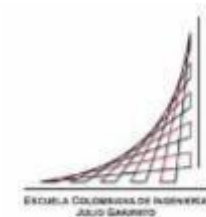


Maestría en Ingeniería Civil

**Propuesta metodológica para la definición del límite de la ronda
hidráulica de la cuenca media del río Magdalena. Sector de
análisis y prueba piloto entre San Luis y Barrancabermeja.**

Jorge Eliecer Gaitán Campos

Bogotá, D.C., día 06 de julio de 2016



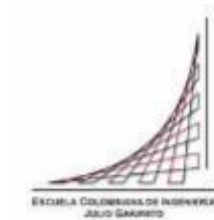
**Propuesta metodológica para la definición del límite de la ronda
hidráulica de la cuenca media del río Magdalena. Sector de
análisis y prueba piloto entre San Luis y Barrancabermeja.**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

MSc, Ph.D., Germán Ricardo Santos Granados

Director

Bogotá, D.C., día 06 de julio de 2016



La tesis de maestría titulada “Propuesta metodológica para la definición del límite de la ronda hidráulica de la cuenca media del río Magdalena. Sector de análisis y prueba piloto entre San Luis y Barrancabermeja.”, presentada por Jorge Eliecer Gaitán Campos, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis

Germán Ricardo Santos Granados

Jurado

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz

Jurado

Paulino Galindo Yustres

Bogotá, D.C., día 06 de julio de 2016

Agradecimientos

Para Luis Alfonso Campos y Enelia Cardona de Campos, mis papitos, mi orgullo. A mi señora y mi familia, por la confianza y apoyo transmitido.

A German Santos Granados, director del trabajo de grado, por la dedicación, interés y los valiosos aportes realizados.

Gracias a Paulino Galindo, coterráneo y colega, por la asesoría y guía en el desarrollo del documento, por la calidad de la información y apreciaciones necesaria para culminar el trabajo de grado.

A Jorge Enrique Sáenz, especialmente gracias por brindarme la primera oportunidad laboral de trabajar en su equipo y permitir que aun continúe aprendiendo de su sapiencia personal y laboral.

El presente documento ha sido elaborado con base en la experiencia del autor en la participación de trabajos de consultoría en temas fluviales referentes a diseños de protección de orilla, diseños de obras de encauzamiento, diseños e interventorías de dragados, modelaciones hidráulicas, análisis de navegabilidad y estudios de proyección de carga para el transporte fluvial, desarrollados con la empresa JESyCa S.A.S.

Jorge.gaitan@jesyca.com

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	V
INTRODUCCIÓN	XII
Planteamiento del problema	XIII
Objetivo General.....	XIV
Objetivos específicos.....	XV
Definiciones y Abreviaturas.....	XVI
CAPÍTULO 1 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN NORMATIVA	18
1.1 El Estado Colombiano	18
1.1.1 Cronología del Código Civil	19
1.1.2 Código civil.....	21
1.1.3 Concepto de dominio público	22
1.1.4 Accesión por Aluvión	24
1.1.5 Procedimiento para revisar una normatividad expresada en una Ley.....	26
1.2 Cronología de la normatividad de rondas hídricas	27
1.3 Normatividad actual	31
1.4 Estudios técnicos realizados en Colombia	33
1.4.1 Corpoguavio.....	34
1.4.2 Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca– CAR.....	36
1.5 Recopilación de información en la Normatividad internacional.....	38
1.5.1 Estados Unidos de América	38
1.5.2 México.....	40
1.5.3 Uruguay.....	42
1.5.4 Chile.....	43
1.5.5 Holanda.....	45
1.5.6 España	48

CAPÍTULO 2 PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL ACOTAMIENTO DE LA RONDA HÍDRICA	51
2.1 Comparación de conceptos hidráulicos sobre ronda hídrica a nivel internacional	53
2.2 Diferentes definiciones de caudal formador de cauce	55
2.3 Procedimiento de cálculo del caudal formador de cauce.....	57
2.3.1 Paso 1: Curva de duración de caudales	59
2.3.2 Paso 2: Curva de volumen de sedimentos de fondo.....	61
2.3.3 Paso 3: Histograma de volumen de material de fondo.....	62
CAPÍTULO 3 ESCENARIO DE ESTUDIO	66
3.1 El río Magdalena.....	67
3.1.1 Cuenca.....	69
3.1.2 Hidrología y niveles del río Magdalena	73
3.1.3 Represas hidroeléctricas sobre el río Magdalena	79
3.1.4 El fenómeno de El Niño y La Niña	80
3.1.5 Prevención sobre desastres naturales.....	83
3.1.5.1 Funciones de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres – UNGRD	85
3.1.5.2 Fenómenos naturales.....	86
3.1.5.3 Inundaciones	86
3.2 Caracterización sector de estudio	89
3.2.1 Registros hidrológicos	90
3.2.2 Topografía y Batimetría (UNAL 2012)	91
3.2.3 Fotografía satelital.....	93
CAPÍTULO 4 ASPECTOS METODOLÓGICOS	94
4.1 Geomorfología	94
4.1.1 Unidades geomorfológicas.....	94
4.1.2 Descripción geomorfológica	97

4.1.3 Análisis geomorfológico.....	98
4.2 Dinámica fluvial.....	100
4.2.1 Información disponible	100
4.2.2 Análisis de orillas y Dinámica fluvial	101
4.3 Hidrología e Hidráulica	104
4.3.1 Hidrología	104
4.3.1.1 Descripción climatológica.....	105
4.3.1.2 Registros de las estaciones hidrológicas	106
4.3.1.3 Calculo del caudal formador de cauce.....	108
4.3.2 Hidráulica.....	114
4.3.2.1 Descripción del modelo 1D	114
4.3.2.2 Información topográfica y batimétrica	115
4.3.2.3 Parámetros básicos y condiciones de frontera	117
4.3.2.4 Modelación Hidráulica	118
4.3.2.5 Calibración del modelo.....	121
4.3.2.6 Resultados.....	124
CAPÍTULO 5 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....	126
5.1 Ronda hídrica según metodología propuesta.....	126
5.1.1 Envoltente	127
5.1.2 Definición de la ronda hídrica	128
5.2 Ronda hídrica según normatividad actual	130
5.3 Límite de zona de utilidad pública e interés social definido por Cormagdalena	134
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	136
BIBLIOGRAFÍA	140
ANEXOS	143

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cronología de los acontecimientos en el Código Civil de Colombia	20
Tabla 2 Resumen del marco legal actual de las rondas hídricas.....	29
Tabla 3 Disponibilidad de información de nivel 1 en Corpoguavio para análisis de ronda hídrica.....	35
Tabla 4 Componentes de la metodología para obtener zonas de ronda en la jurisdicción de la CAR	36
Tabla 5 Comparación de conceptos hidráulicos a nivel internacional.....	54
Tabla 6 Diferentes valores de caudal formador de cauce	55
Tabla 7 Cronología de actividades para la conformación del Canal del Dique	68
Tabla 8 Lista de los principales ríos del mundo de acuerdo a su caudal, longitud, área de drenaje y volumen de sedimentos transportado.....	72
Tabla 9 Variación de niveles máximos y mínimos en el río Magdalena sobre las cuenca media y baja	75
Tabla 10 Pendiente hidráulica media para el nivel de referencia excedido el 50% del tiempo.....	77
Tabla 11 Estaciones meteorológicas e hidrológicas utilizadas en el estudio	91
Tabla 12 Clases de las orillas en el río Magdalena sobre cuenca media.	101
Tabla 13 Estaciones meteorológicas e hidrológicas utilizadas en el estudio	105
Tabla 14 Registros hidrológicos en la estación de Peñas Blancas (San Luis).....	107
Tabla 15 Registros hidrológicos en la estación de Barrancabermeja	107
Tabla 16 Caudales utilizados en la modelación	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de la definición de ronda hídrica	33
Figura 2 Definición del área de riesgo de inundación y de la vía de intenso desagüe.....	39
Figura 3 Delimitación de Zonas Federales en Cauces y Cuerpos de Agua.....	42
Figura 4 Normativa vigente en Chile en relación con la protección de los cuerpos de agua, según el reglamento de Suelo, Agua y Humedales de la Ley 20.283.....	44
Figura 5 Actividades proyectadas para aumentar la capacidad de inundación	47
Figura 6 Definición gráfica de Dominio Público Hidráulico	50
Figura 7 Unión de polígonos para definir la envolvente de la ronda hídrica	51
Figura 8 Procedimiento para obtener la curva de duración de caudales	60
Figura 9 Procedimiento para obtener la ecuación de capacidad de transporte	62
Figura 10 Diagrama de características del transporte de sedimentos en un río	63
Figura 11 Procedimiento para obtener el histograma de capacidad de volumen de sedimentos	65
Figura 12 Localización general del río Magdalena	71
Figura 13 Principales afluentes del río Magdalena (Caudales medios m ³ /s)	76
Figura 14 Perfil longitudinal del río Magdalena	78
Figura 15 Índices de variación de temperaturas desde 1950 a octubre de 2015.....	81
Figura 16 Localización general San Luis – Barrancabermeja.....	89
Figura 17 Mapa geomorfológico entre el sector San Luis y Barrancabermeja (20 Km)	99
Figura 18 Digitalización de orillas del río Magdalena mediante mapas y ortofotos.....	101
Figura 19 Mapa de dinámica fluvial entre el sector de San Luis a Barrancabermeja.....	103
Figura 20 Localización de estaciones hidrológicas y meteorológicas.....	105
Figura 21 Precipitación mensual en Barrancabermeja	106
Figura 22 Temperatura media mensual	106

Figura 23 Curva de duración de niveles diarios en Barrancabermeja	108
Figura 24 Curva de duración de caudales Peñas Blancas	109
Figura 25 Valores medios mensuales de transporte Peñas Blancas.....	110
Figura 26 Curva de caudal solido vs caudal liquido Peñas Blancas.....	111
Figura 27 Histograma de caudales medios Peñas Blancas	112
Figura 28 Histograma de volumen de sedimentos Peñas Blancas.....	113
Figura 29 Modelo digital de terreno San Luis a Barrancabermeja.....	116
Figura 30 Esquema de flujo procesos utilizados en modelo hidráulico.....	120
Figura 31 Curva de calibración Nivel vs Caudal estación Peñas Blancas	121
Figura 32 Curva de calibración Cota (m.s.n.m.) vs Caudal estación Peñas Blancas.....	123
Figura 33 Sección transversal típica del modelo hidráulico	124
Figura 34 Mapa resultante del análisis hidrológico e hidráulico entre San Luis y Barrancabermeja	125
Figura 35 Unión de polígonos para definir la envolvente de la ronda hídrica	127
Figura 36 Mapa de la ronda hídrica del río Magdalena en el sector entre San Luis y Barrancabermeja	129
Figura 37 Niveles máximos de los últimos 15 años en la estación Peñas Blancas	131
Figura 38 Curva de calibración Nivel vs Caudal estación Peñas Blancas	132
Figura 39 Mapa resultante del análisis hidráulico según normatividad actual entre San Luis y Barrancabermeja.....	133
Figura 40 Mapa de faja de zona de utilidad pública e interés social entre San Luis y Barrancabermeja	135

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Respuesta del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) a consultas realizadas sobre parámetros y conceptos técnicos referentes a la definición de la ronda hídrica de un río.

Anexo 2: Registros hidrológicos del IDEAM en la estación Peñas Blancas. (23167010) – Río Magdalena

Anexo 3: Secciones Transversales - Resultados de la modelación hidráulica.

Anexo 4: Archivo magnético en formato comprimido .ZIP del modelo hidráulico.

Anexo 5: Tabla de coordenadas XY que define la ronda hídrica del río Magdalena en el sector entre San Luis y Barrancabermeja. Sistema de referencia MAGNA-SIRGAS / Colombia East Central Zone.

INTRODUCCIÓN

Dadas las grandes consecuencias que tienen los eventos extremos en el río Magdalena y teniendo en cuenta los desastres causados en las emergencias invernales de los años 2010 (noviembre) y 2011 (abril) ocasionados por el fenómeno de La Niña, es fundamental definir la ronda hidráulica la cuenca media del río Magdalena, para establecer las áreas o límites donde no se deben realizar asentamientos humanos y en donde ya existan realizar un plan de manejo hídrico.

La normatividad Colombiana, en el artículo 83, literal d) del Decreto Ley 2811 de 1974, dice que “salvo derechos adquiridos por particulares, son bienes inalienables e imprescriptibles del Estado, entre otros, la faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta (30) metros de ancho”. Y no se especifican metodologías o procedimientos para establecer las líneas de mareas máximas.

Cuatro años después, se expide el decreto reglamentario 1541 de 1978, donde el artículo 11 dice que se entiende por Cauce Natural la “faja de terreno natural que ocupan las aguas de una corriente al alcanzar sus niveles máximos por efectos de las crecientes ordinarias; y por lecho de los depósitos naturales de aguas, el suelo que ocupan hasta donde llegan los niveles ordinarios por efectos de lluvias o deshielo”. Seguidamente en el artículo 13, indica que “...para los efectos de aplicación del artículo 11 se entiende por la línea o niveles ordinarios las cotas promedios naturales de los últimos quince (15) años, tanto para las más altas como para las más bajas”.

Adicionalmente, la definición contenida en los artículos citados en el párrafo anterior tiene referencia con lo dispuesto en el artículo 42 del mismo Decreto Ley 2811, que dice: “Pertenece a la Nación los recursos naturales renovables y demás elementos ambientales que se encuentran dentro del territorio nacional y que son regulados por el Código de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente”.

Entonces la faja de protección, paralela a la línea de mareas máximas del cauce permanente de ríos y lagos hasta de treinta metros, son bienes de dominio público que se caracterizan por su afectación a una finalidad pública, en tanto su uso y goce pertenece a la comunidad por motivos de interés general; de manera que, si esa faja pertenece a un río o cuerpo de agua que atraviesa un predio de propiedad privada, pero no

necesariamente nace y muere en él, se consideran bienes de uso público y por supuesto su delimitación es de interés nacional.

De acuerdo con diversas interpretaciones de las entidades ambientales en la definición y metodología sobre la normatividad Colombiana, para establecer el límite que separa las zonas de uso público y de uso privado de la ronda hídrica de un río mediante los artículos 11 a 17 del decreto 1541 de 1978, se plantea desarrollar una propuesta metodológica para la definición del límite de la ronda hidráulica de la cuenca media del río Magdalena, escogiendo como prueba piloto el tramo comprendido entre San Luis y Barrancabermeja.

Planteamiento del problema

El artículo 8 de la Constitución Política establece que es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación. Consecuentemente, el decreto 2811 de 1974 define que salvo derechos adquiridos por particulares, son bienes inalienables e imprescindibles del Estado: una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho.

Según lo expuesto, existe una debilidad en la normatividad al definir el límite de esta faja, ya que no se plantea un criterio o metodología para determinar el límite, permitiendo que la palabra “hasta” logre establecer un rango desde 1 centímetro hasta 30 metros, generando inseguridad jurídica.

De igual forma, el decreto 1541 de 1978 que reglamenta el decreto 2811 de 1974, en el artículo 12 postula que “se entiende por líneas o niveles ordinarios las cotas promedio naturales de los últimos quince (15) años tanto para las más altas como para las más bajas”. Es tal la ambigüedad en la interpretación, que en sentido estricto, implicaría que después del 31 de diciembre de cada año se calcule un nuevo límite que conlleve alcances legales para la definición de las áreas de los predios privados y más aún en el pago de impuestos.

Adicionalmente, el mismo Decreto establece que en los terrenos privados situados en las riberas de los ríos y donde no se haya realizado la delimitación de la ronda, cuando se produzcan fenómenos naturales como mermas, desviaciones o desecamientos que dejen al descubierto los cauces y sus lechos parcial o totalmente, estos suelos no formarán parte de la propiedad privada sino que se incluirán en la franja de hasta 30 metros.

Como se evidenció anteriormente, esta franja puede ir desde unos pocos centímetros hasta los 30 metros, así que cuando se presenta algún fenómeno como los mencionados del fenómeno de la niña (año 2010 y 2011) o el fenómeno del niño (finales del año 2015), los particulares interesados podrán apoderarse de la zona que antes era de dominio público y se inicia un proceso de asentamiento humano y construcciones en la zona de cauce natural del río, sin tener en cuenta que la dinámica del río tiende a recuperar su zonas de inundación naturalmente.

La normatividad descrita, no presenta un procedimiento o una metodología clara para establecer la ronda hidráulica de un río. Adicionalmente, describe unos lineamientos de forma general que deben ser aplicados a todos los cauces de Colombia, sin distinguir entre ríos y quebradas y mucho menos entre las diferentes etapas longitudinales de las cuencas alta, media o baja. Tampoco se tienen en cuenta aspectos relacionados con la dinámica fluvial y la geomorfología.

Como parte del proceso de este documento, se presentó un derecho de petición dirigido al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) solicitando aclaraciones sobre las variables planteadas en la normatividad que presentan inseguridad jurídica. La solicitud fue respondida el 10 de mayo del 2016, en la cual establece que se están estructurando los criterios para el acotamiento de la ronda hídrica, tal como lo mandata el artículo 206 de la Ley 1450. De acuerdo con lo anterior, esta propuesta se convierte en un documento de revisión e interés particular para el fortalecimiento de la normatividad Colombiana. Con el objetivo de hacerle seguimiento, se presenta la carta enviada al MADS y las respuestas en el Anexo 1.

Objetivo General

Proponer una metodología para determinar el límite de la ronda hidráulica de la cuenca media del río Magdalena, realizando un estudio y prueba piloto para un trayecto de 20 kilómetros entre la población de San Luis (Orilla del departamento de Antioquia) y Barrancabermeja (orilla del departamento de Santander), con base en una recopilación normativa, estableciendo una propuesta para procesar y analizar la información geomorfológica, la dinámica fluvial, hidrológica y el resultado de una modelación hidráulica en una dimensión..

Objetivos específicos

- a) Contextualizar la cronología legislativa en Colombia sobre la ronda hídrica. Investigar diferentes interpretaciones adoptadas por las entidades competentes en Colombia sobre la definición del límite de la ronda hídrica de un río y recopilar información de la normativa semejante en otros países.
- b) Analizar técnicamente las definiciones que establecen el proceder para el cálculo del límite de la ronda hidráulica de un río y de esta manera proponer mediante componentes metodológicos un procedimiento de cálculo para determinar las coordenadas que representen un límite de la zona de ronda hídrica.
- c) Realizar una descripción general del Río Magdalena y caracterizar detalladamente la información secundaria obtenida de la hidrología, especificar la información utilizada en el modelo digital de terreno y la información de las fotografías satelitales del sector de estudio entre San Luis y Barrancabermeja.
- d) Desarrollar tres componentes metodológicos a lo largo de los 20 kilómetros del escenario de estudio, analizando la geomorfología y dinámica fluvial para determinar la evolución fluvial del sector, procesar la información hidrológica y de esta forma obtener un caudal representativo de la formación del cauce permanente, que mediante una modelación hidráulica unidimensional en Hec Ras se logre verificar el nivel de agua producido por este caudal.
- e) Aplicar la metodología propuesta, realizando una superposición de los polígonos resultantes de los tres componentes desarrollados, y de esta forma determinar una envolvente entre ellos, para definir el área mediante unas coordenadas que establezcan el límite de la ronda hídrica del sector del río Magdalena entre San Luis y Barrancabermeja.

Definiciones y Abreviaturas

ArcGis	Infraestructura de software para elaborar mapas y poner a disposición la información geográfica de los usuarios. Desarrollado por ESRI (Environmental Systems Research Institute por sus siglas en inglés)
CORMAGDALENA	Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena
Geo Ras	Es una extensión para ArcGis desarrollada conjuntamente por el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC - Hydrologic Engineering Center por sus siglas en inglés) del cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos (USACE - United States Army Corps of Engineers por sus siglas en inglés) y ESRI. Básicamente es un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades especialmente diseñadas para procesar datos georreferenciados que permiten bajo el entorno de los sistemas de información geográfica (SIG), facilitar y complementar el trabajo con HEC-RAS.
Hec Ras	Hydrologic Engineering Center - River Analysis System (Siglas en inglés). Software desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos para el análisis de sistemas de ríos.
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
INCODER	Instituto Colombiano de Desarrollo Rural (Actualmente en liquidación)
INDERENA	Instituto Nacional de Recursos Naturales Renovables y del Ambiente. Formado en 1968 y liquidado en 1993. Reemplazado por el Ministerio de Medio Ambiente
MinAmbiente	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Ronda Hídrica	Una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho (literal d, Art. 83, Ley 2811/74)
Cauce Natural	Faja de terreno que ocupan las aguas de una corriente al alcanzar sus niveles máximos por efecto de las crecientes ordinarias. (Ley 1541/78 Art. 11)

Lecho de los depósitos naturales de agua	El suelo que ocupan hasta donde llegan los niveles ordinarios por efecto de lluvias o deshielo. (Decreto 1076 de 2015, artículo 2.2.3.2.3.1)
Niveles Ordinarios	Las cotas promedio naturales de los últimos quince (15) años tanto para las más altas como para las más bajas. (Ley 1541/78 Art. 13)
Playa Fluvial	Terreno entre la línea de las bajas de aguas y aquellas a donde llegan las ordinarias naturalmente en su mayor incremento. (Ley 1541/78 Art. 12)
Inalienable	Que no se puede enajenar
Enajenar	Vender o ceder la propiedad de algo u otros derechos.
Accesión	La accesión es un modo de adquirir por el cual el dueño de una cosa pasa a serlo de lo que ella produce o de lo que se junta a ella. Los productos de las cosas son frutos naturales o civiles. (Artículo 713, Código Civil Colombiano)
Aluvión	Se llama aluvión el aumento que recibe la ribera de un río o lago por el lento e imperceptible retiro de las aguas. (Artículo 719, Código Civil Colombiano)

Capítulo 1 Recopilación de la información normativa

Para el desarrollo del presente documento, se realizó una recopilación de la información que normaliza el procedimiento en el cual se establece el límite de la ronda hídrica. Se presenta una cronología legislativa en Colombia, contextualizando brevemente el sistema del Estado colombiano a través de la historia del Código Civil, para presentar los lineamientos del Gobierno Nacional en cuanto a la definición de los términos de dominio público y de la ronda hídrica. También se presenta la normatividad actual y una comparación de los recientes estudios técnicos realizados por diferentes entidades como el Ministerio de Ambiente, algunas Corporaciones Autónomas Regionales y universidades interesadas en el tema.

Finalmente, se recopiló información normativa de 6 países donde se utilizan conceptos semejantes a ronda hídrica. En los Estados Unidos de América se denomina Vías de Intenso Desagüe, en México se establece como Zona Federal, en Uruguay se determina como Álveos, en Chile se conoce como las zonas de protección de exclusión de intervención, en Holanda es el Espacio para el río (en idioma holandés: Ruimte voor de river) y en España se le conoce como el Dominio Público Hidráulico.

1.1 El Estado Colombiano

La noción de Estado, es un sentido general, se refiere al conglomerado social, político y jurídicamente constituido, asentado sobre un territorio determinado, sometido a una autoridad que se ejerce a través de sus propios órganos y cuya autoridad (soberanía) es reconocida por otros Estados (Madrid Malo, 2005).

Colombia es un Estado Social de Derecho, organizado en forma de Republica Unitaria, democrática, participativa y pluralista (artículo 1 Constitución Política).

En el artículo 113 de la Constitución Política de Colombia establece que: “Son Ramas del Poder Público, (i) la legislativa, (ii) la ejecutiva y (iii) la judicial, además precisa que existen otros órganos para el cumplimiento de las demás funciones del Estado, y señala que las diferentes ramas y órganos, aunque tienen funciones separadas, colaboran armónicamente para realizar sus propósitos.

También existen unos órganos autónomos, órganos de control y la organización electoral, con funciones separadas e independientes, para la realización de sus fines.

(i) La rama Legislativa está compuesta por el Senado de la Republica y la Cámara de Representantes y estas corporaciones a su vez están divididas en comisiones. (ii) La rama Ejecutiva a nivel nacional está compuesta por el Presidente de la Republica, los ministros, los jefes de los departamentos administrativos, los superintendentes y los directores o gerentes de las entidades públicas (ICBF, Sena, etc.) y a nivel territorial o regional, los gobernadores y alcaldes. (iii) La rama Judicial está compuesta por la Corte Constitucional, Corte Suprema de Justicia, Consejo de Estado, Consejo Superior de la Judicatura (eliminado el año anterior y lo reemplaza el Consejo de Gobierno Judicial), Fiscalía General de la Nación, Tribunales, Juzgados y la Justicia Penal Militar.

Los órganos autónomos e independientes son: El Banco de la Republica, los Entes Universitarios autónomos, las Corporaciones Autónomas Regionales, la Comisión Nacional de Televisión y la Comisión Nacional del Servicio Civil.

Los órganos de control son: La Contraloría General de la Republica y el Ministerio Publico integrado por la Procuraduría General de la Nación, Defensoría del Pueblo, y las Personerías distritales y municipales.

1.1.1 Cronología del Código Civil

Existen dos periodos en la historia del derecho Civil Colombiano, el primero inicia desde el descubrimiento de América hasta el Código Civil de 1873 y el segundo corresponde a las reformas del Código Civil de 1873 realizadas hasta la fecha.

En la siguiente Tabla 1 se presentan los acontecimientos desde el descubrimiento de América hasta el año 1873 que propiciaron la creación del Código Civil en Colombia.

A partir del año 1825 se pone en vigencia el libro de la Nueva Recopilación en la Gran Colombia, en este libro se indicaron las fuentes del derecho de la nueva república, basadas en las leyes de Recopilación de Indias, la Nueva Recopilación de Castilla y las 7 partidas (7 libros que fueron obras de Alfonso Decimo El Sabio), los libros 4, 5 y 6 se refieren al Derecho Civil en el cual se inspira en la doctrina del Derecho Romano Agustiniano.

Tabla 1 Cronología de los acontecimientos en el Código Civil de Colombia

AÑO	ACONTECIMIENTO
1492	Descubrimiento de América
1503	Régimen jurídico conocido como la Legislación de Indias en las colonias españolas de América
1567	En España se expide el libro de la <i>Nueva Recopilación</i> , bajo el reinado de Felipe II
1680	Recopilación de los reinos de Indias, el cual rigió en España hasta el año 1810
1821	Creación de la Gran Colombia, Congreso de Angostura y de Cúcuta
1822	Francisco de Paula Santander crea la comisión legislativa para elaborar proyectos de leyes teniendo en cuenta códigos civiles y penales Europeos
1825	Se pone en vigencia el libro de la <i>Nueva Recopilación</i> en la Gran Colombia
1829	Simón Bolívar ordena crear una comisión que redactara un proyecto de Código Civil, basado en el Código Civil francés
1830	Disolución de la Gran Colombia. Deja sin efecto el propósito de Santander y Bolívar
1840	Chile crea la comisión de legislación del congreso nacional para redactar el Código Civil
1852	Chile presenta terminado el Código Civil, Por Andrés Bello ¹ , considerado humanista más importante de América
1855	Se aprobó el Código Civil en Chile como Ley Nacional
1858	Estado soberano de Santander, con pequeñas modificaciones adopta el código Civil de Chile
1873	El presidente de Colombia Murillo Toro, toma el Código adoptado en 1858 para que rigiera de manera unánime en todos los estados federados

Fuente: Elaboración e investigación propia

¹ Venezolano (Filósofo, Traductor, Poeta, Ensayista, Educador Político y Jurista)

Inicialmente en Colombia rigió el derecho español correspondiente a la época del descubrimiento de América y la conquista de los territorios latinoamericanos, llamado derecho de indias; ya liberados del reino español. Los nuevos países, como Colombia, empezaron a crear sus propias leyes, entre ellas, una vez promulgada la constitución del 1886, la Ley 57 de 1887 que adoptó nuevamente como Código Civil de la nación, el ya sancionado (aprobado) el 26 de mayo de 1873.

El documento elaborado por Andrés Bello, se basó en cuatro fuentes destacadas, la primera en el Derecho Romano Puro (Corpus Juris Civiles), la segunda en el Derecho Romano (Códigos de Austria, de Prusia y la obra de Savigny), la tercera en el Viejo Derecho Español (Las 7 Partidas y la Nueva Recopilación) y por último el Derecho Francés (Obra de Pothier y el Código de Napoleón que fue creado en 1804)

La estructura del Código Civil colombiano es casi la misma al del Código Civil chileno, con algunas variables. Está dividido en cuatro libros contenidos dentro del mismo texto del código: (i) el libro primero trata de las personas, como sujetos de derecho; (ii) el libro segundo versa sobre los bienes, su dominio (propiedad), posesión, uso y goce; (iii) el libro tercero estudia la sucesión por causa de muerte (herencia) y las donaciones; y (iv) el libro cuarto regula lo referente a las obligaciones en general y a los contratos.

1.1.2 Código civil

El Código se llama civil por que comprende las disposiciones legales que determinan especialmente los derechos de los particulares y sus acciones civiles para reclamar su reconocimiento ante los jueces de la Republica, por ejemplo, reclamar una herencia a través de la respectiva demanda (escrito), demandar para exigir el cumplimiento de una contrato, el pago de una deuda, el pago de una indemnización de perjuicios, la restitución de un inmueble porque el arrendatario ha incumplido con el pago del canon de arrendamiento, etc. Esto para distinguirlo de las otras ramas o áreas del derecho, como lo es el derecho penal, el derecho laboral, derecho administrativo, derecho disciplinario, derecho penal de menores, derecho ambiental, derecho minero, derecho constitucional, etc.

El Código Civil colombiano que tiene más de 100 años de expedido, aún conserva su vigencia en casi todas sus normas, al igual que el antiguo derecho romano. El Código

Civil colombiano de todas maneras ha tenido reformas, por medio de decretos (expedidos por el Presidente de la Republica, llamados decretos-leyes) y leyes expedidas por el Congreso de la Republica, que para el presente trabajo no es necesario mencionar, a excepción del decreto-ley 2811 de 1974 y su decreto reglamentario 1541 de 1978.

Por medio del decreto-ley 2811 de 1974 se expidió el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Este decreto-ley² (así se llaman los decretos que expide el Presidente de la Republica por facultades extraordinarias conferidas por el Congreso de la Republica, en este caso la ley 23 de 1973 autorizó al Presidente para expedir el código de recursos naturales renovables, estos decretos-leyes tienen la misma fuerza o categoría de una ley expedida por el Congreso de la Republica) se distingue de los decretos reglamentarios que son para reglamentar las leyes y decretos –leyes, como el decreto reglamentario No. 1541 de 1978.

1.1.3 Concepto de dominio público

Según la Constitución Política de Colombia en su artículo 63 dice que “Los bienes de uso público, son inalienables, imprescriptibles e inembargables”. Los bienes de uso público son aquellos cuya utilización pertenece a todos los habitantes del territorio, pero cuyo dominio pertenece al Estado y sobre los cuales no se puede dar apropiación.

El Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Medio Ambiente aprobado mediante el decreto ley 2811 de 1974, define en el artículo 42 que “los recursos naturales renovables pertenecen a la nación, así como los demás elementos ambientales regulados por el mismo que se encuentren dentro del territorio nacional, sin perjuicio de los derechos legítimamente adquiridos por particulares y de las normas especiales sobre baldíos”.

El Código Nacional de Recurso Naturales Renovables y del Medio Ambiente de 1974 define en su artículo 80 que “Sin perjuicio de los derechos privados adquiridos con arreglo a la ley, las aguas son de dominio público, inalienables e imprescriptibles”.

2

Entre los bienes (las aguas, que son de dominio público) que menciona el Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Medio Ambiente se encuentra el artículo 83 que dice que “el cauce natural de las corrientes, las playas fluviales y el lecho de los depósitos naturales de agua. Las playas marítimas, fluviales y lacustres; una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho; los depósitos de las aguas subterráneas”, entre otros.

El Código determina en el artículo 86 que “toda persona tiene derecho a utilizar las aguas de dominio público para satisfacer sus necesidades elementales, las de su familia y las de sus animales, siempre que con ello no cause perjuicios a terceros, y dicho uso deberá hacerse sin deteriorar el cauce o las márgenes de la corriente”.

Con respecto a la ocupación de cauces, el artículo 102 del Código establece que “quien pretenda construir obras que ocupen el cauce de una corriente o depósito de agua, deberá solicitar autorización”, pero la norma no hace claridad bajo qué condiciones se otorgan dichos permisos ni a quienes. Igualmente, en el artículo 104 establece que “la ocupación permanente de playas sólo se permitirá para efectos de navegación y que la ocupación transitoria requerirá permiso, exceptuando que el uso se verifique para pesca de subsistencia”.

Con respecto a la servidumbre de uso de riberas, el Código determina en el artículo 118 que “los dueños de predios ribereños están obligados a dejar libre de edificaciones y cultivos el espacio necesario para los usos autorizados por ministerio de la ley o para la navegación, la administración del respectivo curso de agua, la pesca o actividades similares”. Así mismo, en lo referente al uso, la conservación y preservación de las aguas, se establece en el artículo 32 que “sin permiso, no se podrán alterar los cauces, ni el régimen y la calidad de las aguas” y que “se negará el permiso cuando la obra implique peligro para la colectividad, o para los recursos naturales y la seguridad interior”.

En el artículo 155 el Código determina que le corresponde al gobierno en cuanto a las facultades de la administración de las aguas y sus cauces, “a) Autorizar y controlar el aprovechamiento y la ocupación y explotación de los cauces; b) Coordinar la acción de los organismos oficiales y de las asociaciones de usuarios, en lo relativo al manejo de las aguas; c) Reservar las aguas de una o varias corrientes o parte de dichas aguas; d) Ejercer control sobre uso de aguas privadas, cuando sea necesario para evitar el

deterioro ambiental o por razones de utilidad pública e interés social, y e) Las demás que contemplen las disposiciones legales”.

Según el Decreto 1541 de 1978, con respecto al dominio de las aguas, éstas se dividen en dos categorías: aguas de dominio público y aguas de dominio privado. Las aguas de dominio público corresponden a “los ríos y todas las aguas que corran por cauces naturales de modo permanente o no, las aguas que corran por cauces artificiales que hayan sido derivadas de un cauce natural, los lagos, lagunas, ciénagas y pantanos, las aguas que están en la atmósfera, las corrientes y depósitos de aguas subterráneas, las aguas lluvias”, entre otras. Las aguas de dominio privado son las que nacen y mueren en una misma heredad³, brotando naturalmente a la superficie y evaporándose por completo o desapareciendo bajo la superficie por infiltración dentro de la misma.

El Consejo de Estado, Sala de Contencioso Administrativo, Sección tercera, Referencia: Acción Popular, conoce y establece claramente las definiciones de Uso Público como “Los bienes de dominio público, de los cuales toda comunidad debe servirse según sus necesidades, constituyen el conjunto de bienes destinados al desarrollo o cumplimiento de las funciones públicas del Estado o aquellos que están afectados al uso común, tal como se dispone en los artículos 63, 82 y 102 de la Constitución⁴. Los bienes de uso público son inalienables, debido a que no se pueden negociar por hallarse fuera del comercio en consideración a la utilidad que prestan en beneficio común, y al ser inalienables como consecuencia son imprescriptibles, entendido esto como el fenómeno por el cual no se puede adquirir el dominio de los bienes de uso público en el transcurso del tiempo, ya que debe primar el interés colectivo y social⁵” (Acción Popular, 2004).

1.1.4 Acceso por Aluvión

El artículo 713 del Código Civil, define que la accesión es un modo de adquirir por el cual el dueño de una cosa pasa a serlo de lo que ella produce o de lo que se junta a ella. Los

³ Porción de terreno cultivado perteneciente a un mismo dueño (RAE)

⁴ Consejo de Estado. Sala de lo Contencioso Administrativo. Sección Tercera. Expediente 18.503 de 22 de febrero de 2001.

⁵ Corte Constitucional. Sentencia T – 566 de 23 de octubre de 1992.

productos de las cosas son frutos naturales o civiles. El código clasifica dos clases de Accesión: cuando una cosa se junta a otra, considerada como una verdadera accesión, y la que se refiere a los frutos derivados de una cosa, considerada como una simple extensión del derecho real de propiedad.

Se llaman frutos naturales los que da la naturaleza, ayudada o no de la industria humana (Código Civil art. 714) y se llaman frutos civiles los precios, pensiones o cánones de arrendamiento o censo, y los intereses de capitales exigibles, o impuestos a fondo perdido (Código Civil art. 717).

Una verdadera accesión es la que implica la unión de dos o más cosas de diferentes dueños y que forman un todo inseparable o indivisible, según las siguientes clases:

- a) De Inmuebles a inmuebles (aluvión, avulsión, mutación de cauce o álveo, formación de islas)
- b) De mueble a inmueble (construir con materiales ajenos en suelo propio, construir con materiales propios en terreno ajeno, construir con materiales ajenos en terreno ajeno)
- c) De mueble a mueble (adjunción, especificación y mezcla)

Lo que respecta al presente trabajo, solo se va a continuar describiendo el literal a) Accesión de inmueble a inmueble.

Hasta la vigencia del decreto 1541 de 1978, los fenómenos de accesión natural de inmuebles a inmueble eran denominados aluvión y avulsión, ingresaban en el patrimonio del propietario ribereño por ocupación. Una vez dictada esta norma, dichos fenómenos no entran en el patrimonio particular si no que hacen parte de los bienes de la Nación.

La definición de Aluvión, según el artículo 719 del Código “al aumento que recibe la ribera de un río o lago por el lento e imperceptible retiro de las aguas”. Si la naturaleza le ha dado al ribereño el privilegio de estar al lado de un cauce, a la Ley no le interesa modificarle dicha situación; así como el ribereño corre el riesgo de que parte de su predio lo arrastre la corriente, la Ley compensa este hecho con la posibilidad de adquirir lo que se adhiera al predio, por obra de la naturaleza misma.

Para ser considerado como Aluvión, (i) debe existir un aumento de la rivera con el retiro de las aguas, (ii) que el retiro de las aguas sea lento, imperceptible, es decir ni violento ni

intempestivo. Si el retiro es violento se presenta la mutación de cauce. (iii) Que el retiro sea obra de la naturaleza, si el terreno dejado se arrebató a las aguas por obra del hombre, no se presenta Aluvión, y (iv) que el retiro de las aguas sea completo y definitivo, si el agua ocupa y desocupa el terreno alternativamente en sus bajas y crecidas periódicas, dicho terreno hace parte de la ribera y no se adquiere por Accesión.

Referente a la formación de islas, el decreto 1381 de 1940, artículo 677 del código civil y el artículo 83 del decreto 2811 de 1974, afirman que son bienes de uso público los ríos y lagos que atraviesan más de una heredad, sus álveos o cauces naturales y el lecho de los depósitos naturales de agua.

En el caso de la heredad inundada, el artículo 723 del código civil, dice que si una heredad privada ha sido inundada por más de 10 años y es restituida por las aguas dentro de los 10 años siguientes a la inundación, el terreno se restituye a sus dueños. Si realizada la inundación esta se prolonga por 10 años más, el terreno ingresa al estado como bien de uso público.

1.1.5 Procedimiento para revisar una normatividad expresada en una Ley.

En Colombia, como en todas las democracias del mundo, el facultado para expedir las leyes es el Congreso de la República, el cual está compuesto por La Cámara de Representantes, cuya elección de sus miembros es por circunscripción regional o territorial y el Senado de la República que se elige por circunscripción nacional, tal como lo señalan los artículos 114, 150, 171 y 176 de la Constitución Política (C.P.).

El Art. 150 de la C.P. dice que le corresponde al Congreso hacer las leyes y por medio de ellas, entre otras, ejercer las siguientes funciones:

- Interpretar, reformar y derogar las leyes.
- Expedir códigos en todos los ramos de la legislación y reformar sus disposiciones.

El Art. 154 de la C.P. faculta a los miembros del Congreso y del Gobierno Nacional, (Presidente y ministros) a presentar proyectos de ley para reformar o derogar leyes, también a los miembros de las altas Cortes (Art. 156 C.P.) en materias relacionadas con sus funciones y por iniciativa popular (Art. 155 C.P.).

El Art. 157 de la C.P. señala los requisitos para que los proyectos sean leyes, los cuales son:

- Heber sido publicado por el Congreso antes de darle curso en la comisión respectiva.
- Haber sido aprobado en primer debate en la correspondiente comisión permanente de cada cámara. (Cámara de representantes y Senado)
- Haber sido aprobado en cada cámara en segundo debate y
- Haber obtenido la sanción del gobierno (firma del Presidente).

