



**Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA**

**Estudio para el Fortalecimiento de la Infraestructura Sanitaria de Santa
Marta para los Requerimientos Proyectados en los Próximos 50 Años**

**PRODUCTO II.2
Análisis de Alternativas de Oferta Hídrica**



**Bogotá, Colombia
Noviembre de 2014**

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	ANTECEDENTES.....	1
1.2.	ÁREA GEOGRÁFICA DE ESTUDIO	3
1.3.	OBJETIVOS	4
1.3.1.	OBJETIVO GENERAL	4
1.3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.4.	CONTENIDO DEL INFORME.....	4
1.5.	EQUIPO DE TRABAJO.....	5
2.	DELIMITACIÓN DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS	7
2.1.	MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (MDE) DE LA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA	7
2.2.	CORRECCIÓN DE IMPERFECCIONES DEL MDE	8
2.3.	DELIMITACIÓN DE CUENCAS EN ARCGIS 10.2.2	11
3.	ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LAS FUENTES DE AGUA SUPERFICIAL.....	13
3.1.	LOCALIZACIÓN DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS	13
3.2.	CLIMA DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS	23
3.3.	GEOLOGÍA DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS	27
3.4.	COBERTURA VEGETAL DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS	28
3.4.1.	SISTEMA MORFOGÉNICO DEL ÁREA GEOGRÁFICA DE ESTUDIO.....	28
3.4.2.	FUENTE DE INFORMACIÓN	29
3.4.3.	PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES	30
3.4.4.	DESARROLLO DE LA LEYENDA DE COBERTURA Y USO DEL SUELO	32
3.4.5.	GUÍAS DE COLOR PARA LA REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA.....	34
3.4.6.	RESULTADOS DE COBERTURA Y USO DEL SUELO	36
3.5.	CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LAS CUENCAS	58
3.5.1.	PARÁMETROS GENERALES DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA	58
3.5.2.	PARÁMETROS QUE CARACTERIZAN LA FORMA DE LA CUENCA.....	62
4.	ESTIMACIÓN DE CAUDALES.....	65
4.1	INFORMACIÓN HISTÓRICA DE CAUDALES MEDIOS.....	65
4.1.1	ESTACIONES CONSULTADAS	65
4.2	CAUDALES MEDIOS.....	66

4.2.1 RÍO PALOMINO	66
4.2.2 RÍO DON DIEGO	66
4.2.3 RÍO BURITACA.....	67
4.2.4 RÍO GUACHACA	68
4.2.5 RÍO PIEDRAS	68
4.2.6 RÍO GAIRA	69
4.2.7 RÍO FÍO	69
4.3 CAUDALES MÍNIMOS	70
4.3.1 RÍO PALOMINO	70
4.3.2 RÍO DON DIEGO	72
4.3.3 RÍO BURITACA.....	74
4.3.4 RÍO GUACHACA	76
4.3.5 RÍO PIEDRAS	78
4.3.6 RÍO GAIRA	80
4.3.7 RÍO FRÍO.....	82
4.4 CUADRO RESUMEN DE CAUDALES	84
5. ESTIMACIÓN DE CAUDALES POR BALANCE HÍDRICO	85
5.1 ESTIMACIÓN DE LA CURVA NÚMERO	88
5.2 CONSIDERACIONES ESPECIALES	92
5.3 CAUDALES MEDIOS MENSUALES	92
6. ALTERNATIVAS	96
6.1. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN: TEORÍA DE UTILIDAD MULTIATRIBUTO	96
7. CONCLUSIONES	147
8. BIBLIOGRAFÍA.....	148

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Localización del área geográfica en estudio	3
Figura 2.1 Cuenca Hidrográfica.....	7
Figura 2.2 Sumidero en un modelo de elevación digital del terreno.....	8
Figura 2.3 Bifurcación en un modelo de elevación digital del terreno	8
Figura 2.4 Modelo digital de elevación de la Sierra Nevada de Santa Marta	9
Figura 2.5 Modelo digital de elevación corregido por sumideros y bifurcaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta	9
Figura 2.6 Modelo de elevación digital del área geográfica de estudio	10
Figura 2.7 Dirección de flujo	11
Figura 2.8 Acumulación de flujo	11
Figura 2.9 Cuencas hidrográficas delimitadas para el área geográfica en estudio	12
Figura 3.1 Localización de la cuenca del río Córdoba	13
Figura 3.2 Localización de la cuenca del río Córdoba	14
Figura 3.3 Localización de la cuenca del río Don Diego	15
Figura 3.4 Localización de la cuenca del río Frío	16
Figura 3.5 Localización de la cuenca del río Gaira.....	17
Figura 3.6 Zona urbana de la cuenca del río Gaira	17
Figura 3.7 Localización de la cuenca del río Guachaca	18
Figura 3.8 Localización de la cuenca del río Manzanares	19
Figura 3.9 Zona urbana de la cuenca del río Manzanares	19
Figura 3.10 Localización de la cuenca del río Mendihuaca.....	20
Figura 3.11 Localización de la cuenca del río Palomino	21
Figura 3.12 Localización de la cuenca del río.....	22
Figura 3.13 Localización de la cuenca del río Toribio.....	23
Figura 3.14 Temperatura media en el mes de Enero.....	25
Figura 3.15 Temperatura media en el mes de Febrero.....	26
Figura 3.16 Temperatura media en el mes de Marzo	26
Figura 3.19 Mosaico imágenes LANDSAT 8.....	30
Figura 3.20 Área de trabajo con el DEM y HillShade para verificar la delimitación de cuencas...	31
Figura 3.4.6.1 Clasificación realizada del mosaico Landsat. sobre Hill Shade.....	36
Figura 3.4.6.2 Leyenda de cobertura vegetal	37
Figura 3.4.6.3 Distribución por área de las diferentes coberturas.....	37
Figura 3.4.6.4 Variaciones en las plantaciones forestales y núcleos urbanos al oriente de la zona de trabajo.....	43
Figura 3.4.6.5 Diferencias en las masas glaciares a la izquierda la imagen 2014, a la derecha imagen 2000	44
Figura 3.4.6.6 Panorámicas de tejido Urbano continuo y discontinuo.....	48
Figura 3.4.6.7 Clasificación de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat 2014 para la cuenca del río Buritaca.....	51
Figura 3.4.6.8 Clasificación de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat 2014 para la cuenca del río Córdoba.....	52

Figura 3.4.6.9. Clasificación de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat 2014 para la cuenca del río Don Diego.....	52
Figura 3.4.6.10 Clasificación de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat 2014 para la cuenca del río Frío.....	53
Figura 3.4.6.11 Clasificación de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat 2014 para la cuenca del río Gaira	53
Figura 3.4.6.12 Clasificación de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat 2014 para la cuenca del río Guachaca.....	54
Figura 3.4.6.13 Clasificación de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat 2014 para la cuenca del río Mendihuaca.....	54
Figura 3.4.6.14 Clasificación de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat 2014 para la cuenca del río Palomino	55
Figura 3.4.6.15 Clasificación de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat 2014 para la cuenca del río Piedras.....	55
Figura 3.4.6.16 Clasificación de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat 2014 para la cuenca del río Toribio	56
Figura 3.4.6.17 Clasificación de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat 2014 para la cuenca del río Manzanares	56
Figura 3.4.6.18 Longitud de una cuenca hidrográfica.....	59
Figura 3.4.6.19 Mapa de Centroides de las Cuencas Hidrográficas.....	62
Figura 3.4.6.20 Forma de la cuenca según el coeficiente de compacidad (Kc)	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del Modelo de Elevación Digital Global de ASTER	7
Tabla 2. Estaciones climatológicas del IDEAM tenidas en cuenta para el cálculo de la temperatura media mensual multianual en el área geográfica de estudio	24
Tabla 3. Estaciones climatológicas del IDEAM tenidas en cuenta para el cálculo de la temperatura media mensual multianual en el área geográfica de estudio	25
Tabla 4. Características de las imágenes LANDSAT 8 recolectadas	29
Tabla 5. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra - Colombia	33
Tabla 6. Guía de color para el nivel I de la metodología CORINE land Cover.	34
Tabla 7. Guía de color para el nivel II de la metodología CORINE land Cover.	34
Tabla 8. Guía de color para el nivel III de la metodología CORINE land Cover	35
Tabla 9. Unidades de coberturas de la tierra para los bosques y áreas seminaturales	38
Tabla 10. Unidades de coberturas de la tierra para las áreas húmedas.....	39
Tabla 11. Unidades de coberturas de la tierra para las superficies de agua	40
Tabla 12. Unidades de coberturas de la tierra para las áreas húmedas.....	50
Tabla 13. Área de las cuencas hidrográficas	58
Tabla 14. Clasificación de una cuenca con respecto a su área	58
Tabla 15. Perímetro de las cuencas hidrográficas	59
Tabla 16. Longitud de las cuencas hidrográficas	60
Tabla 17. Longitud del cauce principal de las cuencas hidrográficas	60
Tabla 18. Ancho de las cuencas hidrográficas	61
Tabla 19. Desnivel altitudinal de las cuencas hidrográficas.....	61
Tabla 20. Coordenadas del centroide de las cuencas hidrográficas	61
Tabla 21. Coeficiente de Compacidad (Kc) de las cuencas hidrográficas	63
Tabla 22. Clasificación de las cuencas hidrográficas según su valor de Kc	63
Tabla 23. Factor de forma (Kf) de las cuencas hidrográficas.....	64
Tabla 24. Caudales medios mensuales en el río Palomino.....	66
Tabla 25. Caudales medios mensuales del río Don Diego	67
Tabla 26. Caudales medios mensuales del río Buritaca	67
Tabla 27. Caudales medios mensuales del río Guachaca	68
Tabla 28. Caudales medios mensuales del río Piedras	68
Tabla 29. Caudales medios mensuales del río Gaira.....	69
Tabla 30. Caudales medios mensuales del río Frío	70
Tabla 31. Resumen de caudales	84
Tabla 32. Áreas aferentes de las estaciones pluviométrias.....	85
Tabla 33. Precipitación mensual multianual	86
Tabla 34. Evapotranspiración potencial mensual.....	86
Tabla 35. Evapotranspiración potencial y real mensual	87
Tabla 36. Área de cada tipo de suelo de los Ríos Toribio y Cordoba	89
Tabla 37. Cobertura vegetal Río Córdoba.....	89
Tabla 38. Cobertura vegetal Río Córdoba.....	90
Tabla 39. Balance Hídrico Río Córdoba, área bajo influencia de la estación San Lorenzo	92
Tabla 40. Balance Hídrico Río Córdoba, área bajo influencia de la estación Vita Nieves.	93
Tabla 41. Caudales ofertados del Río Córdoba.....	93

Tabla 42. Balance Hídrico Río Toribio, área bajo influencia de la estación San Lorenzo.....	94
Tabla 43. Balance Hídrico Río Toribio, área bajo influencia de la estación Vista Nieves	94
Tabla 44. Caudales ofertados del Río Córdoba.....	95
Tabla 6.1. Pesos de los atributos	101
Tabla 6.2. Caudales de ríos	102
Tabla 6.3. Resultados de los atributos para cada alternativa.....	136
Tabla 6.4. Resumen de los valores para análisis de alternativas (a).....	137
Tabla 6.5. Resumen de los valores para análisis de alternativas (b)	137

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento contiene el informe correspondiente a la Tercera Etapa del proyecto “Estudio para el Fortalecimiento de la Infraestructura Sanitaria de Santa Marta para los Requerimientos Proyectados en los Próximos 50 Años”. Esta etapa consistió en la evaluación de la oferta hídrica disponible en 11 de los 30 ríos principales de la Sierra Nevada de Santa Marta, para el posible abastecimiento de la ciudad de Santa Marta y las localidades de Taganga, Bonda y El Rodadero. Asimismo, durante esta etapa se realizó el planteamiento y evaluación preliminar de alternativas de abastecimiento para cumplir con la demanda proyectada para los próximos 50 años en el área geográfica en estudio.

La primera fase de esta etapa del proyecto consistió en realizar un estudio hidrológico de las cuencas hidrográficas aferentes a los ríos Palomino, Don Diego, Buritaca, Guachaca, Mendiaguaca, Piedras, Manzanares, Gaira, Toribio, Córdoba y Frío, considerados como fuentes potenciales de recurso hídrico para ser utilizadas en el incremento en la oferta de agua potable en la región. Como resultado, se estimó un caudal promedio disponible en cada río y un caudal mínimo probable para así caracterizar la confiabilidad y la conveniencia de cada uno de los ríos estudiados como posible fuente de abastecimiento.

Posteriormente, en la segunda fase de esta etapa se propusieron 7 alternativas para el suministro de agua potable a lo largo de los próximos 50 años. El método utilizado para la evaluación de alternativas planteadas se basó en la Teoría de Utilidad Multiatributo (MAUT). Este método permitió evaluar el desempeño de cada una de las alternativas frente a 16 criterios de evaluación definidos para medir la rapidez de la solución en términos de cumplimiento de punto de equilibrio entre la oferta y demanda de agua y en tiempo de entrada de la primera fase de la solución, la confiabilidad del sistema, los costos de implementación, la factibilidad desde el punto de vista de los indígenas presentes en la zona, el impacto ambiental, entre otros.

Por último, como resultado de este producto se presenta la alternativa con mejor desempeño en la mayoría de criterios evaluados, y que por lo tanto, al ser la alternativa que presenta la mayor utilidad es la recomendada para mejorar las condiciones del sistema de abastecimiento, que a su vez permite su sostenibilidad a lo largo del periodo de análisis.

1.1. ANTECEDENTES

La ciudad de Santa Marta y las localidades de Taganga, Bonda y el Rodadero se abastecen en la actualidad de agua potable proveniente de los ríos Manzanares, Gaira y Piedras y del acuífero de Santa Marta. Estos ríos nacen en la Estrella Hídrica de San Lorenzo y desembocan en el mar Caribe. A causa del régimen hidrológico de la región, del efecto antrópico sobre las cuencas afrentes a estos ríos y del incremento en la población servida, se presenta escasez de recurso hídrico en algunos periodos del año, debido a que el caudal que se puede extraer de estas fuentes hídricas no es suficiente para cumplir con los requerimientos de agua en captación.

Previendo este problema, la empresa METROAGUA S.A. E.S.P. operadora del sistema de acueducto de la ciudad de Santa Marta, ha ejecutado durante los últimos años distintos proyectos para el fortalecimiento de la infraestructura del sistema de abastecimiento de la ciudad, alcanzando un 79% de cobertura de la red de distribución de agua potable. Pese a esto, aún no se ha logrado el porcentaje mínimo de cobertura establecido en 85.5%.

El problema enunciado con anterioridad ha sido una constante en la ciudad de Santa Marta y en las localidades de Taganga, Bonda y el Rodadero. Lo anterior se refleja en los diferentes estudios que se han llevado a cabo desde hace más de 25 años con el objetivo de evaluar la oferta hídrica de las fuentes de agua superficial aledañas a la ciudad y determinar el caudal de extracción sostenible en el acuífero de Santa Marta.

El primer estudio llevado a cabo por Calderón (1986), evaluó distintas alternativas de abastecimiento, estableciendo como alternativa factible desde un punto de vista económico y técnico, era abastecer de agua a la ciudad de Santa Marta realizando una captación en el río Guachaca a filo de agua en la cota 250. En un estudio posterior, Calderón (1988) analiza las fuentes potenciales de explotación para el abastecimiento del sistema de acueducto de la ciudad de Santa Marta. En este estudio, se propusieron 10 alternativas distintas para explotar el caudal del río Guachaca y una para explotar el caudal río Frío. Sin embargo, en este estudio no se tuvieron en cuenta los efectos del cambio climático y los fenómenos climáticos al momento de estimar la oferta hídrica mensual. Luego, Calderón (1988) propone diferentes alternativas de diseño para el abastecimiento de agua potable a partir del río Guachaca. Dicho diseño comprendía el sistema de captación, sistema de desarenación, estaciones de bombeo, conducción, diseño de la planta de tratamiento, programación de la obra y costos de inversión.

En 1998, Triple A consultores (1998) propone la captación de un caudal de $4.65\text{m}^3/\text{s}$ del río Magdalena y dos plantas de tratamiento que deberían ser construidas para este caudal. El objetivo principal del proyecto era presentar una nueva alternativa que permitiera suplir los requerimientos de agua potable de la ciudad de Santa Marta. Consultores del desarrollo S.A. (2000) realiza un estudio con el fin de definir las diferentes alternativas o posibles fuentes de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Santa Marta. Las 5 alternativas que se estudiaron fueron: suministro de agua potable desde el río Magdalena; buques cisterna, la cual fue descartada; aprovechamiento del río Guachaca; construcción de nuevos pozos profundos; y la combinación del río Magdalena, pozos profundos y otros ríos actualmente en explotación. La conclusión del estudio fue suministrar de agua a la ciudad aprovechando el río Guachaca.

En el año 2003, METROAGUA S.A. E.S.P. realizó un estudio que evaluaba el represamiento de los 5 cauces cercanos. Sin embargo, no se llegó a un nivel de diseño detallado ni a una elaboración de propuestas con evaluaciones presupuestales. Este estudio llegó a la conclusión de que el 50% del agua de la ciudad es extraída de los acuíferos. En ese proyecto se concluyó que la construcción de las 3 presas en los ríos Gaira, Manzanares y Quebrada Tamacá solamente ofrecería un 38% del caudal demandado. Por lo cual se considera que dicha solución requiere una inversión muy alta y podría generar grandes impactos ambientales con relación al beneficio real que traería. De otra parte, la tesis de pregrado de Gámez y Salgado (2005) sentó un precedente para la evaluación de la

oferta hídrica que compete a la ciudad de Santa Marta. Dicha tesis llegó a la conclusión de que las metodologías HIDROSIG-JAVA y los modelos ABCD, SCS, entre otros, son metodologías que pueden ser aplicadas con un grado de suficiente confianza para las cuencas que se encuentran en el territorio colombiano circundante a la cuenca del río Guachaca. Por último, Londoño y Ortíz (2005) hicieron un análisis en el cual afirman que el río Piedras es una de las alternativas más viables para abastecer los distritos de Santa Marta. Esto lo comprobaron al analizar información del IGAC y del IDEAM junto con hidroSIG, y dieron como resultado las series de caudales del río Piedras, recibiendo como insumos lluvias y evapotranspiración. Sin embargo, es necesario complementar el análisis hidrológico con el fin de discriminar el comportamiento de la cuenca durante periodos bajo influencia del Fenómeno del Niño, y así, establecer la oferta hídrica de la cuenca para periodos críticos.

1.2. ÁREA GEOGRÁFICA DE ESTUDIO

El área escogida para realizar el estudio de la disponibilidad de recurso hídrico para la ciudad de Santa Marta, se encuentra ubicada al noroccidente del departamento del Magdalena y comprende a la ciudad de Santa Marta y a los municipios de Zona bananera, Ciénaga y Dibulla. El área se encuentra circunscrita entre las latitudes 11°20'58" y 10°36'27" y las longitudes 73°08'46" y 74°17'4". Los ríos y con sus respectivas cuencas que serán analizados son el río Manzanares, Gaira, Toribio, Córdoba, Frío, Palomino, Don Diego, Buritaca, Guachaca, Mendihuaca y Piedras. Entre las localidades más importantes que se ubican dentro de la zona se encuentra El Rodadero, Gaira, Taganga, Bonda y La Esmeralda.

