo de Retorno: 30 años Estación: Guayabal

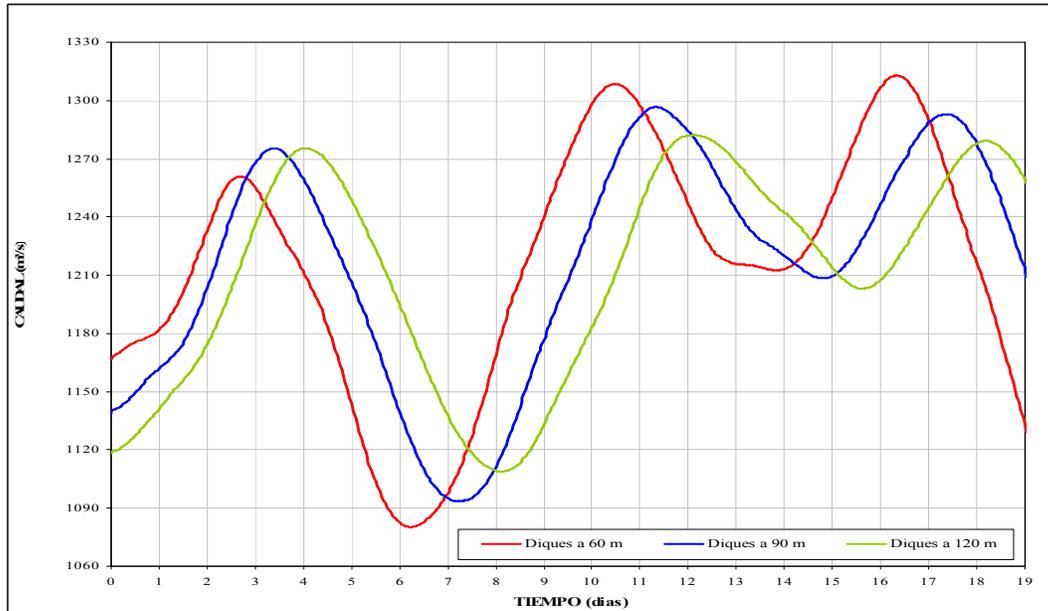


Figura 8.10 Niveles de agua en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques
Periodo de Retorno: 30 años Estación: Guayabal

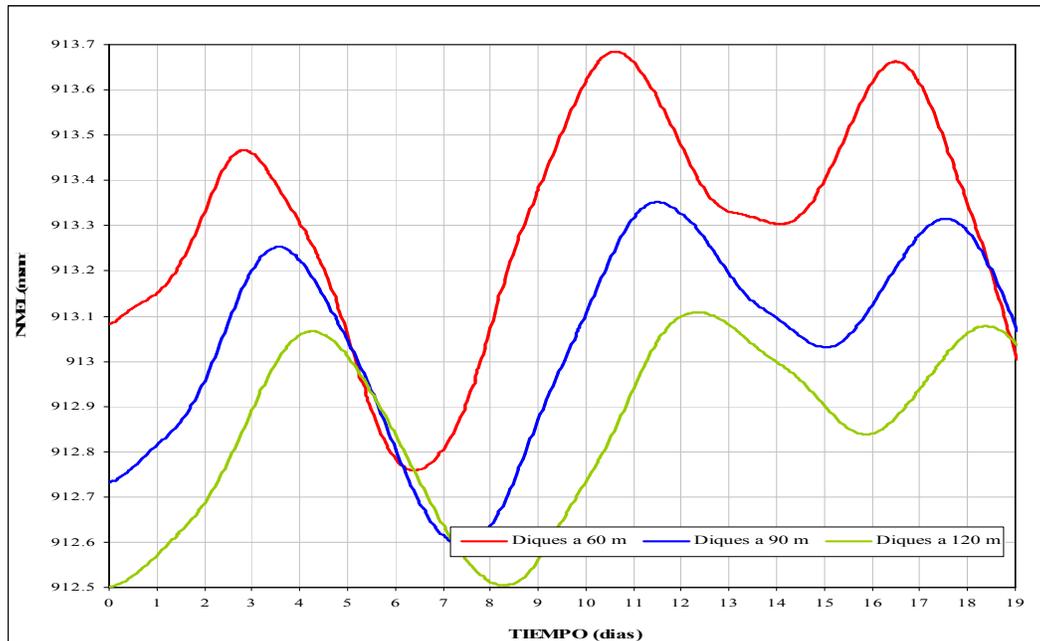


Figura 8.11 Caudales en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques
Periodo de Retorno: 30 años Estación: La Victoria

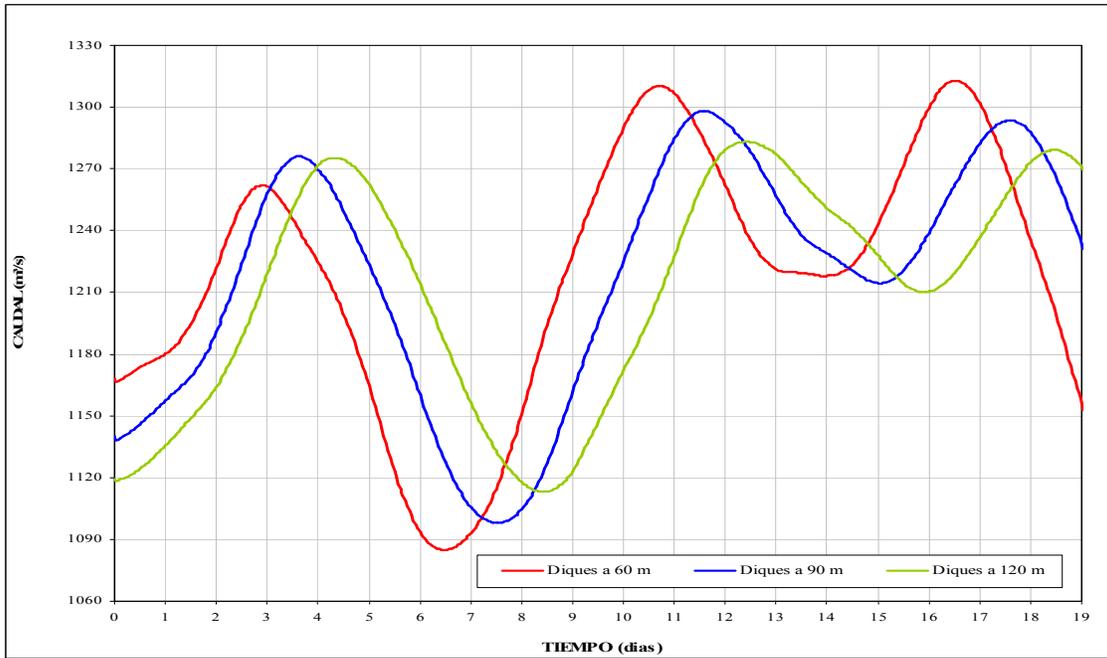


Figura 8.12 Niveles de agua en el río Cauca para diferentes localizaciones de los diques
Periodo de Retorno: 30 años Estación: La Victoria