1.2 Cronología de la normatividad de rondas hídricas

El Código Civil de Andrés Bello, adoptado y modificado en 1873 por el presidente de Colombia Murillo Toro, en los artículos 677 y 678 establece que:

- **ARTÍCULO 677. PROPIEDAD SOBRE LAS AGUAS.** Los ríos y todas las aguas que corren por cauces naturales son bienes de la Unión, de uso público en los respectivos territorios. Exceptúense las vertientes que nacen y mueren dentro de una misma heredad: su propiedad, uso y goce pertenecen a los dueños de las riberas, y pasan con estos a los herederos y demás sucesores de los dueños.
- **ARTÍCULO 678. USO Y GOCE DE BIENES DE USO PÚBLICO.** El uso y goce que para el tránsito, riego, navegación y cualesquiera otros objetos lícitos, corresponden a los particulares en las calles, plazas, puentes y caminos públicos, en ríos y lagos, y generalmente en todos los bienes de la Unión de uso público, estarán sujetos a las disposiciones de este Código y a las demás que sobre la materia contengan las leyes.

En 1915, el Gobierno Nacional mediante decreto 47 de 1915 le revoca las facultades dadas a los concejos municipales para reglamentar el uso y goce de las aguas y se reserva todo lo relativo a estas en los asuntos administrativos. Del año 1918 en adelante se hicieron varias concesiones, y en el año 1924 se dictó el decreto número 338 relacionado con las aguas de la Zona Bananera (Botero V. 1929)

En 1946 se crea el Instituto Nacional de Aprovechamiento de Aguas y Fomento Eléctrico, primer intento administrativo para darle a un mismo recurso natural varios usos. A tal

organismo se le asignó el estudio de las zonas susceptibles de ser regadas o desecadas económicamente, la regulación de corrientes para prevenir inundaciones, la erosión y obviamente la generación de energía eléctrica⁶.

En 1954 comienza un periodo del Derecho de Aguas, con la creación de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), en el cual se adoptó en Colombia el enfoque institucional de utilización racional e integrada con propósitos múltiples de los recursos de agua, que se había venido empleando con éxito en los Estados Unidos desde 1933, cuando se creó la Tennessee Valley Authority (TVA) para llevar a cabo labores de desarrollo de la extensa cuenca hidrográfica del río Tennessee⁷.

A la CVC se le asignó el desarrollo de los recursos naturales de la cuenca hidrográfica del alto Cauca y las vertientes del Pacífico vecinas a esta. Aun cuando los resultados que se esperaban de la CVC no fueron tan buenos como los de la TVA, pronto se le adoptó en otras regiones del país, y fue así como entre 1957 y 1968 se crearon las siete primeras corporaciones autónomas regionales. Igualmente, en este periodo se continuó con la expedición de normas ambientales puntuales sobre pesca marítima y aguas dulces de uso público. (Garizado C. sin fecha)

Después de la Convención de Estocolmo-Suecia⁸ en junio de 1972, y de la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro - Brasil celebrada 20 años después, a la cual asistió un grupo de 22 colombianos liderado por el embajador de ese entonces Enrique Peñalosa Camargo, se crearon las instituciones ambientales en el país y la expedición del Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables, son estas dos, buenas expresiones de ese fenómeno. (Manuel Rodríguez Becerra⁹)

Después de que se expidiera la Ley 23 en 1973, la cual establece los lineamientos políticos para orientar la gestión ambiental y conceder facultades al Presidente de la Republica para expedir un código que permita integrar y renovar la legislación que se

⁶ Decretos 1381 y 1382 de 1940, 1300 de 1941, 1454 de 1942, 284 de 1946 y 2921 de 1946.

⁷ Así nació la CVC. Extraído de: <http://www.cvc.gov.co/vsm38cvc/>

⁸ Denominada Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Humano

⁹ Primer ministro de Medio Ambiente de Colombia y Gerente General del Inderena (1990-1994)

había decretado en forma dispersa, se expide el Decreto Ley 2811 del 18 de diciembre de 1974 por el cual se establece el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, donde, en el libro II parte III, consagra la normatividad en materia del recurso hídrico del país.

“El aporte más significativo para la gestión del agua que se deriva del contenido del Código Nacional de los Recursos Naturales, corresponde al capítulo relacionado con el manejo de las cuencas hidrográficas como áreas de manejo especial. El interés se centraba en fortalecer las políticas y programas que ya se venían desarrollando en el país y para ello se establecieron las bases para los planes de ordenación de cuencas hidrográficas, precisando los criterios para su implementación desde los alcances de la finalidad, las condiciones para la priorización de la ordenación, la competencia de su declaración, llegando finalmente a desarrollar los elementos del contenido y las definiciones para su ejecución y administración”¹⁰.

Posterior a este Código, que hace parte de la normatividad actual, se han expedido decretos, leyes y acuerdos que reglamentan lo expuesto inicialmente en la 2811 de 1974. A continuación se presenta la Tabla 2 con un resumen del marco legal actual de las rondas hídricas.

Tabla 2 Resumen del marco legal actual de las rondas hídricas

NORMA	NUMERO	FECHA	EPÍGRAFE
Decreto-Ley	2811	1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente
Decreto	1541	1978	Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto-Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973.
Decreto	2858	1981	Por el cual se reglamenta parcialmente el Artículo 56 del Decreto-Ley 2811 de 1974 y se modifica el Decreto 1541 de 1978

¹⁰ Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá, D.C. Pág.17

NORMA	NUMERO	FECHA	EPÍGRAFE
Acuerdo	41	1983	Por el cual se determina los procedimientos y competencias para la ordenación y manejo de cuencas hidrográficas.
Constitución Política de Colombia		1991	Constitución Política de Colombia
Ley	160	1994	Que dentro de los objetivos de la Ley 160 de 1994, se encuentra regular la ocupación y aprovechamiento de las tierras baldías de la Nación por medio de la cual se crea el Sistema Nacional de Reforma Agraria y Desarrollo Rural Campesino, se establece un subsidio para la adquisición de tierras, se reforma el Instituto Colombiano de la Reforma Agraria y se dictan otras disposiciones.
Ley	161	1994	Por la cual se organiza la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena, se determinan sus fuentes de financiación y se dictan otras disposiciones.
Acuerdo	114	2007	Por el cual se reglamenta el uso y manejo de terrenos comunales.
Ley	1242	2008	Por el cual se establece el Código Nacional de Navegación y Actividades Portuarias Fluviales y se dictan otras disposiciones
Resolución	196	2008	Por la cual se adopta el Código de Ética de la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales
Acuerdo	17	2009	Por medio del cual se determina la zona de ronda de protección del río Bogotá
Plan de acción		2012 - 2015	Lineamientos y directrices nacionales para la formulación de los planes de acción de las corporaciones.

Fuente: Elaboración propia

A través de los últimos 41 años, la reglamentación y aplicación del concepto de ronda hídrica ha girado en torno al Decreto Ley 2811 de 1974, en donde cada cual lo interpreta a su manera y de esta forma se aplican los correctivos y sanciones respectivas. Por una parte siempre se estableció una franja de hasta 30 metros a lado y lado de cada cuerpo de agua a excepción de los nacimientos de agua donde aplican 100 m, como zona de protección y donde no se puede ejecutar ninguna actividad económica o asentamiento alguno. La falta de llevar a la realidad esta medida de vital importancia para el ser humano, se da por no haberse reglamentado el literal d) del artículo 83 del Decreto 2811 de 1974 y haber definido los mecanismos mediante los cuales se establecería el acotamiento de la ronda o espacio público . (Abraham Salazar)

1.3 Normatividad actual

La Ley 1450 de 2011 donde se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 en el artículo 206 “Rondas Hídricas” del capítulo V (sostenibilidad ambiental y prevención del riesgo), establece que se debe “...efectuar el acotamiento de la faja paralela a los cuerpos de agua a que se refiere el literal d) del artículo 83 del Decreto-Ley 2811 de 1974 y el área de protección o conservación aferente...”, dicho proceso le “Corresponde a las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible, los Grandes Centros Urbanos y los Establecimientos Públicos Ambientales”.

El Decreto-Ley 2811 de 1974, por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, en su capítulo II, relativo al dominio de las aguas y sus cauces, establece en el Artículo 83 literal d) que “salvo derechos adquiridos por particulares, son bienes inalienables e imprescindibles del Estado: d) Una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho”.

El Decreto-Ley 2811 de 1974 es reglamentado por el Decreto-Ley 1541 de 1978 en la Parte III del Libro II "De las aguas no marítimas", donde es su capítulo II – Dominio de los cauces y riberas, establece las siguientes definiciones mediante los artículos 11 a 17.

- **Artículo 11°.-** Se entiende por cauce natural la faja de terreno que ocupan las aguas de una corriente al alcanzar sus niveles máximos por efecto de las

crecientes ordinarias; y por lecho de los depósitos naturales de aguas, el suelo que ocupan hasta donde llegan los niveles ordinarios por efectos de lluvias o deshielo.

- **Artículo 12°.-** Playa fluvial es la superficie de terreno comprendida entre la línea de las bajas de aguas de los ríos y aquellas a donde llegan éstas, ordinarias y naturalmente en su mayor incremento.
- **Artículo 13°.-** Para los efectos de la aplicación del artículo anterior, se entiende por líneas o niveles ordinarios las cotas promedio naturales de los últimos quince (15) años tanto para las más altas como para las más bajas.

Para determinar estos promedios se tendrán en cuenta los datos que suministren las entidades que dispongan de ellos y en los casos en que esta información sea mínima o inexistente se acudirá a las que puedan dar los particulares.

- **Artículo 14°.-** Para efectos de aplicación del artículo 83, letra d) del Decreto-Ley 2811 de 1974, cuando el Instituto Colombiano de Reforma Agraria, Incora, pretenda titular tierras aledañas a ríos y lagos, procederá, conjuntamente con el Instituto Nacional de Recursos Naturales Renovables y del Ambiente, Inderena, a delimitar las franja o zona a que se refiere éste artículo, para excluirá de la titulación.

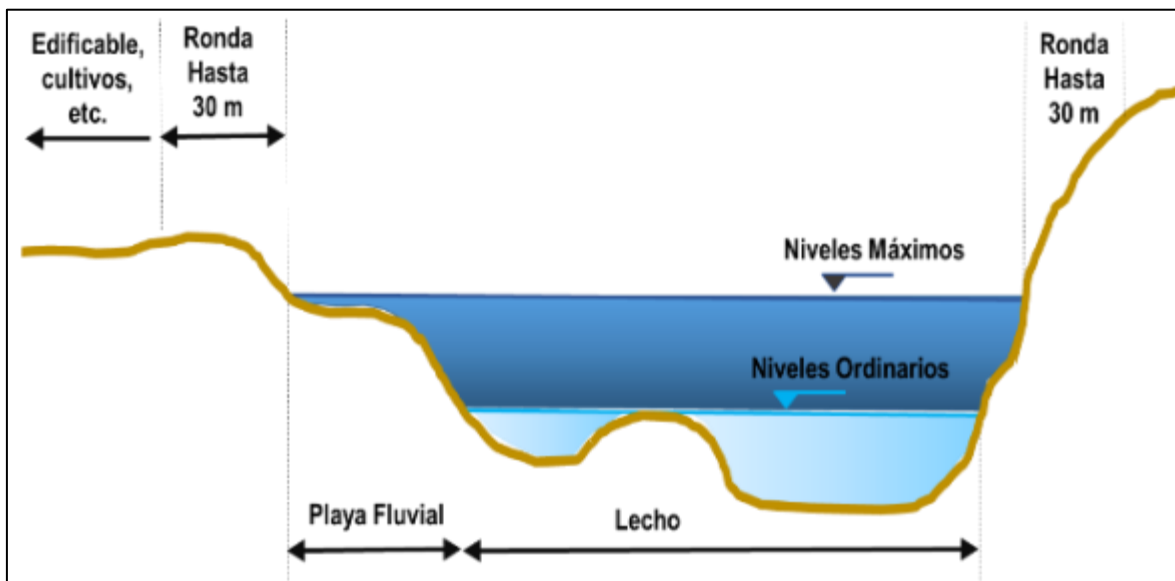
Tratándose de terrenos de propiedad privada situados en las riberas de ríos arroyos o lagos, en los cuales no se ha delimitado la zona a que se refiere el artículo anterior, cuando por mermas, desviación o desacatamiento de las aguas, ocurridos por causas naturales, quedan permanentemente al descubierto todo o parte de sus cauces o lechos, los suelos que se tendrán como parte de la zona o franja que alude al artículo 83, letra d) del Decreto-Ley 2811 de 1974, que podrá tener hasta treinta (30) metros de ancho.

- **Artículo 15°.-** Lo relacionado con la variación de un río y formación de nuevas islas se regirá por lo dispuesto en el Título V, Capítulo II del Libro II del Código Civil, teniendo en cuenta lo dispuesto por el artículo 83, letra d) del Decreto-Ley 2811 de 1974.

- **Artículo 16°.-** La adjudicación de baldíos excluye la de las aguas que contengan o corran por ellos, las cuales continúan perteneciendo al dominio público.
- **Artículo 17°.-** El dominio privado de aguas reconocido por el Decreto-Ley 2811 de 1974 y por éste reglamento, debe ejercerse en función social, y estará sujeto a las limitaciones y demás disposiciones establecidas por el Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente y por este reglamento.

De acuerdo con el literal d) del artículo 83 del Decreto-Ley 2811 de 1974 y las definiciones de los 7 artículos anteriores, se establece que el límite de la ronda hidráulica se puede representar mediante la siguiente Figura 1.

Figura 1 Esquema de la definición de ronda hídrica



Fuente: Elaboración propia

1.4 Estudios técnicos realizados en Colombia

Hasta la fecha de entrega del documento final, se continuó con búsqueda de información oficial de referencia para comparar las metodologías adoptadas. A continuación, se presentan en orden cronológico desde el más reciente de los estudios técnicos encontrados en la web que fueron realizados por el MADS, corporaciones autónomas y universidades.

1.4.1 Corpoguavio

La Corporación Autónoma Regional de Guavio, realizó una “Guía técnica para la delimitación de las zonas de ronda hídrica en afluentes priorizados de la corporación autónoma regional del Guavio – Corpoguavio” para ser utilizada como un caso piloto en un tramo de la cuenca del río Guavio, en 8,3 kilómetros dividido en dos sectores: un primer tramo con una longitud de 7,5 kilómetros del sector de Puentelasio al sector de Puente Reyes aguas abajo, y un segundo tramo desde la confluencia del río Sueva y río Zaque 800 metros aguas arriba de este último, con influencia en los municipios de Junín y Gachetá.

La guía, tuvo como referente técnico el contrato interadministrativo N° 377 de 2012 suscrito entre el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS con la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, el cual tuvo por objeto “Realizar el acompañamiento técnico en la construcción de una guía metodológica, que incluya los lineamientos y directrices para definir las rondas hídricas de los cuerpos de agua, con el fin de establecer las medidas de protección y conservación que requiere la faja paralela a los cuerpos de agua a que se refiere el literal d) del Decreto Ley 2811 de 1974 y el área de protección o conservación aferente que conforman la ronda hídrica”.

De acuerdo con el sector de análisis, y para efectos de la implementación de la guía, se requiere información de nivel 1, que se aplica a suelos urbanos consolidados con corrientes altamente intervenidas, suelos de expansión urbana, áreas con infraestructura altamente vulnerable; el cual sugiere contar con una serie de requerimientos técnicos de información, que podría considerarse de difícil cumplimiento. La información requerida se presenta a continuación en la Tabla 3:

Tabla 3 Disponibilidad de información de nivel 1 en Corpoguavio para análisis de ronda hídrica

INFORMACIÓN MÍNIMA REQUERIDA	INFORMACIÓN DISPONIBLE
Imágenes Lidar	NO
GPS de precisión	SI
Series hidroclimatológicas 20 años	NO
Bases de datos de inundaciones, con niveles (cotas)	NO
Cartografía 1:10.000 o mayor. Para zonas urbanas, cartografía 1:2.000	SI
Fotografías aéreas con resolución espacial mayor a 30 m	SI
Información sobre caudales o precipitación para correr modelos con periodo de retorno Tr2.33 años	NO
Modelos de elevación del terreno	SI

Fuente: Guía técnica para la delimitación de las zonas de ronda hídrica en afluentes priorizados de Corpoguavio

Describe Corpoguavio que *“Al revisar el listado, no cabe duda que hay información mínima que ineludiblemente hace parte del quehacer diario de cualquier autoridad ambiental, pero que aun así, dado su costo y complejidad técnica de elaboración, con seguridad no estará disponible en todos los sitios de nuestro país”*.

Generalmente, las autoridades ambientales no tienen la posibilidad de contar con cartografía oficial de precisión, aun cuando el IGAC quien es la entidad encargada de suministrarla, no cuenta con la totalidad de las bases cartográficas de las escalas más detalladas, 1:10.000 o mayores del país.

La falta de información mínima requerida para realizar el procedimiento descrito en la guía del MinAmbiente, además de la información cartográfica, pone en discusión y al descubierto la insuficiente instrumentación que tienen las cuencas del país, que permitan

que el ejercicio sea adecuadamente representativo. Si bien existen estaciones en la mayoría de regiones del país, es esencial verificar si las mismas tienen la información necesaria para trasladar datos mediante modelos lluvia - escorrentía, para poder realizar los análisis estadísticos e históricos comparativos.

1.4.2 Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca– CAR

La CAR, de acuerdo con las experiencias vividas en las emergencias invernales de los años 1979, 2006 y 2010 en la Sabana de Bogotá y las cuencas de Ubaté y Suárez, estructuró un equipo técnico encargado de la evaluación de dichos eventos, y la delimitación de todas aquellas zonas que son propensas a inundaciones o desbordamientos de ríos y quebradas.

El resultado fue publicado por la CAR mediante resolución No. 608 de marzo 2014, y consistió en la elaboración de la “Guía Metodológica para la Delimitación de Zonas de Ronda en la Jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – Car”.

El documento realiza una descripción del marco normativo y una breve descripción de sistema fluvial, planicie de inundación y la definición de ronda hídrica. Con respecto al procedimiento para obtener el límite de la ronda hídrica, establece una metodología, puntualizada en la Tabla 4, teniendo en cuenta el componente batimétrico, levantamiento topográfico con sistema LIDAR¹¹, análisis ecosistémico, estudio hidrológico, estudio hidráulico y un análisis básico predial.

Tabla 4 Componentes de la metodología para obtener zonas de ronda en la jurisdicción de la CAR

COMPONENTE	PROCEDIMIENTO	PRODUCTO FINAL
Batimetría	Por vadeo con estación total a lo largo de la zona de estudio	Planos de planta que se utilizarán para la elaboración del Shape de los puntos, el TIN y el modelo digital de terreno

¹¹ LIDAR (siglas del inglés Light Detection and Ranging). Tecnología que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado.

COMPONENTE	PROCEDIMIENTO	PRODUCTO FINAL
Levantamiento Topobatómico	Sistema LIDAR	Modelo digital de terreno
Análisis Ecosistémico	<ul style="list-style-type: none"> - Identificar cobertura vegetal - Cálculo de altura (H) promedio de árboles - Cuando no se disponga de cobertura vegetal representativa los ecosistemas estratégicos de la zona de vida, se procederá con base en la fórmula desarrollada por Holdridge (1971) (ver guía, página 15) 	Área definida por la distancia H medida a partir del límite del cauce permanente para cada comunidad de vegetación definida.
Estudio Hidrológico	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis de caudales extremos - Modelo lluvia escorrentía (Racional o Hidrograma de escorrentía superficial) - Para áreas de drenaje > 20 km², se aconseja utilizar modelos computacionales 	Caudal de creciente de diseño, de caudal del promedio máximo de los últimos 15 años y Qtr 25, 50 y 100
Estudio hidráulico	Cualquier modelo que permita simulación hidráulica del flujo para canales de cualquier tipo de sección transversal bajo flujo permanente gradualmente variado	Zona de protección del cuerpo hídrico
Análisis Básico Predial	Superposición del polígono de la zona de ronda del estudio hidráulico con la capa que contiene los polígonos de los límites prediales	Listado de los predios afectados por la zona de ronda de protección del cuerpo hídrico y un listado con el cálculo del área o porcentaje del área afectada en cada uno de los predios afectados por la zona de ronda de protección del cuerpo hídrico

Fuente: Elaboración propia con información de la Guía Metodológica para la Delimitación de Zonas de Ronda en la Jurisdicción de la CAR

Como resultado de la aplicación, la CAR es la única entidad que hasta la fecha ha logrado establecer la ronda hídrica por medio del Acuerdo 17 del 8 de julio de 2009 mediante el ARTÍCULO PRIMERO. DETERMINAR LA RONDA DE PROTECCIÓN. “Determinar como Zona de Ronda de Protección del Río Bogotá, según lo dispuesto en el literal d) del artículo 83 del Decreto Ley 2811 de 1974, la franja comprendida entre la línea de niveles promedios máximos de los últimos 15 años y una línea paralela a esta última, localizada a 30 metros, a lado y lado del cauce, con un área total de doce millones setecientos veinte

mil ochocientos trece (12.720.813) metros cuadrados aproximadamente, en el sector comprendido entre la Estación Hidrológica del río Bogotá en el Municipio de Villapinzón y las Compuertas de Alicachín en el municipio de Soacha”.

1.5 Recopilación de información en la Normatividad internacional

A continuación se realiza una descripción de la recopilación de información encontrada en el contexto internacional referente a la delimitación de las zonas o área que hacen parte integral de una corriente de agua. Se describen generalmente los lineamientos, funciones y/o parámetros que utilizan seis (6) diferentes países para determinar las zonas de protección ambiental a lo semejante en Colombia que es comúnmente llamado como Ronda hídrica.

El término de ronda hídrica en la normatividad internacional, presenta diferentes definiciones con el mismo objetivo final, que es la protección de la zona natural perteneciente a un cauce y de la mitigación de riesgos de inundación. En EUA se le conoce como Vías de Intenso Desagüe, el país de México los describe como Zona Federal, en Uruguay el criterio es llamado Ribera, el termino referente a la Zona de Protección de Exclusión de Intervención es como se le describe en Chile, en Holanda esta recientemente denominado como Espacio de río (En holandés Ruimte voor de rivier) y el país de España lo establece como el Dominio Público Hidráulico.

1.5.1 Estados Unidos de América

La siguiente descripción y recopilación se obtuvo de la tesis de Sarache Silva, Mónica (2015) denominada “Una propuesta técnica para el fortalecimiento de la normatividad colombiana en relación con la definición de ronda hidráulica. Maestría Tesis, Universidad Nacional de Colombia”.

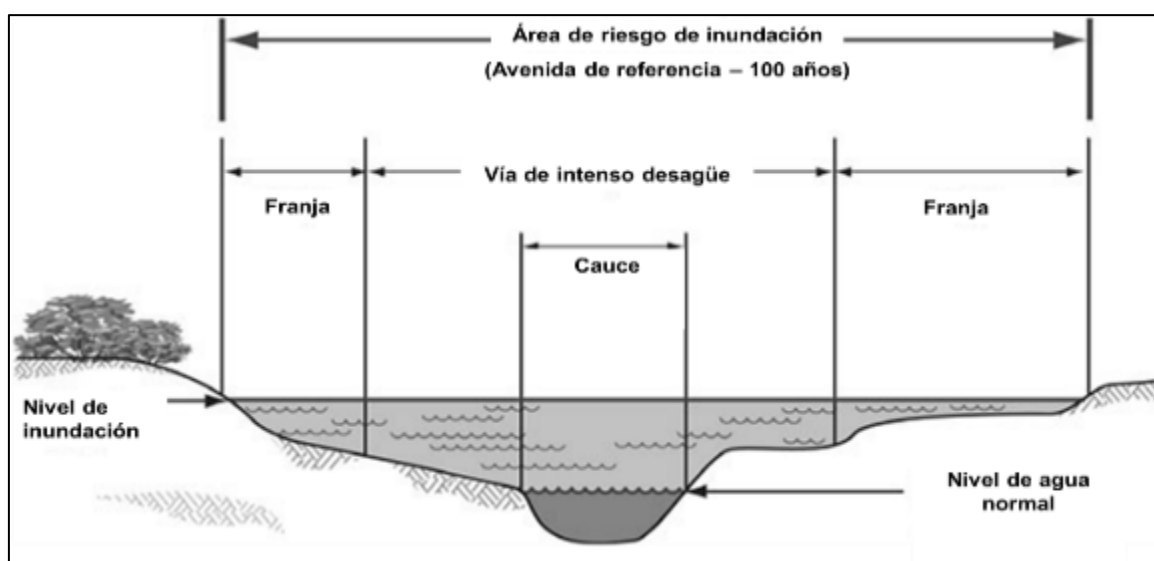
En los Estados Unidos de América (EUA) la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA)¹², ha utilizado el concepto de Vía de Intenso Desagüe – VID, término ***floodway*** en inglés, en el Programa Nacional de Seguros Frente a Inundaciones

¹² El 1 de abril de 1979, el presidente Jimmy Carter firmó la orden ejecutiva que creó la Agencia. La cual se encarga de coordina el papel del gobierno federal en la preparación, prevención, mitigación de los efectos, la

La definición grafica de la VID se presenta en la Figura 2 y se define como el "...cauce y sus áreas de terreno adyacentes que deben reservarse para evacuar la avenida de referencia (100 años) sin producir un incremento acumulativo de la elevación correspondiente a la citada avenida, mayor que una altura determinada (1 pie)" (Mora Alonso-Muñoyerro, 2000).

"La VID corresponde a la parte del cauce y la llanura, por la cual circula la mayor parte del caudal y se define con ayuda del caudal de periodo de retorno de 100 años. Si la avenida mencionada se viera limitada a circular por la VID, presentaría un incremento en el nivel de 30 centímetros (un pie) con respecto al nivel sin tal limitación. (Martín Vide, 2002).

Figura 2 Definición del área de riesgo de inundación y de la vía de intenso desagüe



Fuente: Adaptado de Floodplain Learning on Demand (http://www.nhflooded.org/flood_plains101.php)

Según la FEMA (Federal Emergency Management Agency), los usos permitidos en la VID deberá tener un daño potencial bajo y no se localizarán en esta zona estructuras, terraplenes o depósitos permanentes. La VID corresponde a una herramienta para ayudar a las comunidades a encontrar un equilibrio entre el desarrollo dentro de la planicie de

respuesta y la recuperación de todos los desastres domésticos, ya sean naturales o de origen humano, incluidos los atentados terroristas.

inundación y el incremento del riesgo de inundación resultante (Federal Emergency Management Agency, 2009).

El Programa Nacional de Seguros Frente a Inundaciones fue establecido por la Ley en 1968 con el mismo nombre del programa. La Ley de 1968 fue prevista para establecer la disponibilidad de seguros frente a inundaciones dentro de las comunidades que estaban dispuestas a adoptar programas de gestión de planicies de inundación para mitigar futuras pérdidas por inundaciones (Federal Emergency Management Agency - FEMA, 1998).

La evaluación del impacto de las ocupaciones en la planicie de inundación sobre los perfiles de la superficie del agua, puede ser de gran interés para los planificadores, urbanizadores e ingenieros. Las evaluaciones de la planicie de inundación y de la vía de intenso desagüe son la base para los programas de manejo de las planicies de inundación. La mayoría de los estudios son realizados bajo el Programa Nacional de Seguros Frente a Inundaciones y siguen los procedimientos de la guía denominada "Guidelines and Specifications for Flood Hazard Mapping Partners" (Northern Virginia Regional Commission, 2013).

1.5.2 México

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) publicada en el año 1992 y con última reforma DOF 11-08-2014: establece en su título primero, artículo 3, fracción XLVII que la "Ribera o Zona Federal" corresponde a las fajas de diez metros de anchura contiguas al cauce de las corrientes o al vaso de los depósitos de propiedad nacional, medidas horizontalmente a partir del nivel de aguas máximas ordinarias.

La amplitud de la ribera o zona federal será de cinco metros en los cauces con una anchura no mayor de cinco metros. El nivel de aguas máximas ordinarias se calculará a partir de la creciente máxima ordinaria que será determinada por "la Comisión" o por el Organismo de Cuenca que corresponda, conforme a sus respectivas competencias, de acuerdo con lo dispuesto en los reglamentos de esta Ley (LAN, Art.3, fracción XLVII).

En los ríos, estas fajas se delimitarán a partir de cien metros río arriba, contados desde la desembocadura de éstos en el mar. En los cauces con anchura no mayor de cinco metros, el nivel de aguas máximas ordinarias se calculará a partir de la media de los

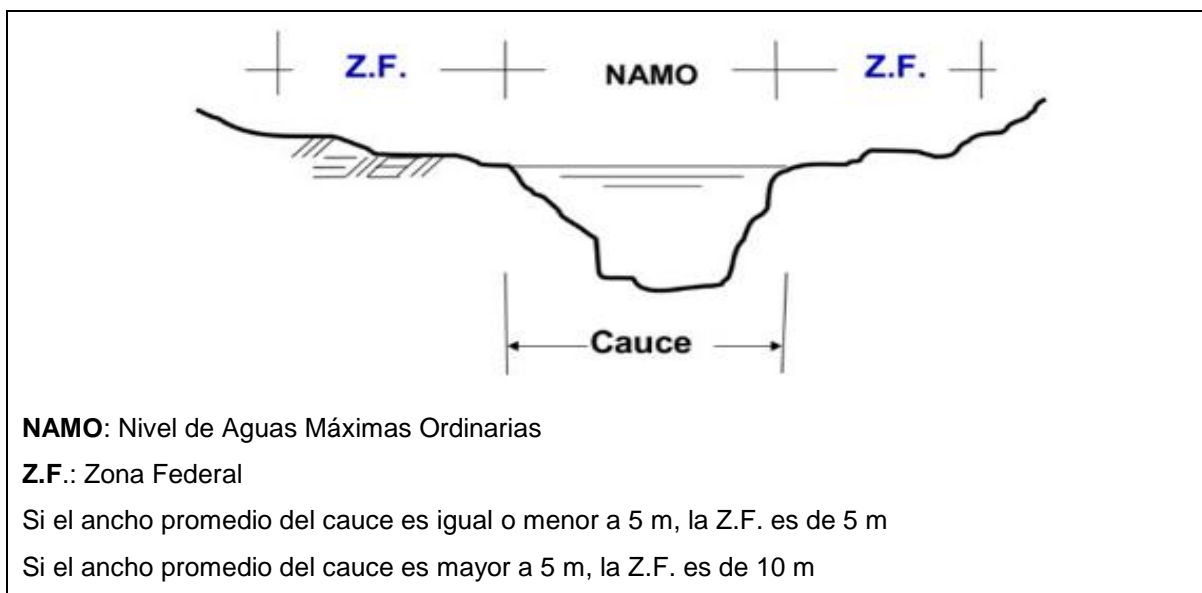
gastos máximos anuales producidos durante diez años consecutivos (LAN, Art.3, fracción XLVII).

Estas fajas se delimitarán en los ríos a partir de cien metros río arriba, contados desde la desembocadura de éstos en el mar. En los orígenes de cualquier corriente, se considera como cauce propiamente definido, el escurrimiento que se concentre hacia una depresión topográfica y forme una cárcava o canal, como resultado de la acción del agua fluyendo sobre el terreno. La magnitud de la cárcava o cauce incipiente deberá ser de cuando menos de 2.0 metros de ancho por 0.75 metros de profundidad (LAN, Art.3, fracción XLVII).

Igualmente, en el Art. 3 fracción XI define como Cauce de una Corriente a *“El canal natural o artificial que tiene la capacidad necesaria para que las aguas de la creciente máxima ordinaria escurran sin derramarse. Cuando las corrientes estén sujetas a desbordamiento, se considera como cauce el canal natural, mientras no se construyan obras de encauzamiento; en los orígenes de cualquier corriente, se considera como cauce propiamente definido, cuando el escurrimiento se concentre hacia una depresión topográfica y éste forme una cárcava o canal, como resultado de la acción del agua fluyendo sobre el terreno. Para fines de aplicación de la presente Ley, la magnitud de dicha cárcava o cauce incipiente deberá ser de cuando menos de 2.0 metros de ancho por 0.75 metros de profundidad”*.

Según el reglamento de la LAN, el artículo 4 Fracción I *“El NAMO a que se refiere la Fracción XLVII del Art. 3 de la Ley, se entiende como el que resulta de la corriente ocasionada por la Creciente Máxima ordinaria dentro del cauce sin que éste se produzca desbordamiento. La creciente máxima ordinaria estará asociada a un periodo de retorno de cinco años”. $Tr = 5$ años. “para el caso... de las cuencas sin registro hidrométrico, la Creciente Máxima Ordinaria se obtendrá a partir de tormentas máximas ordinaria, a las que se asociara el periodo de retorno correspondiente y el cálculo del escurrimiento respectivo, se hará con las normas oficiales mexicanas que expida la Comisión”*

De acuerdo con lo anterior, en la Figura 3 se presenta un esquema de la sección transversal típica de la medición del NAMO y el correspondiente límite de la Zona Federal.

Figura 3 Delimitación de Zonas Federales en Cauces y Cuerpos de Agua

Fuente: CONAGUA, Delimitación y protección de Zonas Federales de Cauces y Cuerpos de Agua.
 Guadalajara 2013

1.5.3 Uruguay

En la República Oriental del Uruguay, la normatividad referente al término de Riberas, análogo a la definición de Ronda Hídrica en Colombia, se rige al Código de Aguas (decreto Ley 14.859 del 15 de diciembre de 1970). En este país, las riberas, son como parte integrante de los álveos¹³ de los cursos y masas de agua, junto a las márgenes, costas, orillas, playas y ramblas, constituyeron elementos de primerísima necesidad, en todos los tiempos, pero con mayor razón importan en los tiempos actuales y futuros, no sólo por motivos ambientales y ecológicos, sino por importantes razones económicas y sociales. El Código de Aguas (CA) define el término “álveos”, y las riberas¹⁴ integran los álveos; resulta que las riberas vienen a ser los terrenos que no cubren las aguas en forma

¹³ El álveo de un río o arroyo es el terreno que cubren sus aguas en las crecidas que no causan inundación (art 35, Código de Aguas).

¹⁴ Desde el punto de vista hidrográfico, se llama ribera al “talud vivo, generalmente abrupto, que separa a ambos lados de un curso de agua, el lecho menor del lecho mayor (Diccionario de Geografía, voz ribera, p. 520; Madrid, 1991).

permanente, y que se extienden desde el límite del curso normal “llamado límite inferior” hasta la línea que alcanzan las aguas, en las crecidas que no causan inundación “límite superior”, coincidente con el límite del álveo. (Biasco, sin fecha)

El Artículo 36 (CA) establece que “el límite del álveo, o línea superior de las riberas de los ríos y arroyos del dominio público o fiscal, con excepción del Río de la Plata, se fijará en la siguiente forma:

1º Se determinará el nivel medio de las aguas, tomando al efecto períodos de observaciones no menores de doce años;

2º Se fijará el promedio de altas aguas ordinarias, que corresponderá al promedio de todas las alturas de aguas que sobrepasen el nivel medio;

3º El promedio de todas las alturas de aguas que sobrepasen la altura determinada de acuerdo con el numeral 2º corresponderá al promedio de las crecidas extraordinarias;

4º La media aritmética de los valores obtenidos con arreglo a lo establecido en los numerales 2º y 3º determinará el límite del álveo o línea superior de la ribera.

En el escenario del Río de la Plata, fronterizo entre Uruguay y Argentina, el artículo 37 menciona que “en el Río de la Plata y en el Océano Atlántico la línea superior de la ribera será la que resulte del promedio de las máximas alturas registradas cada año durante un período no menor de veinte años.

En el caso de Uruguay llama la atención lo poco regulado que se encuentra el tema recientemente, no se ha generado normatividad actual en la cual se pueda definir un criterio que unifique a los diversos regímenes existentes, resulta que: para las Leyes de Partidas y el Código Civil, las riberas no integran en álveo o cauce; mientras que para el Código Rural y para el Código de Aguas, las riberas si integran el álveo o cauce del curso de agua (Biasco et al, sin fecha).

1.5.4 Chile

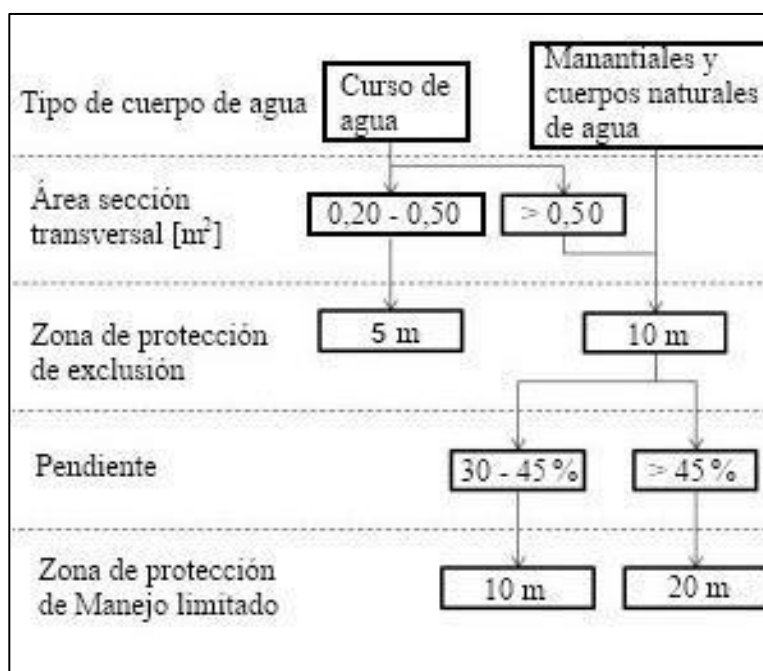
La legislación chilena en febrero del año 2011 reglamentó una metodología para establecer los límites de las “zonas de protección de exclusión de intervención”, mediante la ley 20.283 de Suelos, Aguas y Humedales.

La Ley establece en el artículo 2, letra “p” una “zona de protección de exclusión de intervención”, cuya amplitud dependerá del área de sección de cauce. El mismo reglamento, establece en el artículo 2 letra “q” una “zona de protección de manejo limitado” contigua a la zona de exclusión de intervención de un curso natural de agua de sección mayor a $0,50 \text{ m}^2$, cuerpo de agua o manantial, cuya amplitud variará con las pendientes presentes en el terreno.

Por otra parte, el mismo reglamento establece en torno a los cuerpos de agua presentes en Sitios Prioritarios de Conservación, una zona de protección de 10 m de ancho medidos horizontalmente, a partir del cual se podrá intervenir la cobertura arbórea, dejando al menos un 50 % de esta. A continuación, en la Figura 4, se presenta un esquema general de la definición de la zona de protección de exclusión de intervención.

En el decreto 82 del año 2011, artículo 2 literal “e”, establece la definición de cauce como el “Curso de agua conformado por un lecho de sedimentos, arena o rocas, delimitado por riberas definidas, por el cual escurre agua en forma temporal o permanente”.

Figura 4 Normativa vigente en Chile en relación con la protección de los cuerpos de agua, según el reglamento de Suelo, Agua y Humedales de la Ley 20.283.



Fuente: Adaptado de Zonas ribereñas: protección, restauración y contexto legal en Chile.(Romero et al 2014)

Es necesario estudiar si los anchos establecidos en el reglamento de Suelo, Aguas y Humedales de la Ley de Bosque Nativo 20.283 son adecuados, identificando los efectos positivos y negativos que ocasionaría el aumentar el ancho de las zonas de protección establecidas en dicho reglamento de acuerdo con lo recomendado en apartados anteriores, así como también se debe indagar sobre la restauración en las cabeceras de cuencas, ya que estas regulan naturalmente los recursos hídricos, además de controlar los flujos de sedimentos río abajo (Forget et al. 2013). Las cabeceras de cuencas solo están mencionadas en el reglamento de Suelo, Aguas y Humedales de la Ley de Bosque Nativo 20.283, en lo referido a la protección en la cabecera y borde de las cárcavas, prohibiendo la corta y destrucción de árboles y arbustos en bosque nativo a menos de 5 m (Romero et al. 2014).

La metodología es práctica y con los datos fundamentales de la información en campo, sobre la marca del nivel dejado por la más reciente crecida, establece de forma sencilla el procedimiento para delimitar la zona de protección de exclusión de intervención de los cauces con áreas de sección transversal pequeñas (menores a 0,5 m²).

1.5.5 Holanda

En el desarrollo de la historia de los Países Bajos, el término de ronda hídrica es más particular que en Suramérica, este es denominado “Espacio para el río” (en idioma holandés: Ruimte voor de river) y se enmarca en todo un complejo de proyectos específicos en más de 30 lugares para recuperar las zonas de inundación.

Los Países Bajos se encuentra en un delta, que transcurren tres grandes ríos hacia el Mar del Norte: el Rhine, Meuse y Scheldt. Sin la construcción de diques, desvió de ríos, esclusas y protecciones costeras, alrededor de dos tercios de Holanda estaría inundado. Por lo tanto, la protección contra inundaciones es de alta prioridad para el Ministerio de Infraestructura y Medio Ambiente.