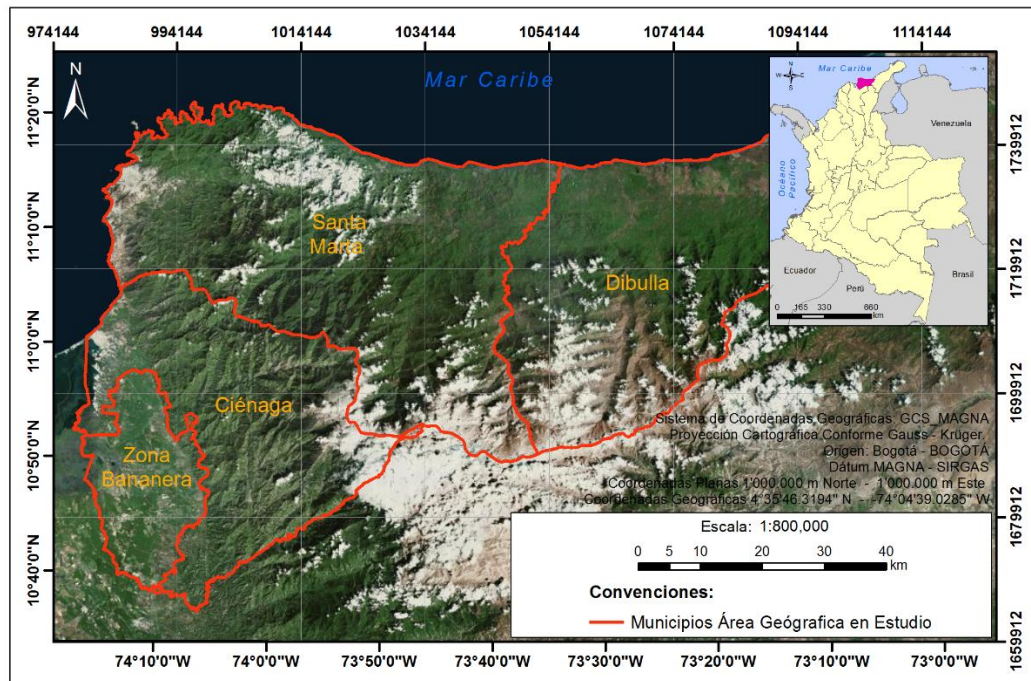


Figura 1.1 Localización del área geográfica en estudio

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Identificar las fuentes y la alternativa más conveniente para mejorar las condiciones actuales del sistema de abastecimiento de agua potable en la ciudad de Santa Marta y su Distrito Cultural y Turístico, Taganga, Bonda y El Rodadero, a partir de una comparación con otras alternativas igualmente factibles

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A fin de cumplir con el objetivo general de este producto, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Identificar las posibles fuentes de agua en las cercanías a la zona de estudio y recolectar y procesar información que permita la caracterización de la oferta de agua que cada una genera.
- Cuantificar la oferta hídrica de los ríos Córdoba, Gaira, Guachaca, Manzanares, Mendihuaca, Piedras y Toribio a partir del análisis de las cuencas de la zona de la Estrella Hídrica de San Lorenzo y los ríos que nacen en el Pico Colón como el río Buritaca, Don Diego, Frío y Palomino.
- Plantear alternativas de combinación de los diferentes cuerpos de agua para suplir la demanda en la zona de estudio para cada año del periodo de análisis.
- Evaluar las alternativas propuestas de acuerdo con una lista de criterios que se considere relevante para la selección de una alternativa apropiada.
- Establecer la combinación óptima de alternativas para el abastecimiento de agua potable para la ciudad de Santa Marta.

1.4. CONTENIDO DEL INFORME

El presente informe contiene la evaluación de alternativas de oferta hídrica para la ciudad de Santa Marta. El informe está dividido en 7 capítulos, de la siguiente forma:

Capítulo 1: Introducción al proyecto y a la primera etapa del mismo. Adicionalmente, se muestran antecedentes, objetivos y contexto del proyecto.

Capítulo 2: Descripción de la metodología de la delimitación de las cuencas hidrográficas a partir del modelo digital de elevación de la Sierra Nevada de Santa Marta utilizando ArcGIS 10.22.

Capítulo 3: Análisis hidrológico de las fuentes de agua superficial. Para desarrollar este capítulo se realizó la localización de las cuencas hidrográficas de interés y se estudió la climatología, la geología, la cobertura vegetal, los tipos de suelo y la geomorfología de la zona.

Capítulo 4: Estimación de caudales a partir de la información histórica de caudales medios de los ríos de interés.

Capítulo 5: Modelo lluvia-escorrentía para obtener valores de precipitación faltante a partir de datos de precipitación conocidos y balance hídrico.

Capítulo 6: Metodología utilizada para la evaluación de las alternativas propuestas para suplir las necesidades sanitarias de la ciudad de Santa Marta durante los próximos 50 años.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones para el proyecto de infraestructura sanitaria, con respecto a los resultados obtenidos en el análisis de oferta hídrica y a la evaluación de las alternativas propuestas.

1.5. EQUIPO DE TRABAJO

Para el desarrollo de este proyecto se cuenta con talento humano conformado por personal de la Universidad de los Andes y algunos especialistas externos asociados. El personal se constituye de profesores, especialistas externos, asistentes graduados y monitores, los cuales se encuentran agrupados según su pericia en las 5 áreas de estudios principales del proyecto: Estimación de las necesidades sanitarias, estudios antropológicos, análisis de aguas subterráneas, análisis de aguas superficiales y estudios hidráulicos. Adicionalmente se cuenta con un personal de apoyo académico para todas las áreas conformado por los monitores de investigación, y un personal de apoyo administrativo.

Personal de FINDETER S.A.

Presidente

Luis Fernando Arboleda González

Vicepresidente Técnica

Flor Haidee Álvarez Torres

Jefe de Asistencia Técnica

Alejandra Londoño González

Gerente Estructuración de Proyectos

Ivonne Manzur Barbur

Directora Dirección de Agua y Saneamiento Básico

Diana Patricia Tavera Moreno

Profesional Gerencia de Estructuración de Proyectos

Ricardo Rave

Profesional Gerencia de Agua y Saneamiento Básico

Alejandro Mejía

Profesional Gerencia de Estructuración de Proyectos

Juliana Isabel Solano Char

Personal de METROAGUA S.A. E.S.P

Gerente General
Johanna Segrera Mercado

Gerente Técnica
Margarita Jaramillo

Director de Planeación e Ingeniería
Adolfo Bernal Diazgranados

Personal de la Universidad de los Andes

Director del proyecto

Vicedecano de Ingeniería para el Sector Externo
Profesor Titular
Juan Saldarriaga V

Profesor de Cátedra
Carlos Molano C

Profesores Asociados
Margarita R. Serje
Jorge A. Tovar

Profesor Instructor
Diego Alejandro Páez

Investigadores Asociados
Gustavo Hernández.
Alcides Huguett G.
Cesar Mauricio Jurado

Asistentes de investigación
Gonzalo Cifuentes
Laura Natalia Cotes
Natalia Duque Villarreal
Laura Lunita López
Alejandra Martínez
Laura Siabatto Beltrán

Personal Administrativo
Aida L. Sabogal

2. DELIMITACIÓN DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Una cuenca hidrográfica es la unidad de respuesta hidrológica básica dentro de los ciclos hidrológicos y geomorfológicos. Se define como el área de superficie terrestre donde la precipitación tiende a drenar por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida o punto de concentración. Por lo tanto, cualquier gota de lluvia que caiga sobre la cuenca y permanezca como escorrentía superficial viajando a través de la red de drenaje saldrá por el punto de concentración.

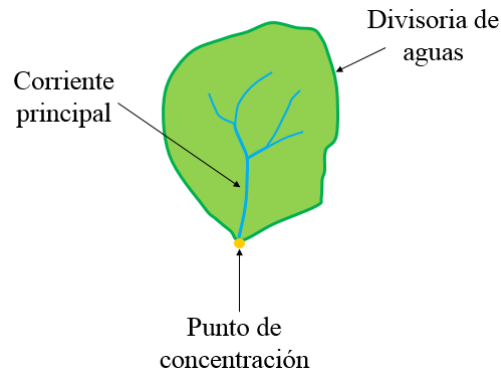


Figura 2.1 Cuenca Hidrográfica

Para el caso estudio se delimitaron las cuencas hidrográficas aferentes a los ríos Palomino, Don Diego, Buritaca, Guachaca, Mendihuaca, Piedras, Manzanares, Gaira, Toribio, Córdoba y Frío, considerados como fuentes potenciales de recurso hídrico para ser utilizadas en el incremento en la oferta de agua potable en la región. Para realizar la delimitación de las cuencas, se contó con información sobre la elevación del terreno como curvas de nivel de cada 10 m y un modelo digital de elevación de la Sierra Nevada de Santa Marta. Los geoprocursos necesarios para obtener las cuencas de los ríos se llevaron a cabo haciendo uso de las herramientas de análisis hidrológico de ArcGIS 10.1.2.

2.1.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (MDE) DE LA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA

El modelo digital de elevación del terreno (MDE) hace referencia a una malla de pixeles delimitada por el área en estudio, donde cada uno de los pixeles que la conforman contiene la elevación promedio del terreno. El MDE para la Sierra Nevada de Santa Marta se obtuvo del Modelo de Elevación Digital Global de ASTER (Global Digital Elevation Model - GDEM), creado a partir de imágenes captadas por el sensor japonés Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), transportado por el satélite TERRA, a cargo de la NASA y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI). El sensor ASTER tiene un ancho de barrido de 60 km y cuenta con las siguientes características:

Tabla 1. Características del Modelo de Elevación Digital Global de ASTER

DEM	Cobertura	Metodología	Resolución Espacial	Error	Formato de Salida
ASTER (GDEM)	Global	Estereoscopia Satelital	30 m	± 20 y 50 m	GeoTIFF de 16 bits

2.1.2. CORRECCIÓN DE IMPERFECCIONES DEL MDE

Debido a las diferencias entre resolución de los accidentes geográficos y la de la malla de píxeles que conforman el MDE, pueden presentarse dos tipos de problemas: los sumideros y las bifurcaciones, que deben corregirse de tal forma que en todas las celdas se pueda establecer una dirección de drenaje. Este ajuste debe realizarse con base en criterios de carácter geomorfológico, además, cabe resaltar que estos problemas son locales, muy frecuentes y fáciles de corregir.

- Corrección de sumideros y bifurcaciones:

Un sumidero se presenta cuando la máxima pendiente del terreno es negativa. Se corrige ajustando la cota a la mínima de las adyacentes como se muestra a continuación:

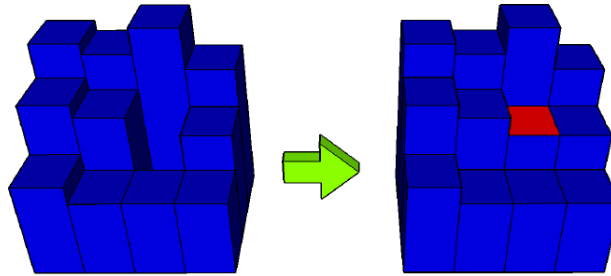


Figura 2.2 Sumidero en un modelo de elevación digital del terreno

Una bifurcación ocurre cuando dos o más celdas comparten la máxima pendiente (>0). Esta imperfección se corrige usando la inercia, calculando una dirección equivalente entre las celdas que llegan, según una operación binaria preestablecida.

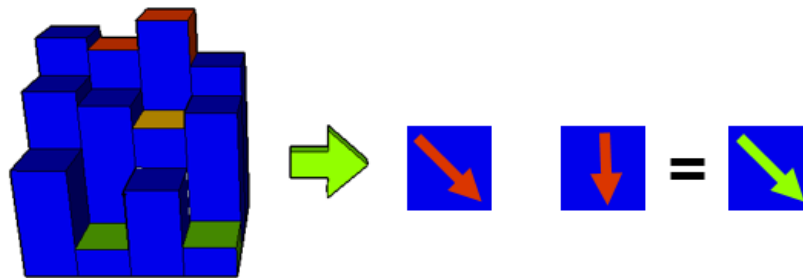


Figura 2.3 Bifurcación en un modelo de elevación digital del terreno

La corrección de las imperfecciones del MDE del área geográfica en estudio se realizó en el software ArcGIS 10.1.2. En la figura 2.4 se encuentra el MDE de la Sierra Nevada de Santa Marta obtenido a partir del modelo digital de elevación ASTER. Luego de realizar las correcciones al MDE por sumideros y bifurcaciones se obtiene el MDE con el cual se trabajó durante todo el proyecto (ver Figuras 2.5 y 2.6).

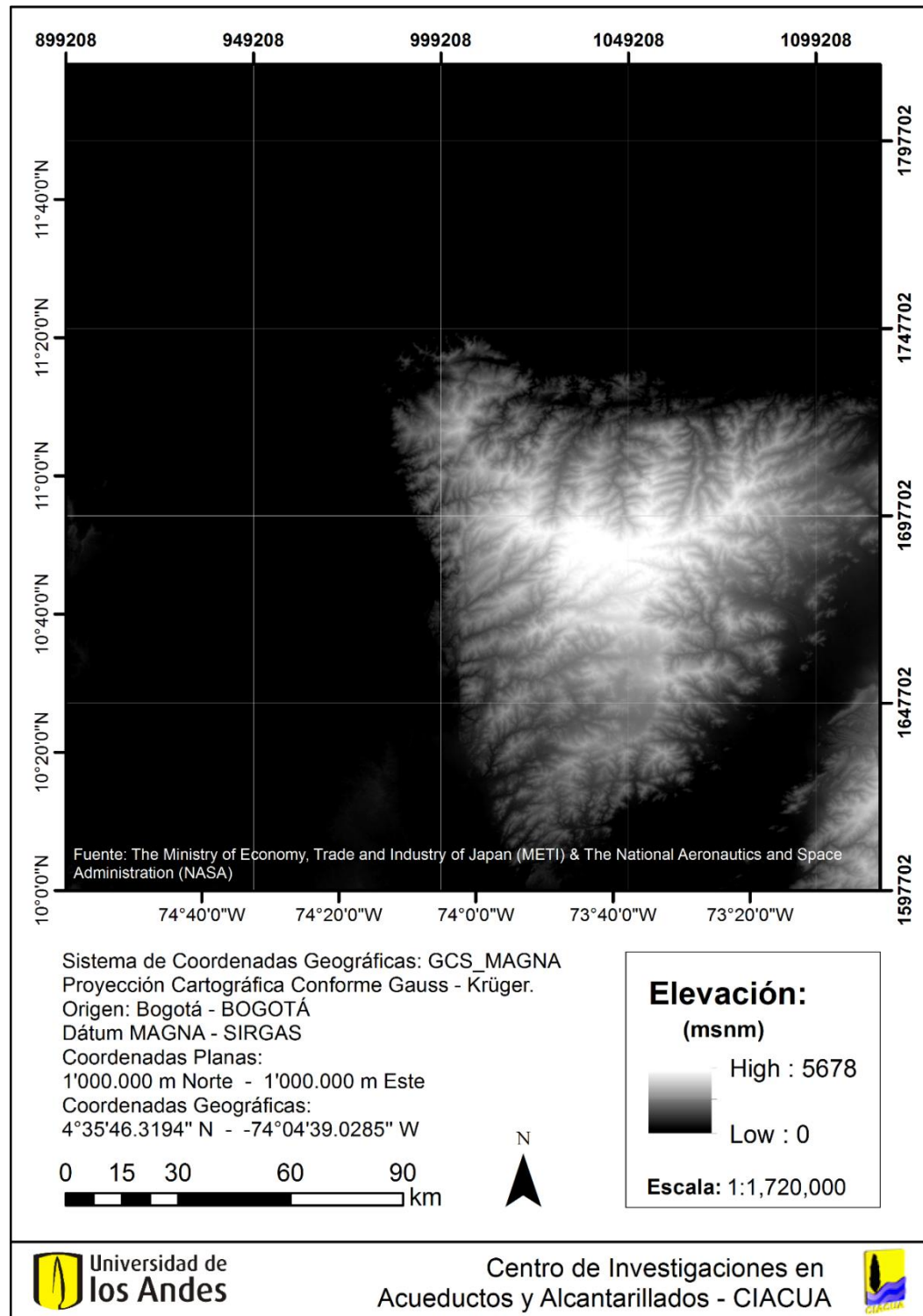


Figura 2.4 Modelo digital de elevación de la Sierra Nevada de Santa Marta

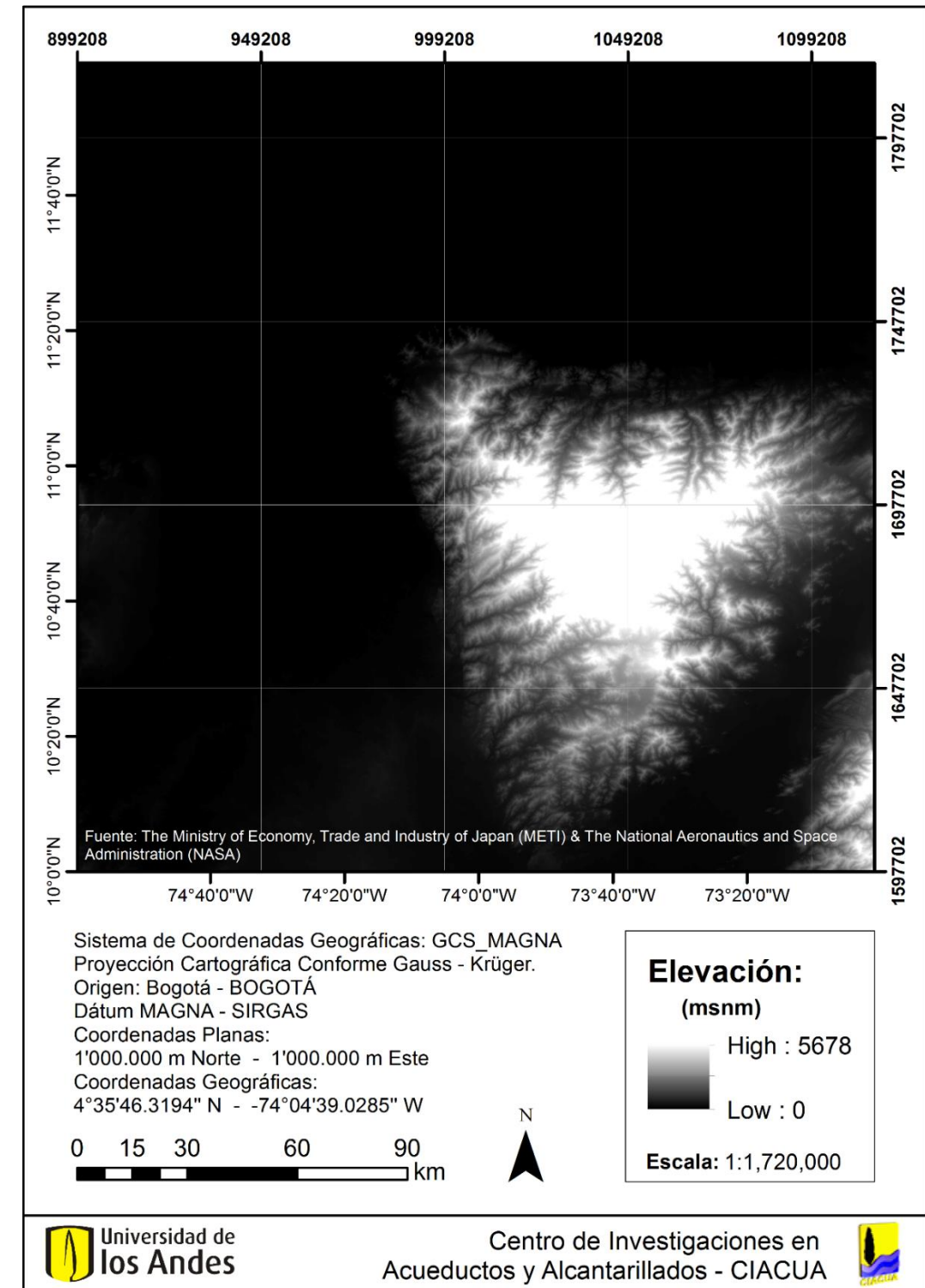


Figura 2.5 Modelo digital de elevación corregido por sumideros y bifurcaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta