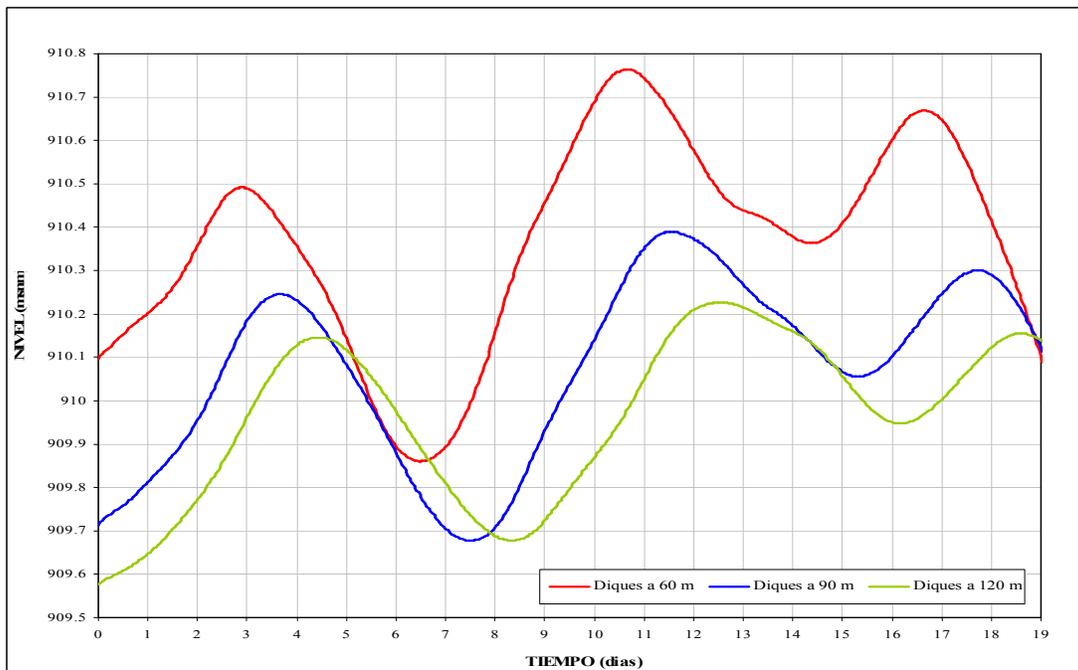
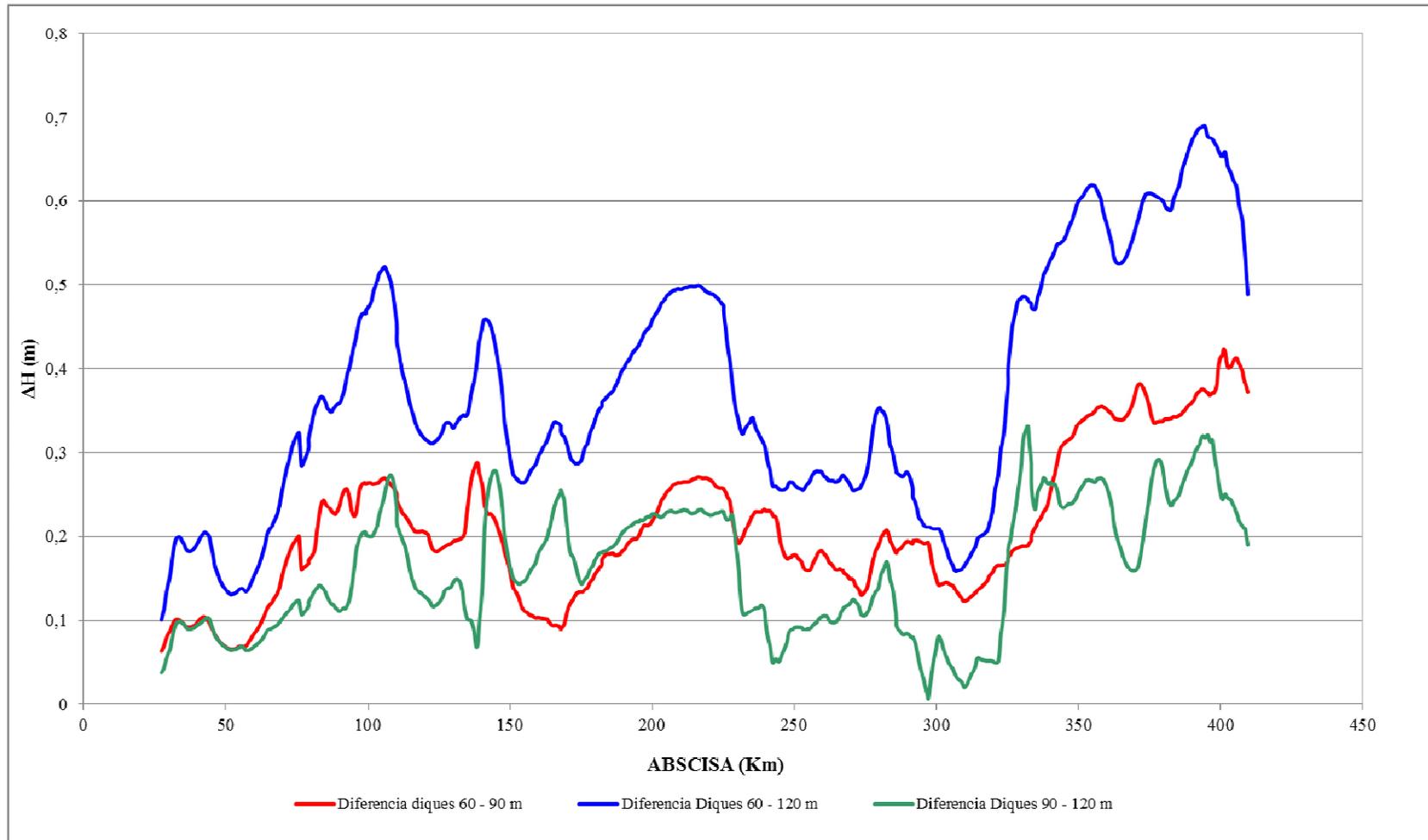


Figura 8.13 Disminución relativa de los niveles de agua máximos en el río Cauca considerando diferentes localizaciones de los diques marginales de protección Período de Retorno: 30 años



Cuadro 8.2 Niveles de agua máximos en el río Cauca calculados para diferentes localizaciones de los diques marginales de protección Periodo de Retorno: 30 años

Estación	Abscisa (km)	Nivel de banca llena	Nivel de agua máximo en el río (msnm)		
			Dique a 60m	Dique a 90m	Dique a 120m
La Balsa	27.385	989.2	985.592	985.556	985.474
	37.492	977.916	979.166	979.103	979.041
	57.861	969.98	969.06	968.984	968.911
La Bolsa	79.9231	960.266	961.551	961.386	961.27
	99.291	956.52	958.434	958.168	957.962
	115.443	954.16	956.382	956.16	955.991
Hormiguero	130.175	954	953.902	953.71	953.57
	140.895	950.98	951.635	951.337	951.279
	160.096	946.85	946.888	946.783	946.616
Juanchito	180.159	942.449	942.815	942.664	942.498
	200.206	937.575	940.003	939.79	939.565
	223.602	932.47	935.898	935.638	935.413
Mediacanoa	240.475	929.46	931.673	931.446	931.33
	260.484	926.55	928.227	928.041	927.941
	280.593	926.936	924.658	924.352	924.216
Guayabal	300.734	921.115	920.733	920.587	920.497
	320.677	916.678	917.422	917.267	917.216
	340.748	912.807	914.783	914.54	914.296
La Victoria	350.187	911.1	913.684	913.352	913.107
	360.551	907.949	912.804	912.451	912.18
	372.006	907.988	910.764	910.389	910.227
Anacaro	392.492	905.102	907.827	907.461	907.159
	400.518	901.037	907.053	906.686	906.446
	410.476	900.493	906.359	905.975	905.765
La Virginia	418.246	903.287	904.486	904.123	904.209
	430.421	899.999	901.214	901.116	901.134
	440.041	900.692	898.861	898.785	898.788
	444.928	901.367	897.996	897.928	897.943

8.2 ACUERDO CVC 052 (diques a 60 m + humedales)

Posterior al análisis que se realizó para estimar la influencia de la ubicación de los diques a diferentes distancias del río, se procedió a simular la **Alternativa estructural 2**, la cual considera los diques marginales de protección localizados a 60 m del río con la integración de los humedales al sistema fluvial. Esta alternativa corresponde a lo contemplado en el Acuerdo CD 052 de 2011 de la CVC. Los niveles de agua máximos obtenidos a lo largo del río Cauca para esta alternativa se contrastaron con los niveles máximos calculados anteriormente para la alternativa de localizar solamente diques distanciados 60 m del río, lo cual permite observar directamente el efecto de laminación que generan los humedales en la dinámica del río Cauca con respecto a la alternativa de sólo diques a 60 m del cauce (ver Figura 8.18). Tal como se puede apreciar en esta gráfica, la reducción o descenso promedio en los niveles de agua a lo largo del valle es alrededor de 0.08m.

8.3 LAGUNAS DE LAMINACIÓN

Para el análisis de los efectos de las lagunas de laminación en la planicie aluvial sobre los niveles de agua en el río Cauca se construyeron dos modelos diferentes: (i) un modelo que incluye las lagunas y los diques marginales a 60 m del cauce (Alternativa 4) y (ii) un modelo que incluye las lagunas, los diques a 60 m del cauce y los humedales (Alternativa 5). En el análisis se consideraron diferentes configuraciones del canal de entrada a las lagunas de laminación, variando el ancho ($B=30\text{m}$, 60m y 100m) y el nivel del fondo ($H=0\text{m}$, 0.5m , 1m y 2m , con respecto al nivel de banca llena del cauce). No obstante, debe mencionarse que las alternativas 7 y 8 también incluyen lagunas de laminación, por lo cual en dichas alternativas también se evalúa el efecto de las lagunas, aunque combinado con los efectos de otras medidas estructurales.

En el primer modelo los resultados de los niveles máximos de agua en el río Cauca se contrastaron con los niveles obtenidos para la alternativa de sólo diques distanciados 60 m del cauce y en el segundo modelo se contrastaron con los niveles máximos obtenidos en las alternativas de diques a 60 m del cauce y diques a 60 m del cauce más humedales.

ALTERNATIVA 5: Diques a 60 m de las bancas del cauce + Humedales + Lagunas de Laminación

En la Figura 8.14 se ilustra la disminución que se presentaría en los niveles de agua a lo largo del río Cauca cuando se implementa esta alternativa con respecto a los niveles estimados al implementar la alternativa 1 (solamente diques marginales de protección). Se aprecia que desde La Balsa (K27+385) hasta la abscisa K147+000 (unos 6 kilómetros aguas abajo de la estación Juanchito) la reducción en los niveles de agua es la misma para todas las configuraciones geométricas de la entrada a las lagunas de laminación analizadas. Este resultado es el esperado debido a que en este tramo no se plantearon lagunas de laminación, con excepción de la laguna de El Estero (Caucaseco), en la cual los niveles de entrada no son alcanzados por los niveles del río para la creciente con periodo de retorno de 30 años.

Aguas abajo de la abscisa K147+000 los resultados de las distintas configuraciones de la conexión río-laguna evaluadas muestran diferentes comportamientos y tendencias en la disminución de los niveles de agua en el río, siendo cada vez mayor la reducción en los niveles hacia aguas abajo en el río. Se aprecia en la figura que las lagunas cuya entrada tiene una altura de 0.5 m sobre el nivel de banca llena del cauce (para los tres anchos analizados) tienden a generar los mayores descensos en los niveles de agua en el río, llegando a reducir los niveles entre unos 0.40 y 0.50 m a partir aproximadamente de la estación Guayabal (abscisa K350) hacia aguas abajo. También generó un comportamiento eficaz para reducir los niveles en el río (con respecto a la alternativa 1 de sólo diques) la alternativa en la cual la entrada a la laguna tiene un ancho de 30 m y el nivel de fondo se encuentra al mismo nivel de la banca llena del cauce.