Holanda ha resuelto sus problemas de estar por debajo de los niveles del Mar, obteniendo una reputación mundial como un país que había ganado la pelea contra el agua y había

rescatado a una amplia zona de su territorio¹⁵. Pero el país se enfrentó una vez más a inundaciones en los años 1993 y 1995, debido al aumento de las descargas de los ríos y de la lluvia en la cuenca alta; grandes extensiones de tierras y de cultivo fueron inundados, 250.000 personas fueron evacuadas.

El Gobierno, estructuró un nuevo enfoque de la gestión del agua: en lugar de seguir aumentando la altura y el tamaño de los diques, en el año 2007 nació el proyecto denominado “Espacio para el río” ahora en Holanda, después de reducir las áreas naturales de los ríos y optimizar la navegación fluvial mediante diques de contracción, está dando más espacio para el agua y restaurando las llanuras de inundación en lugares específicos.

Sólo elevar los diques no es suficiente para detener las crecientes y disminuir el riesgo de inundaciones. *“El nivel del agua en los ríos debe reducirse también. Es por eso que se está dando más espacio a los ríos, por ejemplo moviendo los diques o dragado de canales secundarios en las llanuras de inundación”* (Dutch Water Program Room for the River)¹⁶. El proyecto tiene un costo de 2,3 millones de euros, actualmente presenta una descarga máxima de 15.000 m³/seg y espera que al finalizar el proyecto en el año 2016, logre tener una capacidad de descarga de 16.000 m³/s y está previsto finalizarse en el año 2016.

A continuación se presenta la Figura 5 con esquemas representativos de las medidas que está ejecutando el gobierno de Holanda para recuperar las zonas naturales de inundación de los ríos.

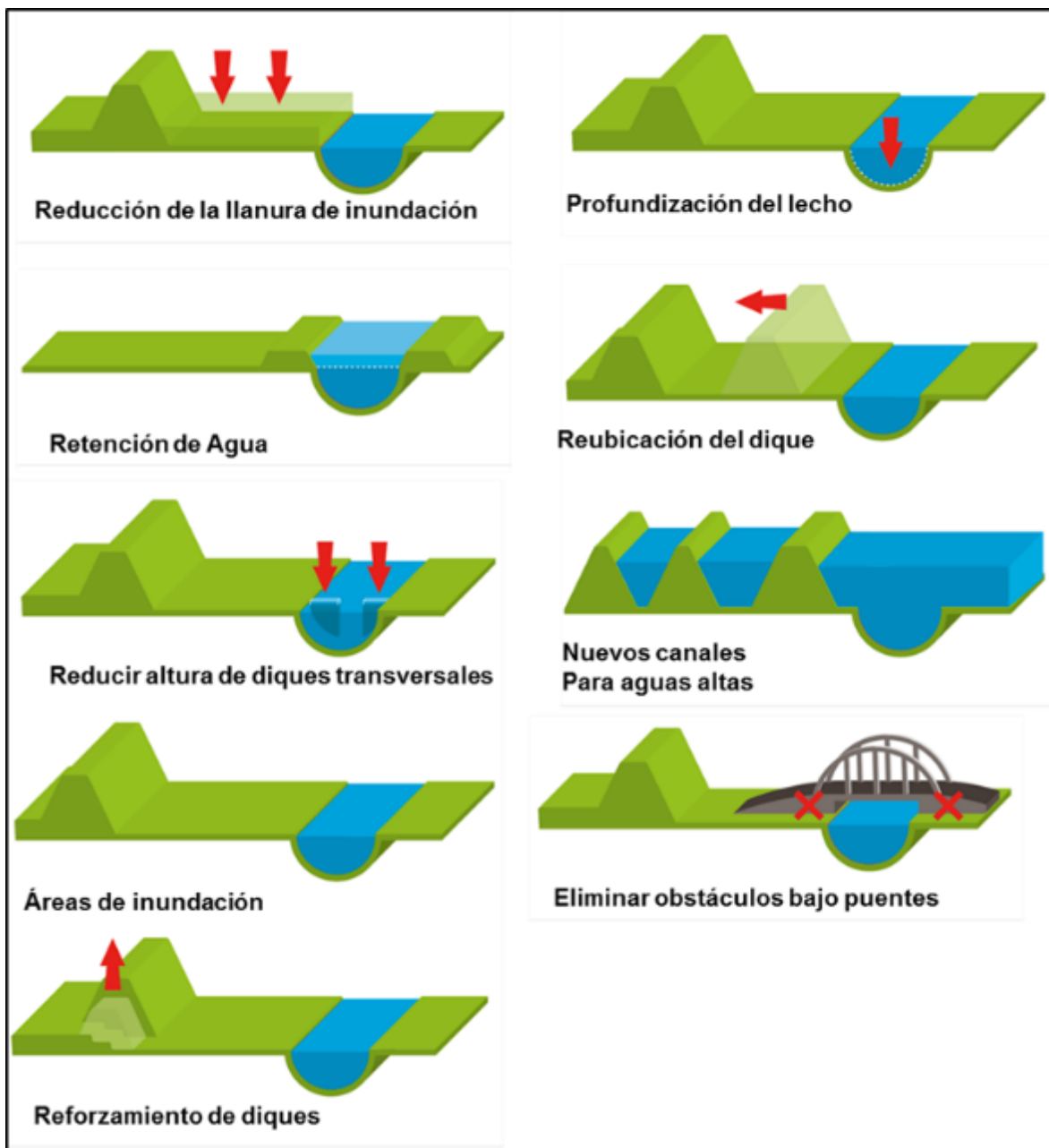
En la normatividad de Holanda no se encontró una metodología específica para determinar las áreas de la ronda hídrica o espacios para el río, que no puede ser objeto de comparación para el presente documento. Pero la recopilación de información muestra unos proyectos pioneros en el mundo y que avalados por el Gobierno, que buscan

¹⁵ El primer proyecto de ingeniería a gran escala llevado a cabo en el siglo 20 fue la construcción de una gran represa (Afsluitdijk) para cerrar el Zuiderzee. Cierre de la conexión abierta entre el Mar del Norte y el centro de País. La modernización de la sociedad holandesa se tradujo en logros tales como el drenaje del lago Haarlemmermeer 18.000 hectáreas, lo que luego se convertiría en el hogar de Amsterdam Airport Schiphol.

¹⁶ <https://www.ruimtevoorderivier.nl/english/>

recuperar las áreas de inundación y aumentar la capacidad del flujo en aguas altas. También es importante resaltar que el país presenta una geografía plana, donde se forma el delta de la desembocadura al mar de los ríos; Rhine, Meuse y Scheldt.

Figura 5 Actividades proyectadas para aumentar la capacidad de inundación



Fuente: Adaptado de "Medidas: cómo vamos a hacer espacio para el río" - www.ruimtevoorderivier.nl

1.5.6 España

Comparando con las anteriores metodologías descritas, en la legislación española se destaca la existencia del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) que depende del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente - Magrama.

En el año 1986, mediante el Real Decreto 849, se aprobó el reglamento del Dominio Público Hidráulico (DPH), en el cual se establecieron los conceptos relacionados con la delimitación y entre los cuales se encuentran la definiciones técnicas del cauce natural, las zonas de servidumbre y de policía. En el año 2008 se modifica el Reglamento del DPH, planteando la necesidad de integrar las definiciones pertinentes a la gestión del riesgo en la normatividad; esto se realiza por medio del Real Decreto 9 de 2008, en donde se establece que el objetivo que persigue la gestión del riesgo corresponde a la protección de las personas, los bienes y del medio ambiente.

El Artículo 4, del Real Decreto 9 de 2008, define que el “Álveo o cauce natural de una corriente continua o discontinua es el terreno cubierto por las aguas en las máximas crecidas ordinarias. La determinación de ese terreno se realizará atendiendo a sus características geomorfológicas, ecológicas y teniendo en cuenta las informaciones hidrológicas, hidráulicas, fotográficas y cartográficas que existan, así como las referencias históricas disponibles. Se considerará como caudal de la máxima crecida ordinaria la media de los máximos caudales anuales, en su régimen natural producidos durante diez años consecutivos, que sean representativos del comportamiento hidráulico de la corriente y que tengan en cuenta lo establecido en el apartado 1.”

El Artículo 6, del mismo decreto, establece que “Se entiende por riberas las fajas laterales de los cauces públicos situadas por encima del nivel de las aguas bajas y por márgenes los terrenos que lindan con los cauces. La protección del dominio público hidráulico tiene como objetivos fundamentales prevenir el deterioro del estado ecológico y la contaminación de las aguas, establecer programas de control de calidad en cada cuenca hidrográfica, impedir la acumulación de compuestos tóxicos o peligrosos en el subsuelo, capaces de contaminar las aguas subterráneas, evitar cualquier otra acumulación que pueda ser causa de degradación del dominio público hidráulico y recuperar los sistemas acuáticos. Las márgenes de los terrenos que lindan con dichos cauces están sujetas en toda su extensión longitudinal: a) a una zona de servidumbre de cinco metros de anchura

para uso público, que se regula en este reglamento y b) a una zona de policía de cien metros de anchura, en la que se condicionará el uso del suelo y las actividades que en él se desarrollen...” (Subrayado y cursiva fuera del texto)

La descripción de la zona de servidumbre y la zona de policía se presentan en la Figura 6. La zona de servidumbre la define el Artículo 7 (Real Decreto 9/2008) como “La zona de servidumbre para uso público definida en el artículo anterior tendrá los fines siguientes:

- a) Protección del ecosistema fluvial y del dominio público hidráulico.
- b) Paso público peatonal y para el desarrollo de los servicios de vigilancia, conservación y salvamento, salvo que por razones ambientales o de seguridad el organismo de cuenca considere conveniente su limitación.
- c) Varado y amarre de embarcaciones de forma ocasional y en caso de necesidad.

Los propietarios de estas zonas de servidumbre podrán libremente sembrar y plantar especies no arbóreas, siempre que no deterioren el ecosistema fluvial o impidan el paso señalado en el apartado anterior...”

El Artículo 8¹⁷, dice que “En la zona de policía de 100 metros de anchura medidos horizontalmente a partir del cauce quedan sometidos a lo dispuesto en este Reglamento las siguientes actividades y usos del suelo:

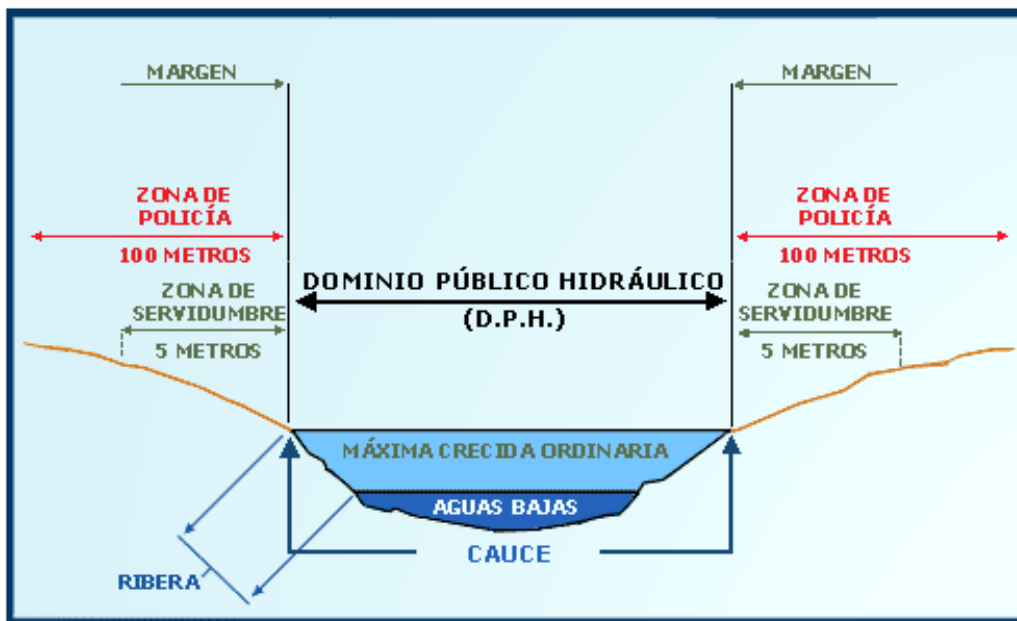
- a) Las alteraciones sustanciales del relieve natural del terreno.
- b) Las extracciones de áridos.
- c) Las construcciones de todo tipo, tengan carácter definitivo o provisional.
- d) Cualquier otro uso o actividad que suponga un obstáculo para la corriente en régimen de avenidas o que pueda ser causa de degradación o deterioro del estado de la masa de agua, del ecosistema acuático, y en general, del dominio público hidráulico.

La zona de policía podrá ampliarse, si ello fuese necesario, para incluir la zona o zonas donde se concentra preferentemente el flujo, al objeto específico de proteger el régimen de corrientes en avenidas, y reducir el riesgo de producción de daños en personas y bienes.

¹⁷ Real Decreto 9 de 2008

La zona de flujo preferente es aquella zona constituida por la unión de la zona o zonas donde se concentra preferentemente el flujo durante las avenidas, o vía de intenso desagüe, y de la zona donde para la avenida de 100 años de periodo de retorno, se puedan producir graves daños sobre las personas y los bienes, quedando delimitado su límite exterior mediante la envolvente de ambas zonas...”

Figura 6 Definición gráfica de Dominio Público Hidráulico



Fuente: Imagen tomada de la página web del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de España. (<http://www.magrama.gob.es>)

La delimitación y deslinde de los cauces de dominio público hidráulico se realiza a través del Proyecto Linde incluido en el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) y su conservación y restauración, entre otros programas, se realiza a través de la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos y su Programa de voluntariado en ríos.

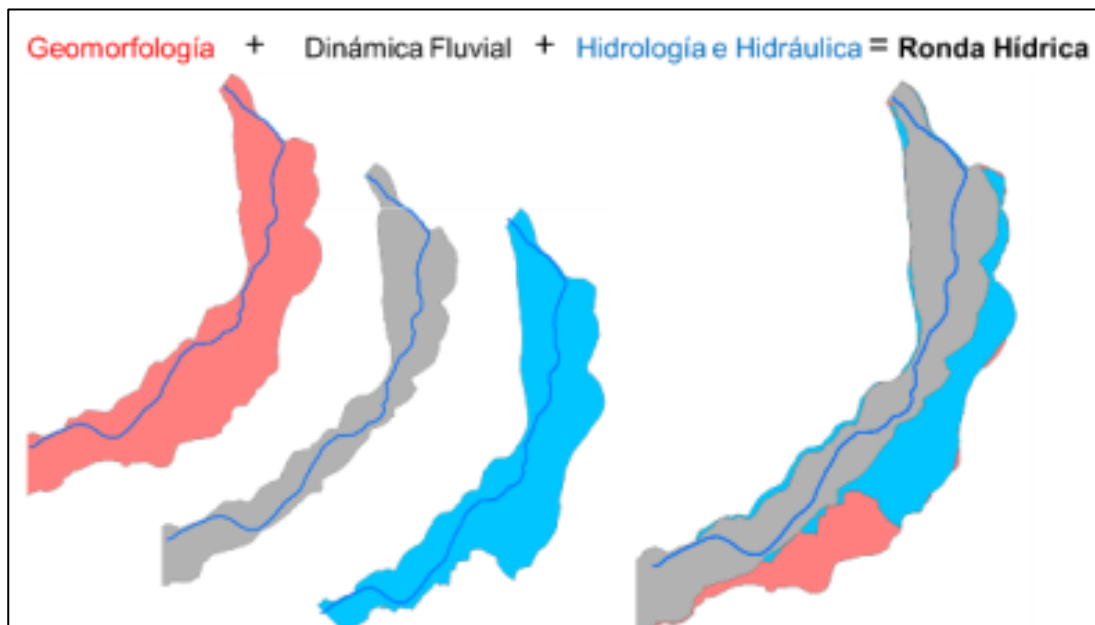
De esta manera, el objetivo del Proyecto LINDE corresponde a delimitar y deslindar físicamente, cuando proceda, las zonas de Dominio Público Hidráulico presionadas por intereses de cualquier tipo, que corren riesgo cierto de ser usurpadas, explotadas abusivamente, o degradadas por falta de una respuesta contundente y reglamentada de la Administración

Capítulo 2 Propuesta metodológica para el acotamiento de la ronda hídrica

Debido a la falta de un procedimiento que determine la zona de ronda hídrica de un río con la normatividad existente, se propone en este documento plantear una metodología que contemple tres aspectos fundamentales en la dinámica natural del cauce que permita establecer un límite seguro para el asentamiento humano y prevenir pérdidas cuando se presenten inundaciones, en el cual se considere de preservación natural y como la ronda hídrica de un río.

El análisis de cada uno de los aspectos, de la Geomorfología, la Dinámica Fluvial y la Hidrología e Hidráulica, dará como resultado unos límites en donde ocurren los procesos dinámicos y naturales del río. Particularmente, se obtendrá un polígono de cada aspecto, que al realizar un proceso de unión de los tres, se obtendrá un nuevo polígono envolvente, cuya área interna acota la propuesta metodológica para la ronda hídrica. La Figura 7 presenta un ejemplo de intersección de polígonos o mapas.

Figura 7 Unión de polígonos para definir la envolvente de la ronda hídrica



Fuente: Elaboración propia

La Geomorfología de las orillas de un río, es un parámetro fundamental para el asentamiento de la humanidad y construcción de infraestructura. Considera la estabilidad de los suelos frente diversos procesos erosivos que ocurren naturalmente en una cuenca

hídrica. Este aspecto metodológico se desarrolla en el capítulo 4, donde se realiza una descripción general y un análisis de las unidades geomorfológicas.

La Dinámica Fluvial, es el aspecto que recopila la información de los registros históricos de las orillas y son procesos de divagación natural de acuerdo con las formaciones geomorfológicas existentes. Es el aspecto metodológico que contiene la historia del río, en cuanto a la variación de las orillas de forma diaria. Se considera uno de los elementos más dinámicos de la naturaleza. El análisis multitemporal de la variación de la orillas, se desarrolla en el capítulo 4.

La Hidrología y la Hidráulica, corresponden al tercer aspecto y estima el comportamiento de los niveles máximos, medios y mínimos del río, producida por caudales que generalmente son el resultado del proceso menos predecible de la naturaleza que es el ciclo hidrológico.

El documento desarrolla de forma general los dos primeros aspectos, pues no son objeto de conocimiento particular e interés específico en este documento. El aspecto de Hidrología e Hidráulica será desarrollado detalladamente, realizando un análisis hidrológico para determinar un procedimiento de cálculo que estime el caudal que genere los niveles de cauce permanente, comúnmente denominado en la literatura hidráulica como el Caudal Formador.

Se requiere un procedimiento estandarizado para asegurar que la estimación del caudal formador es el adecuado y que los resultados obtenidos en diferentes sitios de un río puedan ser comparados. Para lograr esto, la información secundaria que será la base para los análisis y cálculos realizados debe ser de buena calidad.

Adicionalmente, los criterios utilizados en otros países para determinar la ronda hídrica, hacen parte del análisis de esta propuesta. Recopilada la información necesaria, se compararon las diferentes definiciones de ronda hídrica, cauce y criterios hidráulicos para determinar el caudal formador o la banca llena.

También se realiza una descripción general, según diferentes autores, sobre la discrepancia de los resultados que determinan el periodo de retorno del caudal que forma la banca llena o el caudal formador.

El valor estimado del caudal formador, depende de cierta medida de los pasos usados para manipular los datos de entrada que definen la caracterización hidrológica y la estimación de los volúmenes de transporte de sedimentos. De acuerdo con esto, por medio de tres diagramas de flujo, se plantea un procedimiento de cálculo para estimar el caudal formador que corresponderá al caudal que representa el cauce permanente.

2.1 Comparación de conceptos hidráulicos sobre ronda hídrica a nivel internacional

La información recopilada, en seis países, sobre la normatividad existente para determinar la ronda hídrica, permitió realizar una investigación general sobre las diferentes definiciones hidráulicas y procedimientos utilizados para calcular las zonas o fajas de ronda.

La comparación realizada se presenta en la Tabla 5, identificando cuatro conceptos fundamentales de la hidráulica, (i) ronda hídrica, (ii) definición de cauce, (iii) caudal máximo ordinario y (iv) periodo de registro de datos hidrológicos. En este último concepto se logró identificar un tema común, los países investigados recomiendan utilizar series hidrológicas de mínimo de 10 años para realizar los estudios necesarios para caracterizar las cuencas y las corrientes hídricas.

Tabla 5 Comparación de conceptos hidráulicos a nivel internacional

PAÍS	CRITERIO	NORMATIVIDAD	DEFINICIÓN DE RONDA	DEFINICIÓN DEL CAUCE	CAUDAL MÁXIMO ORDINARIO	PERIODOS DE REGISTROS HIDROLÓGICOS (AÑOS)
Estados Unidos de America	Vía de intenso desagüe - VID (Floodway)	Ley Nacional de Seguros Frente a Inundaciones en 1968. (National Flood Insurance Act)			N/A	
México	Ribera o Zona Federal	Ley de Aguas Nacionales, última reforma DOF 11-08-2014: Título primero, artículo 3, numeral XLVII, página 6	Las fajas de diez metros de anchura contiguas al cauce de las corrientes o al vaso de los depósitos de propiedad nacional, medidas horizontalmente a partir del nivel de aguas máximas ordinarias. El nivel de aguas máximas ordinarias se calculará a partir de la creciente máxima ordinaria que será determinada por "la Comisión" o por el Organismo de Cuenca que corresponda, conforme a sus respectivas competencias, de acuerdo con lo dispuesto en los reglamentos	Cuando las corrientes estén sujetas a desbordamiento, se considera como cauce el canal natural,	Promedio 5 años	10
Uruguay	Ribera	Poder Legislativo, Código de Agua, Artículos 35, 36 y 37	1º Se determinará el nivel medio de las aguas, tomando al efecto períodos de observación no menores de doce años; 2º Se fijará el promedio de altas aguas ordinarias, que corresponderá al promedio de todas las alturas de aguas que sobrepasen el nivel medio; 3º El promedio de todas las alturas de aguas que sobrepasen la altura determinada de acuerdo con el numeral 2º corresponderá al promedio de las crecidas extraordinarias; 4º La media aritmética de los valores obtenidos con arreglo a lo establecido en los numerales 2º y 3º determinará el límite del álveo o línea superior de la ribera.	El álveo de un río o arroyo es el terreno que cubren sus aguas en las crecidas que no causan inundación	Tr: 5 Años	12
Chile	Zona de protección de exclusión de intervención (Zona Ripariana)	Decreto 82/2011, Artículo 2, literal "p"	Zona de protección de exclusión de intervención: Corresponde a los 5 metros aledaños a ambos lados de cursos naturales de agua, cuya sección de cauce, delimitada por la marca evidente de la crecida regular, es superior a 0,2 metros cuadrados e inferior a 0,5 metros cuadrados.	Curso de agua conformado por un lecho de sedimentos, arena o rocas, delimitado por riberas definidas, por el cual escurre agua en forma temporal o permanente. (literal e, artículo 2, Dto 82/2011).	Tr: 5 Años	10
Holanda	Espacio para el río (Ruimte voor de rivier)	Comisión Internacional para la Hidrología de la cuenca del Rhine (CHR)	Uno de los productos del proyecto es el modelo RHINEFLOW que simula estimaciones de descargas medias mensuales para la cuenca del río Rhine, el modelo requiere una amplia base de datos como topográficas, meteorológicas, condiciones hidrológicas y de uso del suelo de toda la cuenca del Rhine, a en una escala muy detallada utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG).	N/A	N/A	N/A
España	Dominio Público Hidráulico - DPH	Real Decreto 849/1986		Máxima crecida ordinaria	Tr: 15 años	Media de los máximos caudales anuales, en 10 años consecutivos

Fuentes: ver capítulo 1.5

2.2 Diferentes definiciones de caudal formador de cauce

En diferentes estudios, el caudal que forma el cauce natural de una corriente hídrica, se estima a partir del periodo de recurrencia de un evento hidrológico. Leopold y Wolman (1957) demostraron que el caudal formador tiene un intervalo de recurrencia entre uno y dos años. Dury (1973) concluyó que este caudal formador es de aproximadamente el 97 por ciento del caudal correspondiente a 1,58 años de periodo de retorno, y lo ha denominado como la inundación anual más probable. Hey (1975) demostró que, en tres ríos británicos con material de fondo de gravas, el caudal de 1.5 años de periodo de retorno corresponde a un máximo anual de banca llena. Richards (1982) sugiere que, en una serie de duración parcial, el caudal máximo es igual a la inundación anual más probable, que corresponde a un año de periodo de retorno.

En la práctica, el caudal formador se asemeja al caudal que representa al nivel de agua que se encuentra inmediatamente antes de presentarse inundación o desborde, generalmente se supone que tienen un periodo de retorno de 2.33 años. Recientemente, Leopold (1994) indicó que la mayoría de las investigaciones han llegado a la conclusión de que los periodos de retorno del caudal formador están entre 1,0 y 25 años. Sin embargo, hay muchos casos en que el caudal no se establece dentro de este rango. Por ejemplo, Pickup y Warner (1976) determinan que los intervalos del caudal formador pueden variar de 4 a 10 años.

A continuación se presenta la Tabla 6, indicando otros autores que estipulan diferentes valores del periodo de retorno del caudal que define teóricamente el nivel del cauce a banca llena.

Tabla 6 Diferentes valores de caudal formador de cauce

FUENTE	CAUDAL FORMADOR (Tr años)	TIPO DE RÍOS
LEOPOLD, L., MADDOCK, T. 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications" U.S. Geol. Survey Prof. Paper 252, 57 p.	1.07 a 4	Con base en caudales máximos anuales de ríos de Norteamérica. Criterios en los que las condiciones topográficas no es posible el desborde.

FUENTE	CAUDAL FORMADOR (Tr años)	TIPO DE RÍOS
Leopold, L.B., Wolman, M.G., and Miller, J.P., 1964, Fluvial processes in geomorphology: San Francisco, Calif., W.H. Freeman and Co., 522 p.	1 a 2	La definición más simple del caudal formador o de banca llena, es aquella descarga cuando el nivel del agua en la sección está a punto de desbordarse hacia la planicie de inundación activa.
Williams, G.P., 1978. Bankfull discharge of rivers. Water Resources Research, 14: 1141–58	1.01 a 32	Observaron grandes variaciones en la frecuencia de la descarga de cauce lleno, que varió de 1,01 a 32 años. (página 32 y 33)
Chow V.T., Maidment D. R. and Mays L.W. 1988. Applied Hydrology, McGraw-Hill International editions	2.33	Gumbel sugiere que el caudal formador es el correspondiente a un período de retorno de 2.33 años considerando que éste es la media de la distribución de valores extremos Tipo I (Chow, V. T. 1988)
Annable, W.K., 1995, Morphological relations of rural water courses in southeastern Ontario for use in natural channel design: Guelph, Ontario, Canada, University of Guelph, School of Engineering, Master's thesis, 389 p	1.5 a 1.7	Recientes análisis de los datos de flujo máximo para las estaciones de calibre en 47 ríos ubicados en Ontario, Canadá.
Mejía, G y Posada, L. 2002. Geometría hidráulica para corrientes estables de la zona andina Colombiana. XV Seminario nacional de hidráulica e hidrología – Medellín. pp 5.	1.3	Estudio con 29 corrientes en la zona andina antioqueña
Rodríguez. H. A. 2010. Hidráulica Fluvial - Fundamentos y Aplicaciones - Socavación. Escuela Colombiana de Ingeniería	1.5	Caudales máximos anuales

Descrita la compilación anterior, no es conveniente definir un mismo caudal determinado por un valor de periodo de retorno para un río, inclusive se debe determinar este caudal dependiendo si la corriente de agua se está desarrollando sobre una cuenca alta, media o baja. Por ejemplo, Williams (1978) demostró claramente que en 35 ríos aluviales en los Estados Unidos de América, el resultado del periodo de retorno que determina el caudal

formador varió entre el 1.01 y 32 años, y que sólo un tercio de aquellas corrientes tuvieron un caudal formador con periodo de retorno entre uno y cinco años, y llegó a la conclusión de que esto era demasiado variable para asumir un período de retorno uniforme para todos los ríos.

Debido a tales discrepancias, investigadores han llegado a la conclusión de que el caudal referente a un periodo de retorno tiende a generar pobres estimaciones de un caudal de banco llena (Copeland, 2000). Por lo tanto, a continuación se presenta un análisis del procedimiento de cálculo para determinar el caudal formador realizado recientemente por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (United States Army Corps of Engineers - USACE¹⁸ por sus siglas en ingles), en el cual se basa en el transporte de sedimentos del lecho y un histograma de frecuencia de caudales. El análisis práctico será objeto de una prueba piloto en el desarrollo de este documento, el cual será determinante para concluir la recomendación de este procedimiento al componente hidráulico.

2.3 Procedimiento de cálculo del caudal formador de cauce

Dependiendo del sector de la cuenca, los ríos aluviales tienen la capacidad de ajustar su forma y características hidráulicas de acuerdo con el transporte de sedimentos (Copeland, 2000). Inglis (1941) sugirió que un solo caudal constante se puede identificar como el caudal que produciría las mismas dimensiones y características del cauce lleno. Se refirió a este flujo como el caudal dominante, que es equivalente al término que forma el cauce, indicado caudal efectivo en este documento.

Sobre la base de las observaciones de campo, Inglis (1947) determinó que el caudal formador se determina cuando el flujo llega al nivel de cauce lleno. Este hallazgo ha sido comprobado en posteriores investigaciones por Nixon 1959, Simons y Albertson 1960, Kellerhalls 1967, Hey y Thome 1986.

Para explicar este procedimiento, es necesario reconocer que cualquier fenómeno local es determinante en el balance del transporte de sedimentos y genera un cambio en la

¹⁸ USACE es la agencia federal del Ejército de los Estados, y da recomendaciones para la ingeniería de diseño público, y gestión de la construcción. Generalmente se asocia con instituciones encargadas de administrar los recursos hídricos como las presas, canales y protección contra las inundaciones en los Estados Unidos.

morfología de un río aluvial, ya sea a través de la erosión o sedimentación. Por lo tanto, las características hidráulicas del canal serán ajustadas naturalmente para que, en un periodo de tiempo, la entrada y salida de sedimentos alcancen el equilibrio. Teniendo en cuenta este concepto, Wolman y Miller (1960) demostraron que los ríos se ajustan a su capacidad de cauce lleno de acuerdo con el transporte de los sedimentos. Ese flujo fue denominado caudal formador (Andrews 1980).

Wolman y Miller (1960), también demostraron que el caudal formador corresponde a un flujo intermedio, que va desde pequeñas inundaciones recurrentes (eventos ordinarios) y que tienen un marcado impacto sobre las características generales del cauce, hasta flujos que transportan grandes cargas de sedimentos de forma súbita (evento extraordinario), que se producen con poca frecuencia y no son determinantes en la formación del cauce de banca llena.

En la práctica, en un cauce natural, identificar el caudal que establece el cauce lleno es confuso. No existe ni la instrumentación suficiente para realizar el monitoreo adecuado ni las estaciones de medición con intervalos de cercanía óptimos para caracterizar un río. Inclusive las características geométricas de un río se comprueban utilizando una rugosidad del cauce supuesta.

El caudal formador no es lo único que determina un cauce a banca llena. Es necesario identificar la zona en que se desarrolla la corriente, ya sea de la cuenca alta, media o baja, y comprobar los resultados en campo. Adicionalmente se debe considerar la información geomorfológica.

Mediante tres pasos, se describe un procedimiento para calcular el valor del caudal formador¹⁹, el primer paso consiste en recopilar información de los caudales registrados para trazar la curva de duración de caudales medios. En el paso 2, los datos de transporte de sedimentos se utilizan para determinar la relación entre el volumen transportado de sedimentos de fondo y el caudal que los transporta. En el paso 3 mediante una operación entre los resultados de los pasos 1 y 2, se obtiene un histograma de frecuencia de sedimentos, cuyo pico corresponde al caudal formador de cauce.

¹⁹ “Effective discharge calculation: A practical guide,” Technical Report, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. 2000. Biedenbarn.

2.3.1 Paso 1: Curva de duración de caudales

La curva de duración de caudales representa la magnitud del caudal igualado o superado con diversos porcentajes de tiempo en un año.

a) Evaluación de registros: Corresponde a los registros diarios o mensuales de los caudales medidos a lo largo de un río. El registro en una sola estación de medición puede ser utilizado para desarrollar la curva de frecuencia de duración de caudales. Si la estación se encuentra ubicada en la zona de análisis, el registro del caudal medido es representativo del régimen del flujo. Cuando la estación de aforo, solo tiene registros de niveles de agua y no contiene la medición de caudales, se recomienda utilizar una curva de calibración de la estación para determinar los caudales. En caso que los registros sean medidos en una estación que no comprenda el área del análisis, los datos de los caudales se obtendrán mediante una regionalización derivada de rendimientos de la cuenca-área o por los métodos descritos en la literatura para obtener caudales en sitios no aforados.

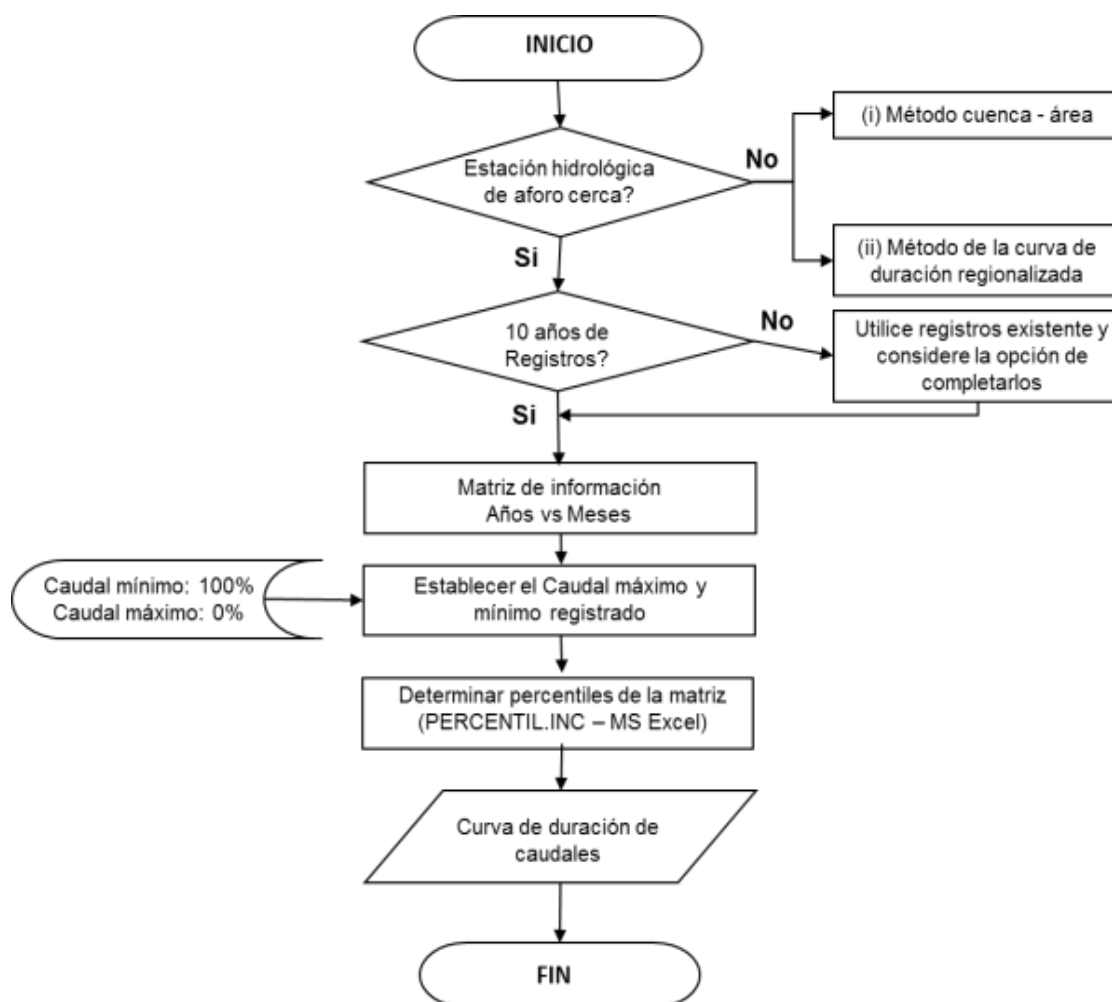
El procedimiento será sencillo cuando se logre utilizar los datos disponibles a partir estaciones de aforo. Los lugares donde los registros de aforo no están disponibles o donde no existe instrumentación en el sector de estudio, será necesario sintetizar los caudales mediante las curva de duración. Hay dos posibles formas de hacerlo. El primer método es mediante el uso de los registros de las estaciones de aforo cercano dentro de la misma cuenca de drenaje. El segundo es el desarrollo de una curva de flujo-duración regionalizada.

Hay que reconocer que estos métodos sólo proporcionan una aproximación de las características de caudal, y que puede haber una considerable incertidumbre en los resultados. La fiabilidad de estos métodos es función de la calidad de los datos existentes, principalmente cuando logran ser calibrados satisfactoriamente. Se recomienda tener precaución cuando el sitio en cuestión tiene un carácter morfológico significativamente diferente al del sitio de aforo.

b) Período de registros: Se deben utilizar los registros históricos existentes. Se recomienda que la longitud del período de registro sea de al menos 10 años y que las mediciones sean continuas. Si los datos presentan vacíos, se deberán utilizar los métodos recomendados para completar serie hidrológicas.

c) Datos de la curva de duración de caudales: Los datos se representan en un plano cartesiano con el caudal en el eje de las ordenadas y los 365 días del año representados en forma porcentual en el eje de las abscisas. Se puede realizar en MS Excel utilizando percentiles²⁰ del total de los registros utilizando la fórmula “PERCENTIL.INC”²¹

Figura 8 Procedimiento para obtener la curva de duración de caudales



²⁰ Diccionario Real Academia Española define percentil al Valor que divide un conjunto ordenado de datos estadísticos de forma que un porcentaje de tales datos sea inferior a dicho valor.

²¹ La fórmula devuelve el k-ésimo percentil de los valores en un rango, donde k está en el rango de 0 a 1, ambos incluidos.

2.3.2 Paso 2: Curva de volumen de sedimentos de fondo

Se obtendrá una serie de puntos en un plano cartesiano, donde cada punto representa la relación entre el volumen de transporte de sedimentos de fondo y su caudal asociado. Se debe tener consistencia entre las unidades de medida en que se encuentran los registros.

a) Determinar la disponibilidad de datos de sedimentos. Se requieren datos de sedimentos para generar la curva de volumen de material de fondo. Estos datos pueden obtenerse a partir de mediciones en la estación seleccionada en el paso anterior, con información adecuada y confiable del volumen del sedimento registrado para determinar la porción de material de fondo. Se requiere un ensayo de laboratorio, para obtener la granulometría del material y determinar mediante diferentes fórmulas de transporte de sedimentos, el volumen de transporte de fondo.

b) Ecuación de relación de Volumen de sedimentos de fondo VS Caudal. Los datos obtenidos se representan en el plano cartesiano con escalas logarítmicas. La ordenada corresponde al volumen de transporte de sedimentos expresadas en unidades (toneladas/día) y la abscisa, el caudal asociado en metros cúbicos por segundo (m^3/s). El tener los datos graficados, permite encontrar la línea de tendencia potencial que mejor ajuste los datos registrados, con su respectiva ecuación para calcular el volumen de transporte de sedimentos según el caudal registrado. La ecuación es de la siguiente forma:

$$Q_s = a \cdot Q_L^b \quad (1)$$

Donde:

Q_s : Volumen de sedimentos (Toneladas/día)

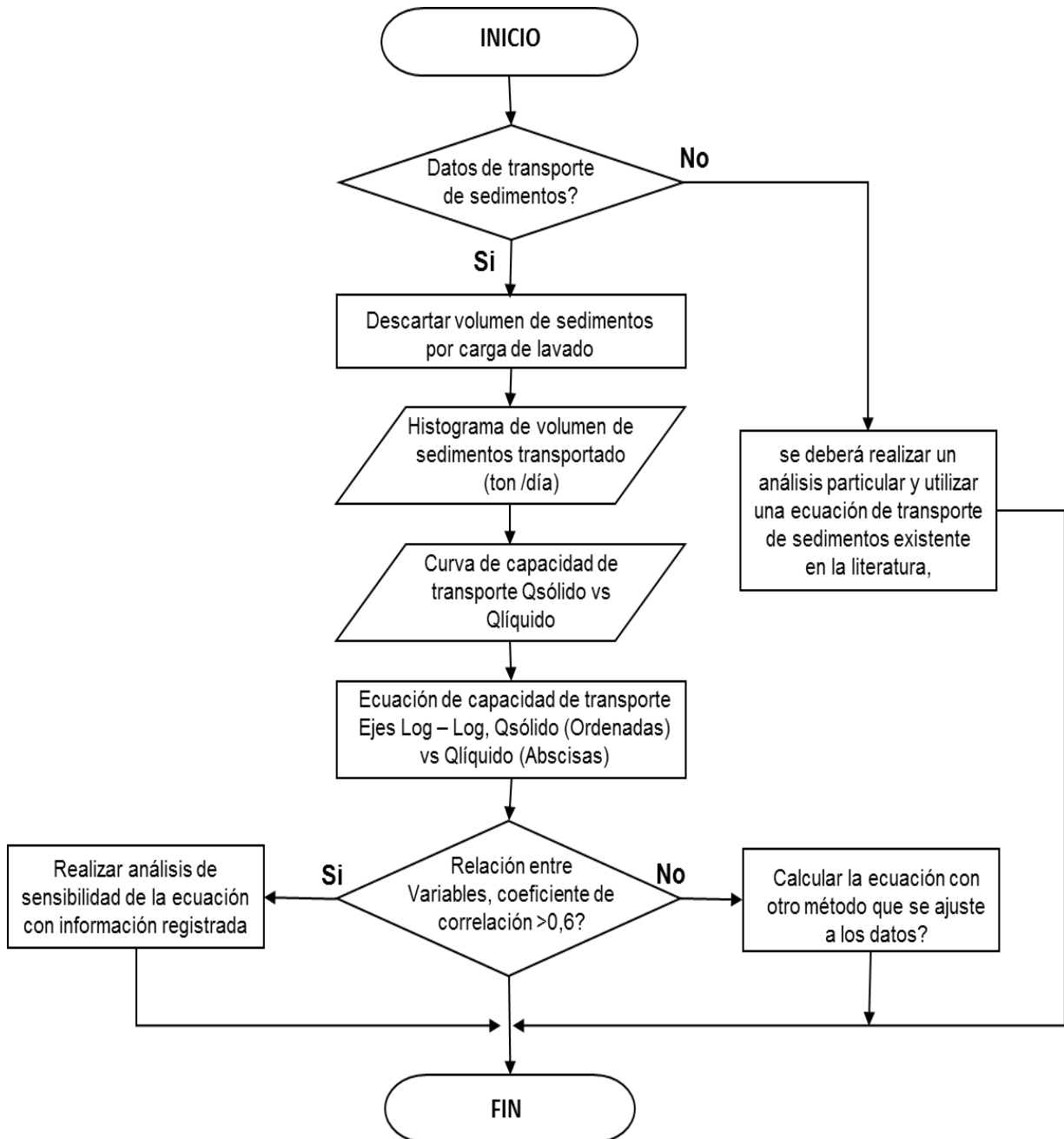
a : Coeficiente de regresión

Q_L : Caudal (m^3/s)

b : Exponente de regresión

Sin embargo, de acuerdo con las características de los registros, esta ecuación puede no ser la más apropiada. A veces, para caudales puede ser necesario utilizar una función de ajuste diferente.