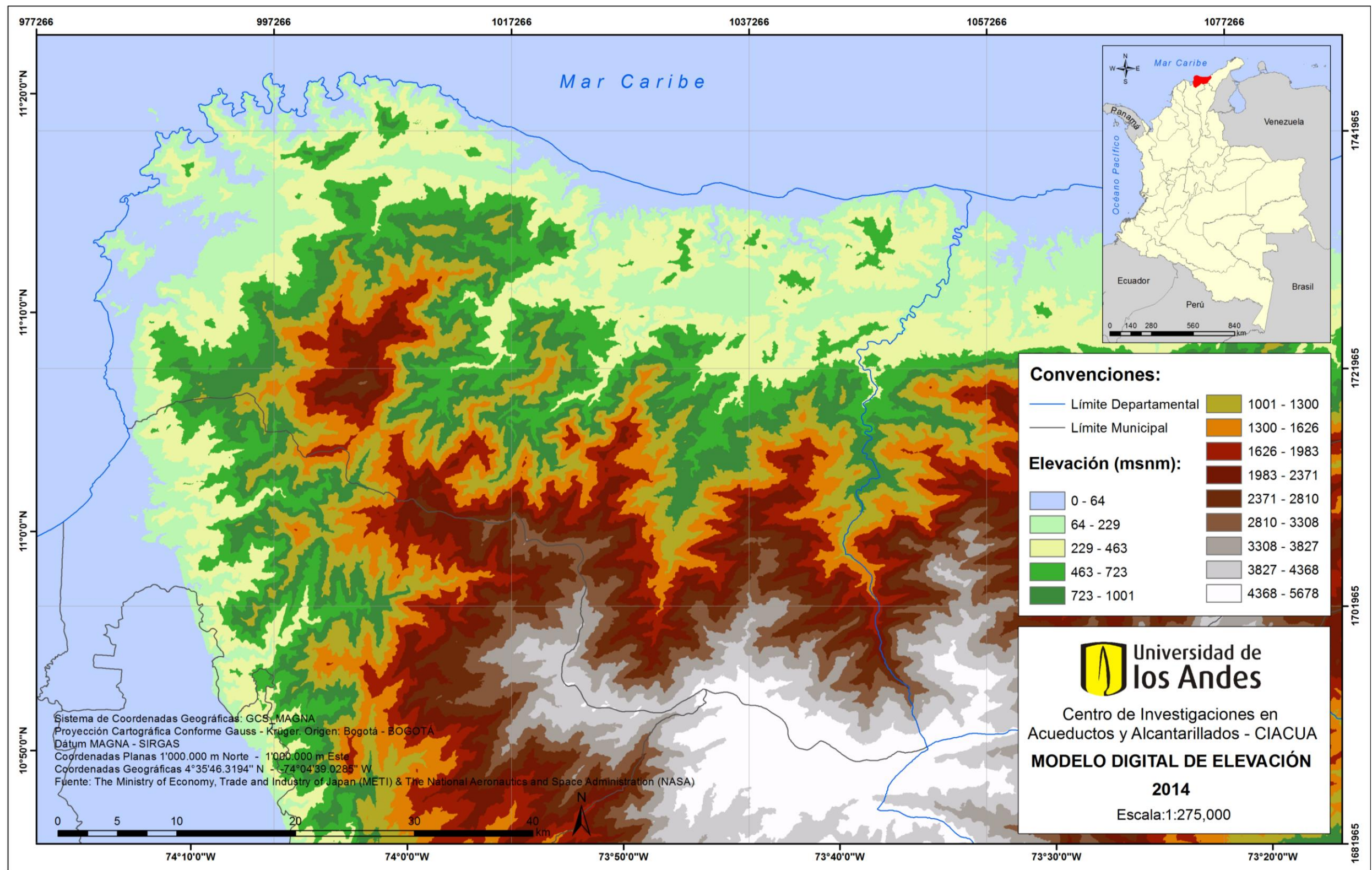


Figura 2.6 Modelo de elevación digital del área geográfica de estudio

2.1.3. DELIMITACIÓN DE CUENCAS EN ARCGIS 10.2.2

2.1.3.1. DIRECCIÓN Y ACUMULACIÓN DE FLUJO

Para delimitar las cuencas hidrográficas se utilizaron las herramientas de análisis hidrológico de AcrGIS 10.1.2. En especial las herramientas dirección de flujo, que a partir de una capa raster de la elevación del terreno, para este caso el MDE corregido, proporciona como salida una capa raster que muestra la dirección de flujo que sale de cada celda y la herramienta acumulación de flujo que calcula el flujo acumulado de todas las celdas que fluyen en cada celda de pendiente descendente en el raster de salida. El resultado de estos dos geoprocesos se muestra en las figuras 2.7 y 2.8.

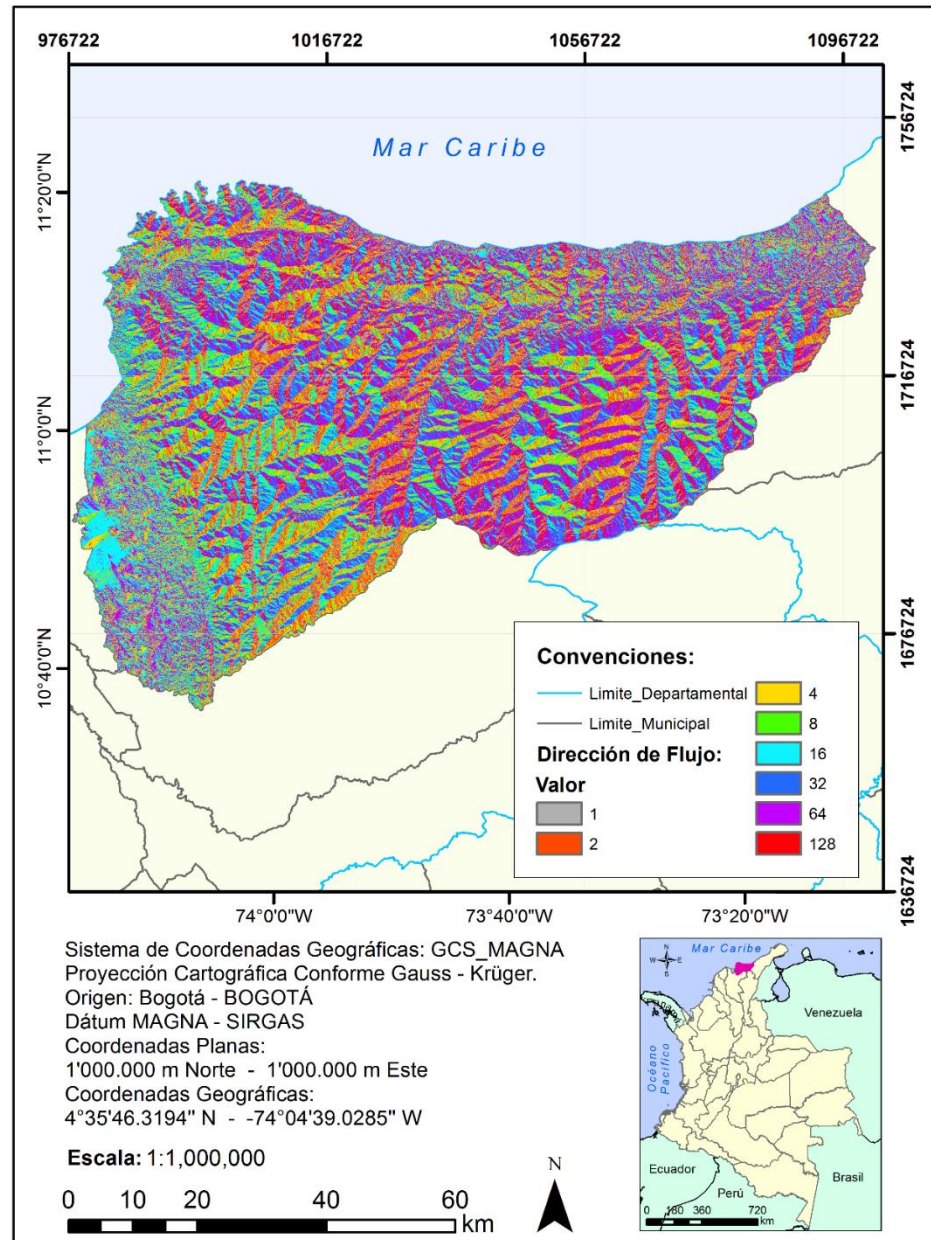


Figura 2.7 Dirección de flujo

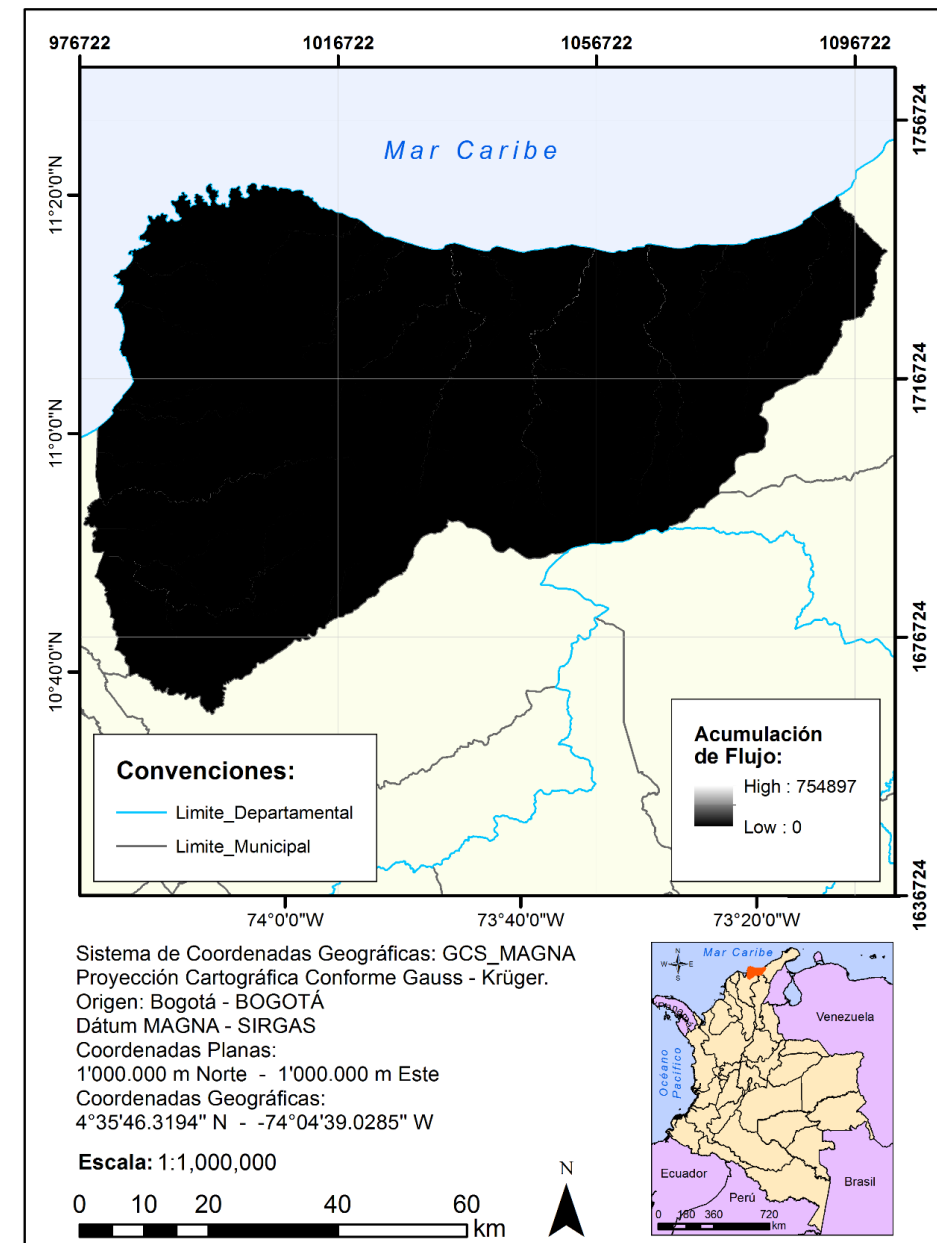


Figura 2.8 Acumulación de flujo

Por último, se calculan las cuencas aferentes a los ríos en estudio, tomando como punto de salida de las cuencas su desembocadura en el mar y teniendo como datos de entrada la dirección y la acumulación de flujo en la zona. Como resultado se obtienen las cuencas mostradas en la figura 2.9

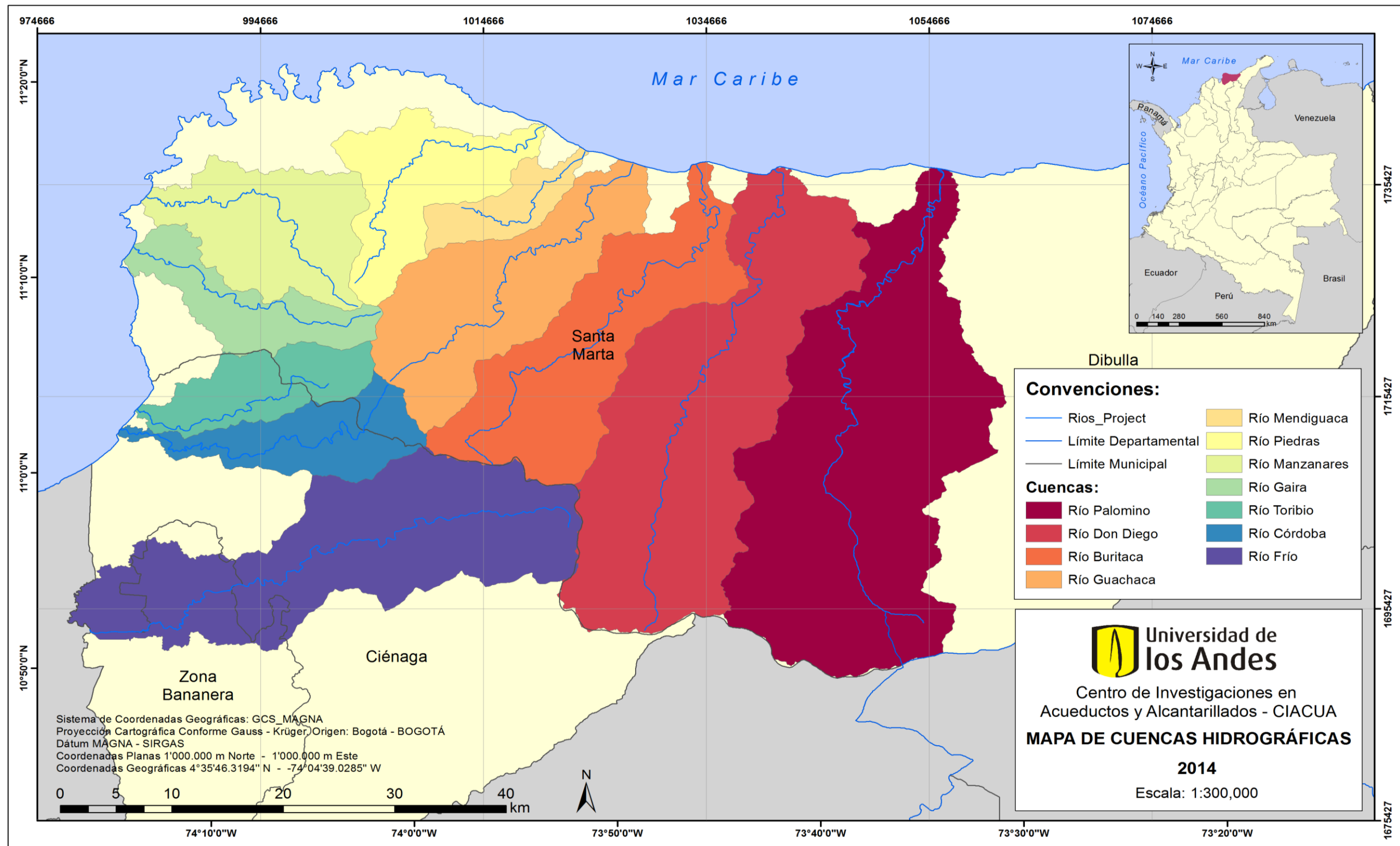


Figura 2.9 Cuencas hidrográficas delimitadas para el área geográfica en estudio

3. ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LAS FUENTES DE AGUA SUPERFICIAL

3.1. LOCALIZACIÓN DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS

- *Localización de la cuenca del Río Buritaca*

La cuenca hidrográfica del río Buritaca se ubica en la parte norte del departamento del Magdalena en la ciudad de Santa Marta. Específicamente, se encuentra circunscrita entre las latitudes $11^{\circ}15'55''$ y $10^{\circ}59'22''$ y las longitudes $73^{\circ}43'29''$ y $73^{\circ}59'26''$ y tiene un área de 304.27 km^2 . La cuenca incluye a la localidad Buritaca y el 48.93% de su área está localizada dentro del Resguardo Indígena Kogui - Malayo - Arhuaco. El río Buritaca tiene una longitud aproximada de 57.87 km y dentro de sus afluentes se destacan las quebradas Lágrimas, Unión, Nina, La Nigua, Doasangué, Naculundicue y Corea.

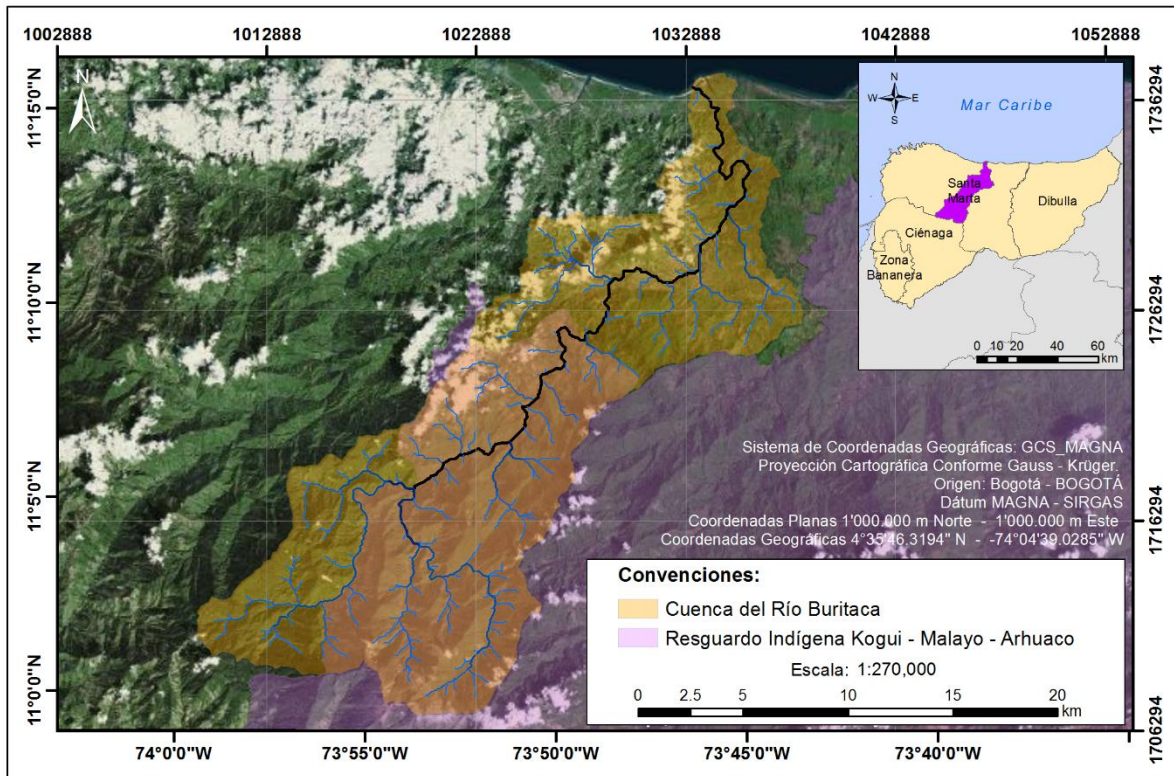


Figura 3.1 Localización de la cuenca del río Córdoba

- *Localización de la cuenca del río Córdoba*

La cuenca hidrográfica del río Córdoba se localiza en la parte norte del departamento del Magdalena. La parte baja de la cuenca se encuentra ubicada en el municipio de Ciénaga y la parte alta de la cuenca en la ciudad de Santa Marta. En detalle, la cuenca se encuentra circunscrita entre

las latitudes $11^{\circ}05'18''$ y $10^{\circ}59'28''$ y las longitudes $73^{\circ}59'22''$ y $74^{\circ}14'36''$ e incluye las localidades de La Casita, La Elisa y Francia. Tiene un área de 124.59 km^2 y entre sus principales cuerpos de agua se encuentran el río Córdoba con aproximadamente 44.55 km de longitud y las quebradas La Palma, El Cano, Lourdes, El Quindío, La Sierrita.