Las configuraciones evaluadas con el nivel de la conexión río-laguna localizado 2.0 m por encima del nivel de banca llena generaron, en promedio, la menor reducción o descenso en los niveles máximos de agua (con respecto a la alternativa de solo diques) hacia la parte norte del corredor río Cauca (entre uno 0.20 m y 0.35 m).

Por otra parte, en la Figura 8.15 se registra la disminución que presentarían los niveles de agua a lo largo del río Cauca cuando se implementa la alternativa 5 con respecto a los niveles estimados al implementar la alternativa 2 (diques + humedales). El comportamiento en la reducción de los niveles de agua del río a lo largo del corredor del río Cauca es similar al comportamiento observado en el caso anterior (Figura 8.14), cuando se comparaban los resultados de la alternativa 5 con los niveles calculados para la alternativa 1 (sólo diques a 60 m del cauce), con la diferencia en que ahora la reducción en los niveles de agua en el río es de unos 0.08 m, en promedio.

ALTERNATIVA 4: Diques a 60 m de las bancas del cauce + Lagunas de Laminación

Con el fin de disminuir un poco la frecuencia de inundación de las lagunas de laminación se simularon dos configuraciones geométricas diferentes de la conexión río-laguna (considerando las lagunas y los diques a 60m del río), en las cuales el nivel de entrada a la laguna se ubicó por encima del nivel de banca llena del río, así: (i) $B=60$ m y $H= 0.50$ m y (ii) $B=30$ m y $H= 1.0$ m. Los resultados obtenidos de los niveles de agua a lo largo del río se contrastaron con los niveles calculados para la alternativa 1 (sólo diques a 60m del río) (ver Figura 8.18). Se observa que la disminución en los niveles de agua es casi idéntica hasta la abscisa K140+000 (unos 17 km aguas abajo de la laguna de Sonso); a partir de este sitio, en la configuración con conexión río-laguna de 60 m de ancho y nivel de fondo 0.50 m por encima de la banca llena del cauce se obtiene un mejor efecto en la reducción de los niveles de agua en el río (aproximadamente 0.15 m) con relación a la segunda configuración evaluada ($B=30$ m y $H= 1.0$ m).

8.4 EMBALSES EN TRIBUTARIOS

Para el análisis de los efectos de los embalses en los tributarios sobre los niveles de agua en el río Cauca se construyeron tres modelos diferentes: (i) un modelo que incluye los embalses y los diques a 60m del río (Alternativa 3), (ii) un modelo que incluye los embalses, los diques a 60m del río y los humedales (Alternativa 6), (iii) un modelo que incluye los embalses, los diques a 60m del río, y las lagunas de laminación (Alternativa 7), y (iv) un modelo que incluye los embalses, los diques a 60m del río, los humedales y las lagunas de laminación (Alternativa 8).

ALTERNATIVA 3: Diques a 60m del cauce + Embalses en tributarios

En esta alternativa se simularon los embalses en los ríos tributarios Timba, Bugalagrande y Riofrío junto con los diques a 60 m del río. Los niveles de agua máximos calculados se compararon con los niveles máximos obtenidos para la alternativa 1 (sólo diques a 60m del río); la diferencia entre estos niveles máximos a lo largo del corredor río Cauca se presentan en la Figura 8.18. Se aprecia que la operación de los embalses puede contribuir a disminuir los niveles de agua en el río Cauca entre 0.15 m y 0.28 m, dependiendo del sector del río.

ALTERNATIVA 6: Diques a 60m del cauce + Humedales + Embalses en tributarios

En esta alternativa se simularon los embalses en los ríos tributarios Timba, Bugalagrande y Riofrío junto con los diques a 60 m del río y los humedales integrados al sistema fluvial. Los niveles de agua calculados en el río Cauca se compararon primero con los niveles calculados para la alternativa 1 (sólo diques a 60m del cauce) y después con los niveles calculados para la alternativa 2 (diques + humedales).

Al comparar los niveles en el río Cauca obtenidos para esta alternativa 6 con los hallados para la alternativa 1 (sólo diques) (ver Figura 8.18) se observa que los niveles disminuyen entre 0.22m en el sector de Mediacanoa, hasta cerca de 0.43 m en el sector de La Victoria-Anacaro. La mayor reducción en los niveles de agua de esta alternativa con respecto a la alternativa 3 (diques + embalses) se debe lógicamente a la laminación causada por los humedales (incluidos en esta alternativa 6).

Si se comparan los niveles en el río Cauca calculados para alternativa 6 con los hallados para la alternativa 2 (diques + humedales) (ver Figura 8.19) se aprecia que los niveles de agua en el río disminuyen entre 0.15m en el sector de Mediacanoa, hasta cerca de unos 0.27 m en el sector de La Victoria-Anacaro.

Los últimos resultados muestran que el comportamiento o tendencia observada en la reducción de los niveles de agua a lo largo del río Cauca al comparar el efecto relativo entre las alternativas 6 (D+H+E) y 2 (D+H) es muy similar al observado al comparar las alternativas 3 (D+E) y 1 (D), ya que en estas dos últimas alternativas no se tuvieron en cuenta los humedales.

ALTERNATIVA 7: Diques a 60m del cauce + Lagunas de laminación + Embalses en tributarios

En esta alternativa se simularon los embalses en los tributarios junto con los diques a 60m del cauce y las lagunas de laminación. Para las lagunas de laminación se consideraron dos configuraciones de entrada diferentes: (i) $B=60\text{ m}$ y $H=0.50\text{ m}$ y (ii) $B=30\text{ m}$ y $H=1.0\text{ m}$. En la Figura 8.18 se presentan los resultados en la reducción de los niveles de agua a lo largo del río Cauca al simular esta alternativa 7 con respecto a los niveles estimados para la alternativa 1 (sólo diques a 60m del cauce). En la figura se observan tendencias algo similares en la reducción de los niveles a lo largo del corredor río Cauca, mostrando algunas leves diferencias entre ellas según el sector del río: entre las abscisas K160+000 y K240+000 la alternativa con las lagunas con conexión situada 1.0 m por encima de la banca llena produce un descenso en los niveles en el río ligeramente mayor (hasta de unos 0.7m) que el que produce la alternativa con conexión río-laguna situada 0.5 m por encima de la banca llena; pero aguas debajo de la abscisa el efecto se invierte, pues esta última ($H=0.5\text{ m}$) genera una mayor reducción en los niveles de agua en el río (entre unos 0.10 y 18m).

ALTERNATIVA 8: Diques a 60m + Humedales + Lagunas de laminación + Embalses en tributarios

En esta alternativa se simularon los embalses en los tributarios junto con los diques a 60m del cauce y las lagunas de laminación. Para las lagunas de laminación se consideraron cinco configuraciones de entrada diferentes: (i) $B=30\text{ m}$, $H=1.0\text{ m}$; (ii) $B=60\text{ m}$, $H=1.0\text{ m}$; (iii) $B=100\text{ m}$, $H=1.0\text{ m}$; (iv) $B=60\text{ m}$, $H=0.5\text{ m}$; y, (v) $B=30\text{ m}$, $H=0.0\text{ m}$.

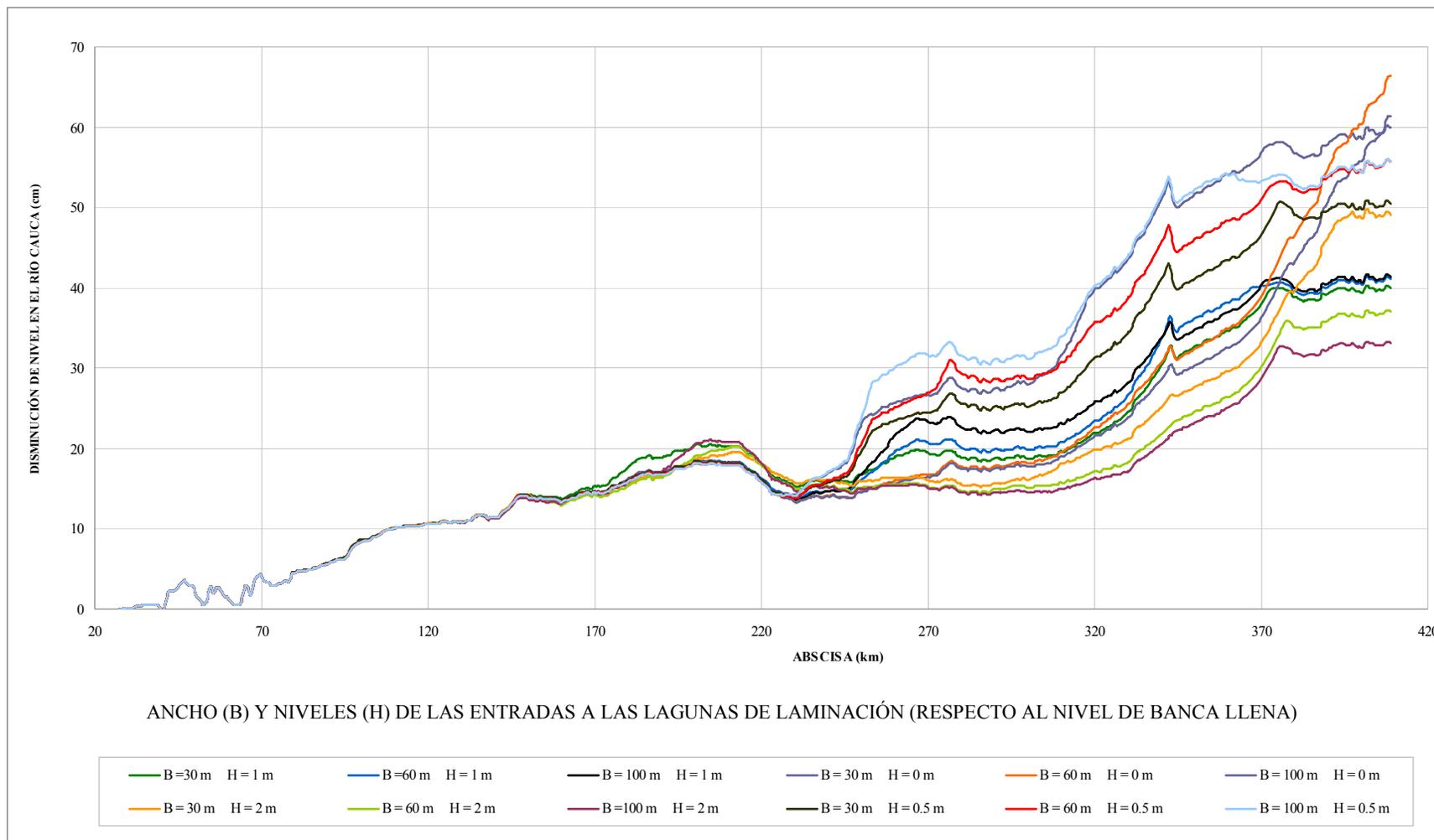
Los resultados de los niveles de agua en el río se compararon primero con los niveles hallados para la alternativa 1 (sólo Diques) (ver Figura 8.16) y luego con los niveles calculados para la alternativa 2 (Diques + Humedales) (ver Figura 8.17) con el fin de observar el efecto adicional de laminación producido por los embalses con respecto al efecto generado por la alternativa 2 (Diques+Humedales).