Figura 9 Procedimiento para obtener la ecuación de capacidad de transporte



2.3.3 Paso 3: Histograma de volumen de material de fondo

Para generar el histograma de volumen de material de fondo, se debe utilizar los caudales medios registrados utilizados en el paso 1 y la ecuación (1) que estima el volumen de sedimentos de fondo determinada en el paso 2.

En las corrientes aluviales las principales características de la morfología del canal son las derivadas del transporte de material de fondo. Por lo tanto el volumen de sedimento del fondo es el que debe ser usado en el cálculo de caudal formador de cauce.

La carga total de sedimentos de una corriente se puede dividir de acuerdo con tres características fundamentales, (i) método de medición, (ii) mecanismo de transporte y (iii) la fuente de sedimentos, como se muestra en el siguiente diagrama. Cuando se habla de la carga de sedimentos de un río, es importante mantener unidades de medida constantes, usar terminología adecuada y tener claridad sobre la naturaleza del mecanismo de transporte que se está calculando.

Figura 10 Diagrama de características del transporte de sedimentos en un río

MÉTODO DE MEDIDA	MECANISMO DE TRANSPORTE	FUENTE DE SEDIMENTOS
Volumen medido	Material suspendido	Carga de Lavado
Volumen no medido		Carga de Lecho
	Material de fondo	

Fuente: Biedenharn, D. S., Copeland, R. R., Thorne, C. R., Soar, P. J., Hey, R. D., and Watson, C. C. (2000). "Effective discharge calculation: A practical guide," Technical Report, U.S. Army

Las mediciones del transporte de sedimentos habitualmente se realizan para determinar el volumen de material suspendido. En estas circunstancias, el material que no hace parte del transporte en suspensión corresponde a las partículas con tamaño superior a 0.062 milímetros. Generalmente, en las mediciones de transporte de sedimentos, el volumen de material de fondo se obtiene mediante una curva de gastos o se estima utilizando las ecuaciones para determinar el transporte de sedimentos de fondo.

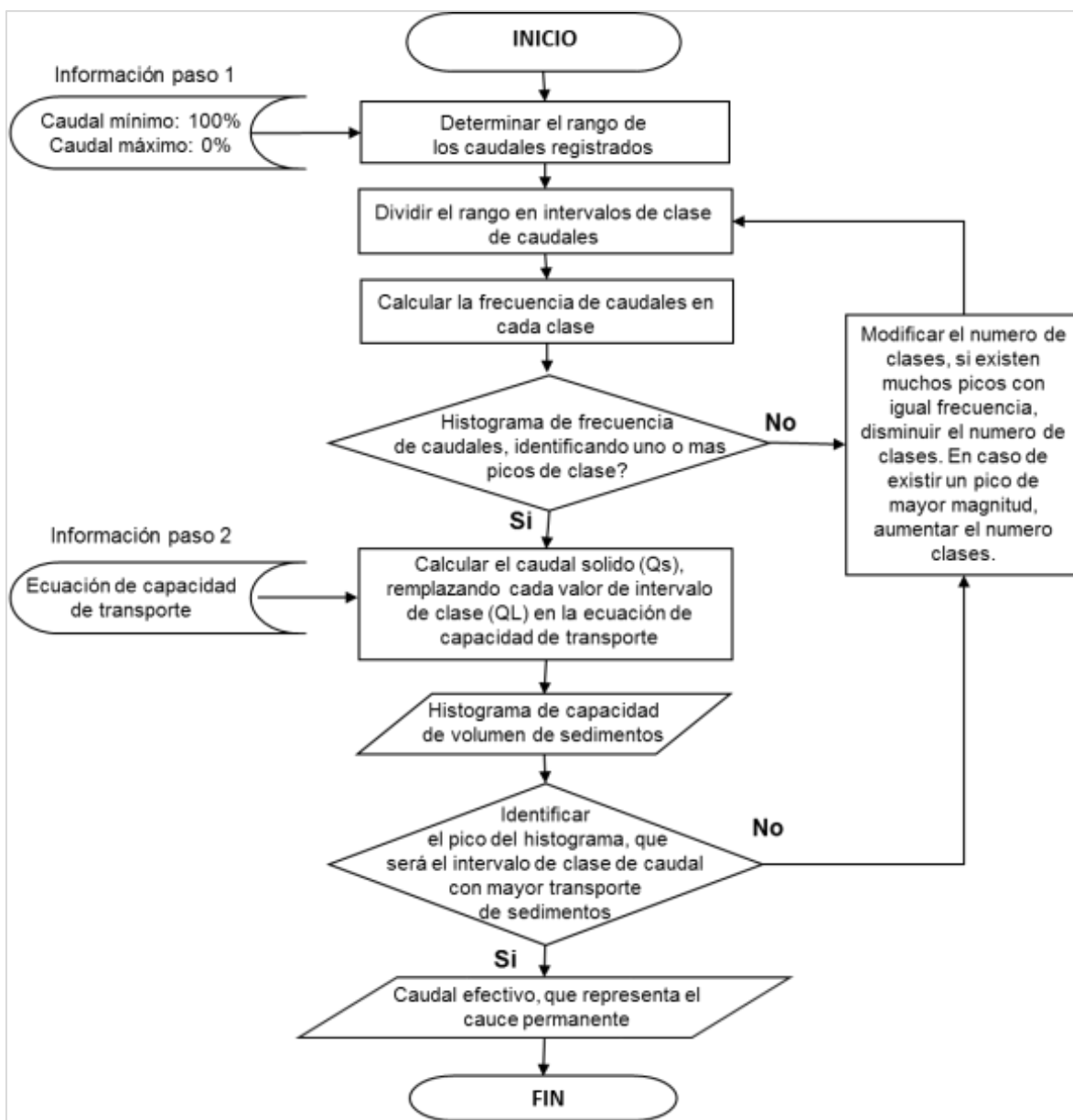
a) Construir el histograma de Volumen de material de fondo. Se genera el histograma de volumen de material de fondo, resolviendo la ecuación (1) mediante el uso de los caudales medios de la curva de duración. Inicialmente se establece un rango de caudales entre el valor del caudal mínimo y caudal máximo, seguidamente se establece un intervalo de clases representativo del rango y que permita realizar una clasificación adecuada de las frecuencias con que se repiten los valores de un rango.

b) Cálculo del caudal formador de cauce. El histograma de Volumen de material de fondo debe mostrar una distribución continua con un solo pico. Si el pico del histograma no puede ser fácilmente identificado, el caudal formador de cauce se estima mediante una curva suave a través de los picos de las barras del histograma.

c) Evaluar el histograma de Volumen de material de fondo. Si el caudal efectivo calculado, tiene un valor inferior al igualado o superado el 50 por ciento del tiempo, es probable que la caudal efectivo indicado sea erróneo. En este caso, puede ser necesario modificar el procedimiento, aumentando el número de clases de caudal o modificando la ecuación que determina el volumen de transporte de sedimentos de fondo.

d) Compruebe si el caudal formador de cauce calculado es razonable. Al final del procedimiento, es importante comprobar que el caudal formador corresponde a un valor razonable de acuerdo con la zona de estudio. Un control inicial consiste en realizar un chequeo con el análisis de los niveles en una modelación hidráulica de este caudal calculado.

Figura 11 Procedimiento para obtener el histograma de capacidad de volumen de sedimentos



Capítulo 3 Escenario de estudio

De acuerdo con la importancia que tiene el proyecto de la Recuperación de la Navegabilidad del Río Magdalena para el país, el cual se fundamenta en el objetivo de acercar al principal centro de origen y destino de carga general del país (Bogotá) al modo fluvial, y unir el río con las zonas productoras de petróleo y carbón del interior y del Magdalena medio, que son las principales cargas de vocación fluvial en Colombia²², se planteó como escenario de estudio un sector del río Magdalena con una longitud de 20 kilómetros entre la población de San Luis (Orilla izquierda en el departamento de Antioquia) y Barrancabermeja (orilla derecha en el departamento de Santander).

En el sector de análisis, es importante mencionar que sobre el río Magdalena desemboca el río Carare por la orilla derecha aproximadamente a 32.6 km aguas arriba de San Luis y el río Opón desemboca inmediatamente aguas arriba de Barrancabermeja. Este sector del río cuenta con información histórica de los niveles y caudales registrados en las estaciones limnigráficas a cargo del IDEAM²³, que es necesaria para el desarrollo de la aplicación de la metodología propuesta.

Adicionalmente se cuenta con una batimetría realizada con ecosonda mono haz en secciones transversales cada 100 metros y un levantamiento topográfico de las zonas secas y de las orillas incluido 50 metros de zona inundable.

Gracias a la colaboración de CORMAGDALENA, se cuenta una fotografía aérea con resolución de 15 cm por pixel ($GSD^{24}=15$ cm) tomada en octubre del año 2013. Se puede

²² Estudios realizados desde 1993 hasta la fecha, sobre la demanda de transporte y las concesiones portuarias en el río Magdalena, han presentado la justificación y motivación para reactivar la navegación en los tramos localizados aguas arriba de Barrancabermeja (puerto localizado a 630 km del mar Atlántico), y han recomendado revitalizar todo el sistema de transporte por el río, con puerto terminal en el nodo Puerto Salgar / La Dorada como un centro intermodal de importancia económica debido a la cercanía con Bogotá de 180 km por carretera.

²³ De acuerdo con la Ley 1712 del 6 de marzo de 2014, el IDEAM entrega de la información de manera gratuita.

²⁴ GSD (Ground Sample Distance siglas en ingles)

decir que el análisis cuenta con información privilegiada y fundamental para la adecuada interpretación de los resultados.

3.1 El río Magdalena

La descripción general del río Magdalena descrita a continuación se desarrolló con base en información de proyectos y estudios en que ha participado el autor con la empresa JESyCA S.A.S²⁵.

Por el río Magdalena se logró la conquista y colonización de la mayor parte del interior de Colombia, por la facilidad de acceso y penetración desde la costa Atlántica hasta el corazón de la colonia, lo cual ayudó a consolidar un país de ciudades en contraste con el resto de países de la América Española.

Sus dos desembocaduras, una por Cartagena y la otra por Barranquilla, definieron durante cuatro siglos las obras de infraestructura multimodal y encauzamiento que permitieron conectar a un país con desarrollo mediterráneo con el mundo. Desde el siglo XVII comenzaron los españoles a mejorar las condiciones de la navegabilidad del río Magdalena para conectarlo con el puerto de Cartagena, adecuando para la navegación el Canal del Dique a partir del año 1650, labor incesante hasta la independencia y luego en la era republicana. Más tarde, la llave Barranquilla-Puerto Colombia se convirtió en la articulación entre el Río Magdalena y el mar Caribe, lo cual se consolidó a principios del siglo XX con las obras de encauzamiento de Bocas de Ceniza, que le dieron a esta ciudad el carácter de puerto fluvial y marítimo.

El río Magdalena continuó siendo un medio de transporte muy importante hasta mediados del siglo XX y el río y sus puertos eran un buen ejemplo de multimodalismo. En el interior, las conexiones con las carreteras y el ferrocarril en Puerto Wilches, Puerto Berrío y Puerto Salgar, y con el cable aéreo en Gamarra, así lo atestiguaban.

El Canal de Dique, es un canal artificial construido a lo largo de un brazo antiguo del río Magdalena, construido desde el siglo XVI hasta el siglo XX. El canal inicia en las proximidades de la población de Calamar (90 kilómetros aguas arriba de Barranquilla) y desemboca en la bahía de Cartagena. Su ancho promedio es de 100 m y una longitud de

²⁵ www.jesyca.com

115 Km aproximadamente. El Canal del Dique fue excavado en el año 1650, interconectando cierto número de ciénagas que se formaron a lo largo de un antiguo brazo del río Magdalena. El Gobernador de Cartagena de turno, Pedro Zapata de Mendoza, adelantó en el siglo XVII un trabajo de limpieza y conexión de ciénagas y luego rompió un “dique” que separaba en verano al Río Magdalena de dichas ciénagas, en proximidades de lo que hoy es la población de Calamar. Del rompimiento de dicho dique viene el nombre del Canal del Dique y también el sueño de un canal que uniera al Río Magdalena con Cartagena de Indias. Pedro Zapata de Mendoza realizó estas modestas obras con 2000 hombres de hacha, pico y pala entre enero y agosto de 1650²⁶. La Tabla 7 muestra la cronología de la conformación del Canal del Dique.

Tabla 7 Cronología de actividades para la conformación del Canal del Dique

AÑO	ACTIVIDAD
1571	Finales Siglo XVI: Limpieza y conexión de ciénagas mediante corte y remoción de manglares para comunicar antigua ciénaga de Matuna con bahía de Barbacoas.
1650	Pedro de Mendoza: Rompimiento del dique que separaba el río Magdalena de las ciénagas de agua dulce
1844 y 1884	G.M. Totten: Construcción canal recto de 8 km entre río Magdalena y ciénaga Sanaguare, cerca de Santa Lucía.
1923 y 1930	Foundation Co: Reducción a 250 el número de curvas
1934	Frederick Snare Co: Conexión ciénaga Matunilla con caño Estero mediante corte de Paricuica.
1951 y 1952	Standard Dredging: Reducción a 93 el número de curvas. Ampliación sección canal
1961	Construcción caño Lequerica
1981 y 1984	Layne Dredging y Sanz & Cobe: Reducción a 50 el número de curvas. Ampliación sección canal

Fuente: Cormagdalena. Comité Técnico Selección de Alternativa Plan de Restauración Ambiental y de Navegación del Canal del Dique 2011

²⁶ MISIÓN TÉCNICA COLOMBO – HOLANDESA (MITCH). Proyecto de estudio del Río Magdalena y Canal del Dique. 1973

Finalmente, después del año 1991, mediante el artículo 331 de la Constitución Política de Colombia se crea la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena - CORMAGDALENA y el río vuelve a ser considerado como uno de los grandes motores para el desarrollo económico del país.

Actualmente, en el progreso de esta investigación y desde el 11 de diciembre de 2014, se está desarrollando el proyecto de la Recuperación de la Navegabilidad del río Magdalena mediante una Asociación Público Privada – APP entre el Gobierno Nacional y el Consorcio Navelena. El objetivo específico es recuperar la navegabilidad desde Barranquilla y Cartagena hasta Puerto Salgar / La Dorada, por medio de convoyes con 7 pies de calado (6 barcazas empujadas por un remolcador) que trasportan un máximo de 7.200 toneladas, equivalentes a 180 vagones de 40 toneladas cada uno o a 225 camiones de carga terrestre, que unido uno tras de otro serian aproximadamente 5 kilómetros. El proyecto tiene una duración total de 13.5 años y una inversión de 2.5 billones de pesos a precio del año 2012.

3.1.1 Cuenca

La cuenca del río Magdalena se encuentra definida por la geología y topografía del país, como lo son las cordilleras Central y Oriental de los Andes y la llanura del Caribe como se muestra en la Figura 12. El área total de la cuenca desde su nacimiento hasta la desembocadura es de 257.440 km² con una longitud de 1540 Km. Su caudal medio en la desembocadura, por bocas de Ceniza es de 7.100 m³/s.

La cuenca se divide en tres subcuencas, la cuenca del Alto, Medio y Bajo Magdalena. La cuenca del Alto Magdalena, tiene una forma alargada que parte desde el nacimiento del río en la laguna de la Magdalena a 3685 m.s.n.m. hasta el municipio de Honda (229 msnm). En este trayecto recorre una longitud de 565 Km y desciende 3.456 metros aproximadamente. En esta área se encuentran ecosistemas desde páramos húmedos, en el nacimiento, hasta bosques tropicales en cercanías de Honda, el cual está en deterioro ambiental por la tala y las actividades agropecuarias. Como sitios poblados importantes se encuentran las ciudades ribereñas de San Agustín, Garzón, Neiva, Girardot y Honda.

La cuenca del medio Magdalena, a comparación de la parte alta es más ancha, inicia desde Honda y llega hasta el centro poblado de El Banco (a 400 km de Barranquilla),

donde desemboca el río Cesar a una altura de 33 m.s.n.m. Los municipios ribereños más importantes que recorre el río son: Puerto Salgar, La Dorada, Puerto Boyacá, Puerto Nare, Puerto Berrío, Barrancabermeja, Puerto Wilches, San Pablo y Gamarra, las cuales tuvieron un gran desarrollo a causa de la navegación que existió en el pasado (mediados del siglo XX). En la actualidad la ciudad de Barrancabermeja es el único municipio ribereño que tiene gran actividad debido a que es el centro petrolero del país y cabecera del transporte fluvial. En cuanto a sus ecosistemas, esta es la parte más húmeda donde se encuentra el bosque húmedo tropical, afectado por actividades agrícolas y ganaderas.

La cuenca baja, se extiende desde El Banco hasta la desembocadura del río Magdalena en Bocas de Ceniza (Barranquilla) y en la bahía de Cartagena a través del Canal del Dique. La cuenca baja está determinada por la geomorfología del sector, formando numerosas ciénagas que actúan como reguladores de crecientes en épocas de lluvia. En esta zona se encuentran municipios de El Banco, Barranco de Loba, Pinillos, Magangué, Plato, Mompo, y Barranquilla, Calamar y Pasa Caballos en el Canal del Dique²⁷.

²⁷ Caracterización Física, demográfica, social y económica de los municipios ribereños de la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena. Cormagdalena. 2013.

Figura 12 Localización general del río Magdalena



Fuente: Corporación Andina de Fomento – CAF (2014).

El rendimiento hídrico de la cuenca del río Magdalena es significativamente alto a nivel mundial. Por ejemplo, la cuenca del río Paraná es 12.8 veces más grande pero su caudal es solo 2.3 mayor que el del río Magdalena. En la Tabla 8, se presenta una lista con los 30 ríos más importantes del mundo clasificados por caudal, área de drenaje, longitud y transporte de sedimentos.

Tabla 8 Lista de los principales ríos del mundo de acuerdo a su caudal, longitud, área de drenaje y volumen de sedimentos transportado

RÍO	CAUDAL (m ³ /s) x 1.000	POSICIÓN	LONGITUD (km)	POSICIÓN	ÁREA DE DRENAJE (Km ²)	POSICIÓN	SEDIMENTACIÓN (Millones de Ton/año)	POSICIÓN
Amazonas (Brasil)	180.0	1	6450	2	6900	1	900	5
Zaire (Zaire)	42.0	2	4667	8	3700	2	70	21
Padma (Bangladesh)	39.0	3	2900	22	2049	11	1927	1
Orinoco (Venezuela)	36.0	4	2062	33	899	26	352	7
Yangtse (China)	34.0	5	5987	4	1943	13	970	4
Paraná (Argentina)	22.0	6	3943	13	2305	10	88	18
Brahmaputra (Bangladesh)	20.0	7	2897	23	935	24	726	6
Yellow (China)	19.8	8	5462	5	751	28	1600	2
Yenissei (Rusia)	19.0	9	4129	10	2699	9	-	-
Ganges (India)	19.0	10	2506	31	1114	20	1451	3
Mississippi (USA)	18.0	11	6260	3	3212	4	330	8
Mahanadi (India)	17.3	12	-	-	-	-	99	17
Zambesi (Mozambique)	16.0	13	3540	18	1329	18	100	16
Lena (Rusia)	15.5	14	4828	7	3028	6	80	19
Mekong (China - Vietnam)	15.0	15	4184	9	704	29	187	11
Irrawaddi (Burma)	14.1	16	2012	34	430	36	326	9
San Lorenzo (Canadá - USA)	14.0	17	1159	12	1463	16	-	-
Ob (Rusia)	12.5	18	5410	6	2976	8	-	-

Amur (Rusia)	11.0	19	2808	26	1844	14	-	-
Tocantius (Brasil)	11.0	20	2639	28	906	25	-	-
Volga (Rusia)	8.4	21	3701	15	1458	17	25	31
Nilo (Egipto)	8.3	22	6825	1	3349	3	60	23
Godavari - Burdkin (Australia)	8.0	23	1450	44	300	42	55	24
Columbia (USA)	8.0	24	1939	36	668	31	-	-
Mckenzie (Canadá)	8.0	25	4055	11	1805	15	-	-
Yukón (USA)	7.3	26	3701	16	1010	21	-	-
Magdalena (Colombia)	7.1	27	1613	40	262	49	172	12
Níger (Nigeria)	7.0	28	3219	19	2048	12	60.5	22
Indus (Pakistán)	6.7	29	3058	20	969	23	220	10
Danubio (Europa)	6.4	30	2900	21	816	27	80	20

Fuente: THE VARIABILITY OF LARGE ALLUVIAL RIVERS. Stanley A. Schumm y Brien R Winkley. Tabla 1-1.

Páginas 3 y 4

3.1.2 Hidrología y niveles del río Magdalena

Con base en la información recolectada del IDEAM, se describe un panorama general de la hidrología de la cuenca media y cuenca baja del río Magdalena, donde se identifica en las estaciones de Puerto Salgar y Gamarra una diferencia de niveles entre el máximo y el mínimo hasta de 8 metros, y la menor variación de niveles se presenta a la altura de la estación de Gamarra con 5 metros. A continuación, con periodos de registros que van desde 20 años hasta de 48 años, en la Tabla 9 se presenta un resumen del comportamiento del río en cuanto a niveles máximos y mínimos.

El abscisado asignado a las estaciones que se muestran en la Tabla 9 respeta el asignado por ADENAVI (Asociación Nacional de Navieros), el cual inicia con K 000 en la dársena de la Sociedad Portuaria Regional de Barranquilla (SPRB) y va aumentando el abscisado hacia aguas arriba hasta llegar a Puerto Salgar en el kilómetro K 886.8.

La división de cuencas del río se desarrolla en tres zonas: cuenca alta, cuenca media y cuenca baja, las cuales facilitan el entendimiento del comportamiento del río. En la Figura

13 se muestra un esquema indicando la desembocadura de los principales afluentes del río Magdalena, mostrando el valor del caudal medio y la orilla por donde desemboca, adicionalmente se indica la ubicación de los proyectos hidroeléctrico de mayor influencia sobre el río Magdalena.

Desde el nacimiento en la Laguna de la Magdalena a una altura de 3685 m.s.n.m., el río Magdalena desciende hasta unos 229 m.s.n.m. en el municipio de Honda. Durante el trayecto el río recibe afluentes de los ríos Páez, Saldaña, Coello, Totare, Gualí, procedentes de la Cordillera Central, y de los ríos Suaza, Cabrera, Prado, Sumapaz y Bogotá, originarios de la cordillera Oriental. A la altura del municipio de Honda, el río Magdalena registra caudales medios de 1385 m³/s. Una condición importante en esta zona es la presencia del embalse de El Quimbo y de Betania, construidos sobre el cauce y que regula las condiciones naturales del drenaje.

La parte media del río se extiende desde Honda hasta El Banco, cerca de la desembocadura del río Cesar. El caudal medio que transporta el río a la altura del municipio de El Banco llega hasta los 4224 m³/s. Esta zona debido a su dinámica fluvial, la pendiente varía aproximadamente de 30 cm/km a 10 cm/km y la variación de niveles, permite la formación de ciénagas y brazos, los cuales funcionan como reguladores hidráulicos de la hidrovía río Magdalena. Entre los afluentes más importantes están los ríos Guarinócito, La Miel, Nare, Cimitarra, Simití, Negro, Carare, Opón, Sogamoso, Lebrija y Cesar

Tal como se describió anteriormente, la parte baja del río comienza desde el municipio de El Banco hasta la desembocadura del río. En la llamada depresión Momposina se constituye un delta interior donde llegan los ríos Cauca, Cesar y San Jorge, formando vastas zonas inundables. En la estación de Calamar se presenta un registro de caudal medio de 7100 m³/s.

Para un conocimiento general de la hidrología del río Magdalena, de acuerdo con la recopilación de información histórica de niveles de registrados por el IDEAM, se generó la Figura 14 que muestra un perfil longitudinal esquemático con la pendiente hidráulica media para los niveles de referencia que corresponden al 50% del tiempo indicados en la Tabla 10.

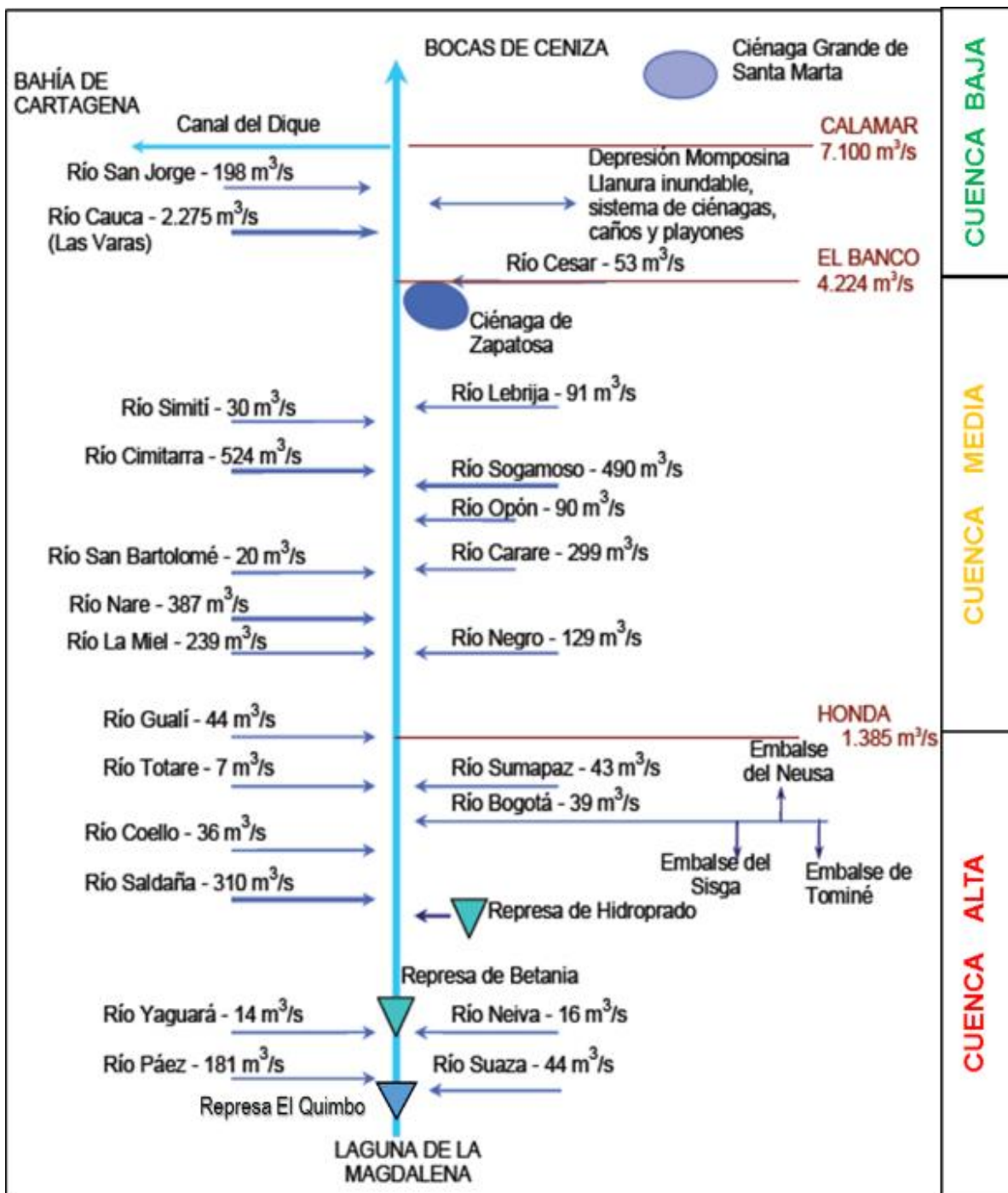
Tabla 9 Variación de niveles máximos y mínimos en el río Magdalena sobre las cuenca media y baja

Cuenca	Estación	Abscisa ADENAVI	Periodo de registros (IDEAM)	Máximo Nivel de Agua	Mínimo Nivel de Agua	Diferencia de niveles Máx. y Mín.
				(m.s.n.m.)		(metros)
MEDIA	Puerto Salgar	K 886.8	1962 - 2010	172.09	163.83	8.26
	Puerto Inmarco	K 772.7	1973 - 2005	127.48	121.89	5.59
	Puerto Berrio	K 729.6	1972 - 2011	110.54	106.18	4.36
	Barrancabermeja	K 631.2	1974 - 2014	75.99	71.02	4.97
	Puerto Wilches	K 597.1	1977 - 2011	66.50	60.97	5.53
	San Pablo	K 582.0	(1977-1995) y (2007-2010)	62.56	57.19	5.37
	El Contenido	K 485.2	(1974-1995) y (1998-2011)	43.41	35.25	8.16
	Gamarra	K 472.7	1991 - 2011	41.40	33.05	8.35
	Regidor	K 429.2	1973 - 2011	35.45	28.92	6.53
	El Banco	K 378.7	1972 - 2006	28.87	21.98	6.89
BAJA	Magangué	K 237.9	1973 - 2007 (Mensuales)	18.35	11.26	7.09
	Plato	K 163.7	1976 - 2007 (Mensuales)	13.22	4.56	8.66
	Calamar	K 090.7	1972 - 2006	8.64	0.91	7.73
	Barranquilla (SPRB)	K 000	1972 - 2006	2.38	0.27	2.11

1. Información de las estaciones desde Pto. Salgar hasta Regidor, obtenida de los "Diseños de las Obras de Encauzamiento del Río Magdalena entre Puerto Salgar y Regidor", realizado por IEH-GRUCON para FEDENAVI y CORMAGDALENA. (Años 2011 a 2013)

2. Información de las estaciones desde Regidor hasta Calamar, obtenida del informe "River Engineering Consulting Task 3.3, Ecopetrol PMRB Barrancabermeja, Colombia" realizado por EMDEPA CONSULTORÍA para MOFFATT & NICHOL en el año 2010.

Figura 13 Principales afluentes del río Magdalena (Caudales medios m³/s)



Fuente: Adaptado del Atlas Cuenca Río Magdalena, 2002

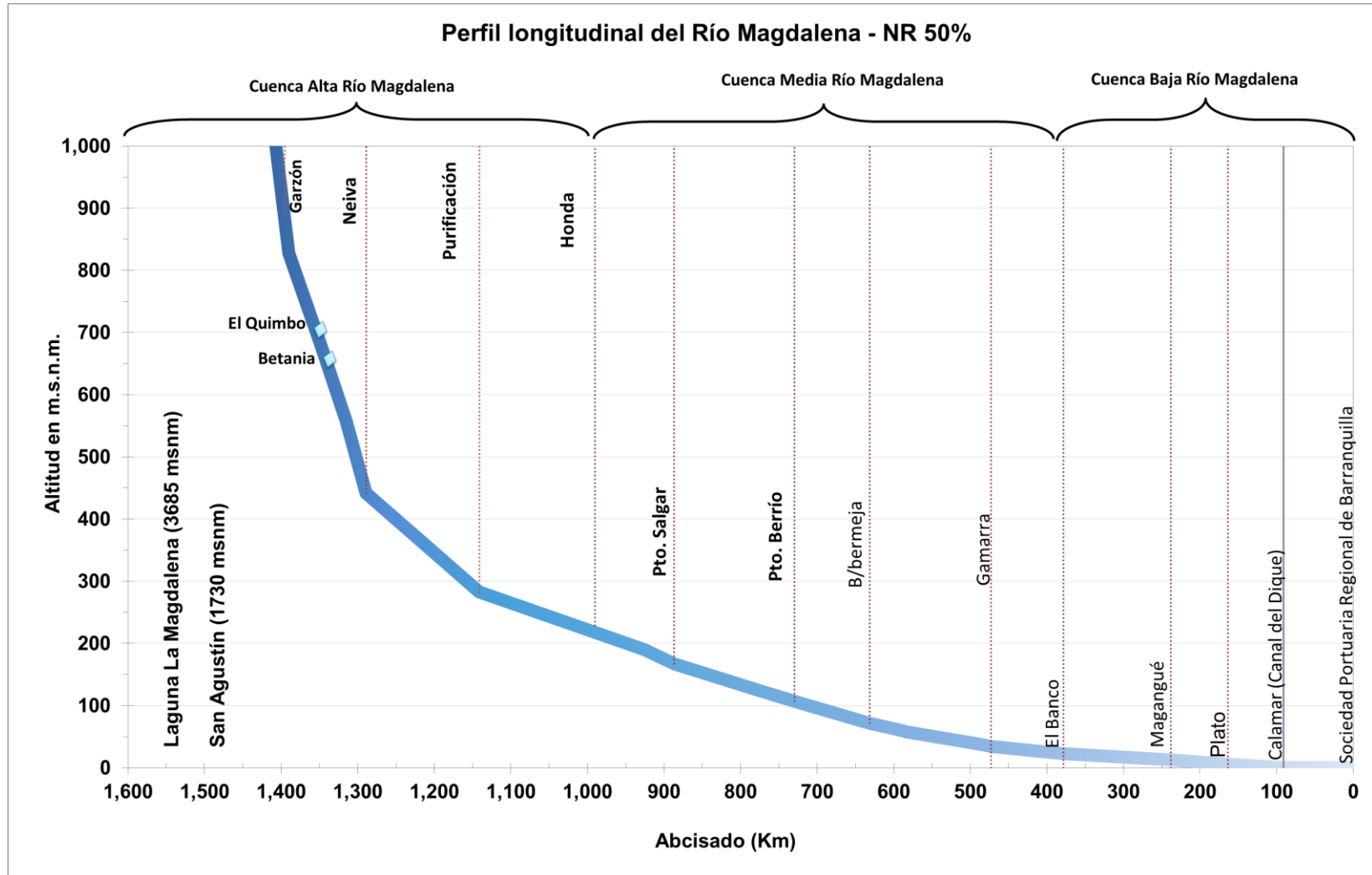
Tabla 10 Pendiente hidráulica media para el nivel de referencia excedido el 50% del tiempo

Estación	Abscisa ADENAVI	Nivel de Referencia 50% (m.s.n.m.)	Pendiente media para nivel de referencia del 50% (cm/Km)
Puerto Salgar	K 886.8	168.73	
			39.05
Puerto Inmarco	K 772.7	124.17	
			37.26
Puerto Berrio	K 729.6	108.11	
			35.45
Barrancabermeja	K 631.2	73.23	
			28.06
Puerto Wilches	K 597.1	63.66	
			25.83
San Pablo	K 582.0	59.76	
			20.37
El Contenido	K 485.2	40.04	
			22.24
Gamarra	K 472.7	37.26	
			11.98
Regidor	K 429.2	32.05	
			12.40
El Banco	K 378.7	25.79	
			7.44
Magangué	K 237.9	15.31	
			8.26
Plato	K 163.7	9.18	
			5.41
Calamar	K 090.7	5.23	
			4.41
Barranquilla (SPRB)	K 000	1.23	

1. Información de las estaciones desde Pto. Salgar hasta Regidor, obtenida de los "Diseños de las Obras de Encauzamiento del Río Magdalena entre Puerto Salgar y Regidor", realizado por IEH-GRUCON para FEDENAVI y CORMAGDALENA. Años 2011 a 2013.

2. Información de las estaciones desde Regidor hasta Calamar, obtenida del informe "River Engineering Consulting Task 3.3, Ecopetrol PMRB Barrancabermeja, Colombia" realizado por EMDEPA CONSULTORÍA para MOFFATT & NICHOL en el año 2010.

Figura 14 Perfil longitudinal del río Magdalena



Fuente: Elaboración propia con datos hidrológicos del IDEAM,

3.1.3 Represas hidroeléctricas sobre el río Magdalena

La primera construcción de un proyecto de generación de energía sobre el río Magdalena fue la Represa de Betania²⁸ localizada en el departamento del Huila, en la cuenca alta a 1320 km de la desembocadura del río Magdalena en el mar. Esta construcción constituye una influencia significativa en los niveles y caudales de la cuenca media del río Magdalena, y el régimen natural se ha visto levemente modificado por la operación de la represa, la cual está en servicio desde el año 1987.

Este embalse aumenta los caudales en épocas de verano y amortigua parte de las crecientes y caudales extremos. El área de drenaje de la cuenca hasta la represa de Betania es de 13,660 km² y en Puerto Salgar / La Dorada es de 73,980 km². Es importante señalar que una parte de la cuenca más alta del río Magdalena, arriba de la represa de Betania se encuentra en un régimen hidrológico diferente al del resto de la cuenca. En efecto, las zonas altas de la cuenca tienen un régimen monomodal con mayores caudales en los meses de junio a agosto, como es el caso de los llanos orientales, mientras que en la gran mayoría de la cuenca central se observa el régimen bimodal, propio de los desplazamientos norte-sur y viceversa del Frente de Convergencia Intertropical. La variación de niveles diarios en la cuenca media, de acuerdo con los datos registrados antes y después de la entrada en operación de la hidroeléctrica de Betania, con alguna frecuencia son superiores a cincuenta centímetros entre dos días consecutivos, tanto en la serie anterior a la operación de la central, como en la serie posterior, lo cual indica que no es evidente que la represa esté ocasionando subidas en los niveles de verano del río Magdalena en la cuenca media.

²⁸ Represa de Betania. Tiene varios fines: la generación de energía eléctrica, controlar el caudal del Río Magdalena en la cuenca alta, también es destinada para el riego de tierras y para la piscicultura. Tiene una superficie de 7400 ha y una profundidad máxima de 76 metros. Su volumen total es de 1.971 millones de m³ con capacidad de generar 540 MW.

El segundo proyecto hidroeléctrico sobre el río Magdalena, es “El Quimbo”²⁹. En este punto el caudal promedio mensual del río es de 235 m³/s y está situado igualmente en el departamento del Huila. La presa se encuentra a 30 km aguas arriba de la cola del embalse de Betania.

Un estudio realizado por el CIRMAG (2016)³⁰, a través de un modelo hidráulico en una dimensión y tomando como base el caudal mínimo registrado en Puerto Salgar en diciembre de 2015, demuestra el impacto en el nivel del Río Magdalena con la operación de sistema Betania/El Quimbo. En Puerto Salgar el impacto en el nivel del Río de con 100 m³/s más, sería un aumento de 42 centímetros. Según el análisis realizado por el CIRMAG el tiempo de viaje de la onda es de 135 horas entre Betania y Barrancabermeja, es decir este lapso de tiempo es lo que dura una partícula de agua en recorrer este tramo, por lo tanto, el aumento de niveles previsto será evidente en Barrancabermeja, 135 horas (5 días y medio) después que se libere el caudal en Betania

Las demás represas existentes en la cuenca del Río Magdalena están localizadas sobre los afluentes río Prado, río Bogotá, río La Miel, río Nare y río Sogamoso, y se construyeron con propósitos principalmente de generación de energía, aunque también operan para abastecimiento de agua, irrigación y control de inundaciones.