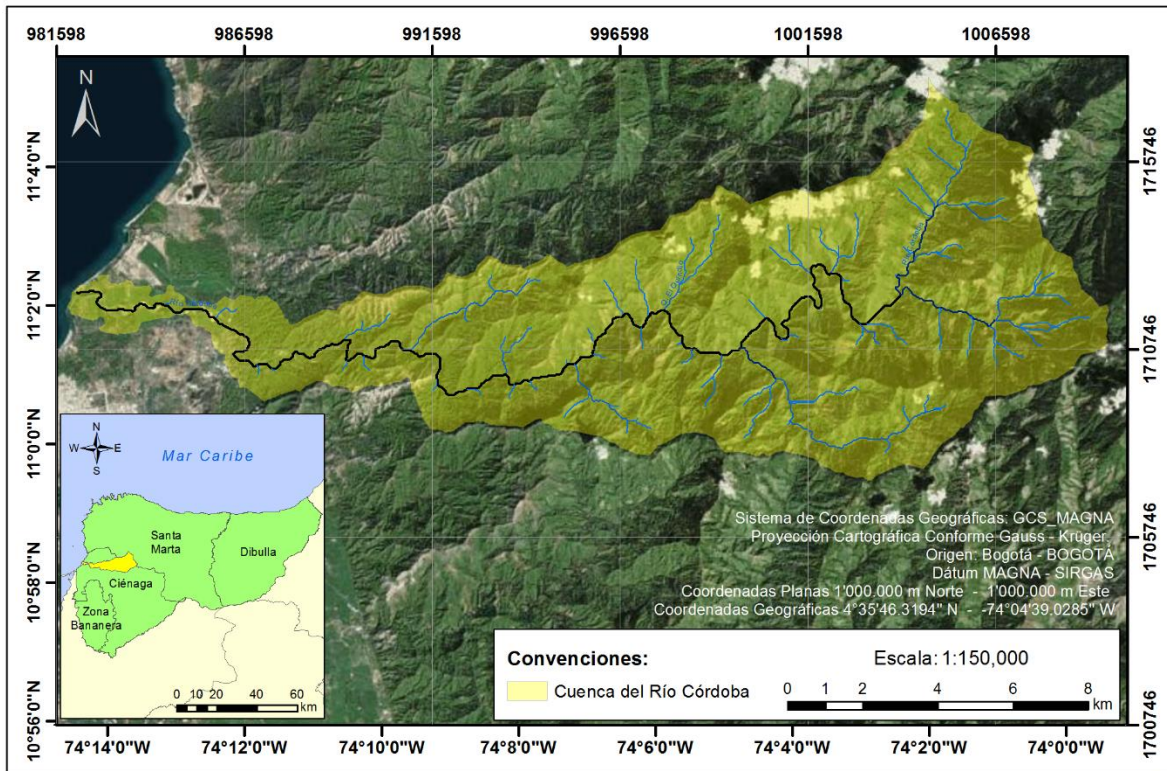


Figura 3.2 Localización de la cuenca del río Córdoba

- *Localización de la cuenca del río Don Diego*

La cuenca hidrográfica del río Don Diego se ubica en la parte norte del departamento del Magdalena en la ciudad de Santa Marta. Específicamente, la cuenca se encuentra circunscrita entre las coordenadas $11^{\circ}15'38''$ - $10^{\circ}51'45''$ de latitud Norte y $73^{\circ}37'31''$ - $73^{\circ}52'59''$ de longitud Oeste, ocupando un área de 561.95 km^2 , de los cuales 94.45% de esta área se encuentra localizada en el Resguardo Indígena Kogui – Malayo – Arhuaco. Dentro de su área también se encuentra la localidad de Don Diego.

El río Don Diego nace en el margen noroccidental del Pico Colón en la Sierra Nevada de Santa Marta y tiene una longitud aproximada de 67.22 km . En esta cuenca además se encuentran el río Don Dieguito y las quebradas Pica de la Palanoa, de las Arepas, Perico Aguado, El Baticano, Del Hierro, La Virgen, Tamimaca, La Danta, Del Mono, Hiyula, El Molino, Siloué, Daisinai, Mancumalis, Niscaja, Ni, Páramo y Guinue.

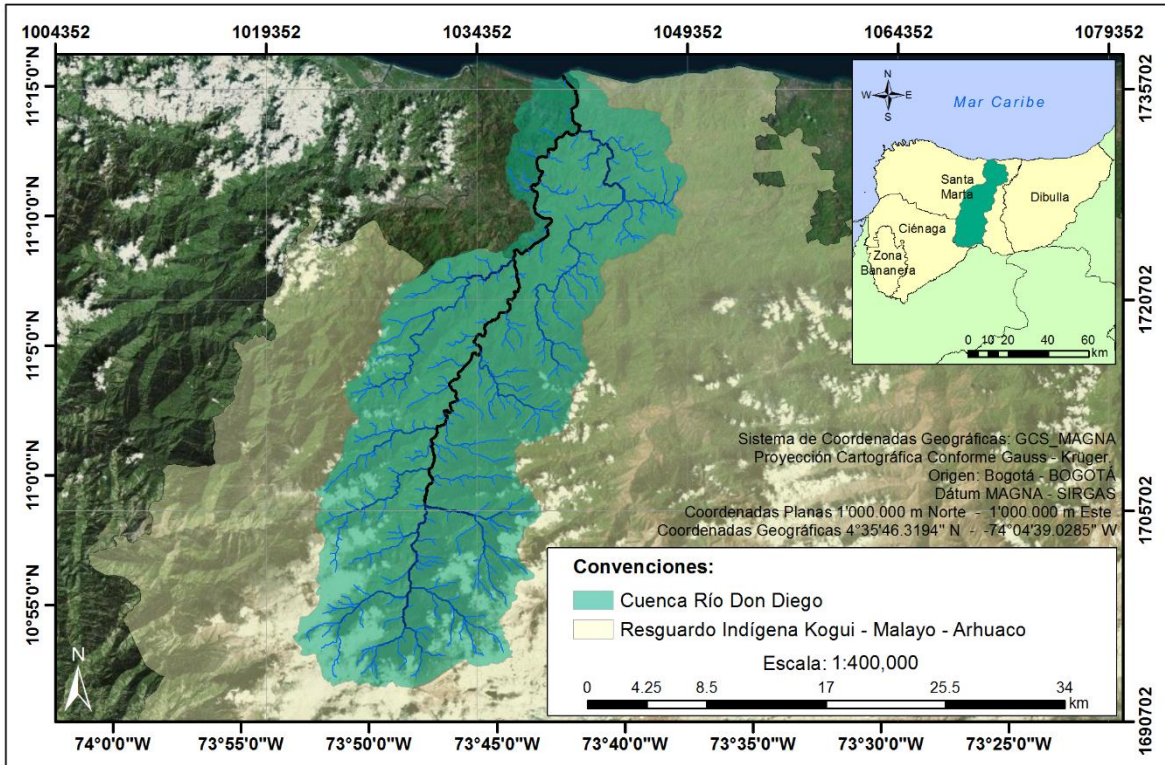


Figura 3.3 Localización de la cuenca del río Don Diego

- *Localización de la cuenca del río Frío*

La cuenca hidrográfica del río Frío se localiza en la parte norte del departamento del Magdalena en el municipio de Ciénaga, atravesando en su desembocadura al municipio de Zona Bananera. En detalle, se encuentra circunscrita entre las latitudes 11°01'22" y 10°50'52" y las longitudes 73°51'42" y 74°17'5".

La cuenca tiene un área de 442.99 km² e incluye a las localidades de Claralicia, Villa Leonor, Dilia Ester, Varelia, El Mamón y Florida. Además, el 30.28% de su área, lo que equivale a 134.13 km², se encuentra localizada dentro del Resguardo Indígena Kogui - Malayo - Arhuaco.

El río Frío nace en el Pico Colón de la Sierra Nevada de Santa Marta, tiene aproximadamente 68.65 km de longitud y un gradiente altitudinal desde el nivel del mar hasta los 4209 msnm. Entre los principales afluentes del río Frío, se encuentran las quebradas La Matea, Rodríguez, Arena Seca, Guaimaro, Santa Clara, San Pedro, La Unión, El Escondido, San José, Guandusaca, La Sirena, La Secreta, La Reserva, Piedras Blancas, La Mohana y Hato Josefa.

La cuenca del río frío hace parte de la macrocuenca del flanco occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, de la cual también hacen parte los ríos Sevilla, Tucurínca, Aracataca y Fundación, cuya desembocadura se ubica en la Ciénaga Grande de Santa Marta.

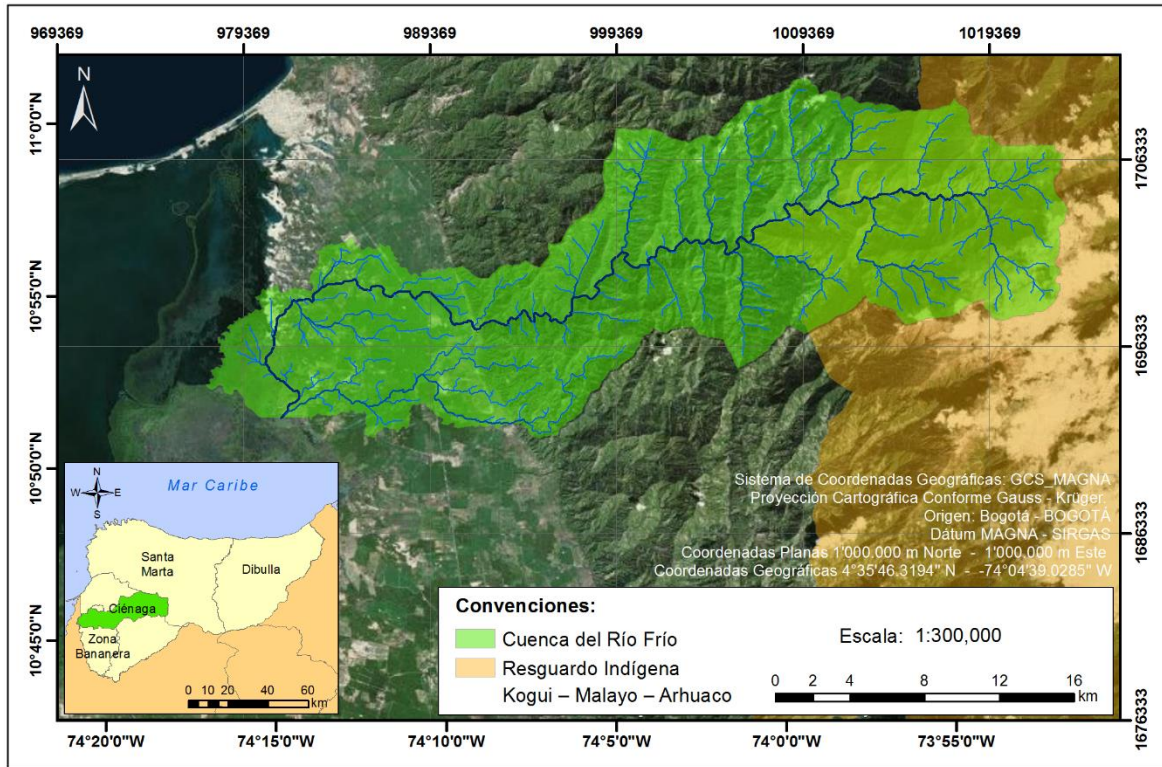


Figura 3.4 Localización de la cuenca del río Frío

- *Localización de la cuenca del río Gaira*

La cuenca hidrográfica del río Gaira se encuentra ubicada en la parte norte del departamento del Magdalena en la ciudad de Santa Marta. Concretamente, la cuenca está enmarcada entre las coordenadas $11^{\circ}12'47''$ - $11^{\circ}05'53''$ de latitud Norte y $74^{\circ}01'32''$ - $74^{\circ}14'18''$ de longitud Oeste.

Tiene un área de 111.09 km^2 y dentro de ella se ubican las localidades de Sena, Gaira, Arimaca y Bureche. El río Gaira, su corriente principal, tiene aproximadamente 33.55 km de longitud y entre sus afluentes se encuentran las quebradas El Plamar, Arimaca, Las Mercedes, Aguadulce, La Macanilla, Jabalí, entre otras.

La cuenca del río Gaira hace parte de la macrocuenca del Caribe de la Sierra Nevada de Santa Marta. Dentro de esta macrocuenca también se encuentran las cuencas de los ríos Córdoba, Toribio, Manzanares, Piedras, Mendihuaca, Guachaca, Buritaca, Don Diego, Palomino, San Salvador, Ancho, Cañas, Maluisa, Jerez, Tapias, Camarones y Ranchería. Todas estas cuencas se clasifican como exorreicas, puesto que sus corrientes principales desembocan directamente en el mar.

El río Gaira nace en la Estrella Hídrica de San Lorenzo y tiene un gradiente altitudinal desde el nivel del mar hasta los 2842 msnm.

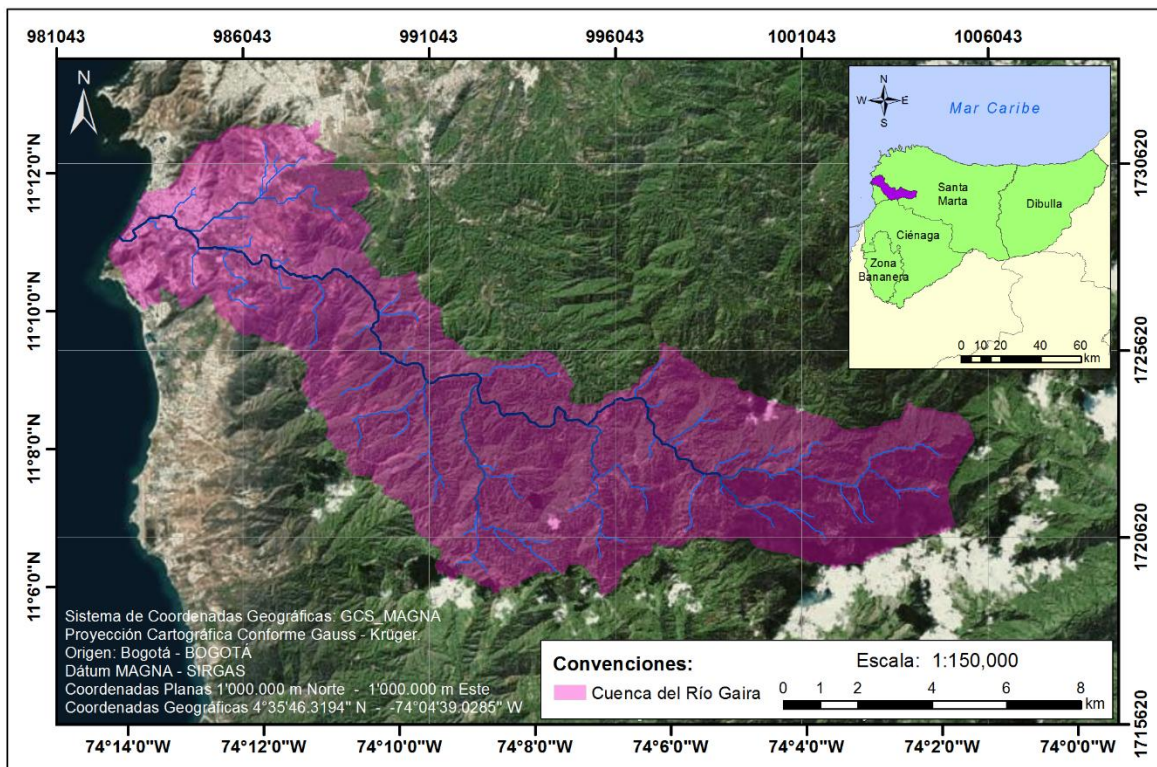


Figura 3.5 Localización de la cuenca del río Gaira

La parte baja de cuenca se encuentra dentro del perímetro urbano de la ciudad de Santa Marta, razón por la cual esa área de la cuenca se encuentra totalmente urbanizada.

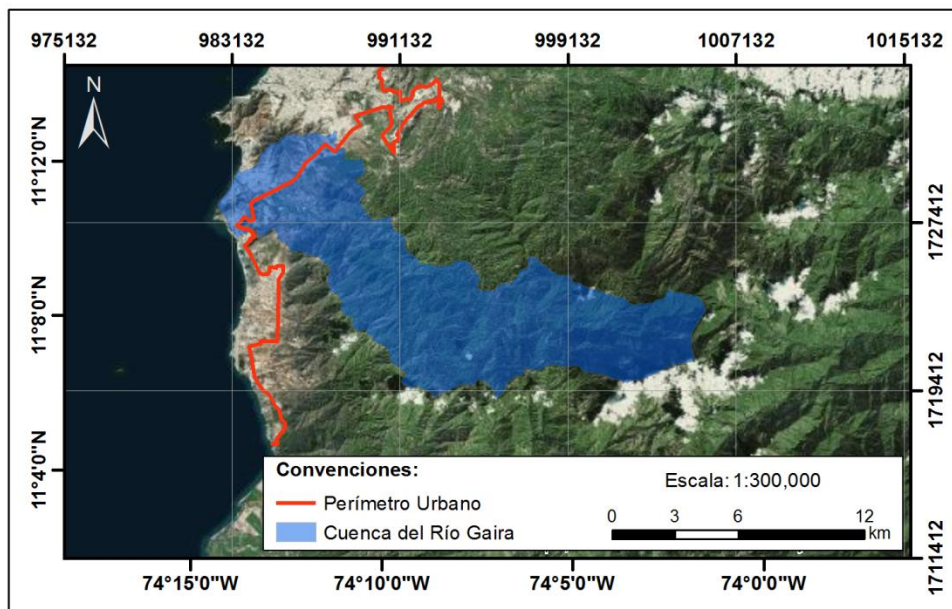


Figura 3.6 Zona urbana de la cuenca del río Gaira

- *Localización de la cuenca del río Guachaca*

La cuenca hidrográfica del río Guachaca se encuentra localizada en la parte norte del departamento del Magdalena en la ciudad de Santa Marta. Tiene un área de 267.33 km², enmarcada entre las latitudes 11°16'1" y 11°01'59" y las longitudes 73°48'17" y 74°02'10". En esta cuenca se ubican las localidades de Guachaca y las Vegas. El río Guachaca nace en la Cuchilla San Lorenzo, al occidente de la sierra nevada de Santa Marta y tiene una longitud aproximada de 44.46 km. Entre los afluentes del río Guachaca se encuentran las quebradas Río Viejo, Mamá Conchita, El Diablo, Las Nubes, Del Mayor, La Cascada, El Encanto, Las Ánimas, El Reflejo, La Nieve, entre otras.

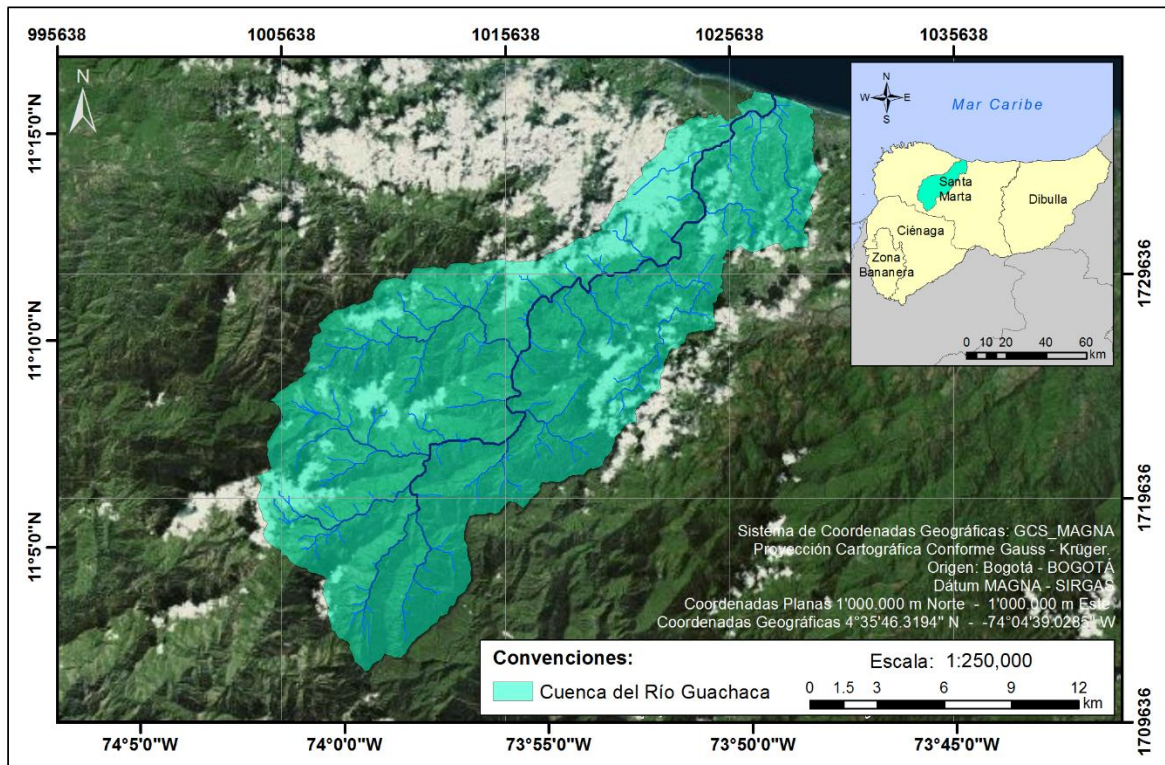


Figura 3.7 Localización de la cuenca del río Guachaca

- *Localización de la cuenca del río Manzanares*

La cuenca hidrográfica del río Manzanares se ubica en la parte norte del departamento del Magdalena en la ciudad de Santa Marta. Específicamente, se encuentra circunscrita entre las latitudes 11°16'17" y 11°08'17" y las longitudes 74°02'11" y 74°13'27". La cuenca incluye a las localidades de Bonda, La Esperanza y La Tigrera. Tiene un área de 185.21 km² y su cauce principal, el río Manzanares tiene aproximadamente 33.48 km de longitud. El río Manzanares nace en la Estrella Hidrográfica de San Lorenzo y presenta un desnivel altitudinal de 2407 msnm. En esta cuenca además se encuentran las quebradas Tamacá, La Mojada, Seca, Aserrío, Las Palmitas, La Cascada, El Cacao, Ohaca, La Trigrera, Japón, entre otras.