Hasta la abscisa K147+000 aproximadamente todas las configuraciones evaluadas presentan igual efecto reductor en los niveles de agua en el río; esto debido a que en este sector no se plantearon lagunas de laminación. Entre las abscisas K147+000 y K240+000 se observan algunas muy pequeñas diferencias (de sólo unos pocos centímetros) en el efecto reductor sobre los niveles de agua en el río al comparar las distintas configuraciones de entrada a las lagunas de laminación.

En la Figura 8.16 también se puede observar que cuando las lagunas de laminación tienen una conexión con el río de 30m de ancho y un nivel igual al de banca llena se obtiene el mayor efecto de laminación de la creciente desde la abscisa K240+000 hacia aguas abajo, llegando a reducir los niveles en el río hasta en unos 0.80m en La Victoria con respecto a la alternativa de sólo diques. En este mismo tramo las tres alternativas evaluadas considerando una conexión río-laguna con un nivel de entrada 1.0m por encima de la banca llena del río generan el mismo efecto reductor en los niveles de agua en el río, independiente del ancho de entrada a las lagunas. ($B=30, 60$ y 100 m).

Según se puede apreciar en la Figura 8.17, las tendencias en la reducción de los niveles de agua en el río son similares a las observadas en la Figura 8.16, sólo que ahora la disminución en los niveles es ligeramente menor (entre 0.10m y 0.15m, aproximadamente). Esto debido a que en esta figura se comparan los niveles de la alternativa 8 con los niveles de la alternativa 2.

Figura 8.14 Disminución de los Niveles de agua en el Río Cauca considerando la alternativa 5 (Diques a 60 m + Humedales + Laguna de laminación) respecto a la alternativa 1 (Diques a 60 m del cauce), para diferentes anchos y niveles de entrada a las Lagunas de Laminación



Copia NO controlada CVC

Figura 8.15 Disminución de los Niveles de agua en el Río Cauca considerando la alternativa 8 (Diques a 60 m + Humedales + Laguna de laminación + Embalses) respecto a la alternativa 2 (Diques a 60 m del cauce + Humedales), para diferentes anchos y niveles de entrada

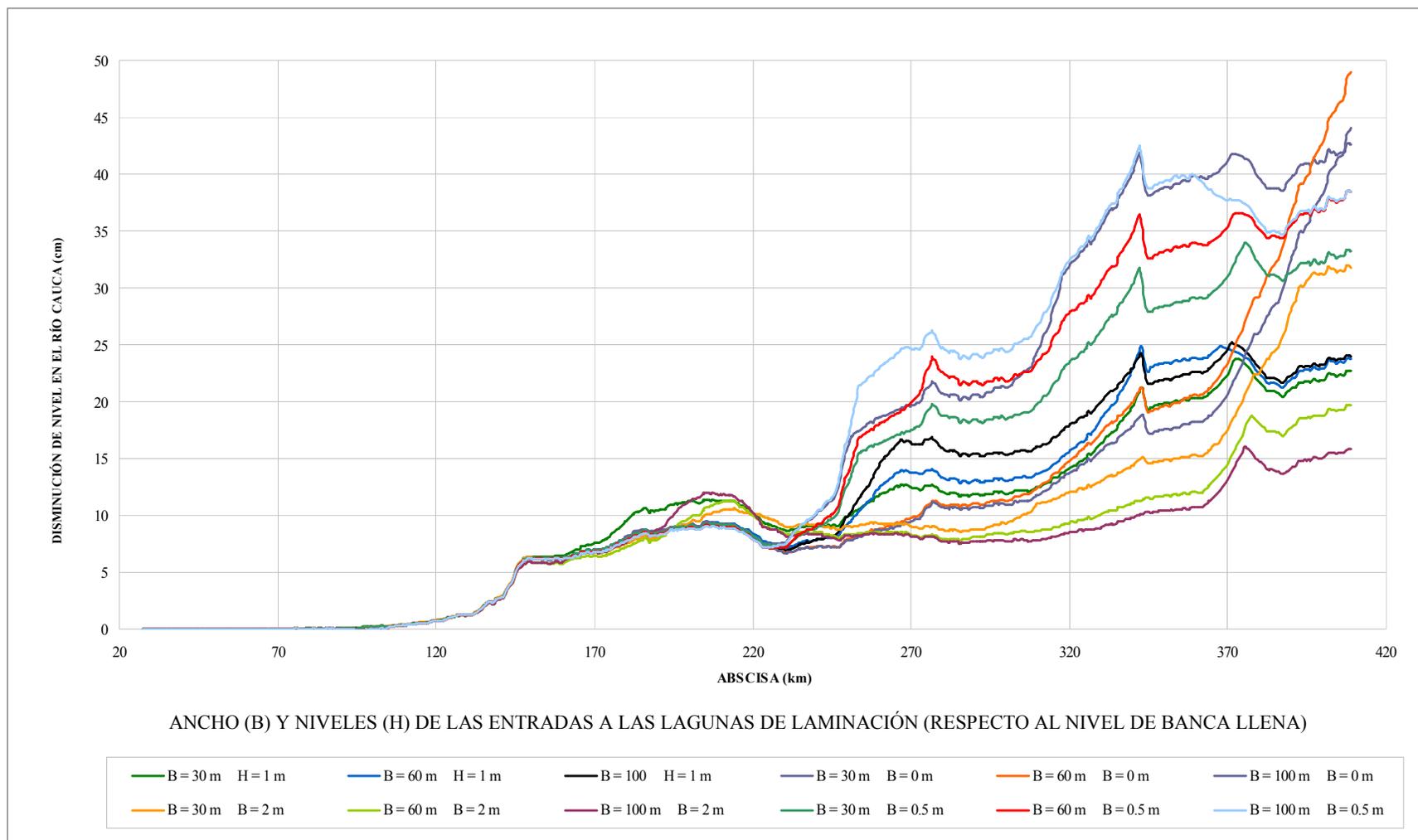
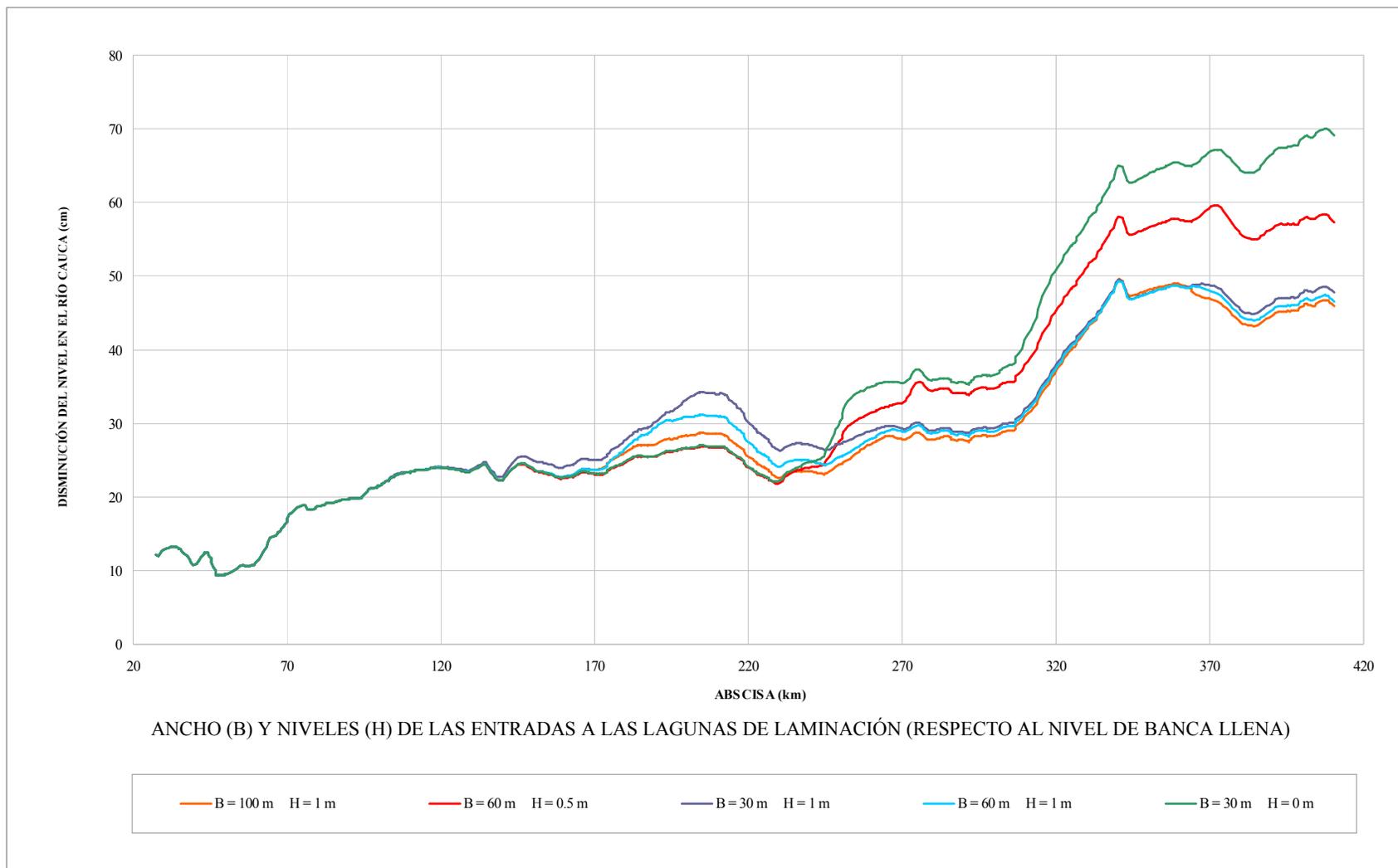