3.1.4 El fenómeno de El Niño y La Niña

Uno de los factores a tener en cuenta sobre el clima son los fenómenos del Niño y la Niña, eventos que se presentan cíclicamente y que pueden modificar el comportamiento de diferentes variables como la lluvia, los caudales, los niveles de los ríos, la temperatura y los vientos en todo el país. El fenómeno del Niño se relaciona con el calentamiento del océano Pacífico que genera una disminución en la precipitación de la cuenca y un aumento en las temperaturas, condiciones que se reflejan en la disminución de niveles de

²⁹ Represa El Quimbo. El Proyecto tendrá una capacidad de generación de energía aproximada de 400 MW (2.216 GWh/año). El embalse llegará hasta la cota 720 msnm y cubrirá un área de 8.250 ha con un volumen útil de 2.354 millones de m³. Este proyecto de generación de energía, abastecerá junto con la represa de Betania el 8% de la demanda energética colombiana.

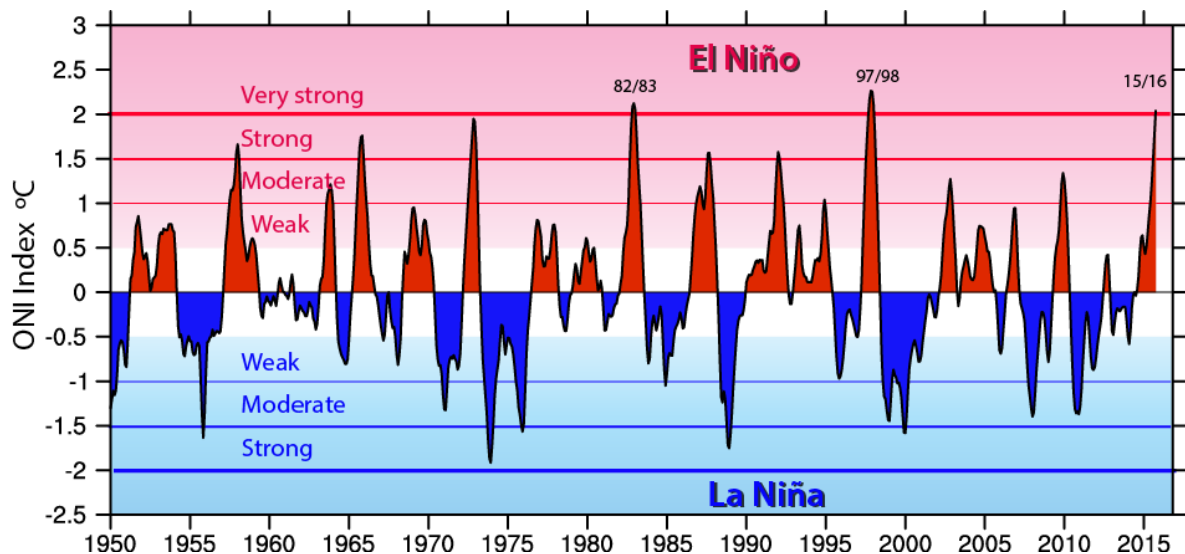
³⁰ CIRMAG: Centro de investigación del río Magdalena Alfonso Palacio Rudas.

agua del río Magdalena y en la afectación de la agricultura y la pesca. Por el contrario, el fenómeno de la Niña provoca un aumento en las precipitaciones y disminución de temperaturas, lo que por consiguiente genera elevación de los caudales y niveles de agua en el río.

Sumado a lo anterior es necesario mencionar el cambio climático, el cual se enmarca por el incremento de la temperatura por la acción antrópica. Esta incluye la quema de combustibles fósiles que lanzan gases de efecto invernadero a la atmósfera, los cuales incrementan las temperaturas alrededor del planeta y elevan los niveles del mar, lo que incrementaría el efecto de los fenómenos del Niño y Niña mencionados arriba.

Debido a que estos fenómenos están relacionados con la temperatura superficial del océano, uno de los indicadores más empleados para su medición es el índice del Niño Oceánico (ONI), ítem planteado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y que mide la temperatura del mar en el sector central del Pacífico tropical frente a las costas de Suramérica. A continuación se presenta una gráfica donde se muestra el ONI entre los años de 1950 a octubre 2015, donde las partes en rojo se consideran eventos Niño y los azules Niña. Estos fenómenos se pueden asociar a los vividos por el país en los mismos años, con temporadas de altas precipitaciones y de bajas.

Figura 15 Índices de variación de temperaturas desde 1950 a octubre de 2015



Nota: El Índice Niño Oceánica (ONI) muestra fríos (azules) fases de temperatura superficial del mar anormales en el Océano Pacífico tropical cálido (rojo) y (aportado por K Trenberth)

Fuente: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/

El Niño es un fenómeno climático cíclico que se presenta en el país a consecuencia de calentamiento de las aguas del Océano Pacífico. El nombre técnico es Oscilación del Sur o ENSO por sus siglas en inglés y se manifiesta en el territorio colombiano en una disminución de la precipitación en la Región Andina del país (cuenca Magdalena – Cauca) (Navas, 2015).

Durante el fenómeno del Niño los vientos alisios se debilitan, o dejan de soplar, la máxima temperatura marina se desplaza hacia la corriente del Perú que es relativamente fría y la mínima temperatura marina se desplaza hacia el Sureste Asiático. Esto provoca el aumento de la presión atmosférica en el sureste asiático y la disminución en América del Sur. Todo este cambio ocurre en un intervalo de seis meses desde junio a noviembre (Navas, 2015).

En la Figura 15 se encuentran los índices de variación de temperaturas, donde se observa que en los años 1982-1983, 1997-1998 y 2015-2016 tuvieron lugar fenómenos reconocidos como eventos Niño Fuerte. Otros años recientes con fenómenos de menor severidad se presentaron en 2002-2003, 2004-2005 y 2009-2010. Por el contrario en los años 2010-2011 y 2011-2012 se presentó el fenómeno inverso o de enfriamiento de la temperatura del océano, conocido como fenómeno Niña, que produjo las olas invernales de los años 2010 y 2011 causantes de inundaciones en muchas cuencas de la región andina del país.

Como la manifestación de la anomalía del calentamiento del Océano Pacífico se produce usualmente a partir del primer periodo invernal en la región andina del país (cuenca del río Magdalena), se realizó un análisis estadístico de la información disponible en la estación limnimétrica de Barrancabermeja mediante el manejo de eventos hidrológicos como es el caso de los caudales o niveles de un río es más coloquial el uso del término Período de Retorno (T), el cual se define como el inverso de la probabilidad ($T=1/P$) de que un evento sea superado por encima en los casos de máximos o por debajo en los casos de mínimos.

En este caso a la probabilidad mencionada se asocia un periodo de retorno de $T= 227$ años. Este resultado indica un comportamiento muy severo de los niveles en el río Magdalena en este periodo, que no se había presentado nunca en los años en que hay registros históricos de los niveles del río Magdalena y que muy seguramente pasarán

muchos años antes de que se presente un evento de características similares (Navas, 2015).

3.1.5 Prevención sobre desastres naturales

De acuerdo con la información recopilada³¹ sobre la ocurrencia e impacto de los fenómenos naturales a través de la historia de nuestro país, se considera que Colombia es un país expuesto a casi la totalidad de dichos fenómenos sin contar con aquellas amenazas de tipo antrópico. Sin embargo, el impacto socioeconómico que han generado estas amenazas en la población, no había sido evaluado de tal manera que a partir de estas experiencias se pudieran establecer lineamientos para así en un futuro, lograr tomar acciones con respecto a prevención y respuesta ante la eventual ocurrencia de estos eventos.

Solo fue hasta el 13 de Noviembre de 1985 con el desastre ocurrido por la avalancha provocada por la activación del Volcán del Ruiz, el cual afectó a los departamentos de Tolima y Caldas, provocando 25.000 víctimas y pérdidas económicas alrededor de los 211.8 millones de dólares, de acuerdo con cifras suministradas por el PNUD³², que se detectó como necesidad prioritaria para el país contar con un sistema que coordinara todas las acciones encaminadas a la prevención y atención de desastres en todo el territorio nacional. En consecuencia se crea el Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres (SNPAD) como red institucional para el cumplimiento de esta función.

A partir de este momento se da inicio a toda la gestión y organización a nivel interinstitucional para la determinación de lineamientos y directrices claros con respecto a la prevención y atención de desastres (Ley 46 de 1988 – Decreto Ley 919 de 1989), los cuales enmarcan las funciones y responsabilidades de cada uno de los actores del Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres. Posteriormente y con el fin de establecer y regular las acciones del Sistema, se adopta el Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (PNPAD) mediante Decreto 93 de 1998.

³¹ Historia del Sistema Nacional para la Atención y Prevención de Desastres. (www.sigpad.gov.co)

³² Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

Al ser el PNPAD un esquema esencial para el desarrollo sostenible a nivel nacional, se determina mediante el Documento CONPES³³ 3146 de 2001:

Estrategia para consolidar la ejecución del Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, un conjunto de acciones prioritarias para mejorar el desarrollo del Plan con respecto a elementos tales como el conocimiento, la incorporación del tema en la planificación, el fortalecimiento institucional del Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres y el mejoramiento de los programas de educación y divulgación entre otros.

En este sentido se determinó como estrategia, el manejo de la gestión del riesgo como componente importante de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y Planes de Desarrollo Sectorial (PDT), configurados como instrumentos de planificación en el corto y mediano plazo y a su vez herramienta para la toma de decisiones sobre el futuro económico y social de los municipios, departamentos y nación.

Con el fin de dar continuidad al manejo de la prevención y atención de desastres a nivel nacional, regional y local, se adoptó mediante la Ley 812 de 2003 Plan Nacional de Desarrollo: “Hacia un Estado Comunitario” criterios claros con respecto a la ejecución del PNPAD en los siguientes temas:

- a) Profundización del conocimiento en riesgos naturales y su divulgación
- b) Inclusión de la prevención y mitigación de riesgos en la planificación de la inversión territorial y sectorial y
- c) Reducción de la vulnerabilidad financiera del Gobierno ante desastres.

³³ CONPES, Consejo Nacional de Política Económica y Social y está catalogado como el máximo organismo de coordinación de la política económica en Colombia. No dicta decretos, sino que da la línea y orientación de la política macro.

3.1.5.1 Funciones de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres – UNGRD³⁴

- i. Dirigir y coordinar el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres,- SNPAD, hacer seguimiento a su funcionamiento y efectuar para su mejora en los niveles nacional y territorial.
- ii. Coordinar, impulsar y fortalecer capacidades para el conocimiento del riesgo, reducción del mismo y manejo de desastres y su articulación con los procesos de desarrollo en los ámbitos nacional, territorial del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres-SNPAD.
- iii. Proponer y articular las políticas, estrategias, planes, programas, proyectos y procedimientos nacionales de gestión del riesgo de desastres, en el marco del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres- SNPAD y actualizar el marco normativo y los instrumentos de gestión del mismo.
- iv. Promover la articulación con otros sistemas administrativos, tales como el Sistema Nacional de Planeación, el Sistema Nacional Ambiental, el Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación y el Sistema Nacional de Bomberos, entre otros en los temas de su competencia.
- v. Formular y coordinar la ejecución de un plan nacional para la gestión del riesgo de desastres, realizar el seguimiento y evaluación del mismo.
- vi. Orientar y apoyar a las entidades nacionales y territoriales en su fortalecimiento institucional para la gestión del Riesgo de desastres y asesorarlos para la inclusión de la política de gestión del riesgo de desastres en los planes territoriales.
- vii. Promover y realizar los análisis, estudios e investigaciones en materia de su competencia.
- viii. Prestar el apoyo técnico, informativo y educativo que requieran los miembros del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres -SNPAD-.
- ix. Gestionar con la Unidad Presidencial de Cooperación Internacional de Colombia, la consecución de recursos para fortalecer la implementación de las políticas de gestión del riesgo de desastres en el país.

³⁴ Tomado de <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Objetivos.aspx>

- x. Administrar y tener en funcionamiento el Sistema Integrado de Información de que trata el artículo 7º del Decreto Ley 919 de 1989 o el de que haga sus veces, que posibilite avanzar en la gestión del riesgo de desastres.
- xi. Las demás funciones asignadas que correspondan a la naturaleza de la dependencia.

3.1.5.2 Fenómenos naturales

Se entiende por desastre el daño o la alteración grave de las condiciones normales de vida en un área geográfica determinada, causada por fenómenos naturales y por efectos catastróficos de la acción del hombre en forma accidental, que requiera por ello de la especial atención de los organismos del Estado y de otras entidades de carácter humanitario o de servicio social.

Los fenómenos de la naturaleza que crean situaciones de riesgo para la población colombiana se pueden agrupar en fenómenos geológicos, tales como los terremotos, erupciones volcánicas y deslizamientos; fenómenos hidrometeorológicos, como las inundaciones, sequías, heladas, maremotos o tsunamis, ciclones tropicales y huracanes, y los incendios, fenómenos de carácter tecnológico tales como los riesgos industriales y sanitarios y fenómenos por concentración masiva de personas.

Algunos de los fenómenos naturales identificados son: concentración masiva de personas, deslizamientos de tierra, heladas, huracanes y vientos fuertes, inundaciones, terremotos, erupciones volcánicas, incendios, tsunamis, riesgos sanitarios, sequias y riesgos industriales.

3.1.5.3 Inundaciones

Para el caso de inundaciones, es más probable que ocurran si seguimos deteriorando los bosques y cuencas, aunque llueva lo mismo, las inundaciones serán cada vez más graves. Las inundaciones en el país coinciden con las temporadas invernales, las cuales se dan por regiones en los siguientes períodos, así:

Región Andina: Primer Semestre: Desde mediados de Marzo hasta mediados de Junio.
Segundo Semestre: Desde mediados de Septiembre hasta los últimos días de Noviembre.

Región Caribe: Abril, mayo y Junio; y en el segundo semestre desde mediados de Septiembre hasta los primeros días de Diciembre.

Región del Pacífico: Desde Enero hasta Octubre. Llanos orientales y Amazonia: Desde inicio de Marzo hasta los últimos días de Julio y posteriormente en Octubre.

La responsabilidad directa para declarar los diferentes grados de alerta de inundaciones recae sobre los Comités Locales y Regionales, dependiendo del ámbito de la situación, con base en la información técnica suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM³⁵, y el comportamiento local, que está supeditado a las condiciones y el nivel de protección y mitigación focal. Esto implica, la necesidad de contar con preparativos para la atención de emergencias por parte de los Comités, entre otros, mecanismos de alarma, información, evacuación, alojamiento temporal, elementos básicos, así como recursos económicos, según lo establece el Decreto Ley 919 de 1989.

El IDEAM, comunica diariamente mediante su página web al Sistema Nacional de Gestión del Riesgo (SNGR) y al Sistema Nacional Ambiental (SINA) un documento técnico³⁶ informando:

- Pronóstico de condiciones meteorológicas en volcanes
- Pronósticos meteorológicos generales
- Precipitaciones
- Temperaturas máximas
- Mapa de precipitación diaria
- Mapa de precipitación acumulada en los últimos 3 días
- Estado y capacidad de los embalses
- Alertas en las regiones Caribe, Andina, Pacífica, Orinoquia, Amazónica y los Océanos.
- Alertas en todas las cuencas del país

Adicionalmente el IDEAM, publica un informe diario de hidrología de la cuenca alta, media y baja del río Magdalena.

³⁵ El IDEAM tiene como función, obtener, almacenar, analizar, estudiar, procesar y divulgar la información básica sobre hidrología, hidrogeología, meteorología, geografía básica sobre aspectos biofísicos, geomorfología, suelos y cobertura vegetal para el manejo y aprovechamiento de los recursos biofísicos de la Nación, en especial las que en estos aspectos.

³⁶ El informe diario de Pronósticos y Alertas del IDEAM puede ser descargado en la siguiente página web: <http://www.pronosticosyalertas.gov.co/jsp/index.jsf>

Las alertas son medidas de pronóstico y preparación, relacionadas con dos aspectos: la información previa que existe sobre la evolución de un fenómeno, y las acciones y disposiciones que deben ser asumidas por los Comités para la Prevención y Atención de Desastres para enfrentar la situación que se prevé.

Las alertas hidrometeorológicas tienen la siguiente connotación:

Alerta Amarilla: Se declara cuando la persistencia e intensidad de las lluvias puede ocasionar desbordamiento de los ríos en los próximos días o semanas. Las acciones que implica la declaratoria de la alerta amarilla son las siguientes:

- Convocar al Comité para la Prevención y Atención de desastres.
- Ubicar los puntos críticos y definir los mecanismos de vigilancia, alerta máxima y evacuación, con base en los censos y mapas de riesgo.
- Realizar un inventario de recursos humanos, técnicos, económicos, en equipos, en instalaciones e insumos de emergencia.

Alerta Naranja: Se declara cuando la tendencia ascendente de los niveles de los ríos y la persistencia de las lluvias indican la posibilidad de que se presenten desbordamientos en las próximas horas. Las acciones que implica la declaratoria de la alerta naranja son las siguientes:

- Preparar los operativos para una posible evacuación.
- Informar a la comunidad sobre los sistemas de aviso en caso de emergencia.
- Establecer alistamiento de equipos y personal.
- Coordinar alojamiento temporal.
- Revisar planes de emergencia, incluyendo las actividades en salud, transporte, remoción de escombros, adecuación vial.

Alerta Roja: Se declara cuando el nivel de los ríos alcanza alturas críticas que hacen inminente el desbordamiento, o cuando ya se ha iniciado la inundación. Las acciones que implica la declaratoria de la alerta roja son las siguientes:

- Activar las alarmas preestablecidas.
- Evacuar y asegurar a la población afectada.
- Movilizar los operativos según los planes de emergencia.
- Atender a la población afectada en sus necesidades básicas.

3.2 Caracterización sector de estudio

El sector de estudio se localiza en la cuenca media del río Magdalena, a lo largo de 20 kilómetros entre la población de San Luis y Barrancabermeja. Sobre la orilla izquierda el departamento de Antioquia están los sitios representativos de San Luis, el muelle de Carmelitas, el dique de casabe³⁷ y la población de Yondó (Antes campamento Casabe). Sobre la margen derecha, en el departamento de Santander, se localiza el sector conocido como Puerto Asís, la isla Cormagdalena, la desembocadura del río Opón y la ciudad de Barrancabermeja. En la Figura 16 se presenta la localización en planta del sector de estudio.

Figura 16 Localización general San Luis – Barrancabermeja



Fuente: Fotografías aéreas Cormagdalena 2013

³⁷En 1943 finaliza la construcción del Dique Casabe por parte de la compañía Anglo Saxon Petroleum

El tramo de río es considerablemente trezado con una pendiente media de 27 cm/km, discurre sobre un valle mayoritariamente plano, inundable y con tres controles geológicos. (UNAL. 2012). Dos controles naturales en la margen izquierda; el primero sobre la población de San Luis sector conocido como Peñas Blancas y el siguiente en la Población de Casabe. Y un control artificial en las dos orillas generado por la construcción durante 27 meses del puente de Guillermo Gaviria finalizado en noviembre del año 2006 (Puente de Yondó).

La temperatura media es de 30° Centígrados y la precipitación media anual es de 2750 milímetros, la elevación sobre el nivel del mar hace que el sector de estudio pertenezca en su totalidad al piso térmico cálido.

De acuerdo con la metodología propuesta en el Capítulo 2, a continuación, se describe la información utilizada para el estudio, presentando las particularidades de la información de registros hidrológicos de más 35 años, un levantamiento topo-batimétrico del año 2012 y una ortofoto con resolución de 15 cm por pixel de fotografías aéreas tomadas en octubre del año 2013.

3.2.1 Registros hidrológicos

Con respecto a las condiciones hidrológicas del río Magdalena en el sector entre San Luis y Barrancabermeja, se dispone actualmente de información de niveles y caudales en la estación hidrométrica Peñas Blancas desde el año 1977 hasta el año 2012.

Debido a que periodo de registro es de más de 35 años, los nuevos datos no modifican en forma sensible el comportamiento de los parámetros históricos de las series (especialmente promedios y desviaciones típicas). No obstante, la presencia de eventos como los registrados en los años 2010 y 2011 puede señalar cambios en el comportamiento de la hidrología del río atribuibles a fenómenos que se están presentando a nivel mundial ocasionados por los cambios climáticos.

Sin embargo, el alcance de este trabajo y la magnitud de las variaciones observadas no justifican aún pronunciarse sobre si deberían introducirse en el estudio predicciones sobre tendencias futuras que modifiquen la estacionalidad de los parámetros obtenidos de la serie histórica empleada.

Se recopilarán registros climatológicos e hidráulicos de las siguientes estaciones que son operadas por el IDEAM:

Tabla 11 Estaciones meteorológicas e hidrológicas utilizadas en el estudio

Estación	Código IDEAM	Clase	Categoría	Coordenadas	
				Latitud	Longitud
Peñas Blancas	2316701	HID	LM	6.954722	-73.950833
Aeropuerto Yarigüies	23155030	MET	SP	7.026389	-73.808611

HID: Hidrológica, MET: Meteorológica SP: Sinóptica principal, CP: Climatológica principal, LM: Limnigráfica
Fuente: Elaboración propia con datos del IDEAM

La información recopilada de niveles y caudales registrados sobre el río Magdalena y los afluentes, se procesará, se ajustará y se completará de acuerdo con las metodologías apropiadas. Se realizará un análisis para determinar la variación multitemporal de los afluentes con base en la elaboración de las curvas de duración de niveles y caudales, pendientes hidráulicas, curvas de calibración y análisis de frecuencia. Los resultados de caudales y niveles obtenidos para los diferentes periodos de retorno serán los datos de entrada para la modelación hidráulica del Río en régimen permanente del sector entre San Luis y Barrancabermeja a lo largo de 20 km

3.2.2 Topografía y Batimetría (UNAL 2012)

El Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de la Universidad Nacional (LEH-UNC), en el desarrollo del convenio Interadministrativo 1-033 de 2009 con CORMAGDALENA, realiza las mediciones topográficas y batimétricas del río Magdalena en el tramo San Luis - Barrancabermeja en abril del año 2012, en el marco de la “Elaboración de especificaciones para la construcción de obras de control de inundaciones y otras obras en la jurisdicción, comprende la realización de visitas técnicas, selección de alternativa a construir, diseños, replanteamiento de obras, elaboración de estudios previos y especificaciones”.

El levantamiento batimétrico del río Magdalena en el sector de estudio, se realizó con ecosonda digital y sistema GPS en tiempo real, con registro de secciones transversales cada 200 m, el trabajo se centró al canal más profundo (thalweg) determinado durante los días del levantamiento.

El levantamiento de la cartografía de orillas, islas y playas se realizó por medio de secciones transversales completas (batimetría – topografía), cada kilómetro (1 km) durante los 20 kilómetros del sector de estudio. El levantamiento topográfico se realizó mediante una topografía convencional, con estación total, tomando como referencia de elevación el nivel de agua en el Río para cada sección levantada. La metodología utilizada consiste en la materialización de dos puntos en cada sección a levantar (un punto en cada orilla), para luego localizar la estación en uno de ellos de tal forma que con visual al otro se conozca y controle el azimut del levantamiento. A partir de esto, se toman los demás puntos de la sección.

El proceso y edición de la información hidrotopográfica fue realizado por el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de la Universidad Nacional con el software hidrográfico Hypack Max y los programas AutoCAD, AutoCAD Civil 3D y Excel, con la siguiente metodología:

- En el módulo de edición del software hidrográfico Hypack Max, se revisaron las secciones batimétricas levantadas para eliminar la información generada por ruido, interferencia y turbulencia que se presenta durante el levantamiento.
- En Excel, se calcularon los respectivos niveles de agua de referencia para cada sección batimétrica levantada teniendo en cuenta el día y hora de levantamiento, y el concepto de pendiente hidráulica en el Río, interpolando linealmente los valores reportados del nivel de agua del Río en las estaciones hidrométricas establecidas.
- En el módulo de edición del software hidrográfico Hypack Max, se realizó la corrección por cota en msnm, para cada sección batimétrica levantada incorporando el nivel de agua de referencia calculado. Obteniendo así los archivos XYZ del levantamiento batimétrico, que se exportan en archivo de texto para ser incorporados en otro software de procesamiento.

El nivel de agua promedio medido durante el levantamiento corresponde a 79.62 msnm en la estación de San Luis y de 74.70 en Barrancabermeja. Esto indica que, para la longitud total de 20 kilómetros en el sector de estudio, La pendiente del nivel de agua es de 24.60 cm/km.

A continuación, se listan los productos obtenidos en el desarrollo de la campaña hidrotopográfica y que fueron suministrados para la realización del presente estudio:

- Coordenadas de los puntos de referencia materializados y temporales para la nivelación de miras.
- Registro de niveles diarios de agua.
- Nubes de puntos de los levantamientos batimétricos.
- Nube de puntos de los levantamientos topográficos.
- Plano en planta con los puntos del levantamiento en formato dwg.
- Secciones transversales en las abscisas en formato dwg.
- Archivos de texto de las secciones transversales para ingresar a un modelo hidráulico

A partir de estos archivos de texto, y utilizando el programa AutoCAD Civil 3D 2014 versión educativa, se generó el MDT (Modelo Digital de Terreno) cuya información se convierte en la base las condiciones de entrada para la modelación hidráulica.

3.2.3 Fotografía satelital

La empresa Rudolf, pionera y experta en fotografía aérea en Colombia, realizó para Cormagdalena en octubre del año 2013, un vuelo fotogramétrico entre Puerto Salgar y Barrancabermeja capturando 3.769 fotos aéreas con resolución de 15 centímetros por píxel, en una longitud de 256 kilómetros cubriendo un área de 78.740 hectáreas.

Cormagdalena, suministró la información cruda de 87 líneas de vuelo, que corresponden a un el total de 78.740 imágenes aéreas en formato .jpg con la respectiva coordenada del centro de disparo de cada foto, las características de las fotos se presentan a continuación:

- Cámara: NIKON D800
- Dimensiones: 7360 x 4912 píxeles
- Resolución: 300 ppp (puntos por pulgada)
- Profundidad de bits: 24
- Color: sRGB

A partir de esta información, con la ayuda del ingeniero Jairo Lozano de la empresa JESyCa S.A.S. y mediante el software Agisoft PhotoScan se realizó la selección de las fotografías de interés para el estudio en el sector entre San Luis y Barrancabermeja (20 Kilómetros) y con las 9 últimas líneas de vuelo (424 fotografías), se realizó un procesamiento fotogramétrico obteniendo como resultado una ortofoto con resolución de 15 centímetros por píxel en un área de 9.600 hectáreas.

Capítulo 4 Aspectos metodológicos

Basados en la información secundaria obtenida, la cual es de excelente calidad e indispensable para el impulso de este documento, se desarrollan los aspectos de Geomorfología y Dinámica Fluvial, Hidrología e Hidráulica para plantear la propuesta metodológica para la definición del límite de la ronda hidráulica del río Magdalena en el sector entre San Luis y Barrancabermeja. El resultado de cada uno de estos aspectos es fundamental para determinar la información necesaria en la metodología propuesta.

4.1 Geomorfología

Del análisis de la geomorfología del sector de estudio, se identifican las formaciones geomorfológicas resistentes a la erosión y las orillas que se consideran como estables. El análisis permite definir las áreas de mayor divagación natural histórica que ha tenido el río.

De esta forma se obtendrá como resultado una zona definida por un polígono, que establece en su área interna las franjas de orillas inestables y que son susceptibles a sufrir grandes cambios de acuerdo con la dinámica fluvial natural del río. Este polígono se ha definido como aquel que establece el límite del componente geomorfológico y de dinámica fluvial.

4.1.1 Unidades geomorfológicas

La descripción y el análisis geomorfológico detallado partió de la siguiente información: (i) los planos 33 y 34 del informe de la Universidad Nacional UN-LEH (2000), que contiene información cartográfica de las unidades geomorfológicas para el tramo Puerto Salgar – La Gloria a escala 1:50.000³⁸, y (ii) el informe de los “Estudios y diseños de obras de encauzamiento del río Magdalena en el sector comprendido entre Puerto Berrío y Barrancabermeja” elaborado por la empresa Boada Sáenz Ingenieros para Cormagdalena y Fedenavi en el año 2007.

³⁸ UN-LEH - Universidad Nacional Laboratorio de Ensayos Hidráulicos; “Geología y geomorfología del río Magdalena, Sector Puerto. Salgar-La Gloria”, CORMAGDALENA, Diciembre 2000.

En general el río Magdalena es de tipo sinuoso a meándrico y transcurre fraccionando la planicie aluvial, unidad morfológica sobre la que se desarrolla su valle y los de sus ríos tributarios. Sin embargo, en la porción del Magdalena Medio, el río presenta con frecuencia multiplicidad de islas y brazos que lo asemejan a un cauce trenzado de piedemonte. UN-LEU (2000).

De acuerdo con lo anterior, las principales unidades geomorfológicas en el sector de estudio se describen a continuación:

- Lomeríos (Sc)
- Depósitos aluviales (Ft)
- Cubetas de Inundación (Fa3)
- Albardón (Fa2)
- Vega de divagación (Fa1)
- **Lomeríos (Sc):** La unidad geomorfológica de lomeríos, corresponde a pequeñas colinas, redondeadas y que no sobrepasan la cota de 200 msnm, ubicados a lado y lado del cauce. La unidad se deriva de una estructura sedimentaria subhorizontal del Terciario Superior, constituido de sedimentos arcillosos, arenosos y conglomeráticos con aspecto general de peniplanicie. Presenta suelos rojizos por alteración y con perfiles poco profundos, indiferenciables, poco permeables y con un bajo contenido de materia orgánica. Generalmente en el fondo del valle, esta unidad se encuentra cubierta por sedimentos aluviales que en algunos casos cubrieron la paleotopografía sobre el Terciario Superior. Esta unidad se manifiesta como cuerpos resistentes que en algunos sectores actúan como un control litológico y como límite de divagación del río en el lecho actual o en el lecho mayor o de inundación, que puede ser ocupado en las épocas de aguas altas invadiendo la llanura aluvial en la vega de divagación o en las depresiones inundables o cubetas de inundación. UN-LEU (2000).
- **Depósitos aluviales (F):** Dentro de la unidad geomorfológica de la llanura aluvial del río Magdalena, se agrupan geoformas que se han desarrollado en el valle como planicies aluviales, terrazas, alta, media y bajas, junto con los depósitos de la vega de divagación (Fa1) con Islas, Barras longitudinales - laterales y zonas de playas. La zona aluvial está constituida por materiales en tránsito y parcialmente estabilizados con gravas, arenas y limos sin consolidar con alta permeabilidad y que corresponden a las formas actuales de acumulación aluvial, en la mayoría de los casos como vega de divagación frecuentemente atacadas por desbordes del río. Los suelos de las

planicies aluviales son producto de depósitos recientes, limosos y micáceos. El desarrollo de los perfiles está generalmente limitado por cambios en la estratificación, cambios en el tamaño de las partículas y en algunos casos por la presencia del nivel freático. UN-LEU (2000).

- **Vega de divagación (Fa1):** La vega de divagación está conformada por las zonas del lecho mayor del río, donde frecuentemente desborda, es decir es la zona de migración lateral del flujo a través del tiempo, y está conformada por barras u orillares, islas estables o parcialmente estabilizadas. Los depósitos aluviales recientes en el área, están relacionados a las geoformas móviles de la zona aluvial formando, barras longitudinales y laterales, zonas de playa, y con gran desarrollo de islas. En esta zona aluvial los sedimentos pueden ser acumulados de dos maneras: por la migración lateral de los canales dentro del cauce, lo cual genera la formación de islas, barras y zonas de playa y por la depositación vertical de los flujos de agua que inundan la planicie aluvial y el lecho mayor, dando como resultado una acumulación de sedimentos en capas. UN-LEU (2000).
- **Albardón (Fa2):** Conocidos como diques naturales, son acumulaciones recientes en los que los materiales predominantes son limos y arenas de grano fino y casi sin compactar dispuestos a lo largo y en los bordes del cauce. Corresponden a bandas aproximadamente paralelas que sirven de límite, entre el lecho del río y las unidades geomorfológicas vecinas, como son las unidades permeables y semipermeables de la planicie aluvial reconocibles por la densidad de la vegetación. Por encima de estos diques al desbordarse las aguas altas, se facilita la acumulación de materiales finos que aumentan su espesor. UN-LEU (2000).
- **Cubetas de Inundación (Fa3):** Esta unidad geomorfológica conocida también como depresiones inundables, corresponde a zonas pantanosas anegadizas o con lagunas permanentes, algunas originadas por la divagación del río en meandros abandonados, canales, o formadas por chorros o descargas (avulsiones) fuera del lecho del río principal, debido a roturas en el dique que lo limita; o son zonas bajas o depresiones donde la escasa pendiente y el carácter impermeable de los suelos hace que ocurra una alimentación muy lenta, subsuperficial hacia los cursos de agua. UN-LEU (2000).

4.1.2 Descripción geomorfológica

El sector del río comprendido entre San Luis y la ciudad de Barrancabermeja comprende una longitud aproximada de 20 km. Para este sector, la mayor parte del cauce menor está controlado por Albardones o diques naturales y en una pequeña extensión por Lomeríos. Los albardones o diques naturales, han sido realizados artificialmente en grandes áreas, especialmente sobre la margen izquierda del Río Magdalena (alrededores del casco urbano del municipio de Yondó), han sido modificadas con drenajes para ser utilizadas como tierras de cultivos.

La dirección del río Magdalena es suroeste – noreste, hace un giro para tomar la dirección sur norte, controlado por la unidad denominada Lomeríos sobre la margen derecha que es donde se localiza la ciudad de Barrancabermeja. La sinuosidad está marcada principalmente por la presencia de islas barras y orillares, con mayor influencia sobre la margen derecha.

Existen estrechamientos del río, localizados en el sector conocido como Puerto Asís y al final del sector sobre la ciudad de Barrancabermeja donde está localizado el puente vehicular que une a Barrancabermeja con Yondó.

En la Figura 17 se presenta un mapa en planta del río Magdalena con cada una de las unidades geomorfológicas identificadas en el sector de estudio, exaltando en la figura las unidades geomorfológicas con resistencia baja a la erosión con color gris.

- **Lomeríos (Sc):** Se exhibe como una expresión importante en el control de la erosión lateral del río, especialmente en la orilla izquierda al inicio y final del sector, en los alrededores de San Luis – Peñas Blancas y en la ciudad de Barrancabermeja, respectivamente. De igual manera las lomas pertenecientes a dicha unidad vuelven a aparecer con elevaciones consolidadas por encima del nivel del río.
- **Depósitos Aluviales (Ft):** Han sido consideradas como terrazas algunas unidades que en el pasado fueron zonas de pantano y ciénagas, pero que en la actualidad han sido modificadas mediante drenajes y manejo de tierras. En este caso especial, se localizan por detrás de albardones que también han ido realizados artificialmente y en algunos casos protegidos de la erosión natural del río por diques artificiales. Se han considerado como terrazas aluviales extensos terrenos de cultivos localizados en los

alrededores del casco urbano del municipio de Yondó (Antioquia), sobre la margen izquierda del río.

- **Albardón Natural (Fa2):** Los albardones, también han sido modificados con el propósito de controlar las inundaciones del río. Dichas modificaciones son principalmente realce de su estructura, compactación y adaptación como vías carretables; adicionalmente se les han realizado algunas protecciones para evita la socavación lateral.
- **Cubetas de inundación (Fa3):** En este tramo, las áreas de inundación más importantes se localizan sobre la margen derecha, al sur de la ciudad de Barrancabermeja (Sistema de ciénagas de Opón, La Cira, Juan Esteban,), y en pequeñas áreas localizadas aguas abajo del caserío San Luis.
- **Vega de divagación (Fa1):** Hacia la desembocadura del río Opón, se observa un sistema intrincado de brazos y canales que dan origen a múltiples barras, islas y orillares

4.1.3 Análisis geomorfológico

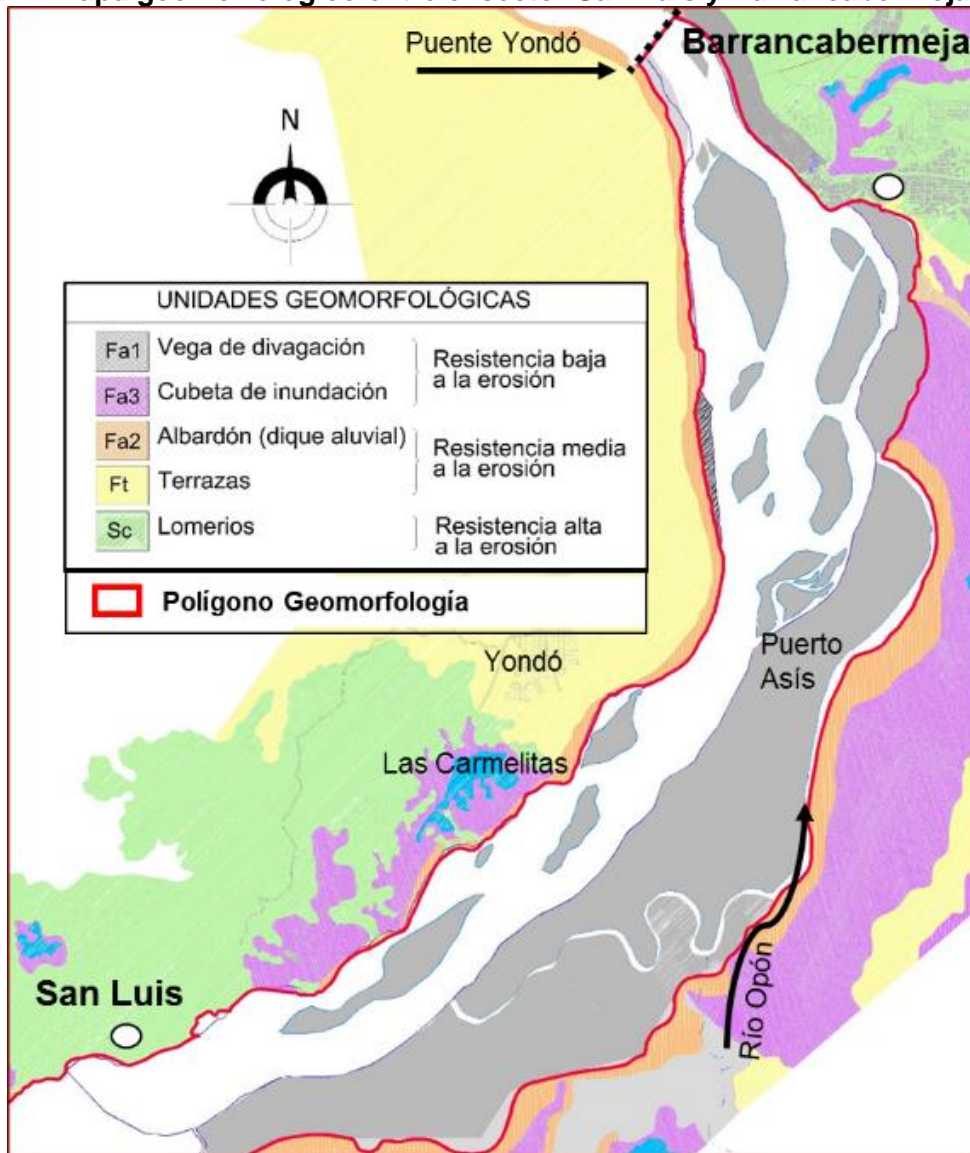
El paisaje ha sido considerado de llanura aluvial intramontaña de desborde, con perfil irregular, el cual presenta materiales litológicamente blandos, que se erosionan fácilmente acompañados de afloramientos rocosos con más alta resistencia relativa a la erosión, que afloran aleatoriamente en el lecho y las orillas de los cauces. Cormagdalena (2007).

La abundante carga de sedimentos aportada tanto por el cauce principal como por sus tributarios y la influencia de un bajo gradiente hidráulico, posibilita la formación de numerosos islotes, barras y playones. Cormagdalena (2007).

La unidad geomorfológica de Vega de Divagación (Fa1), en el sector de estudio, no tiene presencia significativa sobre la orilla izquierda, en caso contrario, sobre la orilla derecha se evidencia en su totalidad la formación con resistencia baja a la erosión, la cual permite establecer que existe gran dinámica en la formación de canales secundario y la creación de islas. La geomorfología de la orilla derecha es influenciada por la desembocadura del río Opón.