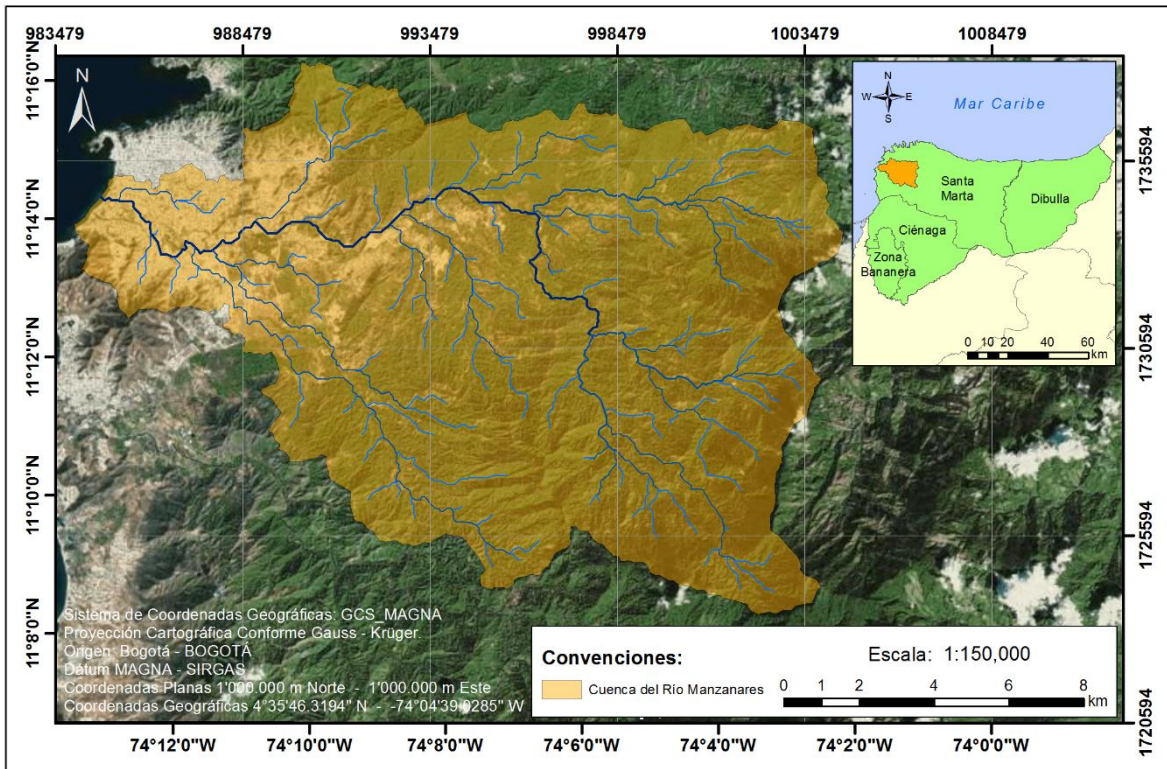


Figura 3.8 Localización de la cuenca del río Manzanarés

La parte baja de cuenca se encuentra dentro del perímetro urbano de la ciudad de Santa Marta, razón por la cual esa área de la cuenca se encuentra totalmente urbanizada.

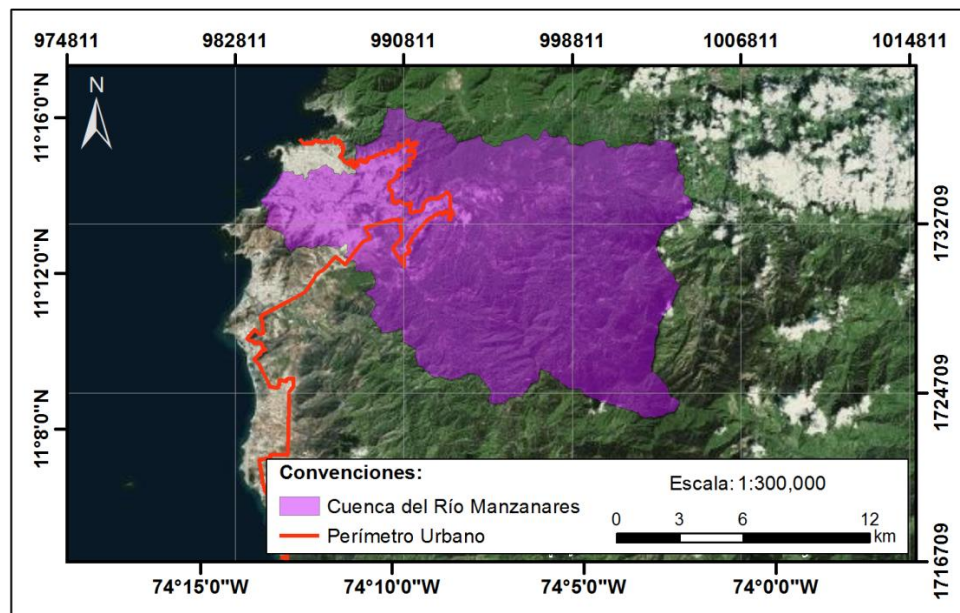


Figura 3.9 Zona urbana de la cuenca del río Manzanarés

- *Localización de la cuenca del río Mendihuaca*

La cuenca hidrográfica del río Mendihuaca se ubica en la parte norte del departamento del Magdalena en la ciudad de Santa Marta. La cuenca se encuentra enmarcada entre las latitudes $11^{\circ}16'39''$ y $11^{\circ}11'10''$ y las longitudes $73^{\circ}51'24''$ y $73^{\circ}59'33''$. Tiene un área de 61.67 km^2 e incluye a la localidad de El Fénix. El río Mendihuaca tiene aproximadamente 25.34 km de longitud y entre sus afluentes principales se encuentran las quebradas El Pilmón, Danta, Domingo, El Fénix, Medellín y Turín.

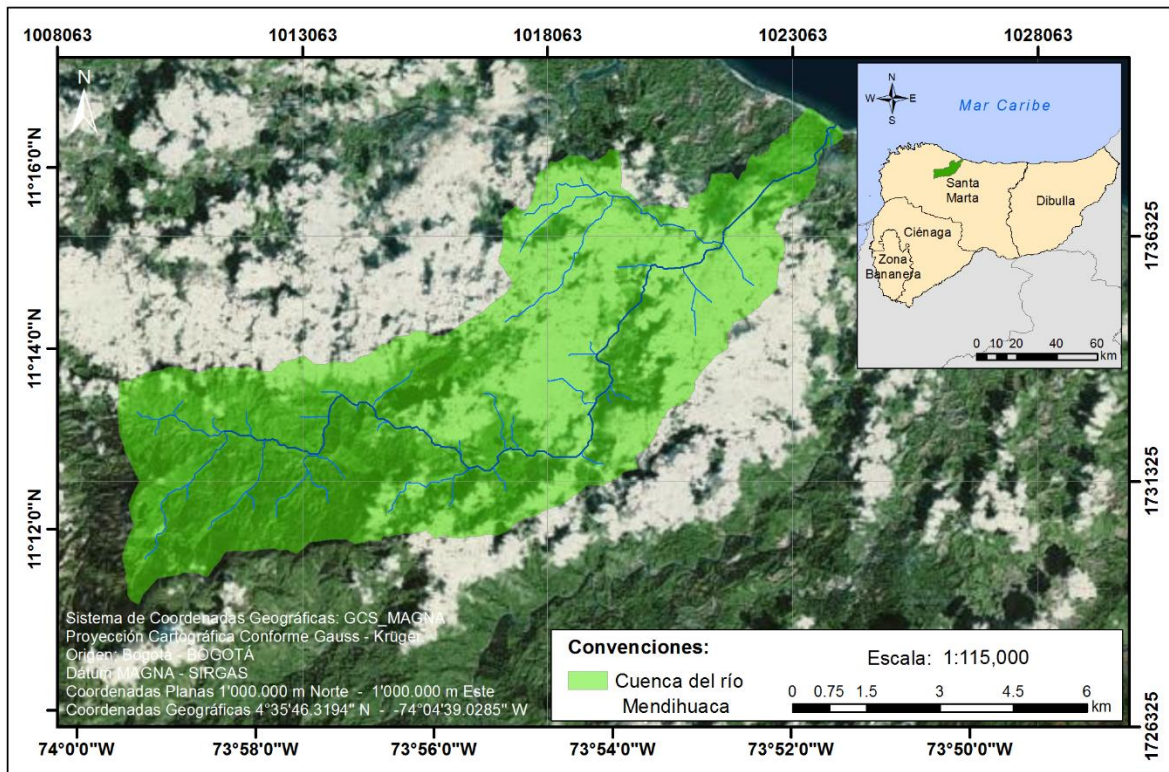


Figura 3.10 Localización de la cuenca del río Mendihuaca

- *Localización de la cuenca del río Palomino*

La cuenca hidrográfica del río Palomino se localiza en la parte norte del departamento del Magdalena y establece la frontera entre la ciudad de Santa Marta y Dibulla. Específicamente, la cuenca se encuentra circunscrita entre las latitudes $11^{\circ}15'35''$ y $10^{\circ}49'28''$ y las longitudes $73^{\circ}30'49''$ y $73^{\circ}44'56''$. Tiene un área de 690.19 km^2 e incluye a las localidades de Palomino y Cuba. El río Palomino nace en el margen norte del pico Colón en la Sierra Nevada de Santa Marta y tiene aproximadamente 77.89 km de longitud. En esta cuenca se encuentran las quebradas Nuanaisí, Nuaca, Salai, Manitza, Gamindí, Dinguí, Naranajal, Camapana, Mamarongo, Muica, Minacatue, Salué, Nabucaisisi, Quanatoco, entre otras.

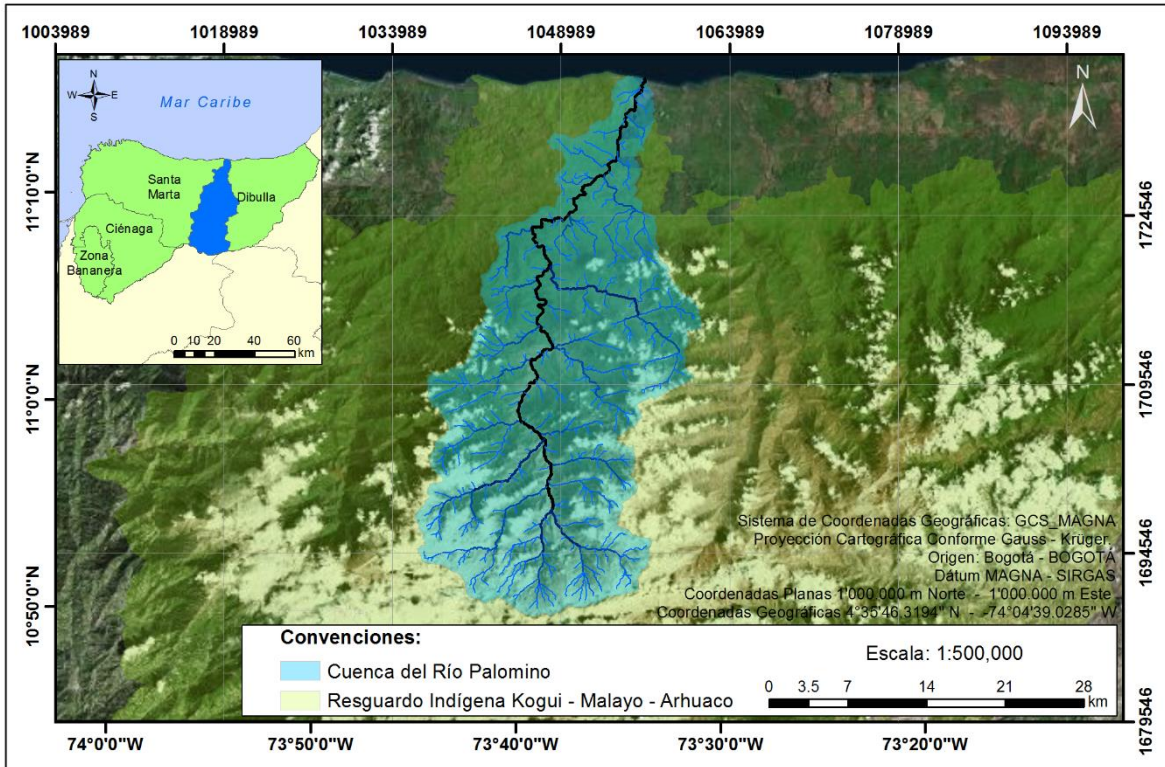


Figura 3.11 Localización de la cuenca del río Palomino

- *Localización de la cuenca del río Piedras*

La cuenca hidrográfica del río Piedras se ubica en la parte norte del departamento del Magdalena en la ciudad de Santa Marta. Específicamente, la cuenca se encuentra circunscrita entre las latitudes 11°18'44" y 11°08'32" y las longitudes 73°53'27" y 74°04'8". Tiene un área de 159.69 km² e incluye a las localidades de Providencia, Calabazo y La Esmeralda.

El río Piedras nace en la Estrella Hídrica de San Lorenzo, tiene una longitud aproximada de 37.84 km y un gradiente altitudinal que va desde el nivel mar hasta los 2424 msnm. Éste río recibe aportes de las quebradas Manzanares, Paloquemao, Santa Teresa, Jordán, San Luis, Alicia, La Sirena, entre otras.

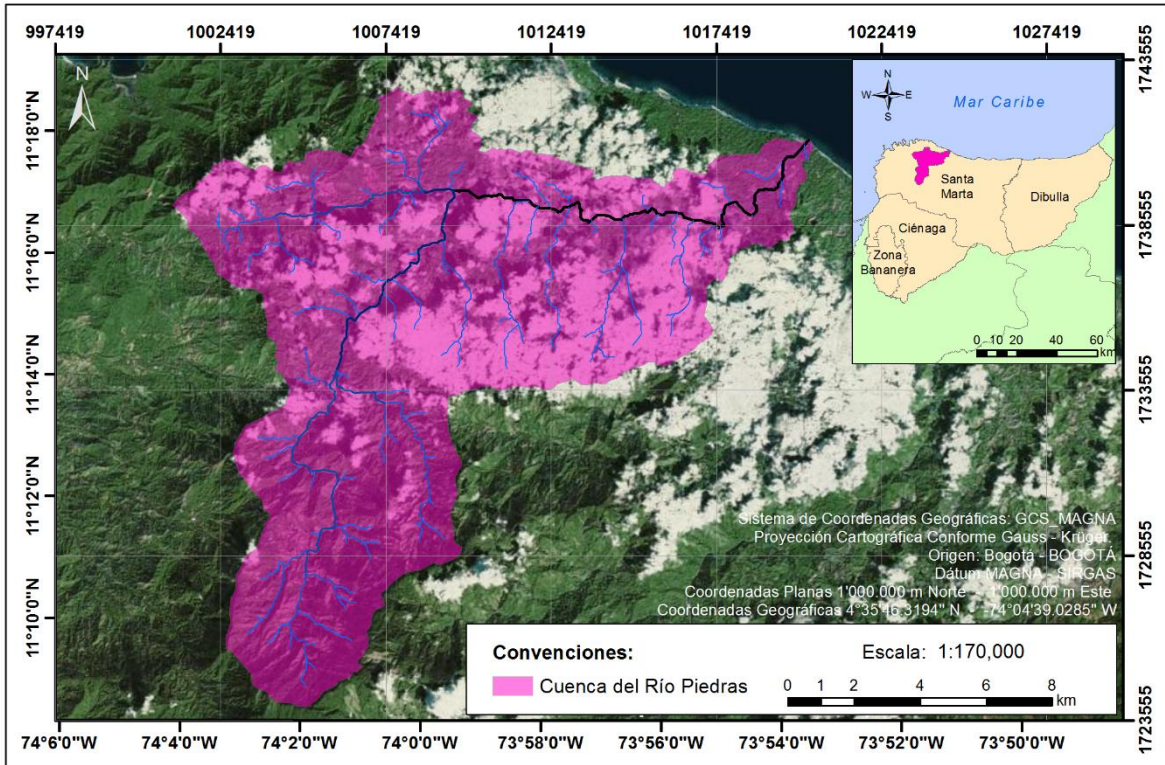


Figura 3.12 Localización de la cuenca del río

- *Localización de la cuenca del río Toribio*

La cuenca hidrográfica del río Toribio se encuentra ubicada en la vertiente nor-occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, en la parte norte del departamento del Magdalena. La mayor parte de su área se encuentra en el municipio de Ciénaga. El nacimiento del río Toribio se encuentra ubicado en la Estrella Hídrica de San Lorenzo a 2849 msnm. Específicamente, la cuenca se encuentra circunscrita entre las latitudes 11°06'46" y 11°01'43" y las longitudes 74°01'54" y 74°13'45" y tiene un área de 108.32 km².

La cuenca incluye a las localidades de Cincinnati, Colonia Militar, además del Muelle Carbonera. El río Toribio tiene una longitud aproximada de 33.01 km y entre sus principales afluentes se encuentran las quebradas, del Guayabo, Marinca, Santa Rosa, La Reserva, El Líbano, Filo de la Popa, Malabrigo, Santa Bárbara, La Tagua, Los Alpes, Jueves Santo y Viernes Santo.