Figura 8.16 Disminución de los Niveles de agua en el Río Cauca considerando la alternativa 8 (Diques a 60 m + Humedales + Laguna de laminación + Embalses) respecto a la alternativa 2 (Diques a 60 m del cauce + Humedales), para diferentes anchos y niveles de entrada



Copia NO controlada CVC

Figura 8.17 Disminución de los Niveles de agua en el Río Cauca considerando la alternativa 8 (Diques a 60 m + Humedales + Laguna de laminación + Embalses) respecto a la alternativa 1 (Diques a 60 m del cauce), para diferentes anchos y niveles de entrada a las Lagunas de Laminación Escenario: Periodo de Retorno = 30 años

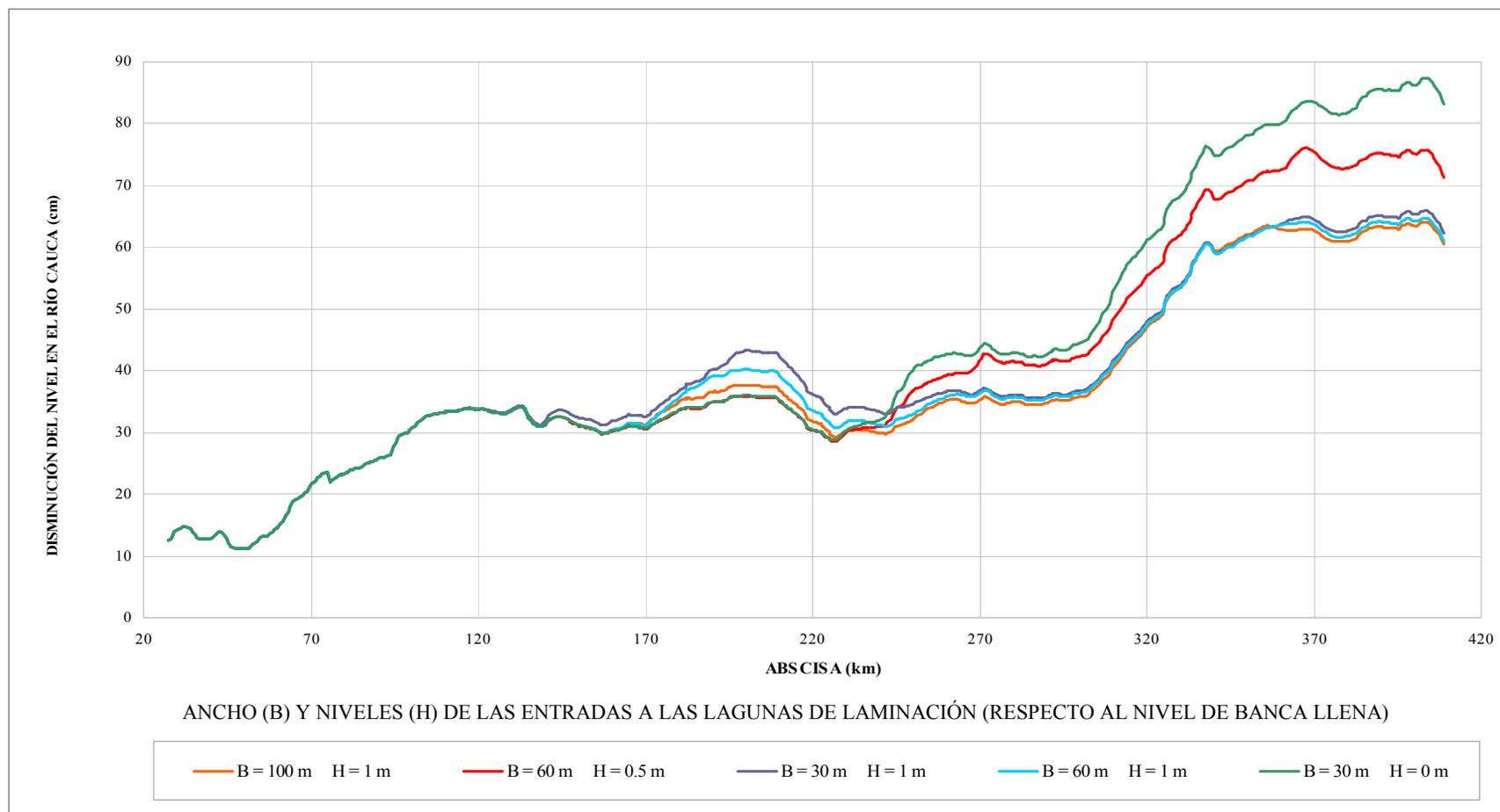
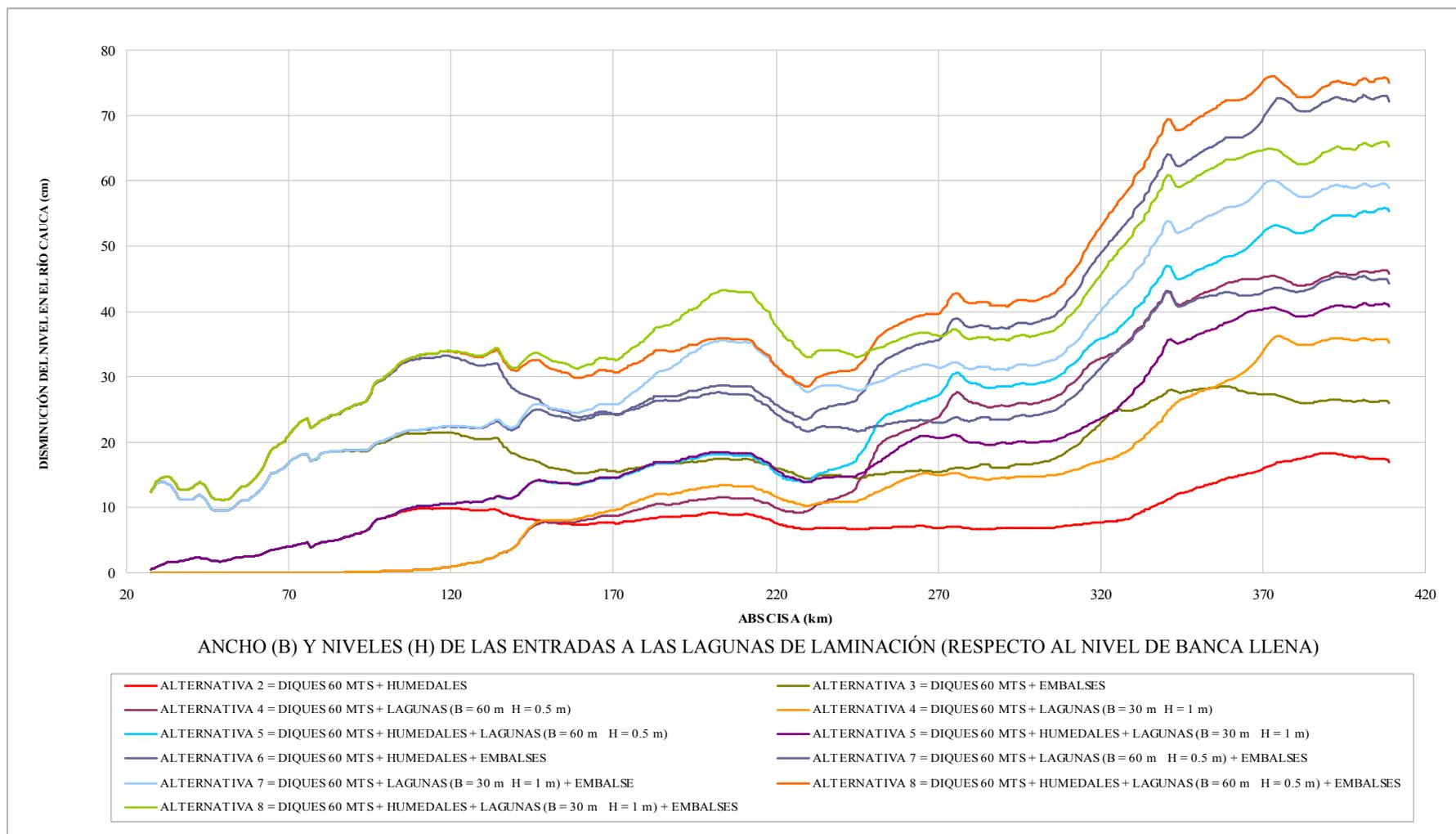
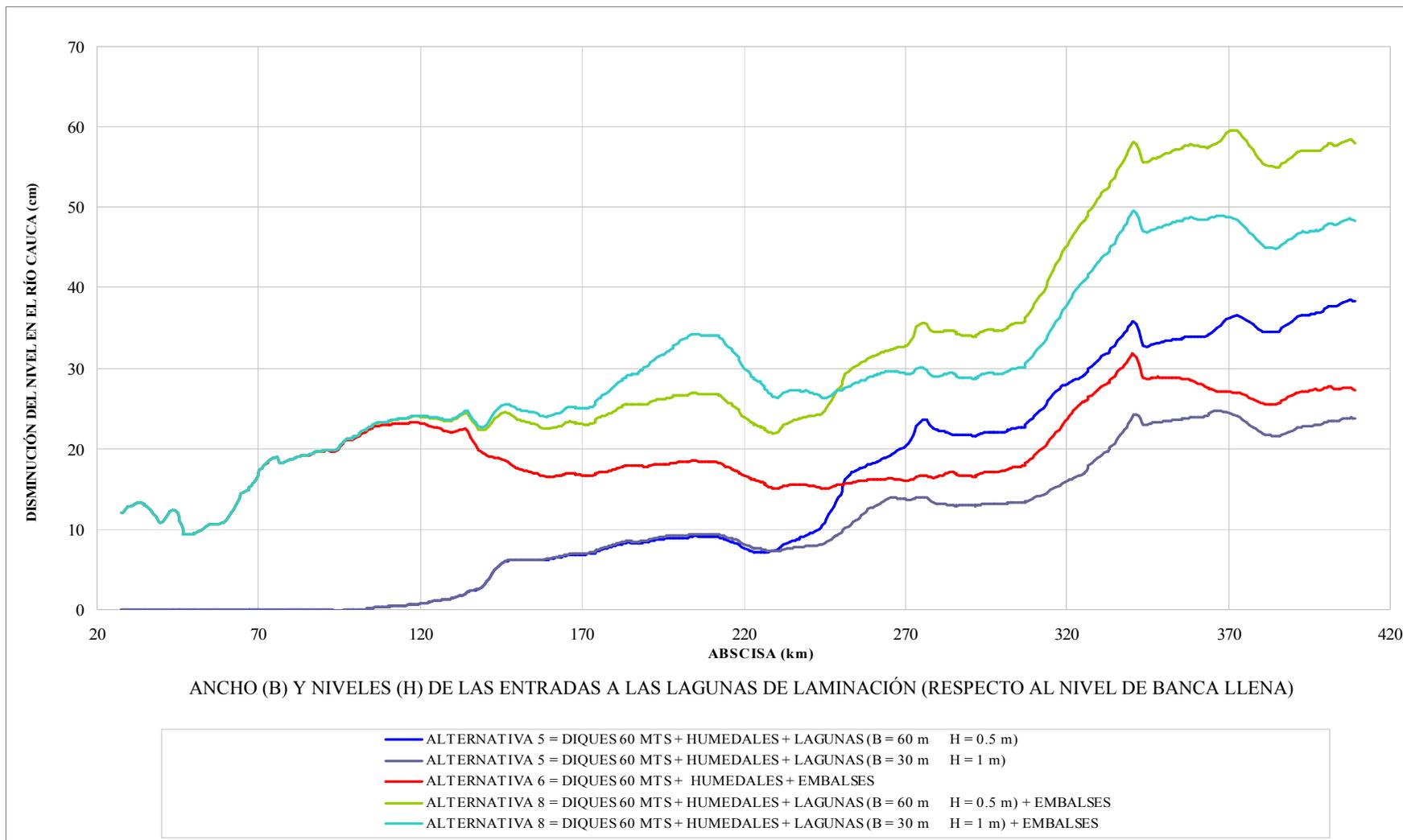