Como resultado del análisis geomorfológico del río Magdalena, a lo largo de los 20 kilómetros entre San Luis y Barrancabermeja, se estableció un polígono que define el área con presencia de la formación con menor resistencia a la erosión, es decir con la formación de Vega de Divagación. Este polígono establece la zona del componente geomorfológico y se presenta en la Figura 17 en color rojo, como un límite donde eventualmente y naturalmente el río puede variar su anchura de acuerdo con el material compuesto por la orilla.

Figura 17 Mapa geomorfológico entre el sector San Luis y Barrancabermeja (20 Km)



Fuente: Adaptado de UN-LEH (2000)

4.2 Dinámica fluvial

El objeto del análisis de la dinámica fluvial es determinar los sitios donde el río ha mostrado orillas estables a través del tiempo, a pesar de que no estén constituidos por materiales resistentes a la erosión. La identificación de estas áreas estables se realiza mediante un análisis multitemporal de las orillas registradas en levantamiento topográfico, digitalización de mapas, fotografías satelitales y ortofotos.

4.2.1 Información disponible

La información suministrada por Cormagdalena comprende 43 años de información morfológica de la vega de divagación del río, registrando información de los años 1969, 1976, 2002, 2004, 2005, 2008, 2009, 2011, 2012 y 2013. Según la densidad de información, se ha clasificado de acuerdo con los registros de orillas significativas en su variación y se ha seleccionado para este estudio las orillas correspondientes a los años 1969, 2004 y 2013.

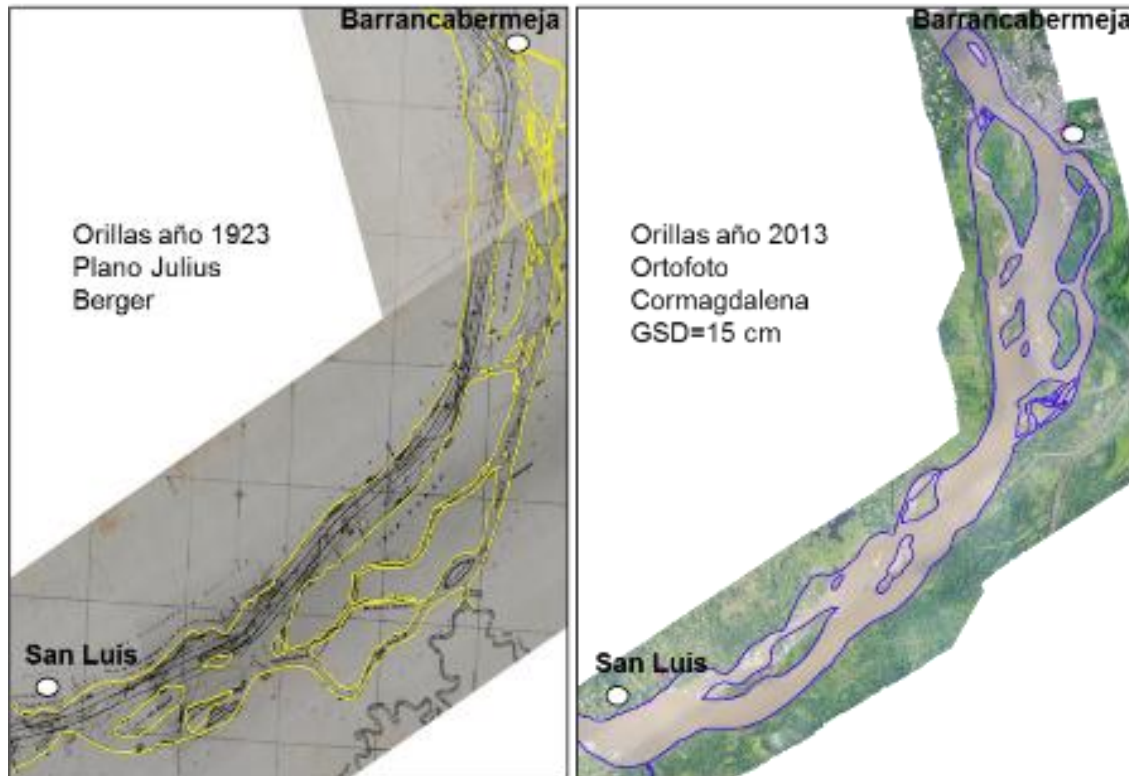
Adicionalmente, se realizó una investigación en el IGAC referente a mapas o información de orillas del río Magdalena anteriores al año 1969, contando con éxito se encontró un mapa con información de campo de las orillas del río Magdalena del año 1923 elaborado por la empresa de Alemania Julius Berger Konsortium³⁹. Este mapa fue escaneado y georeferenciado para la respectiva digitalización de la información disponible. (Ver Figura 18).

La información de las orillas del año 1969 y 2004, fueron obtenidas de informes elaborados por la Universidad Nacional para Cormagdalena, en ellos se describe que la información del año 1969 fue digitalizada de una fotografía satelital publicada por medio de Google Earth, y la información de las orillas del año 2004 fueron levantadas para desarrollar el informe de Navegabilidad del sector entre Puerto Berrío y Barrancabermeja.

³⁹ Los estudios del río Magdalena hechos por Julius Berger Konsortium y por una comisión del Gobierno colombiano, comenzaron con los trabajos de campo en enero de 1922 y duraron hasta mayo de 1924. Se realizaron levantamientos y sondeos en el río principal en una longitud de 1321 km, en brazos principales (238 km), en afluentes (168 km), en afluentes y brazos apartados menos importantes (215 km). El informe y los mapas incluyen datos sobre sedimentos, acarreos, afloros, clima, planos con información de vegetación, geología (resistencia de orillas a erosión), terrenos inundables y clima.

La información de la orilla del año 2013, se obtuvo de una ortofoto suministrada por Cormagdalena, descrita en la página 93 de este documento. El autor de la presente tesis, realizó la digitalización de las orillas de 1923 y de 2013, cuyo resultado se presenta en la Figura 18.

Figura 18 Digitalización de orillas del río Magdalena mediante mapas y ortofotos.



Fuente: Elaboración propia con información de mapa (1923) del IGAC y Ortofoto (2013) de Cormagdalena.

4.2.2 Análisis de orillas y Dinámica fluvial

El tramo del río Magdalena entre San Luis y Barrancabermeja, se caracteriza por presentar diferentes características geomorfológicas, asociadas a los principales tipos de materiales que conforman las orillas dependiendo de las unidades geomorfológicas descritas. Estos materiales permiten categorizar las orillas de los ríos de acuerdo con su resistencia a la erosión en cuatro clases de estabilidad como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 12 Clases de las orillas en el río Magdalena sobre cuenca media.

CLASE	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA	MATERIALES	CARACTERÍSTICAS
Estables	Lomeríos (Sc)	Rocas sedimentarias	Permanente
Poco Estable	Terrazas Depósitos aluviales (F)	Sedimentos Aluviales	Menos Permanente
Inestable	Albardón (Fa2)	Sedimentos recientes	Orilla Móvil
Muy Inestable	Vegas de divagación (Fa1) Cubetas de inundación (Fa3)	Aluvión Reciente	Orillas muy Móviles

Fuente: UN-LEH - (2000). Universidad Nacional Laboratorio de Ensayos Hidráulicos. "Geología y geomorfología del río Magdalena, Sector Puerto Salgar-La Gloria"

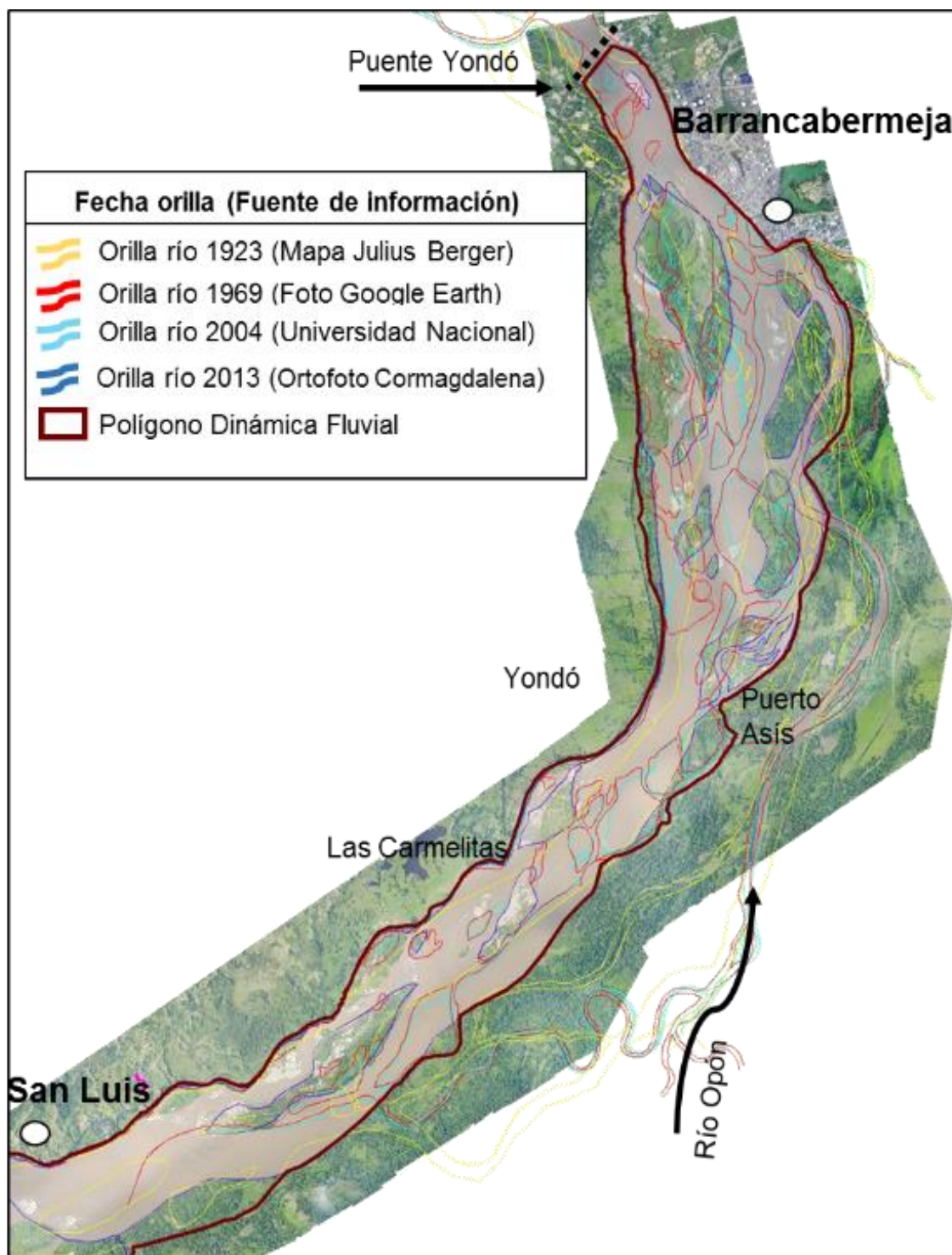
La evolución de las orillas, se muestra en la Figura 19 elaborada mediante el software de Autodesk AutoCAD 2014 versión educativa, recopilando los registros de las orillas del año 1923, 1969, 2004 y 2013. Se presenta en planta sobre la ortofoto del año 2013, mediante diferentes colores para cada año de registro, la dinámica fluvial del río Magdalena en los últimos 90 años en el sector entre San Luis y Barrancabermeja.

El análisis multitemporal, teniendo en cuenta las formaciones geomorfológicas indicadas en la Figura 17, muestra una gran estabilidad de la orilla izquierda desde el sector de San Luis hasta el muelle de Las Carmelitas. La estabilidad de la orilla izquierda hasta el Puente Yondó, se ve altamente reforzada por la existencia del Dique Yondó construido en el año de 1943 por la empresa Anglo-Saxon Petroleum Company para controlar las inundaciones del campo petrolero.

La orilla derecha, no está completamente constituida por materiales resistentes a la erosión. Existe una dinámica grande en la orilla opuesta de San Luis. Ésta se ha desplazado completamente y ha permitido que hasta el sitio conocido como Puerto Asís se desarrollen islas y aluviones recientes. Aguas abajo, en la parte más ancha del río, en el sector entre Puerto Asís y Barrancabermeja, la desembocadura del río Opón genera una gran dinámica de la orilla. En general la orilla derecha del sector entre San Luis y Barrancabermeja es considerada muy inestable.

Como resultado del análisis de la evolución de las orillas, a lo largo de los 20 kilómetros entre San Luis y Barrancabermeja, se estableció un polígono que define el área de mayor dinámica que ha tenido el río hasta la fecha. Este polígono establece la zona del componente de dinámica fluvial y se presenta en la Figura 19 de color marrón, como un límite de máxima evolución en los últimos 90 años de la dinámica fluvial del río.

Figura 19 Mapa de dinámica fluvial entre el sector de San Luis a Barrancabermeja



Fuente: Elaboración propia con información del IGAC (1923), UN-LEH (2004) y Cormagdalena (2013)

4.3 Hidrología e Hidráulica

Con la información en la estación climatológica del Aeropuerto Yariguíes de Barrancabermeja se presenta inicialmente una descripción general del clima para tener un panorama del sector de estudio. Seguidamente, con las estaciones hidrológicas de Peñas Blancas (San Luis) y Barrancabermeja, se procesa la información que determina el cálculo del caudal formador de cauce.

El resultado del procedimiento hidrológico, es un insumo para realizar la modelación hidráulica en una dimensión utilizando el programa HEC –RAS, con el objetivo de establecer el límite del polígono que comprende el aspecto de hidrología e hidráulica.

4.3.1 Hidrología

La información hidrológica en Colombia es administrada por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) que tiene como función, obtener, almacenar, analizar, estudiar, procesar y divulgar la información básica sobre hidrología, hidrogeología, meteorología, geografía básica sobre aspectos biofísicos, geomorfología, suelos y cobertura vegetal para el manejo y aprovechamiento de los recursos biofísicos de la Nación⁴⁰.

Actualmente, por medio de la página web de la entidad, se puede obtener gratuitamente⁴¹ la información registrada en cada una de las estaciones que administra y opera el IDEAM.

Con la información recibida del IDEAM en formato texto (txt), se procedió a organizar los archivos y clasificarlos a partir de las características de los registros. De esta forma se establecieron las gráficas para realizar una descripción general del clima, se conformaron las curvas de duración, y se caracterizaron los niveles y caudales predominantes con diferentes periodos de excedencia, y los histogramas de niveles medios mensuales.

⁴⁰ En especial las que en estos aspectos, con anterioridad a la Ley 99 de 1993 venían desempeñando el Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras - HIMAT-; el Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química - INGEOMINAS-; y la Subdirección de Geografía del Instituto Geográfico Agustín Codazzi –IGAC.

⁴¹ De acuerdo con la Ley 1712 del 6 de marzo de 2014, el IDEAM le hará entrega de la información de manera gratuita.

Tabla 13 Estaciones meteorológicas e hidrológicas utilizadas en el estudio

Estación	Código IDEAM	Clase	Categoría	Coordenadas	
				Latitud	Longitud
Aeropuerto Yarigüies	23155030	MET	SP	7.026389	-73.808611
Peñas Blancas	2316701	HID	LM	6.954722	-73.950833

HID: Hidrológica, MET: Meteorológica SP: Sinóptica principal, LM: Limnigráfica Fuente: Elaboración propia con datos del IDEAM

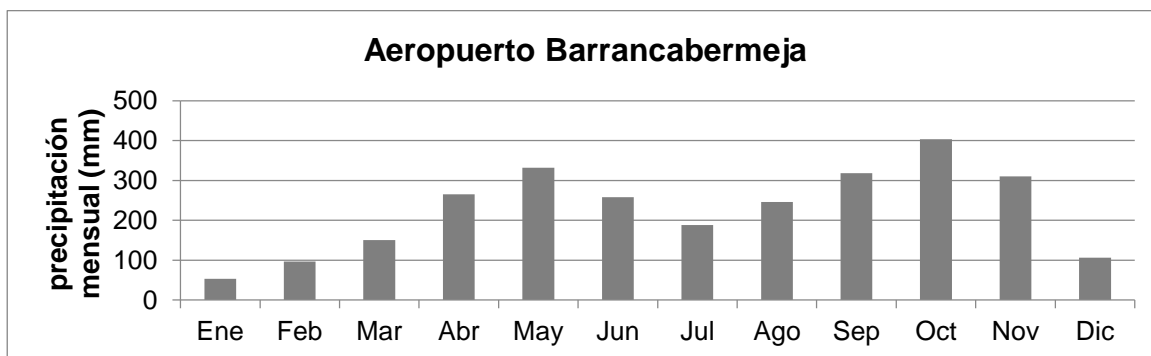
Figura 20 Localización de estaciones hidrológicas y meteorológicas

Fuente: Catalogo de estaciones IDEAM sobre imagen de Google Earth

4.3.1.1 Descripción climatológica

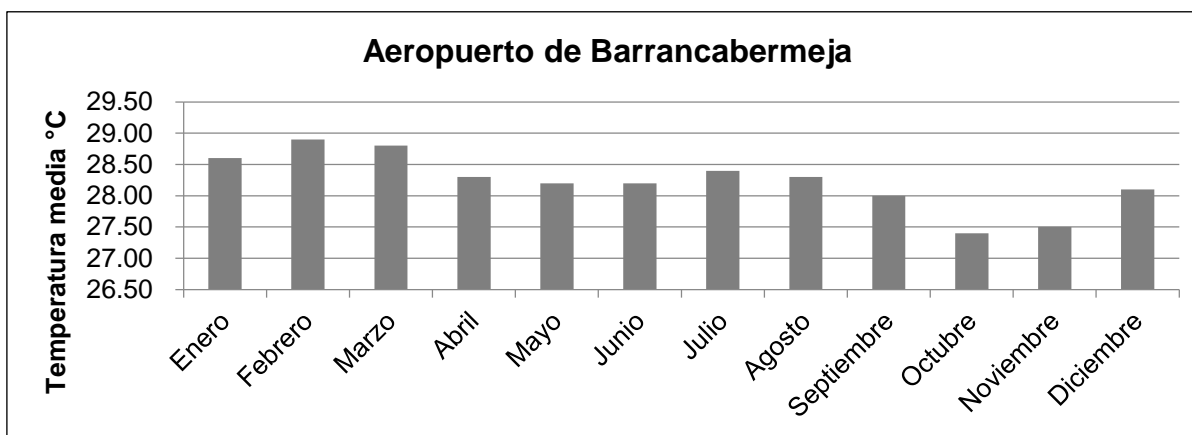
El clima de la región está determinado por los desplazamientos de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCI), asociados a los enfrentamientos de los vientos alisios del norte y del sur. CORMAGDALENA (2007). Con los datos climáticos de la estación del Aeropuerto Yarigüies de Barrancabermeja (Santander), se realizó un análisis general de la información referente a la precipitación y temperatura en la zona de estudio.

La representación gráfica de precipitación mensual, determinó que el régimen pluviométrico general de la zona es bimodal, con dos estaciones lluviosas, de abril a junio y de agosto a noviembre, y una estación seca de diciembre a marzo. (Ver Figura 21).

Figura 21 Precipitación mensual en Barrancabermeja

Fuente: Elaboración propia con datos de la estación meteorológica No. 23155030 del IDEAM

De igual forma se determinó que la temperatura media anual es de 29°C en Barrancabermeja, con valores medios muy constantes durante la mayor parte del año, con ligeras variaciones en las épocas secas y húmedas. En general, la temperatura media mensual presenta un régimen inverso al de la precipitación ya que los meses lluviosos muestran temperaturas medias más bajas y los más secos, las más altas, como se ilustra en la Figura 22.

Figura 22 Temperatura media mensual

Fuente: Elaboración propia con datos de la estación meteorológica No. 23155030 del IDEAM

4.3.1.2 Registros de las estaciones hidrológicas

Existen dos estaciones de registros hidrológicos a lo largo de los 20 Km del sector de estudio, la primera en San Luis (Peñas Blancas), con información de aforos líquidos y aforos sólidos, y la otra en Barrancabermeja en la cual no hay registros de caudal sino solamente lecturas de mira del nivel de agua.

Se han recopilado los registros de niveles diarios en ambas estaciones desde 1977 hasta el 2012 en Peñas Blancas y desde 1974 hasta el 2015 en Barrancabermeja; se considera que este período es suficientemente representativo de las condiciones del cauce en la actualidad. Con las nivelaciones de los ceros de las miras se han establecido las cotas diarias del nivel del agua en ambas estaciones. Trabajar con niveles más antiguos puede distorsionar los resultados en caso que se hayan presentado cambios morfológicos en las secciones donde están instaladas las miras, o que se hayan presentado fenómenos de agradación o degradación del lecho, o que la construcción de embalses en la cuenca haya afectado la regulación de los caudales. En la estación de Peñas Blancas - 2316701 (San Luis) se cuenta con información adecuada para realizar el análisis de caudales y el cálculo de transporte de sedimentos de fondo para estimar el caudal formador de cauce según el procedimiento descrito en el capítulo 2. En la siguiente Tabla 14 se presentan las características de los registros, la cantidad y el resultado esperado después de realizar el respectivo procesamiento de la información. La información cruda de los registros obtenidos por el IDEAM se presenta en el Anexo 2.

Tabla 14 Registros hidrológicos en la estación de Peñas Blancas (San Luis)

Registros	Cantidad	Resultado del procesamiento de la información
Valores máximos, medios y mínimos mensuales de caudales (m ³ /seg)	35 años	Curva de duración de caudales y estimación de caudales extremos
Valores medios, totales y máximos mensuales de transporte (Ton/Día)	20 aforos	Curva de caudal sólido vs caudal líquido
Datos de tabla de calibración	15 años	Curva de nivel vs caudal
Resumen de aforos líquidos	101 aforos	Comprobación de cálculos teóricos vs datos registrados
Resumen de mediciones de materiales en suspensión	4 años	Comprobación de cálculos teóricos vs datos registrados

Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

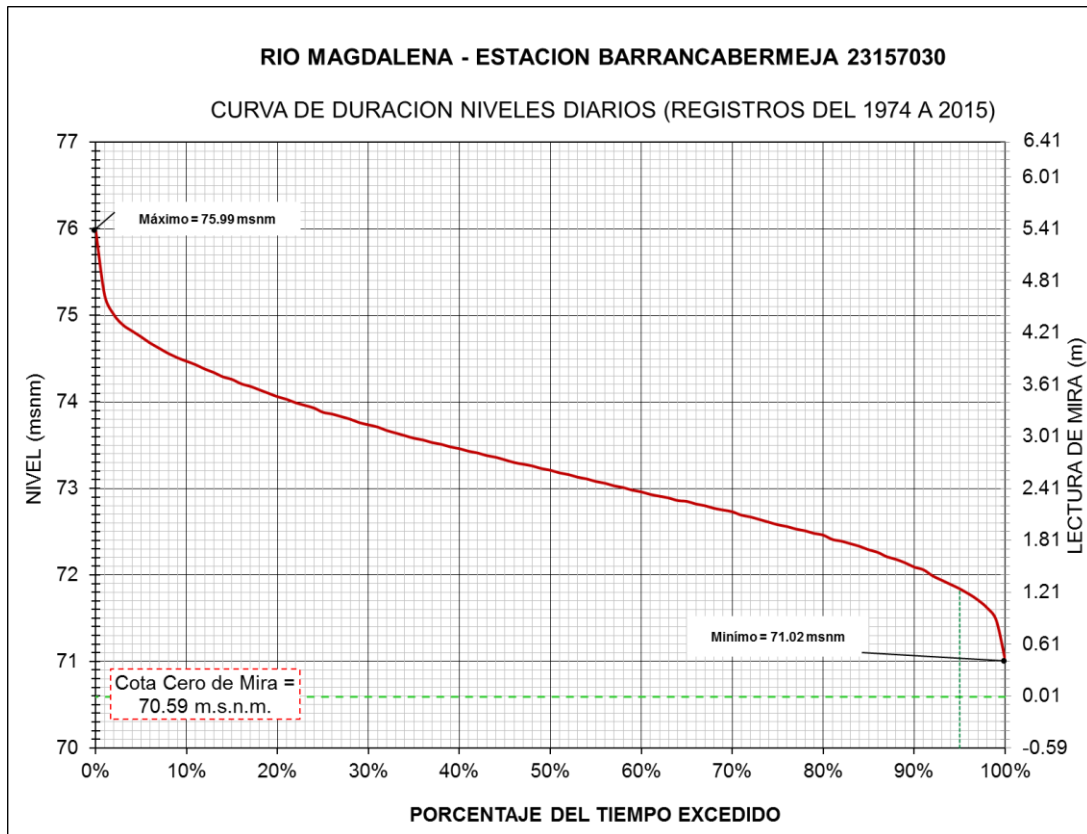
En la estación de Barrancabermeja – 23157030, se tienen los registros diarios desde el año 1974 hasta el año 2015.

Tabla 15 Registros hidrológicos en la estación de Barrancabermeja

Registros	Cantidad	Resultado del procesamiento de la información
Valores diarios de niveles (m)	41 años	Curva de duración de niveles

Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Figura 23 Curva de duración de niveles diarios en Barrancabermeja



Fuente: Elaboración propia con datos de la estación hidrológica No. 23157030 del IDEAM

4.3.1.3 Calculo del caudal formador de cauce

De acuerdo con la propuesta descrita en el capítulo 2, a continuación, se realiza el procedimiento para determinar el caudal formador de cauce mediante tres pasos. En cada uno de ellos se utiliza el programa MS Excel para procesar la información hidrológica y representarla mediante gráficas. El resultado final será el valor del caudal (m^3/s) para ingresar al modelo hidráulico y establecer la mancha de inundación, con la cual se determina el polígono del componente de hidrología e hidráulica.

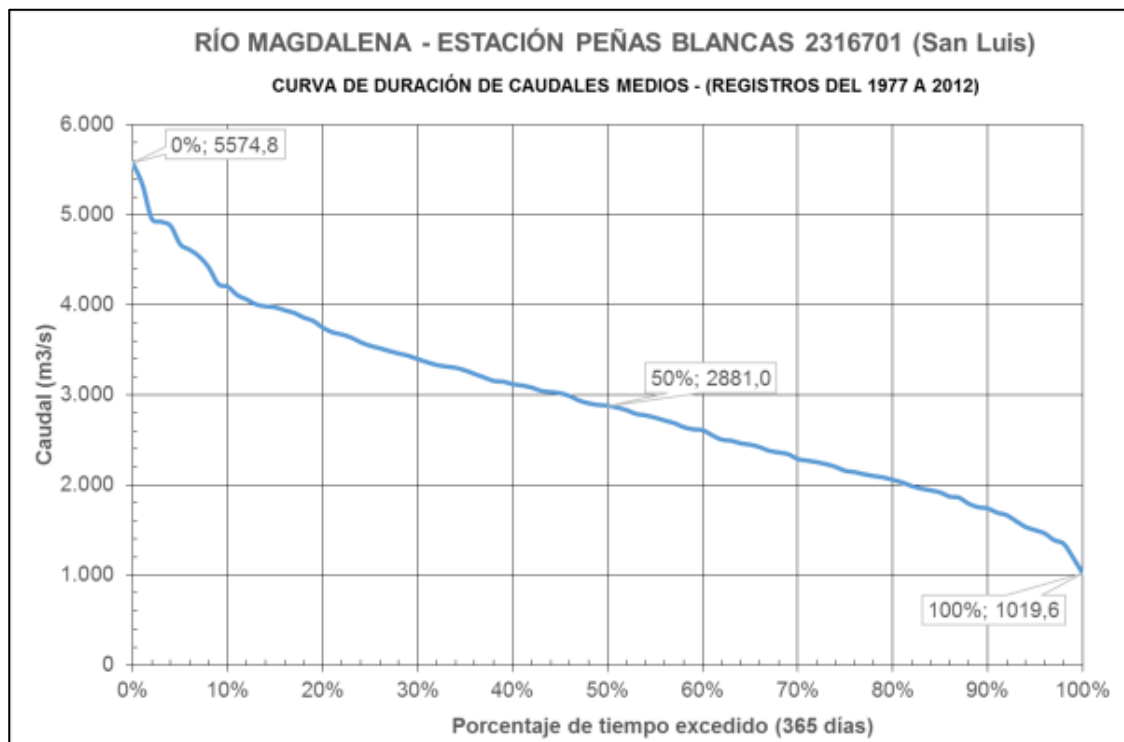
- **Paso 1: Curva de duración de caudales:**

Con 35 años de registros de caudales medios (m^3/s) mensuales, se procedió a organizar la información mediante una tabla en MS Excel donde las columnas representan los 35 años y las filas los registros mensuales. Seguidamente, se determinó el caudal mínimo y

el caudal máximo registrados: con un valor de 1.019,6 m³/s, medido en enero del año 1979 y un valor de 5.574,8 m³/s medido en noviembre del año 1984, respectivamente.

El caudal mínimo registrado corresponde al valor que es igualado o superado el 100% del tiempo y caudal máximo representa el caudal que es igualado o superado el 0% del tiempo, a partir de estos datos, se establece una columna de los porcentajes faltantes a determinar del 99% al 1%. Mediante MS Excel se utiliza la fórmula "PERCENTIL.INC"⁴², la cual determina, para 35 años de registros, los caudales que son superados o igualados para cada punto porcentual. El resultado del Paso 1 se presenta en la Figura 24, identificando el comportamiento de los caudales medios mensuales que son igualados o superados, indicando el valor del caudal en función de la frecuencia de su ocurrencia.

Figura 24 Curva de duración de caudales Peñas Blancas



Fuente: Elaboración propia con datos de la estación hidrológica No. 2316701 del IDEAM.

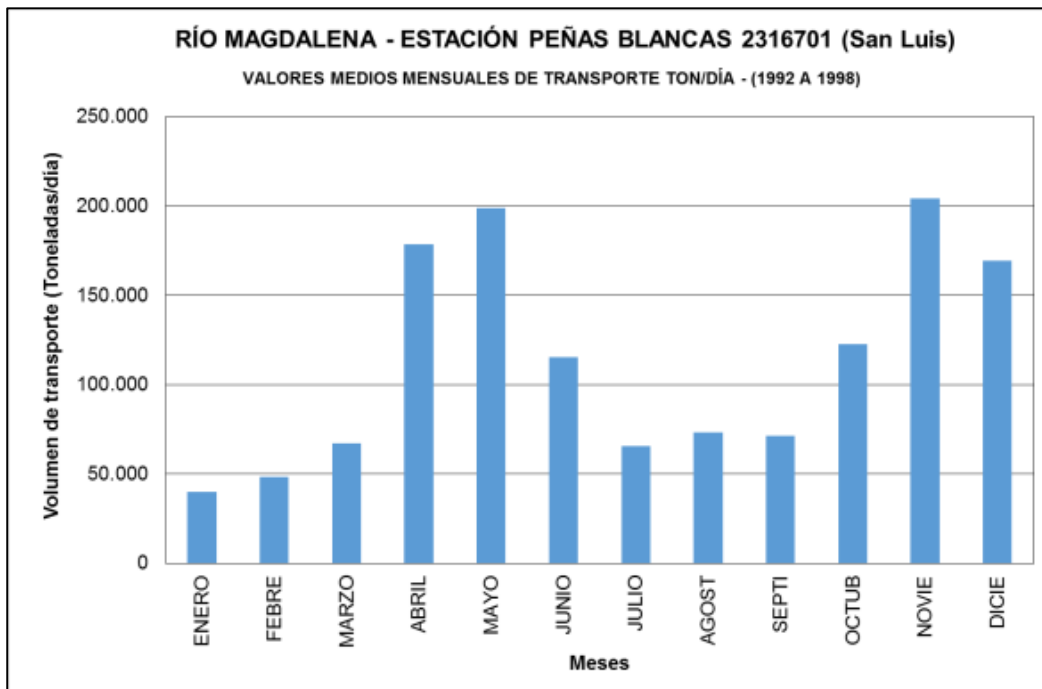
⁴² La fórmula devuelve el k-ésimo percentil de los valores en un rango, donde k está en el rango de 0 a 1, ambos incluidos.

- **Paso 2: Ecuación de volumen de sedimentos**

Durante los años de 1992 y 1998, se tomaron registros mensuales de transporte de sedimentos en la estación Peñas Blancas, determinando un valor de transporte medio anual de 112.820 Ton/día. Se presenta la Figura 25 como información general para tener un orden de magnitud de los registros históricos y poderlos comparar con los resultados obtenidos en este documento.

Con 20 aforos de caudal sólido vs caudal líquido entre los años 1980 y 1995, se determina la ecuación de volumen de sedimentos transportados en función del caudal líquido. Utilizando MS Excel para representar los datos aforados, se realiza una regresión lineal simple en una gráfica con escalas logarítmica. Como resultado se obtiene una ecuación potencial de la relación entre caudal líquido y caudal sólido.

Figura 25 Valores medios mensuales de transporte Peñas Blancas



La regresión se presenta en la Figura 26, que con un coeficiente de correlación de los datos de $R^2 = 0.78$ estima la capacidad de transporte de material mediante la siguiente ecuación:

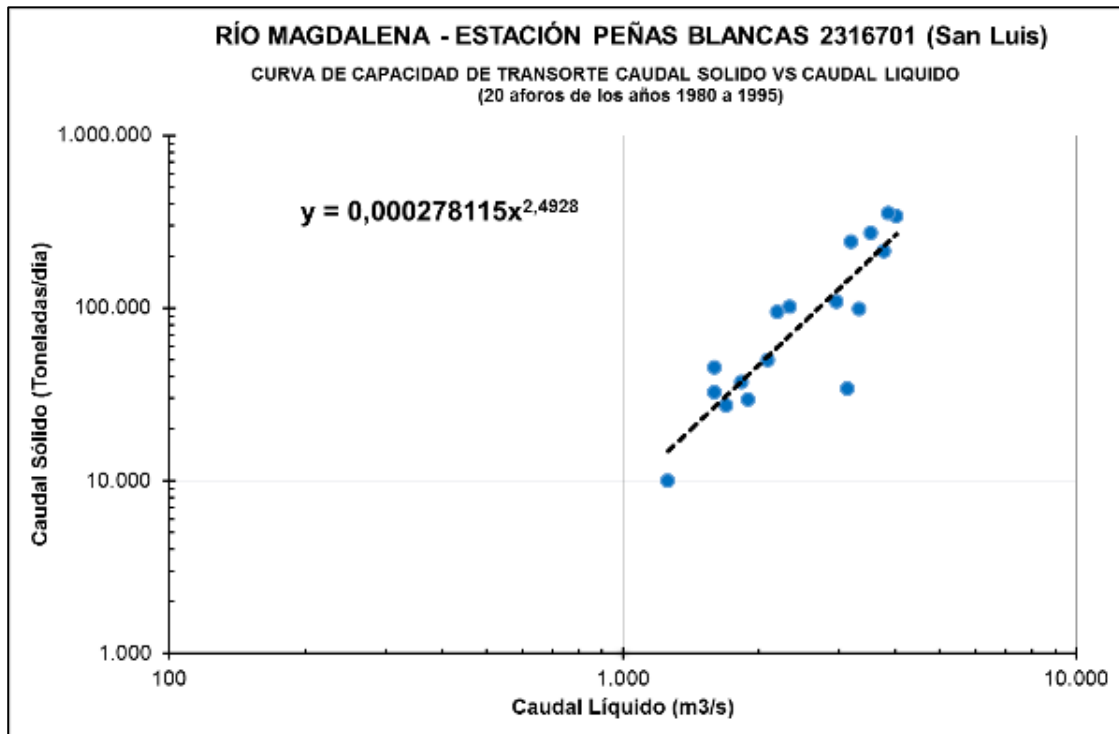
$$Q_s = 0,000278115 \cdot Q_L^{2,4928} \quad (2)$$

Dónde:

Qs: Volumen de sedimentos (Toneladas/día)

Q_L: Caudal líquido (m³/s)

Figura 26 Curva de caudal solido vs caudal liquido Peñas Blancas



Fuente: Elaboración propia con datos de la estación hidrológica No. 2316701 del IDEAM

- **Paso 3: Histograma de volumen de material de fondo**

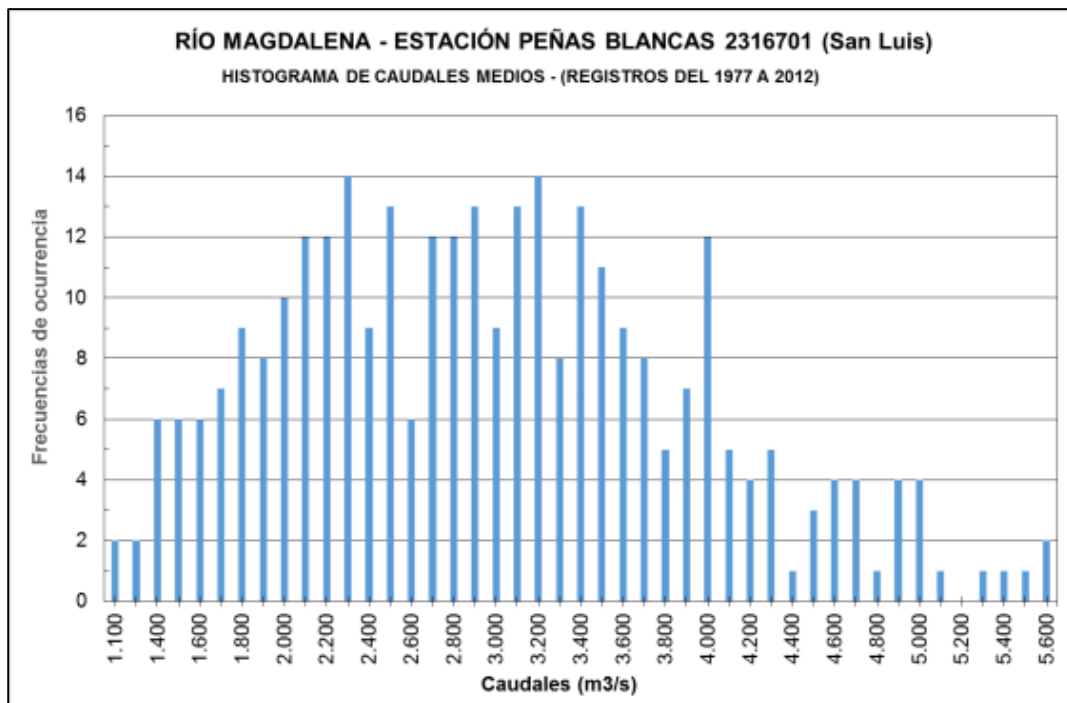
Con los datos de caudal registrados se elaboró la curva de duración de caudales medios en el paso 1 y el histograma de frecuencia de ocurrencia de caudales. Se procedió a determinar el rango de caudales entre el valor máximo y el mínimo registrado, arrojando un resultado de 4.555 m³/s. Se realiza una estimación del número de intervalos del caudal para agrupar los caudales registrados y determinar el número de veces que se repite un caudal en un determinado rango.

Inicialmente se utilizaron 18 intervalos de 250 m³/s entre el rango de 4.555 m³/s. Sin embargo, la representación gráfica de estos intervalos no parecía ser la más adecuada

porque agrupaba una cantidad de caudales con frecuencias de ocurrencias con valores similares, Por otro lado, cuando se seleccionan muchos intervalos, la frecuencia tiende ser de un solo valor por grupo. Se encontró que un valor apropiado es de alrededor de 50 intervalos.

A partir de lo anterior, se escogieron 45 intervalos para representar los registros de caudales agrupados cada $100 \text{ m}^3/\text{s}$ en un rango total de $4.555 \text{ m}^3/\text{s}$. La siguiente figura, representa un histograma de frecuencia de 309 datos de caudales medios mensuales registrados, identificando que se repiten 14 veces los caudales de $2.300 \text{ m}^3/\text{s}$ y $3.200 \text{ m}^3/\text{s}$ en un periodo de 35 años.

Figura 27 Histograma de caudales medios Peñas Blancas



Fuente: Elaboración propia con datos de la estación hidrológica No. 2316701 del IDEAM.

Determinado el histograma de caudales, se procede a remplazar el valor de cada uno de los 45 intervalos de caudales en la Ecuación (2) para determinar la capacidad de transporte de material.