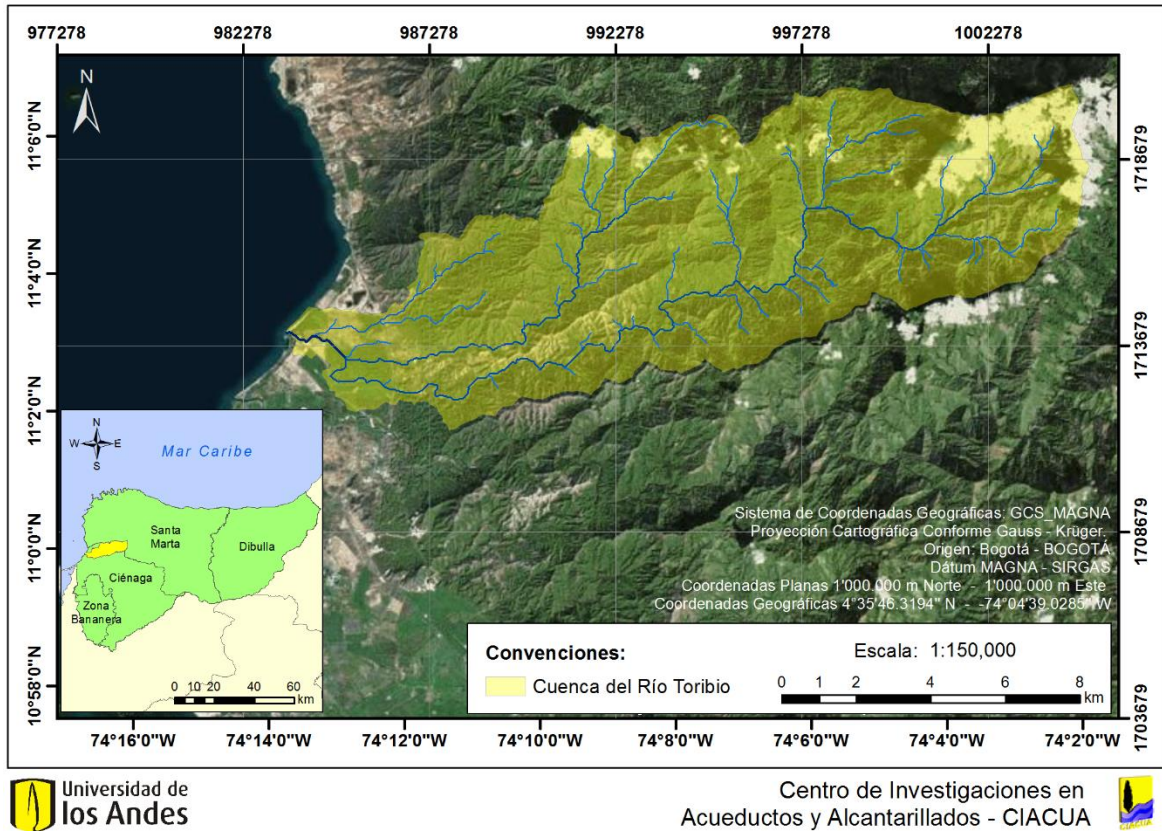


Figura 3.13 Localización de la cuenca del río Toribio

3.2. CLIMA DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS

El clima en la Sierra Nevada de Santa Marta está determinado por los vientos alisios del Noreste y las corrientes que suben de las vertientes expuestas, produciendo nieblas y lluvias orográficas frecuentes (Bartels, 1984). El régimen de lluvias está definido por el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical, que ocasiona dos períodos de lluvia en el año. El primero se presenta en los meses de abril a junio y el segundo en los meses de agosto a diciembre. Sin embargo, cabe aclarar cada una de las tres vertientes de la Sierra Nevada de Santa Marta presenta particularidades y variaciones. En el flanco norte, el más húmedo de todos, hay precipitaciones que van desde los 4.000 mm de lluvia al año en las cuencas de los ríos Buritaca, Guachaca y Don Diego, hasta los valores menos intensos del río Palomino hacia el oriente, donde los índices de precipitación descienden a 2.500 mm y 1.800 mm a medida que las estribaciones se acercan al desierto guajiro. Sobre los flancos occidental y oriental, las precipitaciones varían entre 1.500 mm al occidente, al margen de la Ciénaga Grande y 1.200 mm en las estribaciones del Cesar (UAESPNN, 2004).

La temperatura ambiental depende de dos factores principales: la altitud sobre el nivel del mar, que la incrementa en unos 6 °C por cada 1.000 m de elevación y la ubicación dentro de uno de los tres flancos de esta gran pirámide; así, a nivel del mar, en la vertiente norte se presentan los promedios

más bajos, con registros entre 22 y 26 °C, en contraste con las vertientes oriental y occidental, donde las temperaturas promedio pueden estar entre 25 y 34 °C.

El análisis de la temperatura media mensual multianual en el área de estudio se fundamentó en el Método de Interpolación Espacial Co-Kriging, que asume relación directa entre la temperatura y la altitud. Para este análisis se contó con registros de temperatura media de 39 estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) durante el periodo de 1984-2013. Los cálculos se realizaron en el software ArcGIS 10.1.2, teniendo como datos de entrada la temperatura media y la altitud de cada estación donde se registra la temperatura.

Tabla 2.a. Estaciones climatológicas del IDEAM tenidas en cuenta para el cálculo de la temperatura media mensual multianual en el área geográfica de estudio

Código	Nombre	Tipo	Coordenadas		Elevación (m.s.n.m.)	Periodo Medido
			N	W		
14015010	GALERAZAMBA	Climatológica Principal	10.794861	-75.261667	20	1984 - 2013
14015020	APTO RAFAEL NUNEZ	Sinóptica Principal	10.44725	-75.516028	2	1984 - 2013
14015030	ESC NAVAL CIOH	Climatológica Principal	10.389722	-75.535833	1	1984 - 2013
15015020	YE LA	Climatológica Ordinaria	10.992417	-74.211139	20	1984 - 2013
15015050	APTO SIMON BOLIVAR	Sinóptica Principal	11.128333	-74.228889	4	1984 - 2013
15015060	SAN LORENZO	Climatológica Principal	11.08	-74.033611	2200	1984 - 2013
15015100	PARQUE TAYRONA	Climatológica Ordinaria	11.291667	-73.910278	30	1984 - 2013
15015110	ALTO DE MIRA	Climatológica Ordinaria	11.0915	-73.932389	1080	1984 - 2013
15045010	MATITAS	Climatológica Ordinaria	11.263889	-73.030278	20	1984 - 2013
15065010	APTO A.PADILLA	Sinóptica Principal	11.528222	-72.917694	4	1984 - 2013
15065050	CAMP INTERCOR	Climatológica Principal	11.131167	-72.531389	122	1984 - 2013
15065130	MINA LA	Climatológica Principal	11.137583	-72.615944	80	1984 - 2013
15075030	MANAURE	Climatológica Principal	11.781056	-72.480167	1	1984 - 2013
15075060	PTO BOLIVAR	Climatológica Principal	12.224306	-71.999556	10	1984 - 2013
15085020	NAZARETH	Climatológica Principal	12.178889	-71.283889	85	1984 - 2013
15085030	ESC AGR CARRAIPIA	Climatológica Ordinaria	11.216389	-72.366944	118	1984 - 2013
15085040	RANCHO GRANDE	Climatológica Ordinaria	11.688056	-71.816667	50	1984 - 2013
28015070	URUMITA	Climatológica Ordinaria	10.559861	-73.008778	255	1984 - 2013
28025020	RINCON EL	Climatológica Ordinaria	10.271389	-73.131389	350	1984 - 2013
28025070	MOTILONIA CODAZZI	Agrometeorológica	10.004361	-73.252861	180	1984 - 2013
28025080	SOCOMBA	Climatológica Principal	9.686667	-73.240556	170	1984 - 2013
28025090	CENTENARIO HDA	Climatológica Ordinaria	9.853	-73.269389	100	1984 - 2013
28035010	VILLA ROSA	Climatológica Ordinaria	10.192778	-73.547222	70	1984 - 2013
28035020	CALLAO EL	Climatológica Ordinaria	10.363056	-73.319444	110	1984 - 2013
28035030	APTO ALFONSO LOPEZ	Sinóptica Principal	10.439444	-73.249444	138	1984 - 2013
28035040	GUAYMARAL	Climatológica Ordinaria	9.904917	-73.647528	50	1984 - 2013
29015020	CARMEN DE BOLIVAR	Agrometeorológica	9.71575	-75.106417	152	1984 - 2013
29015030	GUAMO EL	Climatológica Ordinaria	10.037222	-74.973222	75	1984 - 2013
29035030	PRESA AY GRANDE	Climatológica Ordinaria	9.879444	-75.326583	60	1984 - 2013

Tabla 3.b. Estaciones climatológicas del IDEAM tenidas en cuenta para el cálculo de la temperatura media mensual multianual en el área geográfica de estudio

Código	Nombre	Tipo	Coordenadas		Elevación (m.s.n.m.)	Periodo Medido
			N	W		
29035040	NUEVA FLORIDA	Climatológica Principal	9.940556	-75.350833	13	1984 - 2013
29035070	REPELON	Climatológica Principal	10.500278	-75.119167	10	1984 - 2013
29035080	NORMAL MANATI	Climatológica Principal	10.453583	-74.954639	10	1984 - 2013
29035110	SAN PABLO	Climatológica Ordinaria	10.043167	-75.258611	20	1984 - 2013
29045020	A.E CORTISSOZ	Sinóptica Principal	10.883336	-74.779778	14	1984 - 2013
29045110	JUAN DE ACOSTA	Climatológica Ordinaria	10.846528	-75.048944	20	1984 - 2013
29045120	FLORES LAS	Climatológica Principal	11.039361	-74.81975	2	1984 - 2013
29065020	PADELMA	Climatológica Ordinaria	10.721111	-74.199722	20	1984 - 2013
29065030	PRADO SEVILLA	Climatológica Ordinaria	10.764167	-74.154722	18	1984 - 2013
29065080	MEDIA LUNA	Climatológica Ordinaria	10.510028	-74.506667	20	1984 - 2013

Como resultado se obtuvo que la temperatura media en la zona varía entre 12°C y 31°C, dependiendo del gradiente altitudinal y de la época del año, registrándose el valor máximo de temperatura media en el mes de Febrero y el valor mínimo de temperatura media en el mes de Enero.

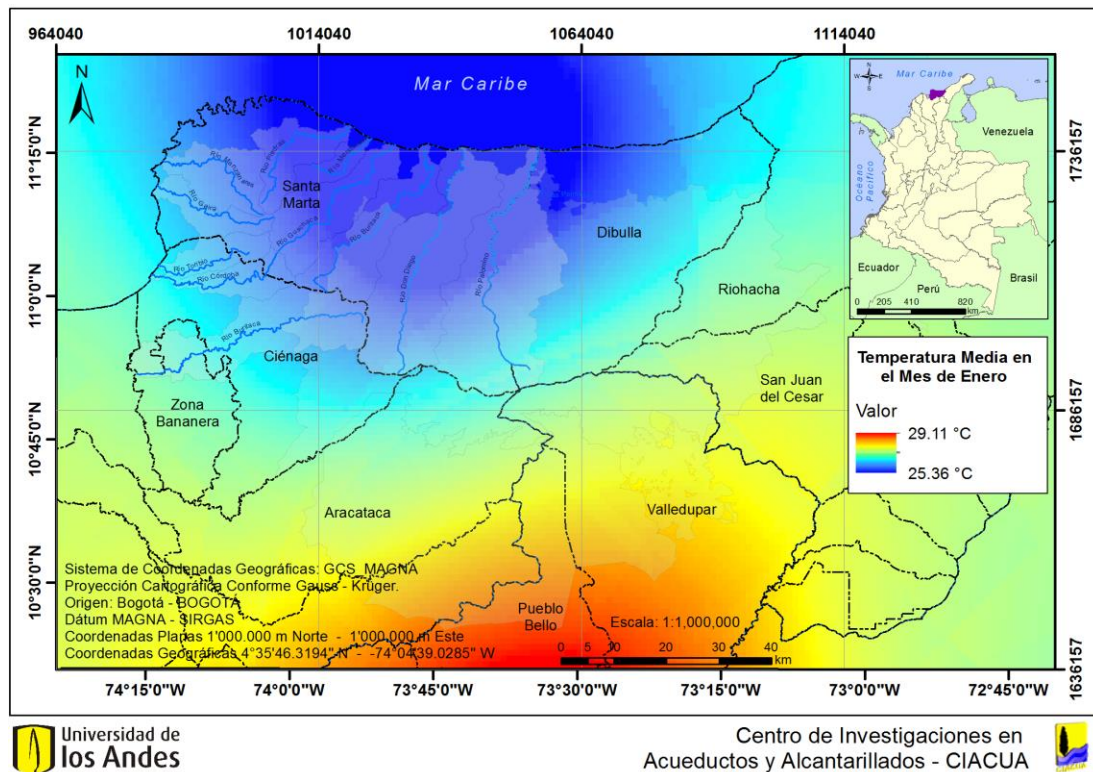


Figura 3.14 Temperatura media en el mes de Enero

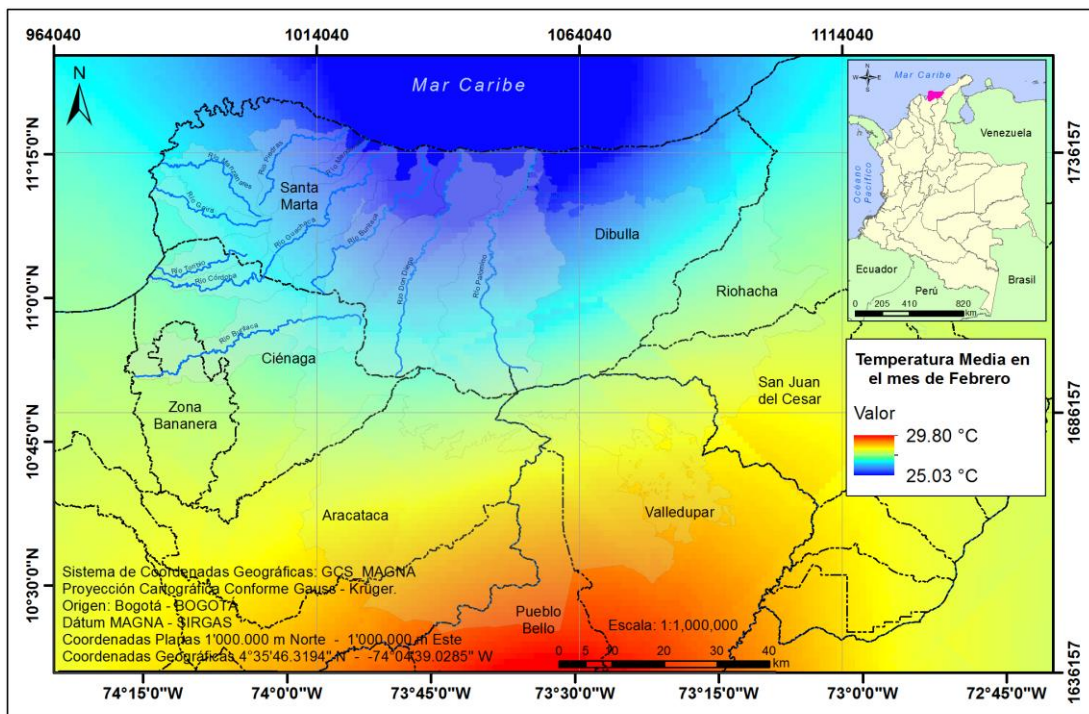


Figura 3.15 Temperatura media en el mes de Febrero

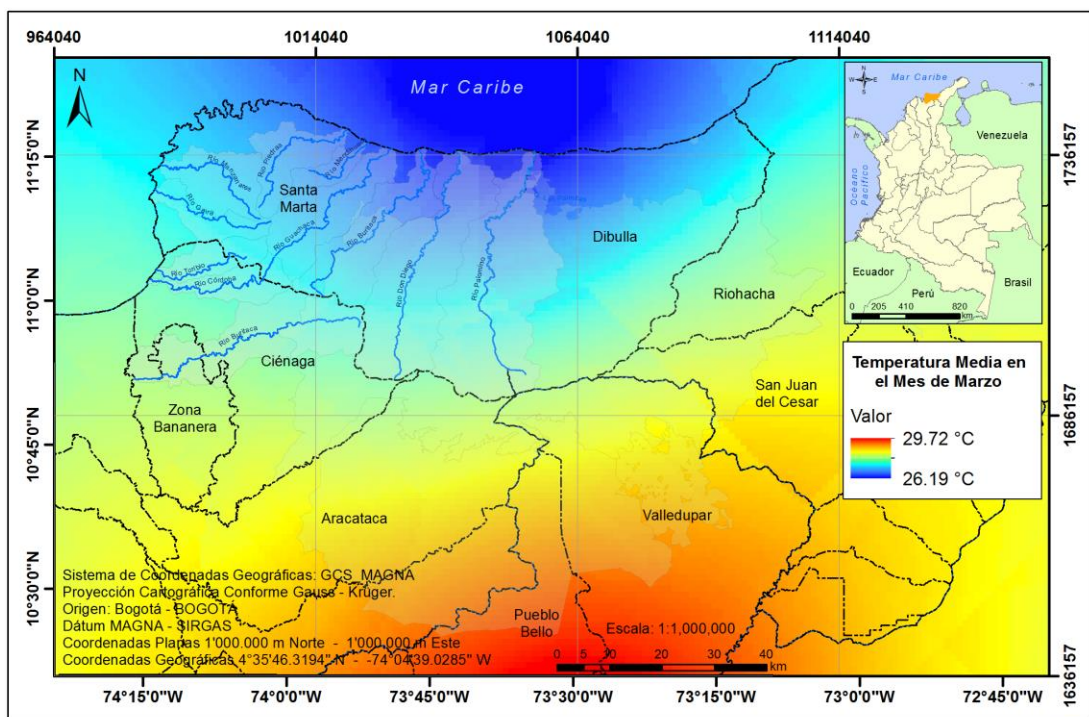


Figura 3.16 Temperatura media en el mes de Marzo

En el mes de Mayo, se registran las temperaturas más altas que oscilan entre 28°C y 30°C, con un comportamiento más o menos constante en casi toda el área de interés para el proyecto. Por último, vale la pena mencionar que a partir del mes de Septiembre y hasta el mes de Diciembre, la temperatura media tiende a bajar, oscilando entre 12°C y 28°C como máximo a nivel del mar.

3.3. GEOLOGÍA DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS

La Sierra Nevada de Santa Marta hace parte de un macizo montañoso, aislado de la cordillera de los Andes, que se levantó entre el Mioceno inferior y el Pleistoceno superior, cuando afloraron rocas de diferentes tipos: batolitos graníticos, dioríticos y cuarzomonzoníticos, rocas volcánicas y una secuencia variada de sedimentos (Bartels, 1984). Geológicamente el complejo paramuno está formado por rocas ígneas, principalmente dioritas y cuarzodioritas, que corresponden al Batolito Central (Tschanz et al., 1969) y son del Jurásico.

- *Geología de la cuenca del río Buritaca*

La cuenca presenta relieve tipo montaña, conformado en un 60% por filas y vigas, y el restante por lomas. Adicional a esto, el suelo está conformado por neises y esquistos en su mayoría, con algunos depósitos fluvio marinos y cuarzodioritas.

- *Geología de la cuenca del río Córdoba*

La cuenca presenta relieve tipo montaña, conformado en un 65% por filas y vigas, y el restante por lomas y colinas. Adicional a esto, el suelo está conformado por neises y esquistos en su mayoría, con algunos depósitos fluviales y cuarzodioritas sobre su margen suroccidental.

- *Geología de la cuenca del río Don Diego*

La cuenca presenta relieve tipo montaña, conformado en un 40% por filas y vigas, un 20% por lomas y colinas, y el restante por planos de marea. Adicional a esto, el suelo está conformado por neises y esquistos en su mayoría, con algunos depósitos fluviales, granodioritas y cuarzodioritas en su parte noroccidental.

- *Geología de la cuenca del río Frío*

La cuenca presenta relieve tipo montaña con un porcentaje bajo de piedemonte de alrededor del 10% del área total. La cuenca está conformada en un 70% por filas y vigas, un 20% por planos de marea y el restante por terrazas subrecientes. Adicional a esto, el suelo está conformado por neises y esquistos en su mayoría, con algunos depósitos fluviales, granodioritas y cuarzodioritas en su parte occidental.

- *Geología de la cuenca del río Gaira*

La cuenca presenta relieve tipo montaña en su mayoría, con algunos terrenos de tipo planicie en su margen oriental. Conformado en un 60% por filas y vigas, y un 40% por lomas y colinas. Adicional a esto, el suelo está conformado por neises y esquistos, con grandes divisiones de granodioritas y algunos depósitos fluviales al margen del río Gaira.

- *Geología de la cuenca del río Guachaca*

La cuenca presenta relieve tipo montaña, conformado en un 75% por filas y vigas, y un 20% por lomas y colinas, siendo el restante conformado por planos de marea. Adicional a esto, el suelo está conformado por neises homblendicos y esquistos casi en su totalidad.

- *Geología de la cuenca del río Manzanares*

La cuenca presenta relieve tipo montaña, conformado en un 50% por lomas y colinas, y un 35% por filas y vigas, siendo el restante conformado por abanicos terraza. Adicional a esto, el suelo está conformado por granodioritas, neises y esquistos a lo largo de la cuenca de manera casi uniforme.

- *Geología de la cuenca del río Cuenca Mendiaguaca*

La cuenca presenta relieve tipo montaña, conformado en un 70% por filas y vigas, siendo el restante conformado por lomas y colinas. Adicional a esto, el suelo está conformado por cuarzomonzonitas, neises y esquistos a lo largo de la cuenca de manera casi uniforme.

- *Geología de la cuenca del río Palomino*

La cuenca presenta relieve tipo montaña, conformado en un 60% por filas y vigas, siendo el restante conformado por lomas y colinas y algunas morrenas en la parte oriental de la cuenca. Adicional a esto, el suelo está conformado por cuarzomonzonitas, granodioritas y cuarzodioritas, con alguna presencia de neises y esquistos a lo largo de su margen norte.

- *Geología de la cuenca del río Piedras*

La cuenca presenta relieve tipo montaña, conformado en un 65% por lomas y colinas, siendo el restante conformado por filas y vigas. Adicional a esto, el suelo está conformado por cuarzomonzonitas, granodioritas y cuarzodioritas, con alguna presencia de neises y esquistos a lo largo de su margen norte.