Figura 8.18 Disminución de los Niveles de agua en el Río Cauca considerando diferentes alternativas para el manejo de las inundaciones con respecto a la alternativa 1 (Diques a 60 m del cauce) Escenario: Periodo de Retorno = 30 años



Copia NO controlada CVC

Figura 8.19 Disminución de los Niveles de agua en el Río Cauca considerando diferentes alternativa para el manejo de las inundaciones con respecto a la alternativa 2 (Diques a 60 m del cauce + Humedales) Escenario: Periodo de Retorno = 30 años



9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 CONCLUSIONES

En el presente estudio se plantearon diferentes alternativas estructurales con el fin de lograr una mejor gestión del riesgo por las inundaciones causadas por el desbordamiento del río Cauca en su valle alto. Las medidas estructurales propuestas fueron simuladas numéricamente para identificar su impacto sobre los niveles y los caudales al paso de una creciente con un periodo de retorno de 30 años. Las medidas estructurales analizadas fueron: relocalización de los diques marginales de protección, integración de humedales al sistema fluvial, lagunas de laminación de crecientes y embalses de regulación en ríos tributarios. En varias de las alternativas evaluadas se integraron dos o más de estas medidas estructurales propuestas, buscando con ello incrementar el efecto regulador de las crecientes en el río Cauca. Adicionalmente, se analizaron la influencia del embalse de Salvajina y la laguna de Sonso sobre la hidrodinámica del río Cauca, en especial los efectos sobre los niveles en el río.

Finalmente se estableció una metodología para la clasificación y zonificación de la amenaza por inundaciones causadas por el desbordamiento de un río aluvial, con el objetivo de contribuir a la generación de herramientas que permitan llevar a cabo una mejor planeación y un adecuado control del territorio por parte de las autoridades. Mediante la modelación matemática se generaron los mapas de amenaza por las inundaciones causadas por el desbordamiento del río Cauca considerando crecientes con períodos de retorno de 15, 30 y 100 años

Las principales conclusiones del estudio son las siguientes:

MEDIDAS ESTRUCTURALES

Diques marginales de protección

El distanciamiento de los diques del cauce y el consecuente aumento del ancho de la berma tendrían un impacto positivo en la disminución de los niveles de agua máximos en el río. En la medida en que se aumenta la separación de los diques del cauce principal del río Cauca se reducen cada vez más los niveles de agua. Así, adoptando como referencia los niveles obtenidos cuando los diques se sitúan a 60 m del cauce, en la estación Juanchito al distanciar los diques a 90 m y 120 m del cauce, el nivel de agua máximo se reduciría en 0.30 m y 0.35 m, respectivamente, y en la estación La Victoria se reducirían en 0.38 m y 0.54 m, respectivamente.

Si se desplazan los diques de 60 m a 120 m del cauce, la reducción promedio en los niveles de agua máximos a lo largo del corredor río Cauca sería de cerca de 0.40 m, mientras que al correr los diques de 60 m a 90 m del río, la diferencia sería, en promedio, de 0.20 m. Es preciso señalar que estas reducciones en los niveles de agua no es constante a lo largo del río Cauca en su valle, debido, entre otras razones, a la irregularidad en la configuración morfológica del mismo cauce.

Integración de humedales al sistema fluvial

La integración de los humedales a la dinámica del sistema río Cauca cumple una función de regulación de las crecientes. Los resultados de la modelación matemática, con base en las condiciones e información existente (topografía de la llanura y los humedales, batimetría del río Cauca, extensión de humedales, hidrógrafa de caudales, etc.) muestran que integrar los humedales al río puede reducir los niveles de agua en el río en 0.08 m, en promedio, y hasta unos 0.18 m en la parte norte del corredor (abscisa K380+000, aproximadamente).

Embalses de regulación en tributarios

En una primera alternativa se simuló los embalses en los ríos tributarios Timba, Bugalagrande y Riofrío junto con los diques a 60 m del río. Se aprecia que la operación de los embalses puede contribuir a disminuir los niveles de agua en el río Cauca entre 0.15 m y 0.28 m, dependiendo del sector del río, con respecto a los niveles estimados para la alternativa de sólo diques a 60 m del cauce.

En una segunda alternativa se combinaron tres medidas estructurales (diques a 60 m + humedales + embalses en tributarios), encontrándose que los niveles en el río Cauca disminuyen entre 0.22 m, en el sector de Mediacanoa, hasta cerca de 0.43 m en el sector de La Victoria-Anacaro, con respecto a los niveles estimados para la alternativa de sólo diques a 60 m del cauce. La mayor reducción en los niveles de agua de esta alternativa con respecto a la alternativa anterior (diques + embalses) se debe lógicamente a la laminación causada por los humedales.