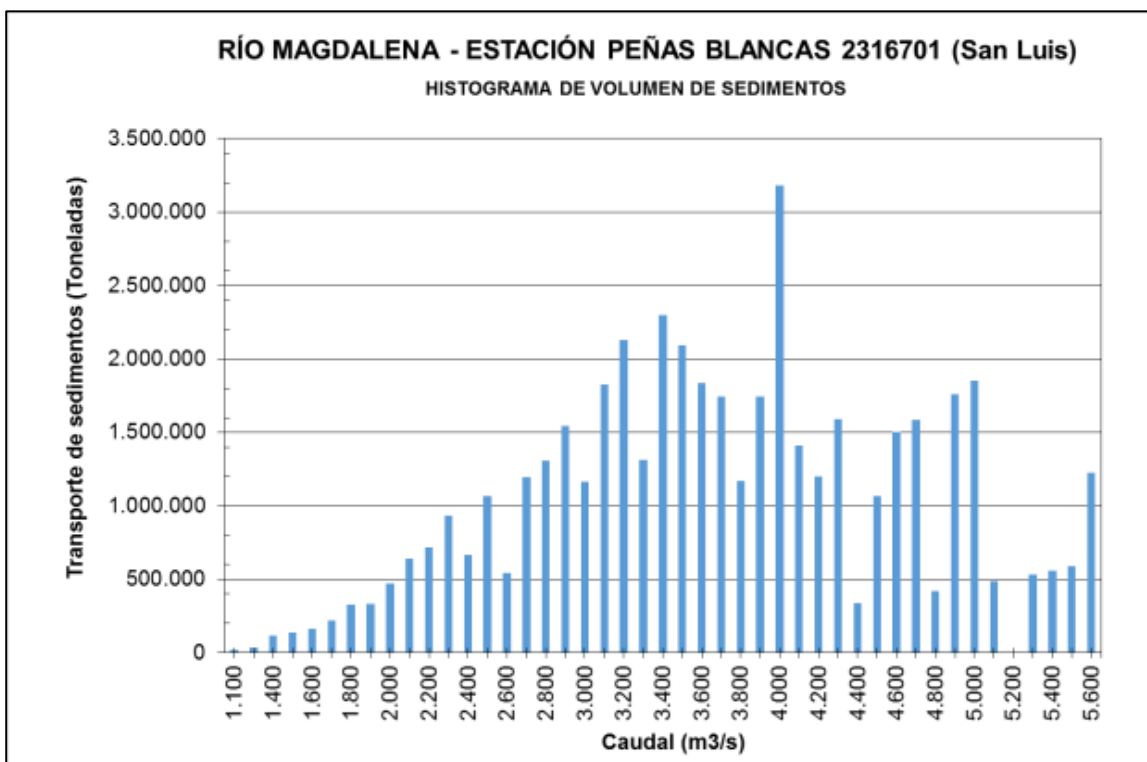
El histograma de Volumen de material de fondo muestra una distribución continua con unos picos claramente identificados.

A continuación, la Figura 28 incorpora el resultado de la aplicación de la Ecuación (2) para cada intervalo. El pico del histograma determina el máximo volumen transportado, esto significa que el caudal formador del cauce es representado por aquel caudal que transporta el mayor volumen de sedimentos en sus condiciones de valores medios.

Para el sector de análisis, entre San Luis y Barrancabermeja, se estimó que el mayor volumen de transporte de sedimentos es definido por el caudal líquido de 4.000 m³/s, este valor representa el caudal formador del cauce permanente.

Si el pico del histograma no puede ser fácilmente identificado se puede estimar mediante la elaboración de una curva suave a través de los picos de las barras del histograma. En caso que no resulte fácil identificar el valor máximo se debe modificar el valor del intervalo de clase de acuerdo a lo recomendado en el diagrama de flujo presentado en el capítulo 2

Figura 28 Histograma de volumen de sedimentos Peñas Blancas



Fuente: Elaboración propia con datos de la estación hidrológica No. 2316701 del IDEAM.

El caudal formador de cauce de 4.000 m³/s, estimado para la estación Peñas Blancas, corresponde a una recurrencia del 13%, de acuerdo con la curva de duración de

caudales, Figura 24 Este caudal es uno de los parámetros de entrada para realizar la modelación hidráulica y determinar la mancha de inundación con la cual se determina el polígono del componente de hidrología e hidráulica.

4.3.2 Hidráulica

Con la información del levantamiento topográfico y batimétrico de abril 2012, se procesa la información en el programa ArcGis para obtener el modelo digital de terreno. Será fundamental para pasar la información de la geometría del cauce del río Magdalena del HEC Geo Ras⁴³ al HEC-RAS. Seguidamente, el resultado de la modelación hidráulica en HEC-RAS se exporta al programa ArcGis para visualizarlo con el modelo digital de terreno.

De esta forma se obtiene una zona definida por una mancha de inundación, que establece el límite máximo del nivel de agua que determina el caudal formador calculado de 4.000 m³/s. Este polígono se ha definido en este documento como aquel que establece el límite del componente de la hidrología e hidráulica.

4.3.2.1 Descripción del modelo 1D

El modelo HEC RAS es un modelo desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers (USACE) Hydrologic Engineering Center (HEC). El modelo permite calcular los perfiles hidráulicos para flujo permanente gradualmente variado en el tramo de un río tanto en régimen subcrítico como supercrítico o mixto. El procedimiento computacional se basa en la solución de la ecuación de energía, en el que las pérdidas de energía se calculan mediante la ecuación de Manning, y las pérdidas por expansión y contracción se avalúan afectando el cambio en cabezas de velocidad por el coeficiente correspondiente. El modelo permite considerar el efecto de obstrucciones del flujo de estructuras como puentes, alcantarillas o vertederos.

⁴³ Es una extensión para ArcGis desarrollada conjuntamente por el USACE y ESRI. Es un conjunto de herramientas y utilidades especialmente diseñadas para procesar datos georreferenciados que permiten bajo el entorno de los sistemas de información geográfica (SIG), facilitar y complementar el trabajo con HEC-RAS.

Como se describe en el manual de hidráulica del modelo (HEC-RAS Hydraulic Reference Manual), los perfiles hidráulicos se calculan de una sección transversal a la siguiente aplicando el método del paso estándar.

4.3.2.2 Información topográfica y batimétrica

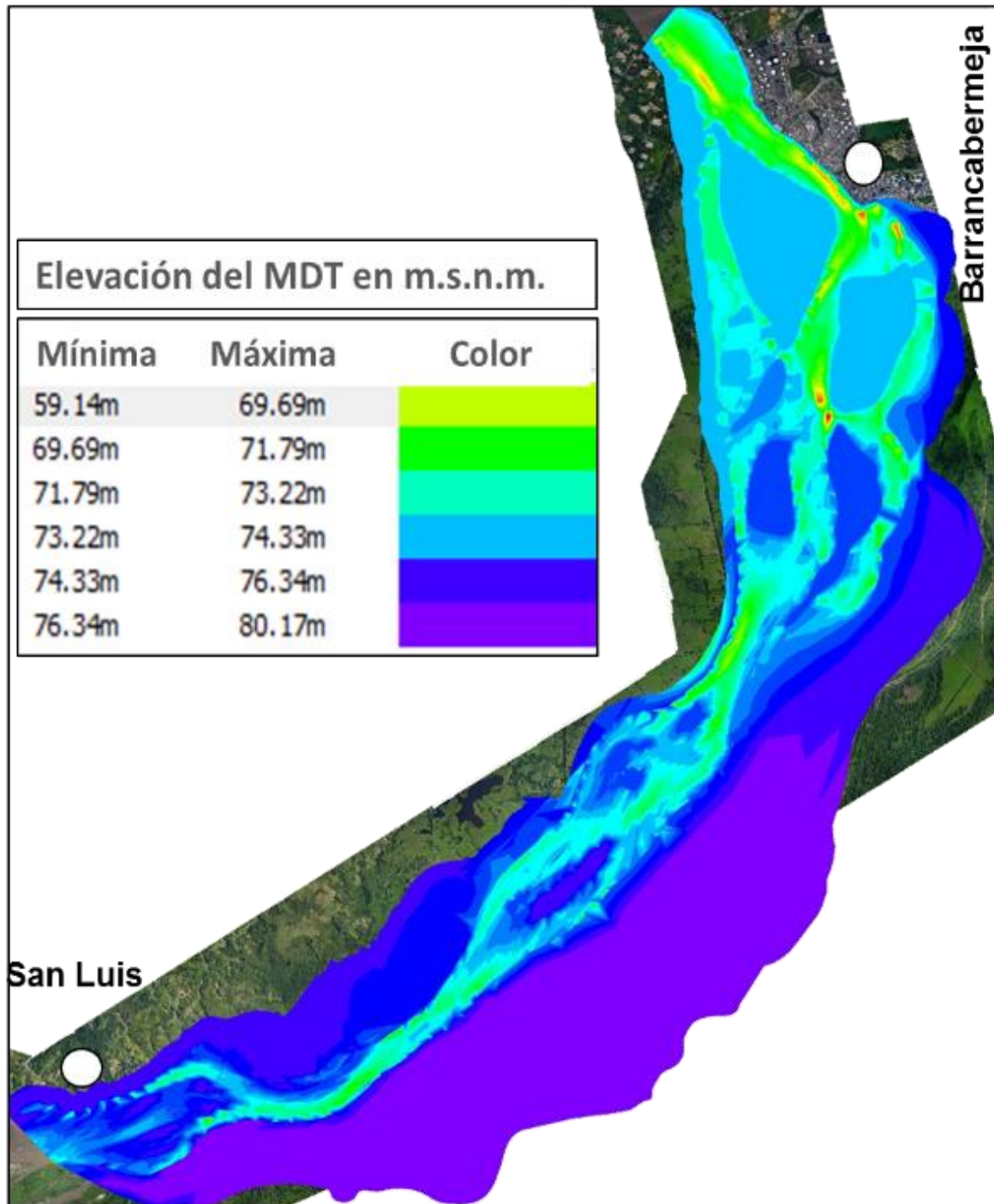
La información de topografía y batimetría disponible para caracterizar el cauce, las orillas y las zonas de inundación del río Magdalena, descrita en el Subcapítulo 3.2.2 de este documento, permitió elaborar un Modelo Digital de Terreno (MDT) del sector de estudio.

Con la utilización del programa de Autodesk Civil 3D, se procesó la información de los puntos XYZ del levantamiento de campo, obteniendo un MDT con curvas de nivel separadas cada metro. Para presentar gráficamente la información, el programa permite que los valores de las curvas de nivel del terreno sean procesados para obtener un espectro de colores, y estas sean editables en los rangos de acuerdo con las elevaciones en metros sobre el nivel del mar. El resultado final del MDT se presenta en la Figura 29 con una representación del terreno mediante 6 colores que permiten identificar el cauce del río sus colores de tonos claro y las zonas de inundación en color oscuro.

En la figura se evidencia un color morado sobre la orilla derecha cerca de la confluencia con el río Opón, la cual representa la zona de inundación del río. Sobre la orilla izquierda no se evidencian zonas de inundación debido a la presencia de lomeríos, terrazas altas y al dique casabe construido en el año 1943.

Esta información de excelente calidad, fue fundamental para desarrollar la modelación hidráulica, debido a que permite el uso del software Geo Ras de ArcGis como herramienta computacional compatible con Hec Ras para obtener la geometría del cauce y la presentación gráfica de los resultados de la modelación hidráulica.

Figura 29 Modelo digital de terreno San Luis a Barrancabermeja



Fuente: Elaboración propia con información de campo levantada por Cormagdalena (2012)

4.3.2.3 Parámetros básicos y condiciones de frontera

Los valores que determinan los parámetros hidráulicos y las condiciones de frontera del modelo hidráulico, se adoptaron de estudios detallados adelantados en la zona por Cormagdalena⁴⁴.

- **n:** Coeficiente de rugosidad de Manning. El modelo HEC RAS permite definir rugosidades diferentes para el canal principal y para las bancas izquierda y derecha. De acuerdo con el informe de la referencia y las características del río y los playones, se tomó una rugosidad promedio de 0.031.
- **C:** Coeficiente de pérdidas por expansión y contracción. Considerando las características de las secciones transversales del río Magdalena en el sector estudiado, se adoptó un coeficiente de contracción de 0.1 y de expansión de 0.3, que son valores comúnmente adoptados para este tipo de ríos.
- **Condición de frontera aguas abajo:** Como condición de frontera aguas abajo se tomó la condición de flujo uniforme con una pendiente de 27 cm por kilómetro, que es la pendiente característica en este sector del río.
- **Caudales de modelación:** De acuerdo con lo expuesto en el Capítulo de hidrología, se determinó el valor del caudal formador de cauce de 4.000 m³/s (Metodología propuesta).

La normatividad vigente sobre la definición de ronda hídrica, no define un procedimiento para determinar un caudal que represente el cauce permanente y mucho menos para realizar una modelación hidráulica computacional. Se realizó una suposición lógica, de la hidráulica general, que consiste en obtener el caudal que es producido por el nivel promedio de los últimos 15 años mediante una curva de calibración en la estación Peñas Blancas. El resultado del análisis proyecta que el caudal que produce un nivel promedio de 4.39 metros es de 4.176 m³/s (Normatividad Actual). En el subcapítulo 5.2 de este documento se detalla el procedimiento utilizado.

⁴⁴ Actualización de los Estudios y diseños de obras de encauzamiento del río Magdalena en el sector comprendido entre Puerto Berrío y Barrancabermeja. Elaborado por IEH Grucón S.A. 2012.

Con el objetivo de realizar una comparación general del nivel de agua producido por este caudal, también se va a modelar el caudal que es igualado y superado el 50% del tiempo con un valor de 2.881 m³/s⁴⁵.

Adicionalmente, la comparación de niveles se complementa con base en análisis hidrológicos realizados de estudios detallados sobre el sector, los cuales han determinado los caudales que corresponden al periodo de retorno de 2.33 años y 5 años, con valores de 6.300 m³/s y 7.070 m³/s respectivamente.

Los caudales líquidos para períodos típicos y los caudales utilizados en la modelación hidráulica son los siguientes:

Tabla 16 Caudales utilizados en la modelación

Caudales de modelación	Valor (m ³ /s)
Caudal excedido el 50 % del tiempo	2.881**
Caudal formador de cauce (Metodología Propuesta)	4.000*
Caudal producido por el nivel promedio últimos 15 años (Normatividad Actual)	4.176*
Tr 2.33 años	5.820**

Fuente: *Calculo propio del autor, **Cormagdalena (2012)

4.3.2.4 Modelación Hidráulica

El análisis hidráulico realizado, mediante una modelación en una dimensión, tiene como propósito proporcionar la información básica de los niveles del agua a los que puede llegar el río Magdalena en el sector de estudio, de acuerdo con las condiciones naturales del río e ingresando como dato fundamental los caudales obtenidos en la evaluación hidrológica.

⁴⁵ Idem

Particularmente, el interés de la modelación hidráulica es conocer el nivel de agua producido por el caudal formador de $4.000 \text{ m}^3/\text{s}$, el resultado es parte de un análisis mediante secciones transversales, comparando los niveles de agua generados por los otros caudales de modelación.

Con la información del MDT, se obtuvo la geometría del cauce por medio del programa Geo Ras de ArcGis utilizando la herramienta “RAS Geometry”, se creó la línea que establece el cauce principal por medio del thalweg⁴⁶ generado por el levantamiento batimétrico, seguidamente se definieron las orillas, la separación de las secciones transversales y las zonas de inundación. Es importante destacar, que las orillas son digitalizadas a través del MDT y esto permite tener incertidumbre a la hora de seleccionar adecuadamente la orilla, por lo tanto se recomienda que se verifique y ajusten las bancas en el programa Hec Ras.

Seguidamente, en el programa Hec Ras, utilizando la opción “Import Geometry Data – GIS Format” dentro de la interfaz de Geometría Data, se obtiene la información del MDT de las secciones transversales indicadas en Geo Ras. Establecida la geometría, se ingresan al programa los parámetros básicos y las condiciones de frontera para realizar la modelación de los caudales seleccionados.

Los resultados del programa se pueden visualizar mediante las respectivas secciones transversales con la información de los diferentes niveles de agua producidos por los caudales modelados. (Ver Anexo 3). Como el programa no tiene la herramienta para visualizar la mancha de inundación generada por dichos caudales, los resultados son exportados nuevamente a Geo Ras utilizando la opción Export GIS Data.

De nuevo en Geo Ras, utilizando la opción RAS Mapping se genera la visualización en planta de los resultados obtenidos en la modelación hidráulica, mediante la opción de “Floodplain Delineation Using Rasters”. Se genera el límite de la zona de inundación de acuerdo con la comparación del MDT y los niveles arrojados producidos por el caudal de $4.000 \text{ m}^3/\text{s}$, que particularmente es el caudal formador de cauce y resultado esperado de

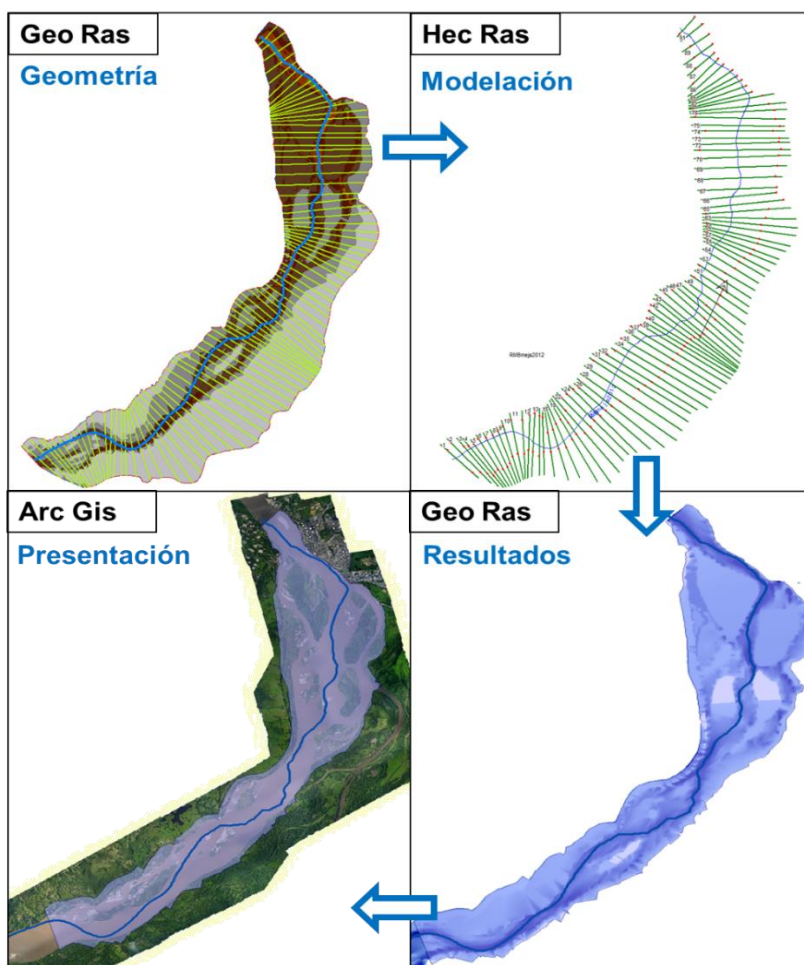
⁴⁶ Zonas de mayores profundidades en un cauce, generalmente es utilizado para propósitos de navegación.

este capítulo. En el Anexo 4, se presenta el procedimiento para descargar el archivo base de la modelación hidráulica en Hec Ras.

Finalmente, la mancha de inundación generada por el caudal formador de cauce, se presenta gráficamente a través del programa ArcGis, el cual permite manipular información de referencia como la ortofoto del sector de estudio. Mediante una secuencia de 4 partes, la Figura 30 presenta un esquema del flujo de los procesos utilizados en el modelo hidráulico.

De acuerdo con el procedimiento descrito, es sencillo aprovechar la compactibilidad de los programas mencionados, de forma general se recomienda guardar y procesar toda la información a través del disco duro local (C) del computador.

Figura 30 Esquema de flujo procesos utilizados en modelo hidráulico



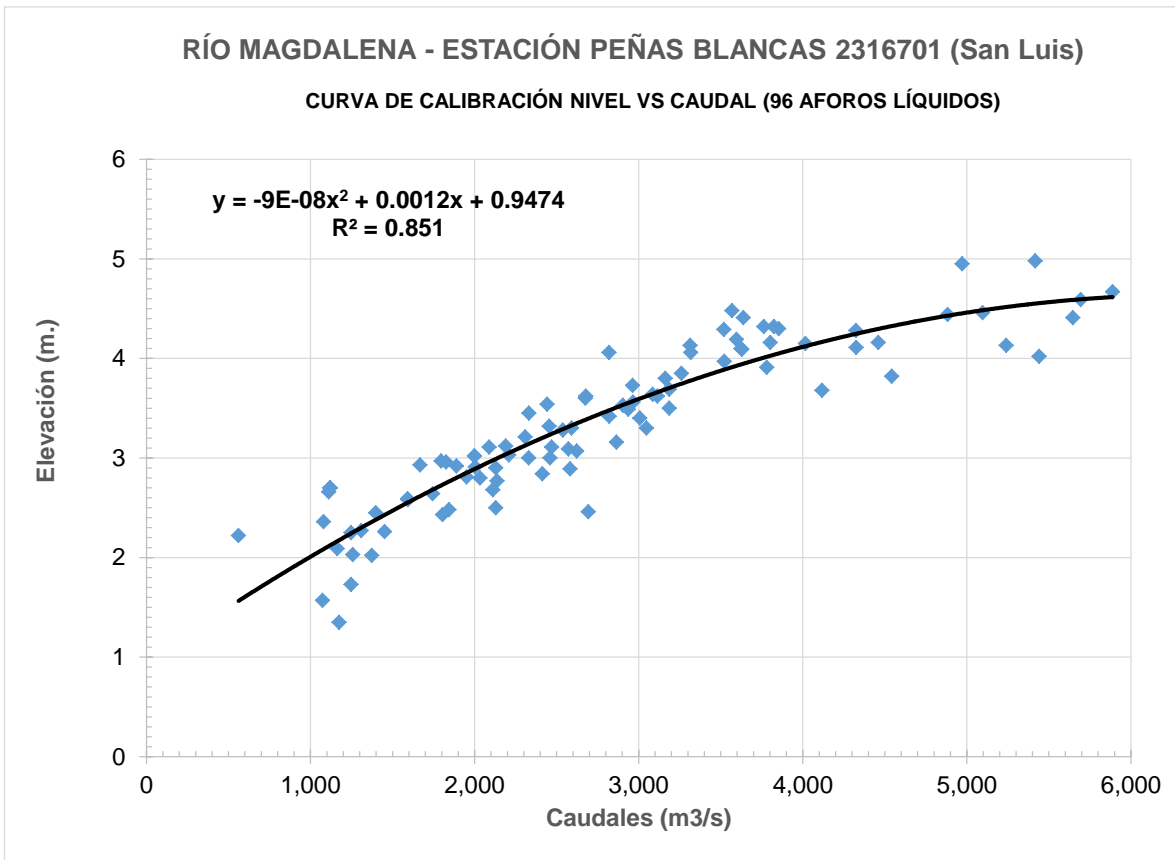
Fuente: Elaboración propia con información de campo levantada por Cormagdalena (2012)

4.3.2.5 Calibración del modelo

Generalmente se utiliza información hidrológica medida en campo para realizar una comparación de los resultados del modelo hidráulico, esta comparación permite validar las condiciones de frontera y la información de entrada con la cual se ejecutan los modelos computacionales.

Para este caso, la calibración del modelo hidráulico de Hec Ras se realizará mediante la curva de calibración de la estación Peñas Blancas, pues se cuenta con 96 aforos líquidos con información de caudal y correspondiente caudal. A continuación, la Figura 31 representa la curva de calibración de Nivel contra Caudal en la estación Peñas Blancas.

Figura 31 Curva de calibración Nivel vs Caudal estación Peñas Blancas



Fuente: Elaboración propia con datos de la estación hidrológica No. 2316701 del IDEAM

Para lograr la comparación de los datos de campo, que son medidos en metros, con los resultados del modelo hidráulico, que son medidos por medio de una batimetría en metros

sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), se debe realiza un procedimiento previo, el cual consiste en sumar a cada uno de los registros medidos en campo la cota cero de la mira (regla), que según la información suministrada por el IDEAM es de 80.00 m.s.n.m..

Realizado el procedimiento, se evidencio que los niveles producidos por el modelo hidráulico estaban aproximadamente 4 metros por debajo de los niveles medidos en campo. Se realizó un análisis de los resultados y se comparó con diferentes estudios realizados sobre el sector, concluyendo que posiblemente la cota cero de la mira puede tener un error. Se procedió a solicitar al IDEAM el histórico de los ceros de la mira en cuestión, donde se puede evidenciar la historia de la mira en cuanto a desplazamientos o nuevos valores del cero de mira. Inexplicablemente, la información suministrada por el IDEAM, ver Anexo 2 página 21, describe que el cero de la mira de la estación Peñas Blancas es de 93.50 m.s.n.m. En este caso, los resultados del modelo estaría 17.5 metros por debajo de los datos medidos en campo.

De acuerdo a la incertidumbre, que ni la misma entidad del Estado ha caído en cuenta, se estableció mediante investigación con personal que trabaja constantemente con la información hidrológica e hidráulica del río Magdalena, que en la estación de Peñas Blancas se han presentado diferentes problemas con la definición de la cota cero de la mira.

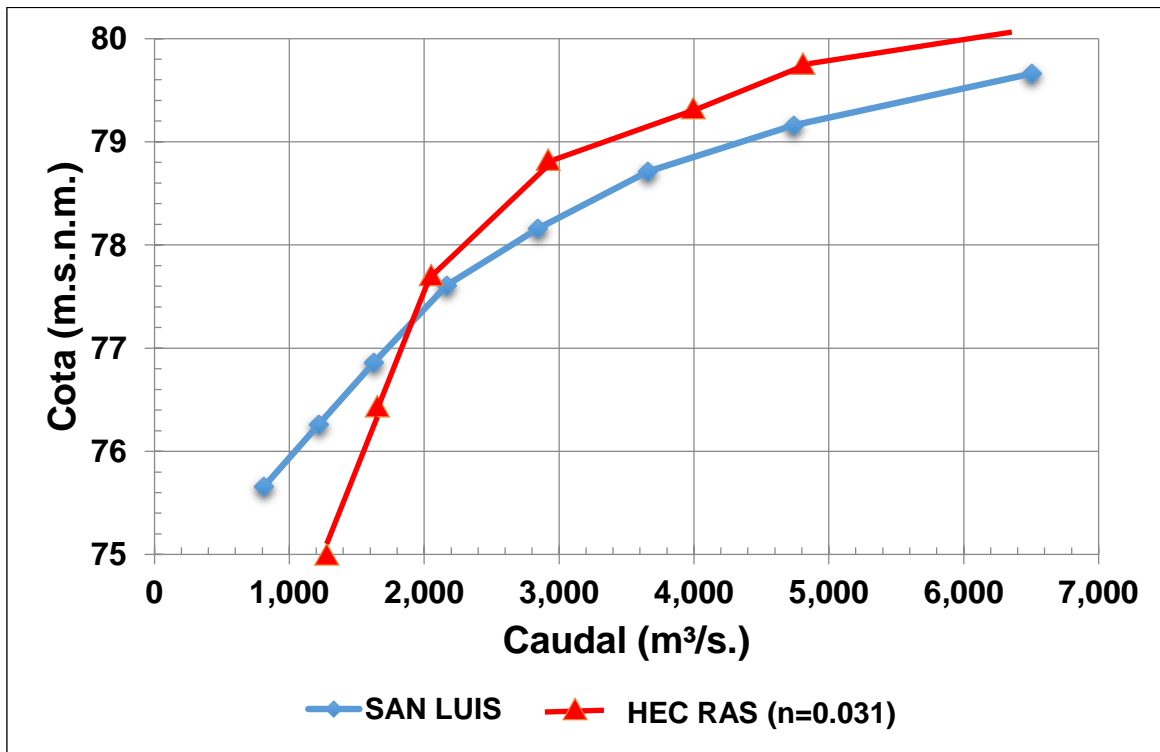
Consecuente a lo anteriormente mencionado, se va a utilizar la información determinada en el estudio de los Diseños de Obras de Encauzamiento del Río Magdalena en el Tramo San Luis - Barrancabermeja para la Estabilización del Acceso al Puerto, elaborado por Emdepa Consultoría S.A. para Cormagdalena en el año 2009. Este informe, en el capítulo 6 - hidrología, se describe que, de acuerdo a las similitudes geomorfológicas del cauce entre dos estaciones de referencia, puede aplicarse en cualquier punto entre estas dos estaciones un procedimiento de regionalización, donde se obtengan por interpolación los caudales y niveles medios de un sector intermedio.

Debido a la suposición de similitud de comportamiento geomorfológico, los valores de la gráfica deben tomarse con precaución y solamente como guías de las relaciones caudal – nivel, dado que siempre se presentan algunas diferencias locales en la forma de las secciones transversales y pendientes longitudinales del río en el sector de estudio del informe citado.

La calibración del modelo hidráulico consistió en un proceso de tentativa y error en el que para una serie de caudales, y diferentes rugosidades se comparaban los resultados obtenidos con las curvas de calibración. Como valores de referencia de las rugosidades se tomaron los obtenidos en los análisis realizados en las modelaciones adelantadas por Cormagdalena en el año 2007.

Los resultados de la calibración se muestran en la Figura 32, se presentan los puntos correspondientes a los resultados de la modelación y la curva de calibración de Peñas Blancas (San Luis) . Los resultados obtenidos concuerdan razonablemente con la curva de calibración de la mira. Estos resultados se obtuvieron con una rugosidad promedio de de 0.031, coeficientes de pérdidas de contracción y expansión de 0.1 y 0.3 respectivamente que son valores comúnmente adoptados para este tipo de ríos. Como condición de frontera de aguas abajo de la modelación, se adoptó la profundidad normal correspondiente a la pendiente promedio del río en el sector analizado de 27 cm / km.

Figura 32 Curva de calibración Cota (m.s.n.m.) vs Caudal estación Peñas Blancas



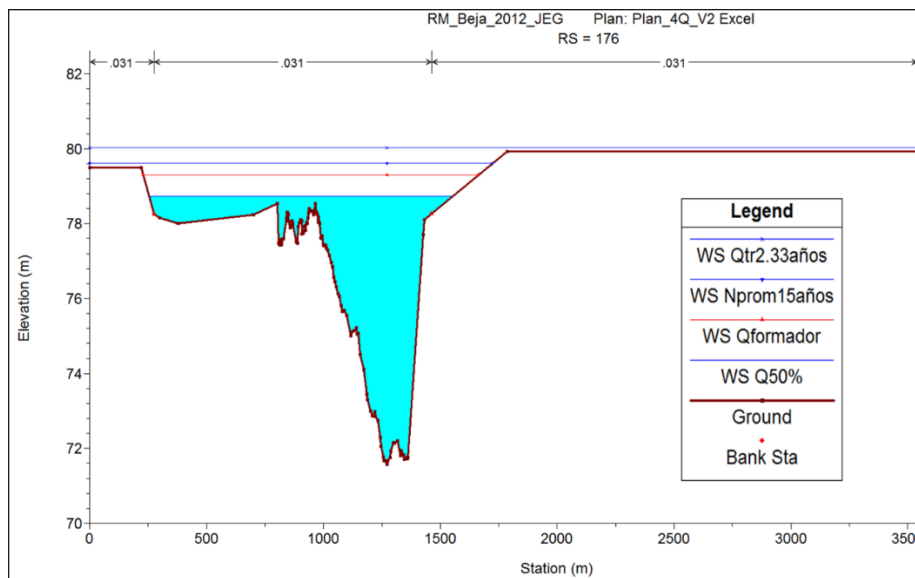
Fuente: Cormagdalena 2009. Diseños de Obras de Encauzamiento del Río Magdalena en el Tramo San Luis - Barrancabermeja para la Estabilización del Acceso al Puerto.

4.3.2.6 Resultados

El cálculo hidrológico que determinó el caudal formador de cauce se considera que es acertado, de acuerdo con los resultados del modelo hidráulico en una dimensión y a la comparación de tres caudales, uno de ellos de menor valor (Caudal excedido o igualado el 50% del tiempo) y los otros correspondientes a un caudal con periodo de retorno de 2.33 año y 5 años, se puede concluir que el nivel de agua generado por este caudal de $4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ se encuentra generalmente al límite del desborde de la sección transversal o banca llena.

La Figura 33, muestra una sección transversal típica del resultado de la modelación hidráulica, se observa los niveles de agua generados y mediante una línea de color rojo se identifica el caudal formador.

Figura 33 Sección transversal típica del modelo hidráulico



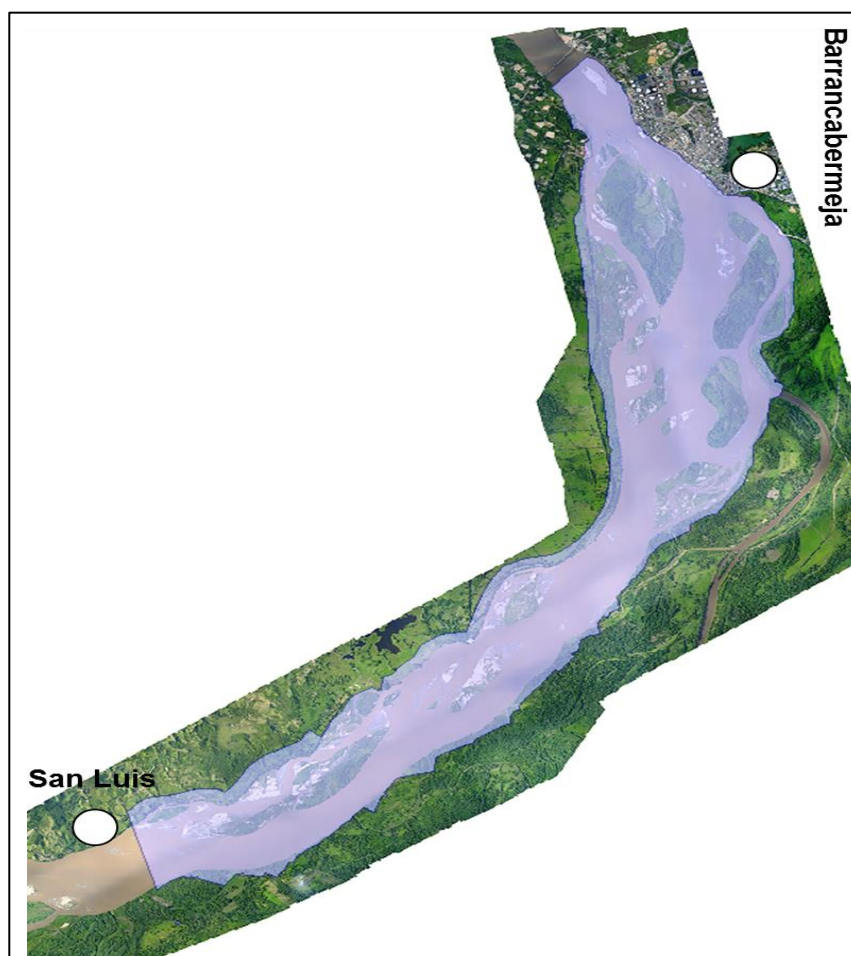
Fuente: Resultado de modelo hidráulico en Hec Ras

EL resultado del análisis de la modelación hidráulica, a lo largo de los 20 kilómetros entre San Luis y Barrancabermeja, se ve representado mediante un polígono que delimita una zona cuyos niveles de agua son generados por un caudal de $4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ y establecen una mancha de inundación. Realizado el análisis particular de cada una de las 91 secciones transversales del modelo hidráulico, se determinó que las seis (9) primeras secciones transversales del modelo, desde la 91 hasta la 83, presentan información con cierta incertidumbre en

las zonas de inundación, motivo por el cual se decidió no tener en cuenta el resultado en estas secciones transversales.

De acuerdo con lo anterior, el resultado final del tercer y último componente de la metodología propuesta, corresponde al resultado del modelo hidráulico en las secciones transversales entre la No. 82 y No. 01 (20.5 kilómetros aproximadamente). Esta área corresponde a la mancha de agua que produce el caudal formador de cauce como se evidencia en la siguiente Figura 34.

Figura 34 Mapa resultante del análisis hidrológico e hidráulico entre San Luis y Barrancabermeja



Fuente: Elaboración propia

Capítulo 5 Aplicación de la metodología propuesta

A continuación se presentan los resultados de la aplicación de la propuesta metodológica para el acotamiento de la ronda hídrica en el sector de estudio. Inicialmente se realiza un análisis del alcance de la metodología, después se describe el procedimiento para obtener el polígono envolvente de los tres componentes desarrollados que establecerá el límite de la ronda hídrica del río Magdalena en el sector entre San Luis y Barrancabermeja. Posteriormente se presenta gráficamente el resultado de la propuesta metodológica y se establecen las coordenadas del polígono que define la ronda hídrica.

Se realiza un análisis particular del resultado del polígono que tendría lugar en caso de aplicar la normatividad actual, debido a que la normatividad no describe el método para obtener el polígono que delimita la faja hasta de treinta metros, se asumirá que por medio de una modelación hidráulica en una dimensión, del caudal producido por el nivel promedio de los últimos 15 años, sería la mejor forma de obtener el polígono que establece la ronda hídrica.

Finalmente, se realizará una comparación de los dos polígonos resultantes de las anteriores metodologías con el polígono definido por Cormagdalena, el cual establece la zona de utilidad pública y de interés social.

5.1 Ronda hídrica según metodología propuesta

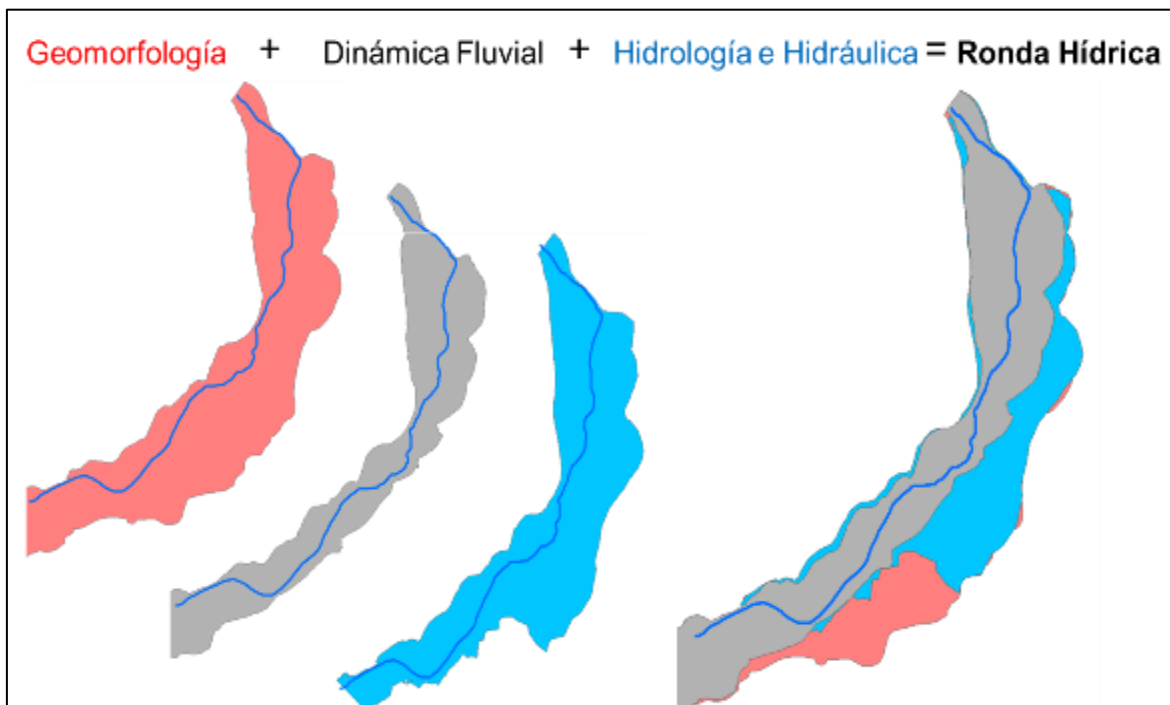
La metodología propuesta proyecta dos alcances, el primero corresponde a la necesidad de establecer un límite para preservar y proteger los recursos naturales como el recurso hídrico, con todos sus componentes de vegetación, calidad de agua, zonas de dinámica fluvial del río, etc. y que finalmente se pueda definir claramente el uso del suelo cuando se establezcan los Planes de Ordenamiento Territorial de los centros poblados rivereños. El segundo consiste que, en el mismo límite, se restrinja el asentamiento de humanos y sus bienes, con el objetivo de prevenir catástrofes generadas por inundaciones como las registradas en el río Magdalena sobre la cuenca media y cuenca baja en noviembre del 2010 y abril del 2011, límite en el cual se deberán estudiar los niveles de riesgo frente a inundaciones, que no es objeto de este documento y será el inicio para el desarrollo de otra investigación.

5.1.1 Envoltente

Los polígonos creados del resultado de cada análisis de los componentes de Geomorfología, Dinámica Fluvial y el componente objeto de este documento, Hidrología e Hidráulica, se procesan utilizando el programa ArcGis para generar una envoltente general que permita intersectar los tres polígonos y de esta forma, obtener el polígono general que define la ronda hídrica del sector de estudio.