- *Geología de la cuenca del río Toribio*

La cuenca presenta relieve tipo montaña, conformado en un 50% por filas y vigas, otro 40% conformado por lomas y colinas, y lo restante por la presencia de algunos abanicos terraza en su margen occidental. Adicional a esto, el suelo está conformado por cuarzomonzonitas, granodioritas y cuarzodioritas con algunos neises y esquistos repartidos de manera casi uniforme.

3.4. COBERTURA VEGETAL DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Para determinar la cobertura vegetal de las cuencas hidrográficas aferentes a los ríos objeto de estudio se implementó la metodología creada por la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) para el proyecto CORINE Land Cover (Coordination of Information on the Environment), que tiene como objetivo desarrollar una base de datos sobre la cobertura vegetal y uso del suelo en los países que conforman la Unión Europea a partir del análisis de imágenes recolectadas por sensores remotos como LANDSAT y SPOT.

3.4.1. SISTEMA MORFOGÉNICO DEL ÁREA GEOGRÁFICA DE ESTUDIO

El área en donde se localizan las cuencas presenta tres sistemas morfogénicos. Iniciando desde la parte más alta de las cuencas hasta la más baja, éstos se pueden describir como: sistema glacial con masas en retroceso, ambiente periglacial, glacial heredado, montaña alta inestable bordeando las anteriores unidades, vertientes medias controladas por sistemas de fallamientos menores, relictos de superficies de aplanamiento, escarpes de retroceso con vertientes cóncavas, escarpes tectónicos litorales, cañones modelados en sedimentos epicontinentales, piedemontes, planicies aluviales y terrazas fluvioamarinas.

3.4.2. FUENTE DE INFORMACIÓN

Para el desarrollo de esta fase se utilizó la cartografía base del IGAC en escala 1:100.000 y un mosaico de tres imágenes tomadas por el satélite LANDSAT 8, puesto en órbita el 11 de febrero de 2013. Las tres imágenes recolectadas tienen resolución espectral de 11 bandas y resolución espacial de 15 metros. Para la selección de las imágenes de satélite se consideró como requisito la presencia de cobertura mínima de nubes, además de la correspondencia de fecha de toma de la imagen con el año 2014.

Tabla 4. Características de las imágenes LANDSAT 8 recolectadas

Características del sensor	Información																		
No de satélites	4																		
Vida útil estimada	--																		
Altitud de orbita	785 Km en órbita polar sincrónica al sol																		
Tipo de sensor	Multiespectral 11 bandas: <table border="1" data-bbox="755 1302 1318 1621"> <thead> <tr> <th>Longitud de onda (nm)</th> <th>Banda Espectral</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>450 - 515</td> <td>Azul</td> </tr> <tr> <td>525 - 605</td> <td>Verde</td> </tr> <tr> <td>630 - 690</td> <td>Rojo</td> </tr> <tr> <td>775 - 900</td> <td>Infrarrojo Próximo</td> </tr> <tr> <td>730 - 850</td> <td>Infrarrojo Medio</td> </tr> <tr> <td>1.550 - 1.750</td> <td>Térmico Lejano</td> </tr> <tr> <td>10.40 - 12.50</td> <td>Térmico próximo</td> </tr> <tr> <td>2.090 - 2.35</td> <td>Infrarrojo Lejano</td> </tr> </tbody> </table>	Longitud de onda (nm)	Banda Espectral	450 - 515	Azul	525 - 605	Verde	630 - 690	Rojo	775 - 900	Infrarrojo Próximo	730 - 850	Infrarrojo Medio	1.550 - 1.750	Térmico Lejano	10.40 - 12.50	Térmico próximo	2.090 - 2.35	Infrarrojo Lejano
Longitud de onda (nm)	Banda Espectral																		
450 - 515	Azul																		
525 - 605	Verde																		
630 - 690	Rojo																		
775 - 900	Infrarrojo Próximo																		
730 - 850	Infrarrojo Medio																		
1.550 - 1.750	Térmico Lejano																		
10.40 - 12.50	Térmico próximo																		
2.090 - 2.35	Infrarrojo Lejano																		
Tamaño de Pixel	30 m en el multiespectral, 15 m en el pancromático.																		
Resolución temporal	16 días																		

El mosaico de imágenes obtenido para el área geográfica de estudio, que cumple con los requisitos expuestos anteriormente se muestra a continuación:

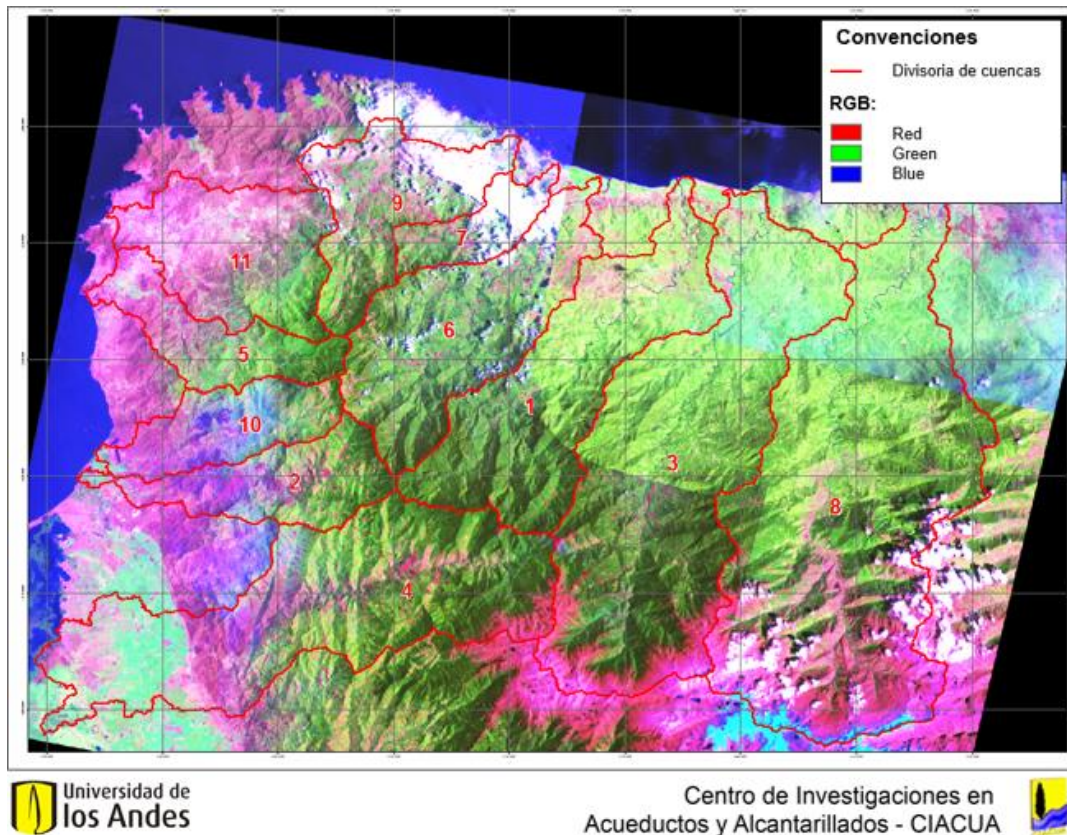


Figura 3.17 Mosaico imágenes LANDSAT 8

3.4.3. PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES

3.4.3.1. REALCES Y MEJORAMIENTOS

El realce de una imagen satelital hace referencia al mejoramiento de la calidad visual de ésta con el fin de facilitar su interpretación. Por ello, se probaron diferentes composiciones para diferenciar diversos elementos presentes en el terreno. Además, se realizó el realce del despliegue visual de la imagen para mejorar el contraste de la imagen al desplegarse en pantalla.

3.4.3.2. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA

- *Puntos de control de terreno*

Los puntos de control de terreno (GCP) son puntos fotoidentificables en las imágenes, cuya posición absoluta es conocida. Las coordenadas horizontales fueron tomadas de la cartografía básica a escalas 1:25.000 y 1:100.000 y de las elevaciones del modelo digital SRTM de 30 m.

- *Ortorectificación*

La ortorectificación consistió en la transformación de la imagen satelital en una proyección ortogonal para eliminar la inclinación de los elementos por efecto del relieve. En este proceso se utilizó el modelo SRTM de 30 m y un algoritmo del software para el procesamiento específico de las imágenes Landsat. De este proceso se obtuvieron las ortoimágenes que fueron utilizadas para la captura de los elementos planimétricos.

3.4.3.3. MOSAICOS Y CORTES

Una vez fueron elegidas las imágenes de referencia, fue necesario realizar con ellas un mosaico. Esta actividad consistió en tomar cada una de las escenas y “unirlas” a las escenas adyacentes realizando todas las correcciones y ajustes necesarios. El resultado final fue una imagen de la zona de estudio en forma de cuadrángulo que contiene los límites de la cuenca abastecedora.

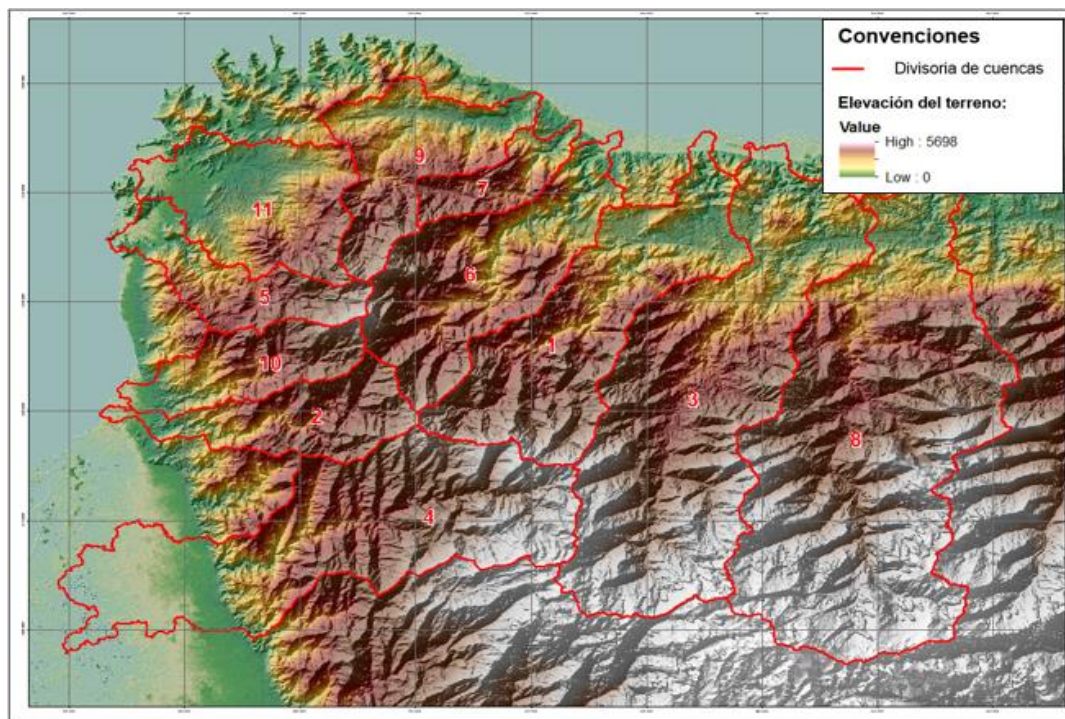


Figura 3.18 Área de trabajo con el DEM y HillShade para verificar la delimitación de cuencas

3.4.3.4. CLASIFICACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES

La clasificación digital de imágenes es un proceso de análisis basado en la interpretación de cada uno de los píxeles que componen la imagen. La limitación de este método es que se basa solamente en atributos espectrales, por esta razón, se propuso en este trabajo el uso de la segmentación (regionalización) previa a la clasificación de las imágenes a fin de poder extraer los objetos más relevantes.

El proceso de segmentación consistió en tomar de la imagen grupos de píxeles homogéneos (*semillas espectrales homogéneas*). Luego el proceso de clasificación digital de la imagen se realizó a partir de estas regiones previamente definidas.

3.4.3.5. INCORPORACIÓN DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA AL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

En esta etapa se realizó una vectorización de la información obtenida. Posteriormente se acondicionó para poder ser utilizada desde el sistema de información geográfica.

Limitaciones del método:

Si bien es posible obtener datos de superficie para los distintos usos y coberturas de suelo, la precisión de los datos obtenidos a partir de este método es inferior a la que se podría lograr mediante un censo. Ello se debe a que la resolución espacial de la imagen Landsat (30m.x30m.) no permite individualizar calles, callejones, canales, etc., las que pueden ser clasificados por ejemplo en las parcelas cultivadas. Por este mismo motivo propiedades agrícolas pequeñas (en general menores a 5ha.) donde coexisten diferentes usos de suelo, pueden no ser clasificadas correctamente, puesto que son afectadas por la respuesta espectral de áreas vecinas.

Esta limitación es minimizada con el uso de imágenes con una mayor resolución espacial, (Landsat 8) que permiten mejorar sustantivamente la clasificación.

Por otra parte, muchas veces algunos usos del suelo que quieren ser identificados en función de un objetivo determinado, como por ejemplo frutales y forestales, poseen una respuesta similar, cuyas diferencias no son lo suficientemente significativas como para ser individualizados por este método. Esta limitación intenta ser solucionada en parte, mediante el análisis multitemporal propuesto en este trabajo.

3.4.4. Desarrollo de la Leyenda de Cobertura y Uso del suelo

La leyenda y las definiciones de las unidades de cobertura de la tierra desarrolladas en la metodología fueron inicialmente agregadas en unidades gruesas que serán depuradas una vez se realice el control de campo, sin embargo estas unidades “gruesas” fueron revisadas, y se interpretaron de la misma manera en todas las escenas analizadas, La versión final de la Leyenda de coberturas de la tierra, que se sintetiza en la siguiente Tabla con su respectiva codificación.

Tabla 5 Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra - Colombia

LEYENDA NACIONAL DE COBERTURAS DE LA TIERRA - COLOMBIA

1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS		3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES	
1.1. Zonas urbanizadas		3.1. Bosques	
1.1.1. Tejido urbano continuo		3.1.1. Bosque denso	
1.1.2. Tejido urbano discontinuo		3.1.1.1.1. Bosque denso alto de tierra firme	
1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación		3.1.1.1.2. Bosque denso alto inundable	
1.2.1. Zonas industriales o comerciales		3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme	
1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados		3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable	
1.2.3. Zonas portuarias		3.1.2. Bosque abierto	
1.2.4. Aeropuertos		3.1.2.1.1. Bosque abierto alto de tierra firme	
1.2.5. Obras hidráulicas		3.1.2.1.2. Bosque abierto alto inundable	
1.3. Zonas de extracción minera y escombreras		3.1.2.2.1. Bosque abierto bajo de tierra firme	
1.3.1. Zonas de extracción minera		3.1.2.2.2. Bosque abierto bajo inundable	
1.3.2. Zonas de disposición de residuos		3.1.3. Bosque fragmentado	
1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas		3.1.4. Bosque de galería y ripario	
1.4.1. Zonas verdes urbanas		3.1.5. Plantación forestal	
1.4.2. Instalaciones recreativa		3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	
2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS		3.2.1.1. Herbazal denso	
2.1. Cultivos transitorios		3.2.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado	
2.1.1. Otros cultivos transitorios		3.2.1.1.1.2. Herbazal denso de tierra firme arbolado	
2.1.2. Cereales		3.2.1.1.1.3. Herbazal denso de tierra firme con arbustos	
2.1.3. Oleaginosas y leguminosas		3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado	
2.1.4. Hortalizas		3.2.1.1.2.2. Herbazal denso inundable arbolado	
2.1.5. Tubérculos		3.2.1.1.2.3. Arracachal	
2.2. Cultivos permanentes		3.2.1.1.2.4. Helechal	
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos		3.2.1.2. Herbazal abierto	
2.2.1.1. Otros cultivos permanentes herbáceos		3.2.1.2.1. Herbazal abierto arenoso	
2.2.1.2. Caña		3.2.1.2.2. Herbazal abierto rocoso	
2.2.1.3. Plátano y banano		3.2.2.1. Arbustal denso	
2.2.1.4. Tabaco		3.2.2.2. Arbustal abierto	
2.2.1.5. Papaya		3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	
2.2.1.6. Amapola		3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos		3.3.1. Zonas arenosas naturales	
2.2.2.1. Otros cultivos permanentes arbustivos		3.3.2. Afloramientos rocosos	
2.2.2.2. Café		3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	
2.2.2.3. Cacao		3.3.4. Zonas quemadas	
2.2.2.4. Viñedos		3.3.5. Zonas glaciares y nivales	
2.2.2.5. Coca		4. ÁREAS HÚMEDAS	
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos		4.1. Áreas húmedas continentales	
2.2.3.1. Otros cultivos permanentes arbóreos		4.1.1. Zonas Pantanosas	
2.2.3.2. Palma de aceite		4.1.2. Turberas	
2.2.3.3. Cítricos		4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	
2.2.3.4. Mango		4.2. Áreas húmedas costeras	
2.2.4. Cultivos agroforestales		4.2.1. Pantanos costeros	
2.2.5. Cultivos confinados		4.2.2. Salitral	
2.3. Pastos		4.2.3. Sedimentos expuestos en bajamar	
2.3.1. Pastos limpios		5. SUPERFICIES DE AGUA	
2.3.2. Pastos arbolados		5.1. Aguas continentales	
2.3.3. Pastos enmalezados		5.1.1. Ríos (50 m)	
2.4. Áreas agrícolas heterogéneas		5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	
2.4.1. Mosaico de cultivos		5.1.3. Canales	
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos		5.1.4. Cuerpos de agua artificiales	
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales		5.2. Aguas marítimas	
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales		5.2.1. Lagunas costeras	
2.4.5. Mosaico de cultivos y espacios naturales		5.2.2. Mares y océanos	
		5.2.3. Estanques para acuicultura marina	

3.4.5. Guías de color para la representación cartográfica

La salida final de la cartografía también estará sujeta a las directrices del trabajo de CORINE realizado para Colombia, las tablas 3, 4 y 5 se muestran los colores a utilizar dependiendo del nivel de detalle.

Para la presentación del mapa se especifican los colores que representan cada una de las unidades clasificadas. Los colores para las unidades de los niveles 1 y 2 corresponden directamente a la nomenclatura europea y los colores del nivel tres fueron definidos por el proyecto CORINE Colombia.

Tabla 6. Guía de color para el nivel I de la metodología CORINE land Cover.






NIVEL 1	Rojo (%)	Rojo (/255)	Verde (%)	Verde (/255)	Azul (%)	Azul (/255)	Muestra	Correspondencia al Nivel 3
1	80,00	204	0,00	0	0,00	0		111
2	100,00	255	100,00	255	65,10	166		211
3	50,20	128	100,00	255	0,00	0		311
4	65,10	166	65,10	166	100,00	255		411
5	0,00	0	80,00	204	94,90	242		511

Tabla 7. Guía de color para el nivel II de la metodología CORINE land Cover.


