Lagunas de laminación

En el estudio inicialmente se consideró una alternativa combinada que incluye diques a 60 m del cauce, humedales y lagunas de laminación. Para el análisis del efecto de las lagunas se consideraron diferentes configuraciones de la conexión río-laguna, variando el ancho ($B=30\text{m}$, 60m y 100m) y el nivel del fondo ($H=0\text{m}$, 0.5m , 1m y 2m , con respecto al nivel de banca llena del cauce). Se encontró que desde La Balsa (K27+385) hasta la abscisa K147+000 (unos 6 kilómetros aguas abajo de la estación Juanchito) la reducción en los niveles de agua (con respecto a la alternativa que considera solo diques) es la misma para todas las configuraciones geométricas de la entrada a las lagunas de laminación analizadas.

Aguas abajo de la abscisa K147+000 los resultados de las distintas configuraciones de la conexión río-laguna evaluadas muestran diferentes comportamientos y tendencias en la disminución de los niveles de agua en el río, siendo cada vez mayor la reducción en los niveles hacia aguas abajo en el río. Las lagunas cuya entrada tiene una altura de 0.5 m sobre el nivel de banca llena del cauce (para los tres anchos analizados) tienden a generar los mayores descensos en los niveles de agua en el río, llegando a reducir los niveles entre unos 0.40 y 0.50 m a partir aproximadamente de la estación Guayabal (abscisa K350) hacia aguas abajo. También generó un comportamiento eficaz para reducir los niveles en el río (con respecto a la alternativa de sólo diques) la alternativa en la cual la entrada a la laguna tiene un ancho de 30 m y el nivel de fondo se encuentra al mismo nivel de la banca llena del cauce.

Las configuraciones evaluadas con el nivel de la conexión río-laguna situado 2.0 m por encima del nivel de banca llena generaron, en promedio, la menor reducción o descenso en los niveles máximos de agua (con respecto a la alternativa de sólo diques) hacia la parte norte del corredor río Cauca (entre 0.20 m y 0.35 m, aproximadamente).

Integración de todas las medidas estructurales consideradas

Las alternativas que presentan los mejores resultados para disminuir los niveles del río Cauca son aquellas que incluyen todos los tipos de medidas propuestas (diques a 60 m del cauce, humedales, lagunas de laminación y embalses de regulación en tributarios). Al sur del corredor río Cauca las disminuciones en los niveles de agua es muy leve y a medida que las medidas estructurales se van integrando al sistema fluvial se va acumulando el efecto regulador, resultando la zona norte la más beneficiada con la implementación de las medidas. Las disminuciones en los niveles de agua máximos en el río durante la creciente con periodo de retorno de 30 años oscilan, dependiendo de la configuración de la conexión río-laguna de laminación, entre 0.10 m y 0.30 m al sur del corredor del río Cauca (hasta cerca de la abscisa K120+000), entre 0.30 m y 0.40 m al centro (hasta la abscisa K270+000, aproximadamente) y entre 0.40 m y 0.80 m al norte del corredor, con respecto a los niveles que se presentarían si sólo existiesen diques a 60 m del cauce principal.

Análisis de la influencia de la laguna de Sonso

Considerando la gran importancia que representa la laguna de Sonso para la región y el sistema río Cauca se analizaron, mediante la modelación matemática, los posibles efectos sobre la hidrodinámica de la laguna y los niveles de agua en el río Cauca que se generarían al construir una segunda conexión en la parte sur de la laguna. Se encontró que no se presentarían cambios leves en los niveles del río Cauca aguas abajo de la laguna, generando una reducción de hasta unos 0.05 m si la entrada sur se realiza al nivel de la banca llena del cauce y con un ancho entre 60 y 100m. Los mayores efectos en la reducción de los niveles del río son principalmente locales (en el sector de la laguna) y puede alcanzar valores que fluctúan entre 0.11m y 0.61m si el ancho de la conexión varía entre 10m y 100m, respectivamente, y el nivel de fondo coincide con el de la banca llena del cauce.

Al interior de la laguna se encontró que el canal ubicado en la zona sur de la laguna permitiría el ingreso al laguna de importantes caudales (variables, en función del ancho y el nivel de la conexión río-laguna) y el canal Caño Nuevo permitiría la salida de los mismos, garantizando una conveniente circulación y de las aguas al interior de la laguna.

Si todos los diques marginales del río Cauca estuviesen a 60 m del río y con las condiciones actuales de la laguna de Sonso, ésta reduciría los niveles máximos en el río en 0.10 m, en promedio, para una creciente con periodo de retorno de 30 años, lo cual evidencia su efecto regulador de las avenidas en el río Cauca

Al aumentar el ancho de Caño Nuevo y sin considerar la conexión al sur de la laguna (30 m, 60 m, 100 m, 500 m o 1000m) el efecto en la hidrodinámica del río Cauca sería casi despreciable, pues la variación en los niveles de agua no superaría los 0.02 m.

Efecto de la operación del embalse de Salvajina sobre hidrodinámica del río Cauca

El embalse de Salvajina ha permitido gestionar en forma más adecuada las crecientes del río Cauca reduciendo, por ende, el impacto de las mismas a lo largo del Valle del Cauca. Esto se evidencia en los caudales relativamente bajos que se registran actualmente en el sector sur del departamento durante las crecientes (inferiores a los que se registraban antes de entrar en operación el embalse), lo cual ha disminuido significativamente la magnitud y frecuencia de las inundaciones en dicho sector. Adicionalmente, mediante la modelación matemática se encontró que sin la regulación del embalse los niveles de agua y los caudales que se registrarían en el río durante las crecientes serían superiores a los que realmente ocurren, especialmente hasta la estación Juanchito, y en menor proporción hacia el norte del departamento. Igualmente al simular la creciente del año 1971 (ocurrida antes de la construcción y puesta en operación de la represa de Salvajina), se encontró que de haberse tenido en ese año en operación el embalse, los niveles y los caudales a la largo del río Cauca habrían sido menores a los registrados.

Debe resaltarse que los ríos tributarios realizan un importante aporte de caudales al río Cauca, en especial durante las crecientes. Debido a estos aportes, a partir de la estación Mediacanoa aproximadamente el efecto del embalse sobre los niveles de agua y los caudales en el río es mucho menos marcado. Entre los ríos que realizan los mayores aportes se tienen los ríos Ovejas, Palo, Timba, Amaime, Tuluá, Bugalagrande y La Vieja.

Ronda hídrica

Con base en los resultados de la modelación matemática para una creciente con un periodo de retorno de 15 años y en el modelo digital de elevaciones del terreno disponible durante el desarrollo del estudio se determinó la ronda hídrica del río Cauca en el valle alto, considerando que no se tuviesen intervenciones en la planicie para controlar o contener las aguas desbordadas del río. Los resultados obtenidos muestran que la extensión de la ronda coincide en gran medida con la envolvente máxima de las inundaciones registradas históricamente.

Zonificación de amenazas por inundaciones

Se estableció una metodología para la clasificación y zonificación de la amenaza por inundaciones causadas por el desbordamiento de un río aluvial. Lo anterior con el fin de contribuir en la generación de herramientas que permitan llevar a cabo una mejor planeación y un adecuado control del territorio por parte de las autoridades. Posteriormente, con base en la modelación matemática hidrodinámica, el modelo digital de terreno y asumiendo que no se existiesen medidas estructurales para el manejo de las inundaciones, se generaron los mapas de amenaza por las inundaciones causadas por el desbordamiento del río Cauca considerando crecientes con períodos de retorno de 15, 30 y 100 años. Los mapas obtenidos muestran que la mayor parte de las áreas que se inundarían con las diferentes crecientes presentarían un nivel de amenaza alto, debido a los niveles relativamente bajos de la planicie aluvial. Igualmente se observa que las áreas afectadas por las inundaciones coinciden en un alto porcentaje con superficie delimitada por la ronda hídrica.

9.2 RECOMENDACIONES

El estudio realizado permitió plantear y evaluar los efectos de algunas medidas estructurales para optimizar la gestión de las inundaciones en el valle alto del río Cauca debido a desbordamientos del mismo. Con el fin de tener un mayor grado de detalle de los escenarios propuestos y disponer de mayores elementos para seleccionar las medidas estructurales más convenientes se presentan las siguientes recomendaciones:

- Realizar un análisis integral de las medidas estructurales planteadas y que generan cambios en la hidrodinámica del río Cauca. Para ello se deberán evaluar los efectos de tales medidas sobre la geomorfología del cauce, los valores y servicios ambientales y los aspectos sociales y económicos, con el fin seleccionar las mejores alternativas para el ecosistema fluvial y su entorno.
- El análisis integral también permitirá identificar la(s) medida(s) estructural(es) más conveniente en los diferentes sectores o tramos a lo largo del río Cauca, por lo cual es posible plantear finalmente una o más alternativas que resulten de la combinación de dos o más medidas estructurales, las cuales deberán ser analizadas considerando los diferentes aspectos ambientales, sociales, económicos e hidráulicos.
- En el análisis realizado para la medida estructural de lagunas de laminación se consideraron diferentes configuraciones de la estructura de conexión río-laguna (distintos anchos y niveles de entrada), pero asumiendo siempre una misma configuración para todo el corredor del río Cauca. En estudios posteriores es recomendable plantear y evaluar configuraciones diferentes para cada una de las estructuras de entrada, dependiendo de las características particulares de cada sector (aspectos fisiográficos, ambientales, sociales, económicos, etc.). Igualmente es conveniente profundizar en los análisis sobre los mecanismos de entrada para cada una de las lagunas, analizando opciones como compuertas y vertederos móviles.
- Se recomienda también estudiar otras alternativas que actualmente se están considerando e implementando a nivel mundial, como el descenso, mediante excavación, del nivel de la llanura de inundación, en aquellos sectores en los que sea posible, siempre que se compruebe que tal nivel se ha incrementado como consecuencia de los sedimentos que el río Cauca deposita en la llanura de inundación durante los desbordamientos.
- Para alcanzar una mejor representación del fenómeno de inundaciones en el valle alto del río Cauca se recomienda evaluar la posibilidad de implementar un modelo bidimensional o uno mixto (donde los cauces se representan en una sola dimensión (1D) mientras que la planicie de inundación se representa en dos dimensiones (2D)). Para lograr esto es necesario contar con información topo-batimétrica muy detallada y confiable, al igual que de información precisa de los niveles y límites de las áreas afectadas durante eventos de inundaciones históricas. Adicionalmente, se debe realizar

un trabajo de catastro exhaustivo, de tal manera que se identifique y caractericen todos los tipos de obras existentes en la planicie para posteriormente realizar una representación más cercana a la realidad al implementar el modelo hidráulico.