La herramienta “Feature to Poligon” de “Arc Tollbox” permite integrar en una sola capa los polígonos definidos por cada componente. Ahora se procede a realizar la unión mediante la opción “Merge” del menú “Geoprocesing”, esta opción realiza la unión de los polígonos existentes y genera un nuevo polígono con la intersección de los polígonos. Finalmente, con la opción “Dissolve” del menú “Geoprocesing” se eliminan las intersecciones internas y genera un solo límite externo, que en este caso se ha denominado la envoltente. La Figura 35 ilustra el procedimiento realizado de la unión de los polígonos para obtener la envoltente.

Figura 35 Unión de polígonos para definir la envoltente de la ronda hídrica



Fuente: Elaboración propia mediante el programa ArcGis 10.2.2

5.1.2 Definición de la ronda hídrica

El polígono final definido por la envolvente, no conserva un valor constante de la distancia entre la orilla y el polígono, el cual es el objetivo de la propuesta que consiste en establecer un límite mediante la superposición (intersección) de los tres componentes desarrollados por los aspectos metodológicos del capítulo 4. Esto permite establecer un criterio contrario a lo expuesto en el decreto 2811 de 1974 que define la ronda hídrica del río mediante "...una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho."

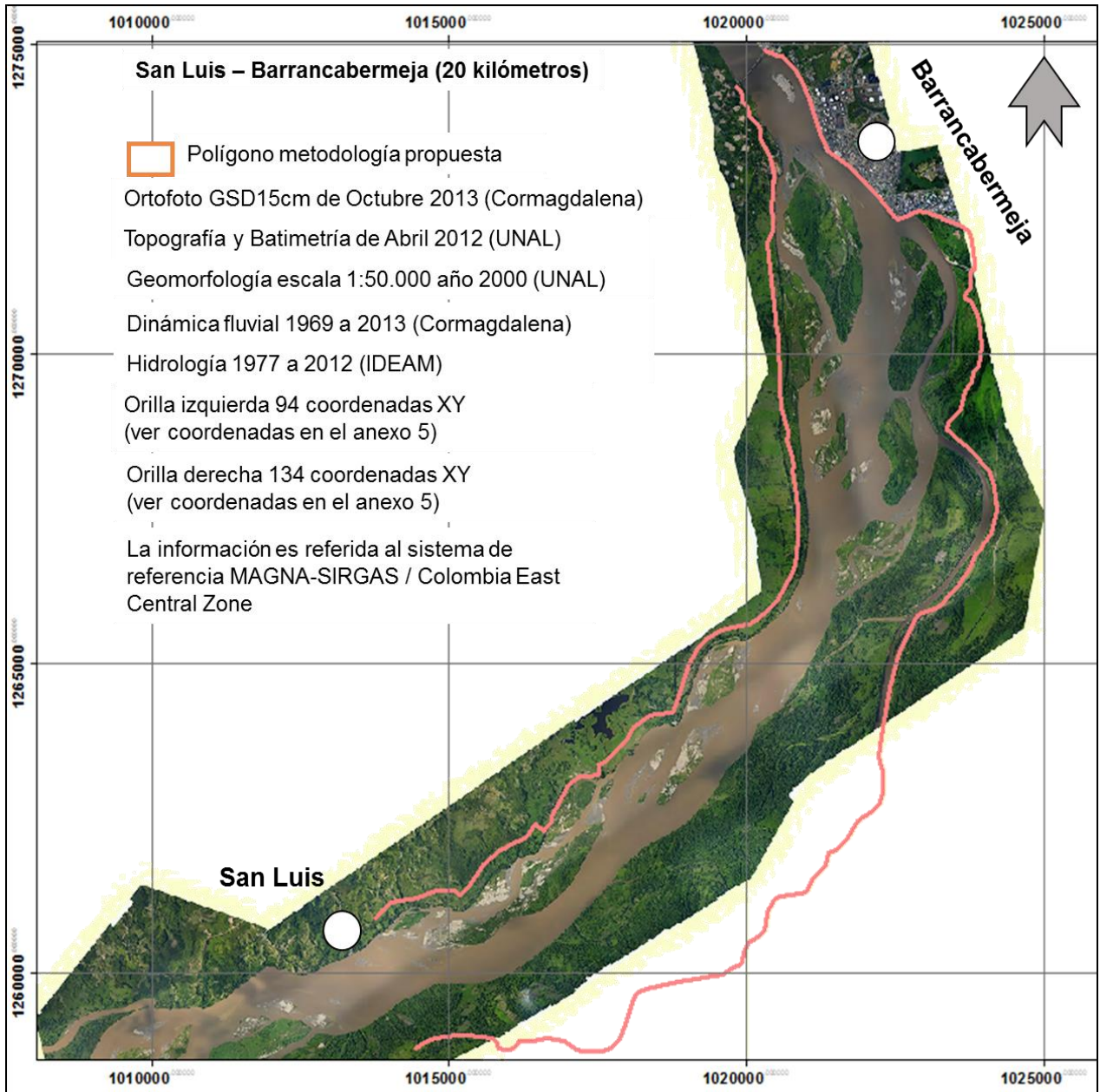
Con el polígono final definido por medio de la envolvente, se procede a establecer las coordenadas XY del límite de la orilla izquierda y la orilla derecha que establece la ronda hídrica del sector de estudio.

Se ha definido que la distancia de separación entre cada coordenada debe estar de acuerdo con la precisión de los levantamientos batimétrico y topográficos. Para este caso la distancia supuesta será de 200 metros. Mediante la utilización del comando "Mapclean" de AutoCAD Civil 3D se estableció la separación indicada y como resultado arrojó que la lista de coordenadas por la orilla izquierda la comprende 94 puntos y la orilla derecha comprende 134 puntos.

En el Anexo 5, se presenta la tabla de coordenadas planas XY que define la ronda hídrica del río Magdalena en el sector entre San Luis y Barrancabermeja. La información es referida al sistema de referencia MAGNA-SIRGAS / Colombia East Central Zone.

Finalmente La Figura 36 muestra el mapa del resultado de la propuesta metodológica, indicando el límite de la ronda hídrica del río Magdalena en el sector entre San Luis y Barrancabermeja.

Figura 36 Mapa de la ronda hídrica del río Magdalena en el sector entre San Luis y Barrancabermeja



Fuente: Elaboración propia mediante el programa ArcGis

5.2 Ronda hídrica según normatividad actual

Según la normatividad actual que establece los parámetros para definir la ronda hídrica de un cauce natural, descrita detalladamente en el sub capítulo 1.3, se establecerá una faja paralela a la línea del cauce natural hasta de 30 metros de ancho.

El artículo 11 del decreto Ley 1141 de 1978 establece que se entiende por cauce natural la faja de terreno que ocupan las aguas de una corriente al alcanzar sus niveles máximos por efecto de las crecientes ordinarias; y por lecho de los depósitos naturales de aguas, el suelo que ocupan hasta donde llegan los niveles ordinarios por efectos de lluvias o deshielo.

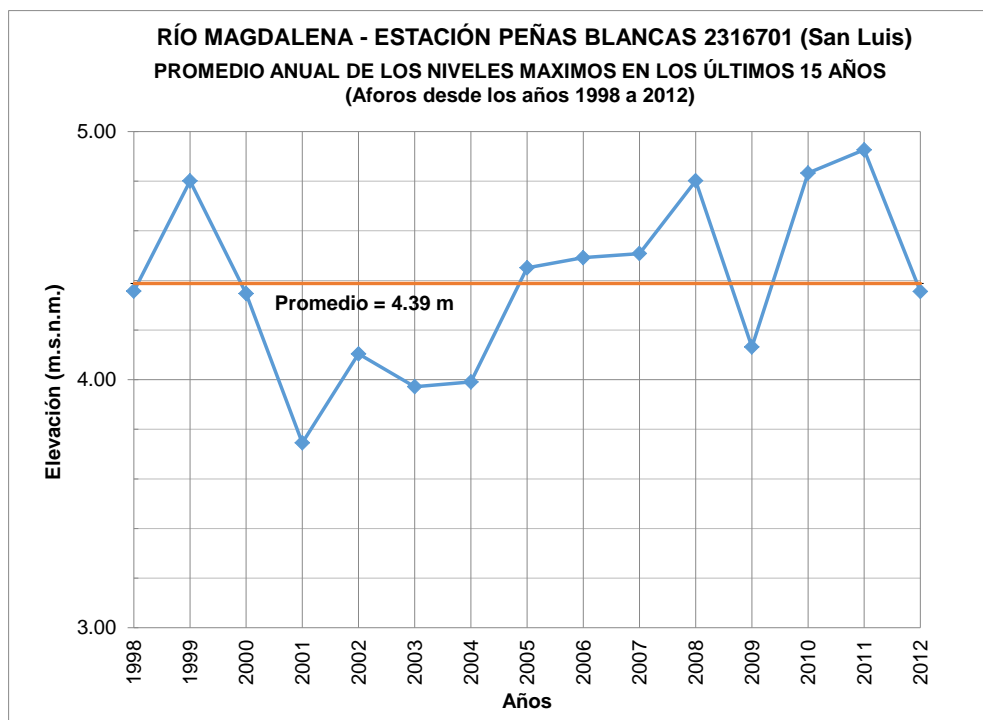
El mismo decreto Ley 1141 de 1978, establece en el artículo 13 que para los efectos de la aplicación del artículo anterior, se entiende por líneas o niveles ordinarios las cotas promedio naturales de los últimos quince (15) años tanto para las más altas como para las más bajas.

Por medio de la información hidrológica de la estación San Luis operada por el IDEAM, (Ver anexo 2) se estableció el promedio de los últimos quince años de registros de los niveles máximos anuales en la estación de Peñas blancas desde el año 1997 hasta el año 2012, último año en que se tiene registros. La información fue procesada mediante MS Excel y en la Determinado este nivel promedio de acuerdo a lo descrito en el artículo 13 del decreto Ley 1141 de 1978, el cual se admite como un nivel de agua promedio que le corresponde a una sección transversal del río. La normatividad actual no establece cual es el procedimiento a seguir con el nivel promedio establecido. Con el objetivo de realizar una comparación de los resultados, se van a realizar la siguientes 3 suposiciones: (i) El nivel de agua promedio de los últimos 15 años corresponde a un límite cuyo caudal que genera este nivel es el mismo que determina el cauce natural, (ii) el caudal correspondiente al nivel de agua promedio establecido, se obtendrá mediante la curva de calibración de caudales vs niveles de la misma estación y (iii) se deberá realizar una modelación hidráulica en una dimensión del caudal estimado anteriormente, cuyo resultado será la estimación de una mancha de inundación en el sector de estudio que represente particularmente el promedio de los niveles más altos de los últimos 15 años.

Figura 37 se presenta una gráfica con las cotas promedio anuales de los niveles más altos registrados en los últimos 15 años, obteniendo como promedio el nivel ordinario de 4.39 metros.

Determinado este nivel promedio de acuerdo a lo descrito en el artículo 13 del decreto Ley 1141 de 1978, el cual se admite como un nivel de agua promedio que le corresponde a una sección transversal del río. La normatividad actual no establece cual es el procedimiento a seguir con el nivel promedio establecido. Con el objetivo de realizar una comparación de los resultados, se van a realizar la siguientes 3 suposiciones: (i) El nivel de agua promedio de los últimos 15 años corresponde a un límite cuyo caudal que genera este nivel es el mismo que determina el cauce natural, (ii) el caudal correspondiente al nivel de agua promedio establecido, se obtendrá mediante la curva de calibración de caudales vs niveles de la misma estación y (iii) se deberá realizar una modelación hidráulica en una dimensión del caudal estimado anteriormente, cuyo resultado será la estimación de una mancha de inundación en el sector de estudio que represente particularmente el promedio de los niveles más altos de los últimos 15 años.

Figura 37 Niveles máximos de los últimos 15 años en la estación Peñas Blancas

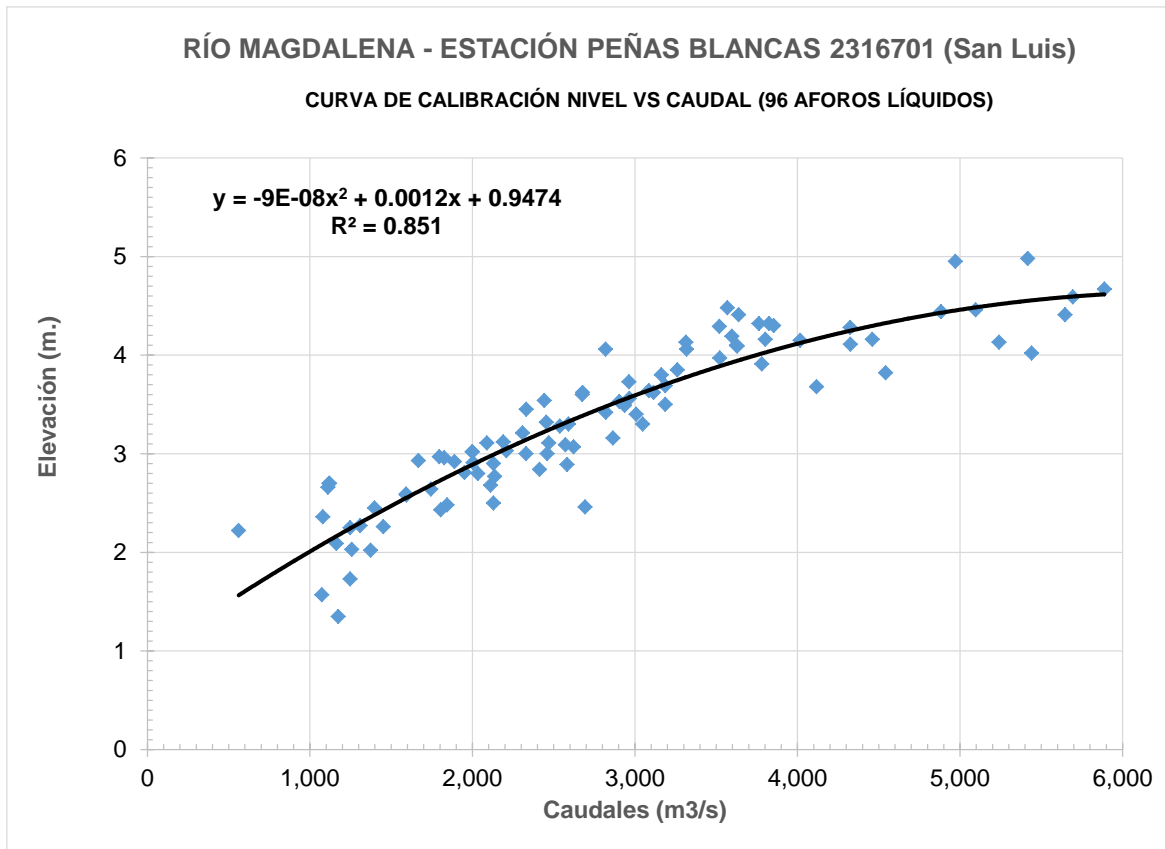


Fuente: Elaboración propia con datos de la estación hidrológica No. 2316701 del IDEAM

De acuerdo con lo anterior, en la estación Peñas Blancas se cuenta con 98 aforos líquidos, los cuales permitieron realizar Figura 38 y establecer la curva de calibración de la estación y por medio de esta, obtener el caudal que genera el nivel de agua de 4.39 metros correspondiente al promedio de los niveles máximos en los últimos 15 años.

La ecuación de regresión polinomial que genera la curva de calibración, arroja como resultado que el nivel de agua de 4.39 metros es producido por un caudal de 4.176 m³/s.

Figura 38 Curva de calibración Nivel vs Caudal estación Peñas Blancas



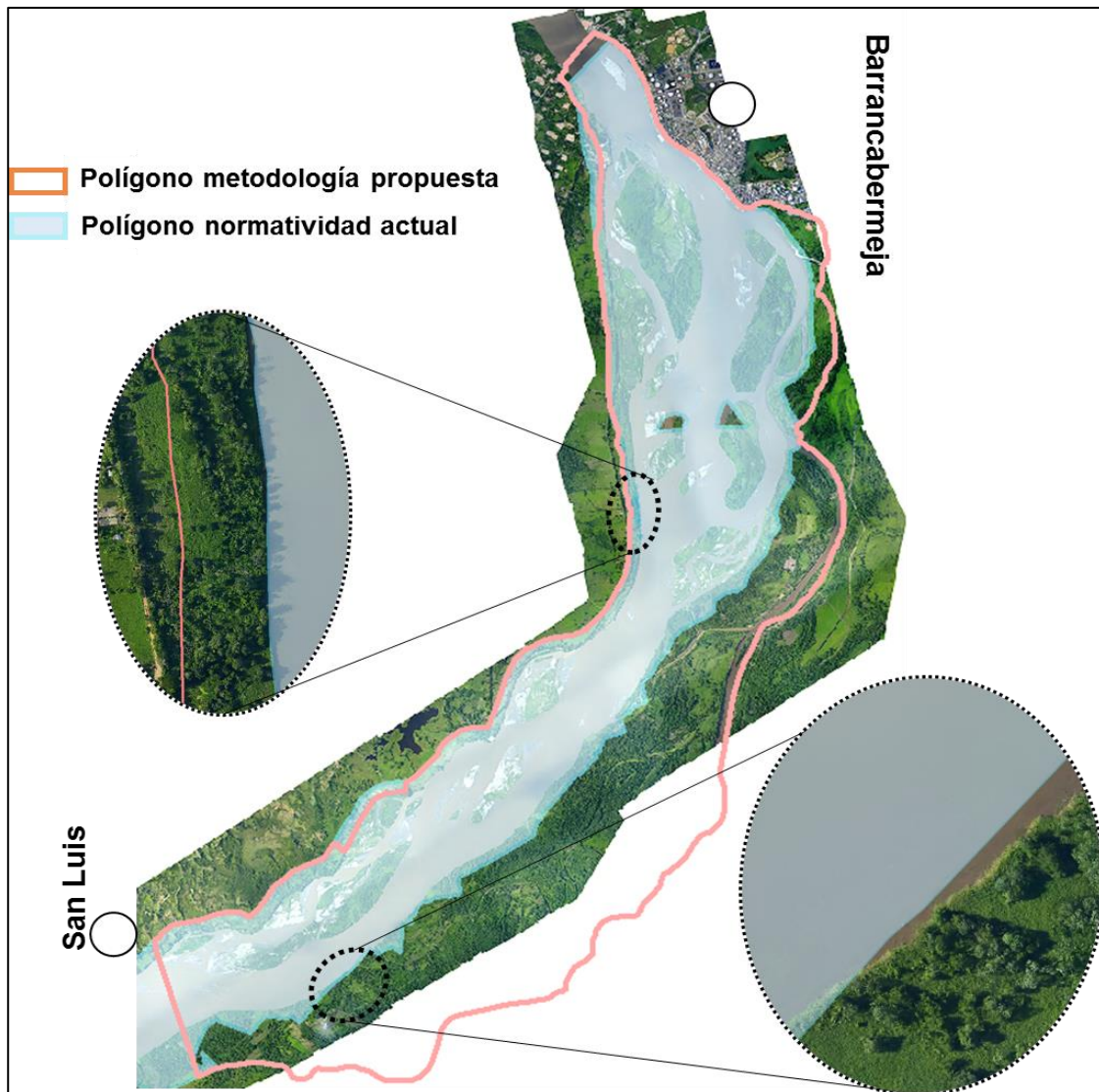
Fuente: Elaboración propia con datos de la estación hidrológica No. 2316701 del IDEAM

El caudal estimado fue modelado hidráulicamente en una dimensión mediante el programa computacional Hec Ras con las características descritas en el sub capítulo 4.3.2. El resultado de la mancha de la lámina de agua producida por el caudal de 4.176 m³/s en el sector entre San Luis y Barrancabermeja se presenta en la siguiente Figura 39.

Las tres suposiciones realizadas para comprender la normatividad actual y poder obtener un resultado comparativo con la metodología propuesta, evidencia 2 sectores (ver Figura

39) en que el polígono que es definido por la ronda hídrica con los planteamientos de la normatividad actual, está dentro del cauce natural. Los óvalos indicados en color negro sobre la figura, demuestra que se genera una incertidumbre de los resultados obtenidos, pues no es conveniente que la ronda hídrica de un río quede expuesta a la dinámica natural de un cauce y a los procesos de erosión y sedimentación de las orillas.

Figura 39 Mapa resultante del análisis hidráulico según normatividad actual entre San Luis y Barrancabermeja.



Fuente: Elaboración propia mediante el programa ArcGis 10.2.2

5.3 Límite de zona de utilidad pública e interés social definido por Cormagdalena

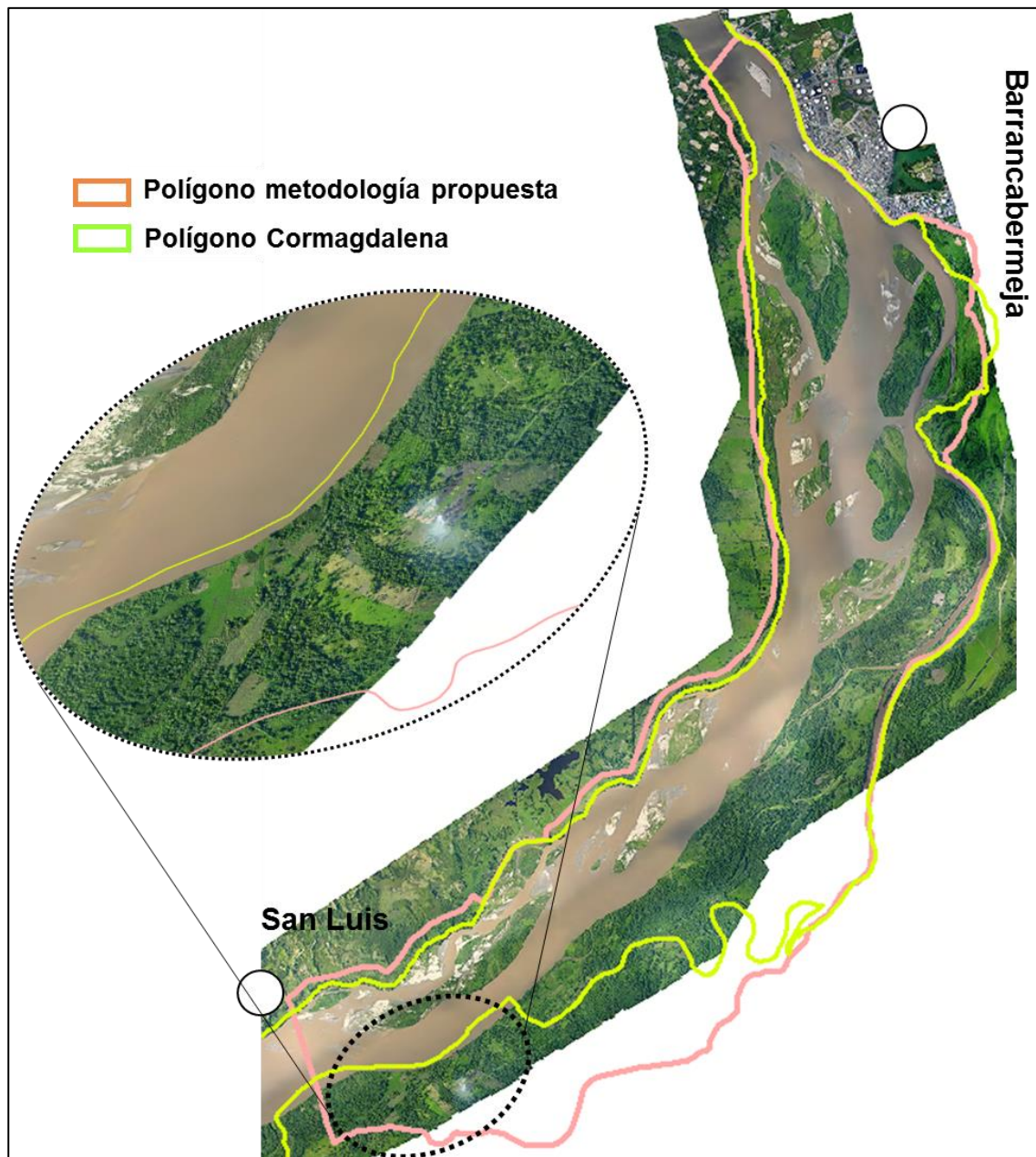
Mediante la resolución 54 del 18 de febrero de 2014, Cormagdalena declara de utilidad pública e interés social el Proyecto de Recuperación de la Navegabilidad en el Río Magdalena, estableciendo una lista de coordenadas XY que delimitan la faja de terreno paralela a línea del cauce en todas sus márgenes de 30 metros de ancho, en el tramo comprendido entre Puerto Salgar hasta Barrancabermeja.

Este límite es definido con base en el literal d) del artículo 83 de la Ley 2811 de 1974 y a los artículos 19 y 57 de la Ley 1682 de 2013 que establece los motivos que dan lugar a la declaratoria de utilidad pública e interés social y es consecuente con lo establecido en el Plan Nacional de Desarrollo 2010 – 2014 y el documento Conpes 3758 del 6 de agosto de 2013.

Con el objetivo de examinar el límite establecido por Cormagdalena y compararlo con los resultados obtenidos por la propuesta de este documento, solo se va a utilizar la información correspondiente al sector entre San Luis y Barrancabermeja. En la siguiente Figura 40 se presenta el polígono en color verde definido por las coordenadas del Anexo 1 de la resolución 54 del 18 de febrero de 2014, identificando un sector sobre la orilla opuesta a la población de San Luis, en que el polígono establecido a principios del año 2014 queda sobrepuesto sobre el cauce de la ortofoto de octubre del año 2013.

Lo anterior demuestra la importancia en la calidad de la información con la cual se realizan los análisis, no es lógico que el límite establecido por el polígono quede dentro del cauce al cual se pretende establecer como una zona de utilidad pública e interés social. La entidad Cormagdalena deberá revisar la información primaria utilizada y la metodología desarrollada para establecer las coordenadas que delimitan dicho polígono.

Figura 40 Mapa de faja de zona de utilidad pública e interés social entre San Luis y Barrancabermeja



Fuente: Elaboración propia con información de la resolución 54 del 18 de febrero de 2014 de Cormagdalena

Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones

La propuesta metodológica para la definición del límite de la ronda hidráulica de la cuenca media del río Magdalena, sector de análisis y prueba piloto entre San Luis y Barrancabermeja, alcanza resultados satisfactorios en el procedimiento de cálculo para estimar el caudal formador que determina el cauce permanente.

Los resultados obtenidos permitieron confirmar: la calidad de información base utilizada, identificar contradicciones sobre conceptos hidráulicos en el instante de aplicar la normatividad que define la ronda hidráulica, plantear nuevos temas de investigación y recomendar que este documento pueda ser de interés general para las entidades competentes en recursos hídricos y para la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD).

La información de campo entregada por Cormagdalena permitió comparar los resultados obtenidos de la modelación hidráulica. Adicionalmente la compactibilidad del software utilizado permitió una fácil interacción y presentación gráfica de los resultados.

Se identificó que la información que presenta el IDEAM referente a la cota cero de la mira de la estación Peñas Blancas, en San Luis, esta errada y no se puede confiar en la información entregada referente a la información del histórico de los movimientos del cero de la mira. Esto se evidenció mediante información de otros estudios del sector de análisis, los cuales permitieron realizar una regionalización de caudales y posteriormente con una verificación mediante la modelación hidráulica.

La metodología propuesta, tiene carácter académico. En caso de materializar los resultados, se requieren estudios adicionales de geomorfología y de dinámica fluvial, y serán bajo responsabilidad de terceros utilizar las derivaciones de este documento.

El Código Civil colombiano, Artículos 713 al 723, establece unos criterios para definir y otorgar nuevas áreas de terreno a los dueños de propiedades en riveras por concepto de accesión por Aluvión, de acuerdo con el aumento de terreno que recibe la ribera de un río por el lento e imperceptible retiro de las aguas. Estos artículos deben ser revisados y analizados por un profesional competente en áreas del derecho público, y compararlo con

lo expresado en la Ley 2811 de 1974, en la cual expresa que las áreas de uso público, son bienes inalienables e imprescindibles del Estado.

La ley 2811 de 1974 y el decreto Ley 1541 de 1978, definen un concepto hidráulico utilizando tres términos que pueden ser interpretadas de forma diferente: Cauce Natural, Mareas Máximas y Cauce permanente. Se recomienda que la normatividad colombiana, unifique las definiciones de conceptos hidráulicos empleados y que separe los conceptos hidráulicos marítimos con los conceptos hidráulicos fluviales.

Adicionalmente, se debe avanzar en la definición de conceptos técnicos de Geomorfología y Dinámica Fluvial, insistiendo que los conceptos técnicos o quienes apoyen en la definición, apaleen a las variables de tiempo y espacio, al tratarse de conceptos sobre unos de los fenómenos más variables de la naturaleza, como lo son los ríos.

El alcance de la investigación y la descripción cronológica de la normatividad colombiana, no logró determinar porqué la ley expresa en su definición que la ronda hídrica debe ser una faja de hasta 30 metros y no 5 metros o 100 metros. En la investigación normativa en los 6 diferentes países, se determinó que Chile y México, también utilizan sin expresar un criterio claro, una unidad de medida de hasta 10 metros después de definir la zona de cauce. Se recomienda que el argumento debe ser investigado profundamente mediante el concepto de accesión pos aluvión en el libro número 2 del Código Civil Chileno y en los libros 4, 5 y 6 de Alfonso Decimo El Sabio, que hacen referencia al Derecho Civil en el cual se inspira en la doctrina del Derecho Romano Agustiniiano.

El Ministerio de Ambiente y desarrollo Sostenible desarrollo el proyecto de la “Modelación hidrológica e hidráulica y el análisis geomorfológico, ecosistémico y socioeconómico de las zonas urbanas y suburbanas de los municipios ribereños del río Magdalena en su cuenca alta y media, en desarrollo del proyecto piloto que tiene por objeto el acotamiento de la ronda hídrica y la identificación de zonas de riesgo por inundación. Segunda Etapa de la Fase II”.⁴⁷ El proyecto fue entregado en el abril de 2015 y la primera conclusión sobre la definición de la ronda hídrica fue que “la metodología aplicada para determinar la

⁴⁷ Estudio realizado por la empresa Hidroconsulta SAS mediante el CONTRATO No. 513/14, 5 de noviembre de 2014

ronda hídrica, aún se encuentra en etapa de evaluación, siendo el presente estudio un elemento de diagnóstico de su aplicación en una situación real”.

El cálculo del caudal formador que establece el cauce permanente en el sector entre San Luis y Barrancabermeja, arrojó un resultado acertado mediante la comprobación con el modelo hidráulico en una dimensión. Este caudal es representativo en la curva de duración de caudales medios, y corresponde a los caudales que son superados o igualados el 13% del tiempo. Será objeto de otro estudio, aplicar esta metodología propuesta en las 11 estaciones limnigráficas existentes entre Puerto Salgar y El Banco, para determinar el caudal que represente el cauce permanente sobre la cuenca media del río Magdalena.

El modelo hidráulico en una dimensión, limita la precisión de los resultados del polígono definido en el componente de hidrología e hidráulica, con la información disponible de los modelos digitales de terreno, se pueden generar mallas de información con detalle y mediante el uso de modelos hidráulicos en dos o tres dimensiones, permitan modelar más características hidráulicas conjuntamente y obtener resultados con mayor precisión.

El límite del polígono que corresponde a la envolvente que define la ronda hídrica según la propuesta metodológica, se realizó con información de campo e hidrológica hasta el año 2012. Con el objetivo de verificar el resultado con información más reciente, se superpuso el polígono en una ortofoto del sector de estudio del abril del año 2015⁴⁸ y se determinó que de acuerdo con la dinámica fluvial del río en los últimos tres años, el polígono definido no interfiere el cauce natural, confirmando que la ronda hídrica conserva su objetivo final, el cual consiste en mantener un franja no constante ni paralela a la orilla del río y de esta forma considerar las variaciones de la dinámica natural del cauce, contrario a lo propuesto en la normatividad vigente.

En caso de aplicar la metodología propuesta en la cuenca media del río Magdalena o en otros ríos, se deberá tener en cuenta la clasificación y estructura hidrográfica para la planificación y manejo del recurso hídrico de acuerdo al Decreto 1640 de 2012, coherente

⁴⁸ Actualmente la información de referencia está en proceso de ser oficial y se podrá consultar en la página web de Cormagdalena

con la PNGIRH⁴⁹, entidad encargada de la estructura, planificación, ordenación y manejo de cuencas hidrográficas y acuíferos en cuatro niveles según la clasificación de los ríos y la escala de la información.

Los programas computacionales utilizados: AutoCAD Civil 3D, Arc Gis, Geo Ras y Hec Ras, permiten establecer un conjunto de herramientas técnicas que son compatibles entre sí, logrando que el procesamiento de la información no requiera experticia ni profundidad en el conocimiento del software.

A partir de este documento, se recomienda iniciar una investigación sobre las consecuencias jurídicas que puede tener la definición del límite de la ronda hídrica o zonas de uso público cuando éste afecte predios privados.

Esta metodología establece un procedimiento de cálculo con énfasis en la hidrología e hidráulica para determinar el límite que define la zona de ronda hídrica en la cuenca media del río Magdalena, la cual puede ser la base de un análisis, y el complemento de estudios posteriores para determinar un procedimiento de cálculo en la cuenca baja del río Magdalena o para otros ríos del país. Adicionalmente dentro del polígono definido, se recomienda desarrollar estudios de evaluación de riesgos contra inundación.

Se recomienda a Cormagdalena revisar la metodología propuesta en este documento, valer de la adecuada información de campo disponible y proporcionar un beneficio adicional en los Planes de Ordenamiento Territorial sobre las riberas de la cuenca media del río Magdalena, debido a que puede pasar tiempo no calculado para que finalmente se modifique la normatividad colombiana referente a los procedimientos para definir la ronda hídrica de un río.

⁴⁹ Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible – MAVDT -PNGIRH. (2010).

Bibliografía

Andrews, E. D. (1980). "Effective and bankfull discharge of streams in the Yampa basin, western Wyoming," *Journal of Hydrology* 46, 311-330

Biasco Emilio (sin fecha). El régimen jurídico de las riberas en el derecho Uruguayo - Uso común y privativo de aguas y álveos - Protección de la franja costera. Trabajo presentado a la XL Jornada Notarial Uruguaya: Prof. Esc. Hebert Curbelo Urroz.- Colonia: 5, 6 y 7.XI.1999.- *Revista de la AEU*, t. 86, Nº 1-6, p. 77-12 gislación que eficacia.

Biedenharn, D. S., Copeland, R. R., Thorne, C. R., Soar, P. J., Hey, R. D., and Watson, C. C. (2000). "Effective discharge calculation: A practical guide," Technical Report, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS

Botero, V. (1929). Régimen Legal de aguas en Colombia Tomo I. Bogotá: Editorial Águila. Págs. 327 a 346

Centro de Investigación Científica del Río Magdalena Alfonso Palacio Rudas – CIRMAG (2016). Modelación Hidráulica Entrada Adicional de Caudal al Río Magdalena en Puerto Salgar (Simulación Posibles Escenarios de Regulación Sistema Betania/Quimbo). Disponible en: http://dc02eja.cormagdalena.com.co/recursos_user/Informe%20Niveles%20Bajos%20RM%20ag.pdf

Copeland, R. R., Biedenharn, D. S., Thorne and Fischenich J.C. (2000) "Channel-Forming Discharge," Technical Report, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS

Cormagdalena - FFEM. (2006) "Plan de manejo de la cuenca del río Magdalena primera fase", con el apoyo de Jaime Iván Ordóñez y Raquel Duque.

Cormagdalena. (2007). "Estudios y diseños de obras de encauzamiento del río Magdalena en el sector comprendido entre Puerto Berrío y Barrancabermeja" elaborado por la empresa Boada Sáenz Ingenieros para Cormagdalena y Fedenavi.

Cormagdalena. (2009). "Diseños de Obras de Encauzamiento del Río Magdalena en el Tramo San Luis - Barrancabermeja para la Estabilización del Acceso al Puerto, elaborado por Emdepa Consultoría S.A. para Cormagdalena en el año 2007

Cormagdalena. (2012). "Actualización de los Estudios y diseños de obras de encauzamiento del río Magdalena en el sector comprendido entre Puerto Berrío y Barrancabermeja". Elaborado por la empresa IEH Grucón S.A. para Cormagdalena y Fedenavi.

Cormagdalena (2013) Caracterización física, demográfica, social y económica de los municipios ribereños de la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena

Corporación Andina de Fomento – CAF (2014). La hidrovía del río Magdalena y los cursos de acción para fortalecer su aporte en la construcción de la integración fluvial sudamericana. Bogotá - Colombia.

Federal Emergency Management Agency - FEMA. (1998). Flood Insurance Study Guidelines and Specifications for Study Contractors. EEUU: FEMA.

Federal Emergency Management Agency. (2009). Appendix C: Guidance for Riverine Flooding Analyses and Mapping. En FEMA, Guidelines and Specifications for Flood Hazard Mapping Partners. EEUU: FEMA

Garizado Toro, Carlos (sin fecha). Evolución del derecho de aguas en Colombia: más legislación que eficacia. Actualidad Jurídica - UNINORTE. Pp 35-43

IGAC (1923). República de Colombia, Instituto Geográfico Militar Sección 3 sala de copias. Planchas 27 y 28 con sondeos de campo sobre el río Magdalena en el año 1923 realizados por la empresa Julius Berger Konsortium.

Inglis, C. C. (1941). "Meandering of rivers," Central Board of Irrigation (India) Publication 24, 98-99

Inglis, C. C. (1947). "Meanders and their bearing on river training," Institution of Civil Engineers, Maritime and Waterways, Paper No. 7.

Ley de Aguas Nacionales, última reforma DOF (2014). Título primero, artículo 3, numeral XLVII, página 6. Chile. Disponible en: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Ley_Aguas_Nacionales.pdf

Madrid Malo, M. (2005). Diccionario de la Constitución Política de Colombia. Bogotá: 3ª edición. Librería Ediciones del Profesional Ltda.

Ministerio de Agricultura y desarrollo rural. (1994). Ley 160 de 1994 Normas que la reglamentan y la desarrollan, 441. Retrieved from http://www.incoder.gov.co/documentos/Ley160_2004.pdf

Mora Alonso-Muñoyerro, J. (2000). Ordenación del territorio e inundaciones: hacia una estrategia de defensa del territorio, respetuosa con el medio natural. I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente, 755-766

Navas. M. A. (2015). Análisis Sobre la Severidad del Fenómeno del niño 2015.

Northern Virginia Regional Commission. (2013). nvrc. Disponible en: <http://www.novaregion.org/DocumentCenter/Home/View/760>

Pickup, G., and Warner R. F. (1976). "Effects of hydrologic regime on magnitude and frequency of dominant discharge," Journal of Hydrology 29.

Poder Legislativo, Código de Agua, Artículos 35, 36 y 37. (1979). Uruguay. Disponible en: [http://www.oas.org/dsd/environmentlaw/waterlaw/documents/Uruguay-Codigo_de_Aguas_\(1992\).pdf](http://www.oas.org/dsd/environmentlaw/waterlaw/documents/Uruguay-Codigo_de_Aguas_(1992).pdf)

Rodríguez. H. A. 2010. Hidráulica Fluvial - Fundamentos y Aplicaciones - Socavación. Escuela Colombiana de Ingeniería.

Salazar H. A. (2012). PROPUESTA METODOLÓGICA PARA SU DELIMITACIÓN (Una aproximación para definir Zonas Inundables y la Restauración de ríos).

Sarache S. M. (2015). Una propuesta técnica para el fortalecimiento de la normatividad colombiana en relación con la definición de ronda hidráulica. Tesis de Magíster en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá

Toffaletti, F. B. (1968). "A procedure for computation of the total river sand discharge and detailed distribution, bed to surface," Technical Report No. 5, Committee on Channel Stabilization, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS.

UN-LEH (2000). Estudio de Geología y Geomorfología del Río Magdalena, sector Puerto Salgar – La Gloria. Cormagdalena

UN-LEH (2000). Universidad Nacional Laboratorio de Ensayos Hidráulicos. "Geología y geomorfología del río Magdalena, Sector Puerto. Salgar-La Gloria".

Wolman, M. G., and Miller, J. P. (1960). "Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes," Journal of Geology 68, 54-74

ANEXOS

Anexo 1: Respuesta del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) a consultas realizadas sobre parámetros y conceptos técnicos referentes a la definición de la ronda hídrica de un río.

Anexo 2: Registros hidrológicos del IDEAM en la estación Peñas Blancas. (23167010) – Río Magdalena.

Anexo 3: Secciones Transversales - Resultados de la modelación hidráulica.

Anexo 4: Archivo magnético en formato comprimido .ZIP del modelo hidráulico.

Anexo 5: Tabla de coordenadas XY que define la ronda hídrica del río Magdalena en el sector entre San Luis y Barrancabermeja. Sistema de referencia MAGNA-SIRGAS / Colombia East Central Zone.