- En algunos sectores del río Cauca se encuentran diques marginales de protección a distancias menores a 60 m del cauce principal, ya sea porque fueron construidos muy cerca del cauce principal o porque la dinámica natural de del río ocasionó la erosión progresiva de las márgenes. Esta situación genera niveles más altos en el río, aumentando la presión sobre ellos, poniendo en grave riesgo la estabilidad de los diques y de otras obras de protección e infraestructura existentes. Por esto, resulta necesario y urgente evaluar el estado de los mismos y su relocalización para dar cumplimiento a lo establecido en el Acuerdo CD 052 de 2011 de la CVC.
- En el marco del proyecto Construcción de un Modelo Conceptual para la Restauración del Corredor de Conservación y Uso Sostenible del Sistema Río Cauca en su Valle Alto se construyó un modelo geoidal local, un levantamiento topográfico detallado de la llanura de inundación del río Cauca con tecnología LIDAR y una batimetría del cauce con secciones transversales espaciadas aproximadamente cada 600 m.. Una vez se disponga de esta información se recomienda actualizar el modelo matemático hidrodinámico disponible del río Cauca o construir, de ser posible, un nuevo modelo bidimensional o un modelo mixto (1D+2D).
- Los humedales incluidos en el modelo matemático del río Cauca corresponden a los humedales de los cuales se tiene información; sin embargo, en etapas posteriores se integrar más cuerpos de agua al sistema fluvial, al igual que ampliar el área definida para los humedales. Lo anterior como resultado de los estudios de identificación, delimitación y planes de manejo de humedales que la CVC viene realizando en su función misional. Esto permitirá incorporar una mayor área útil para fines de laminación o regulación de las crecientes.
- El análisis realizado de la influencia de la laguna de Sonso en la hidrodinámica del río Cauca corresponde a un estudio hidráulico básico enfocado en analizar algunas de las posibles alternativas de intervención de la laguna con el doble propósito de reducir los niveles de agua en el río Cauca y explorar opciones que permitan mejorar las condiciones hidrodinámicas al interior de la laguna. Cualquier estudio que se realice posteriormente debería incluir la información topográfica y batimétrica más reciente y detallada levantada por la CVC, y además, evaluar los volúmenes de sedimentos que se podrían derivar hacia la laguna, lo cual requeriría lógicamente del diseño de estructuras desarenadoras con el fin de evitar problemas de colmatación de la laguna.

10 BIBLIOGRAFÍA

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ, UNIVERSIDAD NACIONAL, CORNARE, CORANTIOQUIA (2007). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río Aburrá, POMCA. Medellín, Antioquia.

ARISTIZABAL J.C. (2011). Modelación hidrodinámica del río Cauca en el tramo la bolsa-guayabal, para definir la altura y adecuada localización de diques riberaños. Proyecto de Grado. Pontificia Universidad Javeriana. Santiago de Cali. Colombia.

BOCANEGRA. R.A. (2013). Un nuevo modelo de medidas estructurales para el manejo de inundaciones en el Valle Alto del Río Cauca. Proyecto de Grado. Universidad del Valle. Santiago de Cali. Colombia.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA – INGETEC - INESCO (1975). Proyecto de Regulación del Río Cauca. Informe técnico. Santiago de Cali, Colombia.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA (1978). Proyecto de Regulación del Río Cauca: Discusión general de alternativas de diseño. Informe técnico. Santiago de Cali, Colombia.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA – UNIVERSIDAD DEL VALLE, GRUPO IREHISA (2013). Análisis Hidrológico de las Crecientes Históricas del río Cauca. Proyecto corredor de conservación y uso sostenible del río Cauca. Informe Ejecutivo.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA – UNIVERSIDAD DEL VALLE (2001). Modelación matemática del río Cauca Tramo Salvajina La Virginia. Proyecto de Modelación del Río Cauca - Fase I, Volumen VIII. Santiago de Cali, Colombia.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA – UNIVERSIDAD DEL VALLE (2005). Optimización y aplicaciones de los modelos hidrodinámico, sedimentológico y morfológico del río Cauca tramo la Balsa – la Virginia. Proyecto de Modelación del Río Cauca - Fase II, Volumen VII. Santiago de Cali, Colombia.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA – UNIVERSIDAD DEL VALLE (2006). Levantamiento topográfico de ejes de diques marginales y llanura de inundación del río Cauca tramo Yumbo - Tuluá. Proyecto de Modelación del Río Cauca - Fase III, Volumen II. Santiago de Cali, Colombia.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA – UNIVERSIDAD DEL VALLE (2009). Modelación Matemática del Sistema Río Cauca - Humedales. Convenio Interadministrativo 0144 de 2008, Volumen V. Santiago de Cali, Colombia.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA – UNIVERSIDAD DEL VALLE (2007). Optimización del modelo hidrodinámico y generación de mapas de inundación tramo Yumbo-Toro. Proyecto de modelación Río Cauca – Fase III, Volumen XIV. Convenio Interadministrativo 029 de 2005, Santiago de Cali, Colombia.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA – UNIVERSIDAD DEL VALLE (2014). Planteamiento de Alternativas estructurales y Modelación hidráulica de escenarios para la Gestión de Inundaciones en el Valle Alto del Río Cauca. Convenio Interadministrativo 001 de 2013. Santiago de Cali, Colombia.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA (2011). Ajuste al plan de manejo ambiental de la madre vieja El Estero – corregimiento de Navarro – zona rural del municipio de Cali, valle del Cauca. Informe técnico. Santiago de Cali, Colombia.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA – FUNDACIÓN PACÍFICO VERDE (2011). Diagnóstico del estado actual de los diques del distrito de Aguablanca. Informe de Diagnóstico. Santiago de Cali, Colombia.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA– VALENCIA ESCOBAR Ingeniería & Arquitectura. (2012). Informe de evaluación y ajuste de la propuesta de intervención presentada como soporte para acceder al fondo de recurso de calamidades. Contrato CVC No. 0309 DE 2011. Informe técnico. Santiago de Cali, Colombia.

CORPORACIÓN OSSO (2012). CONTRATO DE CONSULTORÍA N° 101 DE 2012 CELEBRADO ENTRE EL FONDO ADAPTACIÓN Y CORPORACIÓN OBSERVATORIO SISMOLÓGICO. Informe de avance n° 2 República de Colombia Ministerio de Hacienda y Crédito Público.

FATTORELLI S. Y FERNÁNDEZ P.C. (2011). Diseño Hidrológico. 2^{da} edición. Edición digital publicada en la biblioteca virtual de la Water Assessment & Advisory Global Network.

JICA (2002). Flood Control. Project for the enhancement of capabilities in flood control and Sabo engineering of the DPWH. Department of public works and highways.

PERAFÁN, A. (2005). Transformaciones paisajísticas en la zona plana vallecaucana. Revista Historia y Espacio No. 24. Universidad del Valle

RAGHUNATH H.M. (2006). Hydrology: Principles - Analysis - Design. Revised Second Edition. Manipal, Karnataka

REPÚBLICA DE COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. 2011. Ley 1450 de 2011. Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo, 2010-2014. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación.

RODRÍGUEZ D.M. Y JOJOA J.I. (2011). Estudio y evaluación de alternativas para la restauración de la hidrodinámica de la laguna de Sonso. Trabajo de Grado. Universidad del Valle.

ROYAL HASKONING DHV Y CORPORACIÓN OSSO (2013) .Dique de Aguablanca a lo largo del Río Cauca, Cali, Colombia. Diagnostico y Recomendaciones.

SALAS M.A. (1999). Obras de Protección Contra Inundaciones. Cuadernos de Investigación No 49. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México.

SAAD M.B.A (). Nile River Flood Control: Egyptian Experiences. Hydraulics Research Institute. El Shorouk City. Egypt.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (2012). Guia para el acotamiento de las Rondas Hidricas de los cuerpos de agua de acuerdo a lo establecido en el Artículo 206 de la Ley 1450 de 2011 – Plan Nacional de Desarrollo. Contrato Interadministrativo No. 377 de 2012. Informe Técnico. Bogotá, Colombia.

FOWG (2001). Guidelines of the FOWG. Berne. DUTCH WATER PROGRAM ROOM FOR THE RIVER

Wang Z. (2005). Flood Control in the Yangtze River Basin. Changjiang (Yangtze) Water Resources Commission (CWRC) Ministry of Water Resources, China.