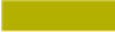





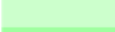

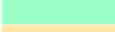














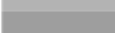










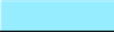

NIVEL 2	Rojo (%)	Rojo (/255)	Verde (%)	Verde (/255)	Azul (%)	Azul (/255)	Muestra	Correspondencia al nivel 3
11	80,00	204	0,00	0	0,00	0		111
12	80,00	204	30,20	77	16,47	42		121
13	65,10	166	0,00	0	80,00	204		131
14	100,00	255	50,20	128	50,20	128		141
21	100,00	255	100,00	255	65,10	166		211
22	94,90	242	80,00	204	65,10	166		221
23	80,00	204	100,00	255	80,00	204		231
24	100,00	255	90,20	230	65,10	166		241
31	50,20	128	100,00	255	0,00	0		311
32	80,00	204	94,90	242	30,20	77		321
33	76,08	194	76,08	194	76,08	194		331
41	65,10	166	65,10	166	100,00	255		411
42	80,00	204	80,00	204	100,00	255		421
51	0,00	0	80,00	204	94,90	242		511
52	0,00	0	100,00	255	65,10	166		521

Tabla 8. Guía de color para el nivel III de la metodología CORINE land Cover

NIVEL 3	Rojo (%)	Rojo (/255)	Verde (%)	Verde (/255)	Azul (%)	Azul (/255)	Muestra
213	93,33	238	90,98	232	0,00	0	
214	82,35	210	80,39	205	0,00	0	
215	70,58	180	69,01	176	0,00	0	
221	94,90	242	80,00	204	65,10	166	
222	92,94	237	71,76	183	50,59	129	
223	90,59	231	62,74	160	34,90	89	
224	89,02	227	55,29	141	21,57	55	
225	83,92	214	47,84	122	11,76	30	
231	80,00	204	100,00	255	80,00	204	
232	62,35	159	100,00	255	62,35	159	
233	61,57	157	100,00	255	78,43	200	
241	100,00	255	90,20	230	65,10	166	
242	100,00	255	84,71	216	45,88	117	
243	100,00	255	78,82	201	25,49	65	
244	99,61	254	70,98	181	0,00	0	
245	83,92	214	60,00	153	0,00	0	
311	50,20	128	100,00	255	0,00	0	
312	43,92	112	87,84	224	0,00	0	
313	38,04	97	76,08	194	0,00	0	
314	33,73	86	67,45	172	0,00	0	
315	28,24	72	56,47	144	0,00	0	
321	80,00	204	94,90	242	30,20	77	
322	67,06	171	86,27	220	6,27	16	
323	58,82	150	75,29	192	5,49	14	
331	76,08	194	76,08	194	76,08	194	
332	70,20	179	70,20	179	70,20	179	
333	61,96	158	61,96	158	61,96	158	
334	53,73	137	53,73	137	53,73	137	
335	39,61	101	39,61	101	70,59	180	
411	65,10	166	65,10	166	100,00	255	
412	30,20	145	56,86	145	100,00	255	
413	45,10	115	45,10	115	100,00	255	
421	80,00	204	80,00	204	100,00	255	
422	71,76	183	71,76	183	100,00	255	
423	65,49	167	65,49	167	100,00	255	
511	0,00	0	80,00	204	94,90	242	
512	27,06	69	87,84	224	100,00	255	
513	58,43	149	92,94	237	100,00	255	

3.4.6. Resultados de Cobertura y uso del suelo

Las descripciones de aquí en adelante mencionadas son tomadas en su totalidad del estudio publicado por el IDEAM: “Leyenda nacional de coberturas de la tierra, metodología CORINE land cover, adaptada para Colombia esc 1/100.000”¹ las definiciones se llevan hasta el nivel adecuado de tal manera que permita su aplicabilidad a la presente escala de trabajo: 1/100.000. Los detalles de unidad mínima de mapeo fueron por supuesto adecuados y su espacialización se presenta seguidamente después de la definición base, se reitera del estudio mencionado.

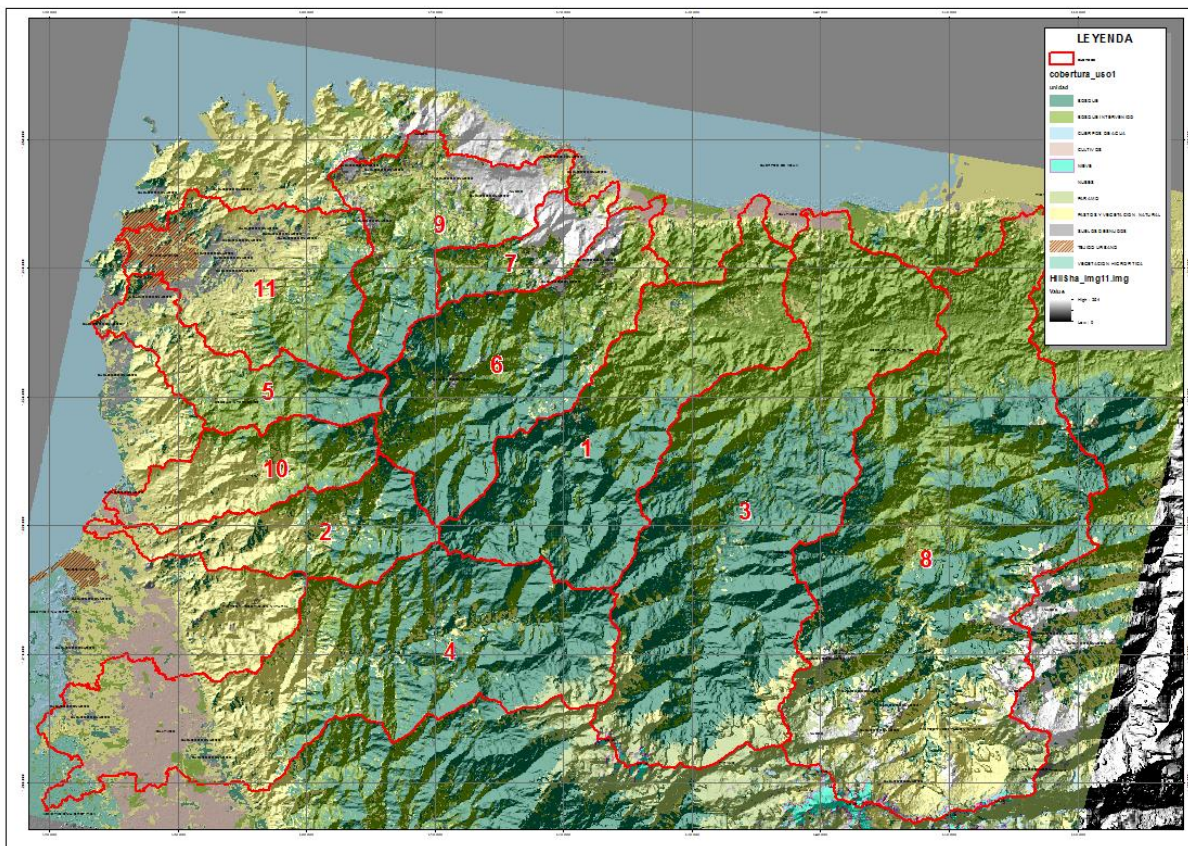


Figura 3.4.6.1 Clasificación realizada del mosaico Landsat. sobre Hill Shade.

¹ IDEAM, 2010. Leyenda Nacional de coberturas de la tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia. Escala 1/100.000. Instituto Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales. Bogotá, D.C. 72p.



Figura 3.4.6.2 Leyenda de cobertura vegetal

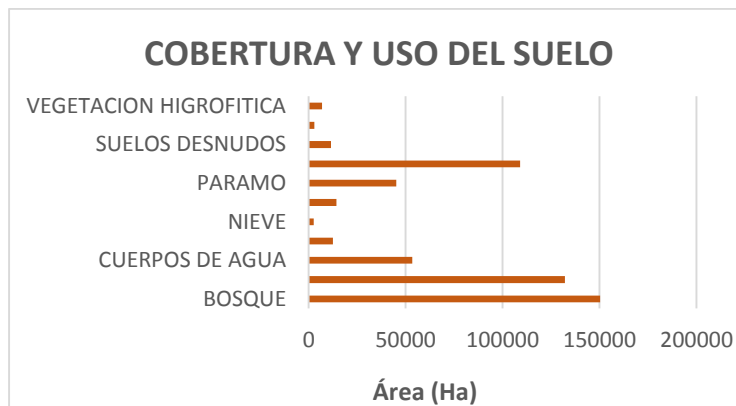


Figura 3.4.6.3 Distribución por área de las diferentes coberturas.

3.4.6.1. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES

Comprende un grupo de coberturas vegetales de tipo boscoso, arbustivo y herbáceo, desarrolladas sobre diferentes sustratos que son el resultado de procesos climáticos; también por aquellos territorios constituidos por suelos desnudos y afloramientos rocosos y arenosos, resultantes de la ocurrencia de procesos naturales o inducidos de degradación. Para la leyenda las unidades se agrupan en las siguientes tres categorías:

Tabla 9. Unidades de coberturas de la tierra para los bosques y áreas seminaturales

NIVEL			
1	2	3	4
3. BOSQUES Y ÁREAS NATURALES	3.1. Bosques	3.1.1. Bosque Denso	3.1.1.1. Bosque denso alto
			3.1.1.2. Bosque denso bajo
		3.1.2. Bosque Abierto	3.1.2.1. Bosque abierto alto
			3.1.2.2. Bosque abierto bajo
		3.1.3. Bosque Fragmentado	3.1.3.1. Bosque fragmentado con pastos y cultivos
			3.1.3.2. Bosque fragmentado con vegetación secundaria
	3.1.4. Bosque de galería y ripario		
	3.1.5. Plantación forestal	3.1.5.1. Plantación de coníferas	
		3.1.5.2. Plantación de latifoliadas	
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	3.2.1. Herbazal	3.2.1.1. Herbazal Denso
			3.2.1.2. Herbazal abierto
		3.2.2. Arbustal	3.2.2.1. Arbustal denso
			3.2.2.2. Arbustal abierto
	3.2.3. Vegetación secundaria o en transición.	3.2.3.1. Vegetación secundaria alta	
		3.2.3.2. Vegetación secundaria baja	
	3.3. Áreas abiertas sin o con poca vegetación	3.3.1. Zonas arenosas naturales	3.3.1.1. Playas
			3.3.1.2. Arenales
			3.3.1.1. Campos de dunas
		3.3.2. Afloramientos rocosos	
		3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	
	3.3.4. Zonas quemadas		
	3.3.5. Zonas glaciares y nivales	3.3.5.1. Zonas glaciares	
		3.3.5.2. Zonas nivales	

3.4.6.2. BOSQUE INTERVENIDO CON VEGETACIÓN SECUNDARIA

Comprende los territorios cubiertos por bosques naturales donde se presentó intervención humana y recuperación del bosque, de tal manera que el bosque mantiene su estructura original. Las áreas de intervención están representadas en zonas de vegetación secundaria, las cuales se observan como parches de variadas formas que se distribuyen de forma irregular en la matriz de bosque. Su origen es debido al abandono de áreas de pastos y cultivos, donde ocurre un proceso de regeneración natural del bosque en los primeros estados de sucesión vegetal, en las zonas montañosas debidas a la dinámica cultural de las comunidades indígenas y en las zonas bajas a los colonos y campesinos. Incluye bosque de galería y ripario que se refiere a las coberturas constituidas por vegetación arbórea ubicada en las márgenes de cursos de agua permanentes o temporales. Este tipo de cobertura está limitada por su amplitud, ya que bordea los cursos de agua y los drenajes naturales. Cuando la presencia de estas franjas de bosques ocurre en regiones de sabanas se conoce como bosque de galería o cañadas, las otras franjas de bosque en cursos de agua de zonas andinas son conocidas como bosque ripario, esta unidad no está diferenciada, pero es lógico que se encuentra.

Incluye:

- Bosque de galería o ripario con ancho de la franja mayor o igual a 50 m y área superior a 25 ha
- El curso de agua con ancho menor o igual a 50 m

- Coberturas de asociaciones de palma y guadua a lo largo de los márgenes de los drenajes, con altura del dosel y densidad del bosque natural.

No incluye:

- Bosques inundables con área mayor o igual a 25 ha
- El curso de agua con ancho mayor o igual a 50 m -5.1.1.

3.4.6.3. CUERPOS DE AGUA

Comprende aquellas coberturas constituidas por terrenos anegadizos, que pueden ser temporalmente inundados y estar parcialmente cubiertos por vegetación acuática, localizados en los bordes marinos y al interior del continente. Las unidades se agrupan en las siguientes dos categorías:

Tabla 10. Unidades de coberturas de la tierra para las áreas húmedas

NIVEL		
1	2	3
4. ÁREAS HÚMEDAS	4.1. Áreas húmedas continentales	4.1.1. Zonas Pantanosas
		4.1.2. Turberas
		4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
	4.2. Áreas húmedas costeras	4.2.1. Pantanos costeros
		4.2.2. Salitral
		4.2.3. Sedimentos expuestos en bajamar

3.4.6.3.1. PANTANOS COSTEROS

Son áreas costeras bajas cubiertas por vegetación herbácea y arbustiva rala, adaptada a los ambientes salobres, las cuales están bajo la influencia de la marea. Se localizan en zonas asociadas con deltas, estuarios, lagunas costeras y planicies marinas de inundación, generalmente ocupando espacios cóncavos detrás de la barra de playa. Son susceptibles a la inundación durante períodos de nivel alto del mar, tormentas y oleaje fuerte. Se encuentran colonizadas por plantas halófilas diferentes al mangle.

Incluye:

- Coberturas de vegetación herbácea y arbustiva halófila que crece sobre arenas y arcillas intermareales con área menor a 5 ha
- Pantanos de estuario que reciben aguas dulces o salobres que están recubiertos por vegetación, con área inferior a 5 ha.

No incluye:

- Marismas terrestres cubiertas por comunidades de mangle con área mayor a 10 ha - 3.1.4.
- Lagunas costeras-5.2.1.
- Playas, arenales y dunas-3.3.1.
- Salitral-4.2.2.

3.4.6.3.2. SUPERFICIES DE AGUA

Son los cuerpos y cauces de aguas permanentes, intermitentes y estacionales, localizados en el interior del continente y los que bordean o se encuentran adyacentes a la línea de costa continental, como los mares (Tabla 6). Se incluyen en esta clasificación los fondos asociados con los mares, cuya profundidad no supere los 12 metros. Las unidades se agrupan en las siguientes dos categorías:

Tabla 11. Unidades de coberturas de la tierra para las superficies de agua

NIVEL			
1	2	3	4
5. SUPERFICIES DE AGUA	5.1. Aguas continentales	5.1.1. Ríos (50m)	
		5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	
		5.1.3. Canales	
		5.1.4. Cuerpos de agua artificiales	5.1.4.1. Embalses
	5.1.4.2. Lagunas de oxidación		
	5.1.4.3. Estanques para acuicultura continental		
	5.2. Aguas marítimas	5.2.1. Lagunas Costeras	
		5.2.2. Mares y océanos	
		5.2.3. Estanques para acuicultura marina	

Las unidades presentes en el área de trabajo son las siguientes:

- *Lagunas, lagos y ciénagas naturales*

Superficies o depósitos de agua naturales de carácter abierto o cerrado, dulce o salobre, que pueden estar conectadas o no con un río o con el mar. En la zona andina hay cuerpos de agua (lagos y lagunas) situados en alta montaña que constituyen las áreas de nacimiento de ríos. En las planicies aluviales se forman cuerpos de agua denominados ciénagas, que están asociadas con las áreas de desborde de los grandes ríos. Las ciénagas pueden contener pequeños islotes arenosos y lodosos, de formas irregulares alargadas y fragmentadas, de pequeña área, los cuales quedan incluidos en el cuerpo de agua siempre que no representen más de 30% del área del cuerpo de agua.

Incluye:

- Lagunas, ciénagas u otros cuerpos agua naturales con área mayor o igual a 5 ha
- Cobertura de vegetación acuática flotante con área menor a 5 ha y que no represente más de 30% del área del cuerpo de agua
- Deltas interiores de lodos y arenas con una superficie menor a 5 ha y que el cuerpo del delta no represente más de 30% de la superficie total del cuerpo de agua.
- No incluye:

- Cuerpos de aguas artificiales utilizados para la cría de especies acuícolas -5.1.4.3.
- Superficies con vegetación acuática flotante con área mayor a 5 ha-4.1.3.

- *Aguas marítimas*

Esta cobertura comprende los cuerpos de agua natural salada y salobre asociada con mares u océanos que bordean el litoral. Fueron definidas las siguientes unidades para clasificar las aguas marítimas:

- *Mares y océanos*

Comprende los cuerpos de agua salada que bordean la zona litoral y que se extienden a partir de la línea de costa en período de bajamar.

Incluye:

- Extensión del mar o del océano
- Extensión del mar o del océano incluida en la estructura de los puertos industriales o de recreo con un área menor a 5 ha.

No incluye:

- Islas, archipiélagos o tierras localizadas en el medio del mar u océano con área mayor a 25 ha
- Extensión del mar o del océano incluida en la estructura de los puertos industriales con área mayor a 5 ha -1.2.3.
- Extensión del mar o del océano incluida en la estructura de los puertos de recreo con área mayor a 5 ha -1.4.2.

3.4.6.4. CULTIVOS

Son los terrenos dedicados principalmente a la producción de alimentos, fibras y otras materias primas industriales, ya sea que se encuentren con cultivos, con pastos, en rotación y en descanso o barbecho. Comprende las áreas dedicadas a cultivos permanentes, transitorios, áreas de pastos y las zonas agrícolas heterogéneas (Tabla 3), en las cuales también se pueden dar usos pecuarios además de los agrícolas. Las unidades se agrupan en las siguientes cuatro categorías:

3.4.6.4.1. CULTIVOS TRANSITORIOS

Comprende las áreas ocupadas con cultivos cuyo ciclo vegetativo es menor a un año, llegando incluso a ser de sólo unos pocos meses, como por ejemplo los cereales (maíz), los tubérculos (yuca), las oleaginosas (el ajonjolí y el algodón), la mayor parte de las hortalizas y algunas especies de flores a cielo abierto. Tienen como característica fundamental, que después de la cosecha es necesario volver a sembrar o plantar para seguir produciendo. Fueron definidas las siguientes unidades:

NIVEL		
1	2	3
2. TERRITORIOS AGRICOLAS	2.1. Cultivos transitorios	2.1.1. Otros cultivos transitorios
		2.1.2. Cereales
		2.1.3. Oleaginosas y leguminosas
		2.1.4. Hortalizas
		2.1.5. Tubérculos
	2.2. Cultivos Permanentes	2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos
		2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos
		2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos
		2.2.4. Cultivos agroforestales
		2.2.5. Cultivos confinados
	2.3. Pastos	2.3.1. Pastos limpios
		2.3.2. Pastos arbolados
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	2.4.1. Mosaico de cultivos
		2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos
		2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales		
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales		

3.4.6.4.2. CULTIVOS PERMANENTES HERBÁCEOS

Comprende los territorios dedicados a cultivos cuyo ciclo vegetativo es mayor a un año, produciendo varias cosechas sin necesidad de volverse a plantar; se incluyen en esta categoría los cultivos de herbáceas como caña de azúcar, caña panelera, plátano y banano; los cultivos arbustivos como café y cacao; y los cultivos arbóreos como palma africana y árboles frutales.

Cobertura compuesta principalmente por cultivos permanentes de hábito herbáceo como caña de azúcar y panelera, plátano, banano y tabaco. Las herbáceas son plantas que no presentan órganos leñosos, son verdes y con ciclo de vida vegetativo anual.

Incluye:

- Los cultivos permanentes de hábito herbáceo que se pueden identificar con área superior a 2 ha
- Suelos en preparación, relacionados con el manejo para próximos cultivos herbáceos
- Infraestructuras asociadas con el cultivo herbáceo con áreas menores a 1 ha.

No incluye:

- Los cultivos permanentes herbáceos con área menor a 2 ha., los cuales se deben asociar con otras coberturas-2.4.1. / 2.4.2. / 2.4.3.
- Los cultivos permanentes de hábito diferente al herbáceo-2.2.2. ó 2.2.3.
- Los cultivos permanentes herbáceos que estén bajo invernaderos o polisombras.-2.2.5.
- Los cultivos permanentes herbáceos que se encuentren en asociación con especies arbóreas, de forma conjunta, formando complejos agrícolas agroforestales-2.2.4.

3.4.6.4.2. CULTIVOS PERMANENTES ARBÓREOS

Cobertura principalmente ocupada por cultivos de hábito arbóreo, diferentes de plantaciones forestales maderables o de recuperación, como cítricos, palma, mango, etc.

Incluye:

- Todos los cultivos permanentes de hábito arbóreo que se puedan identificar en la imagen de satélite con área superior a 2 ha
- Infraestructuras asociadas con el cultivo arbóreo con áreas menores a 1 ha
- Vías o caminos asociados con el patrón de distribución del cultivo permanente arbóreo.

No incluye:

- Los cultivos permanentes arbóreos con área menor a 2 ha, se deben asociar a otras coberturas+2.4.1. / 2.4.2. / 2.4.3.
- Los cultivos permanentes de hábito diferente al arbóreo+2.2.1. ó 2.2.2.
- Los cultivos permanentes arbóreos que se encuentren en asociación con especies arbustivas o herbáceas, de forma conjunta, formando complejos agrícolas agroforestales+2.2.4.
- Plantaciones forestales destinadas a actividades maderables o de recuperación-3.1.5.

Dentro de los cultivos permanentes arbóreos, se diferenciaron cuatro tipos de cobertura: palma de aceite, cítricos, mango y otros cultivos, las cuales se describen a continuación:

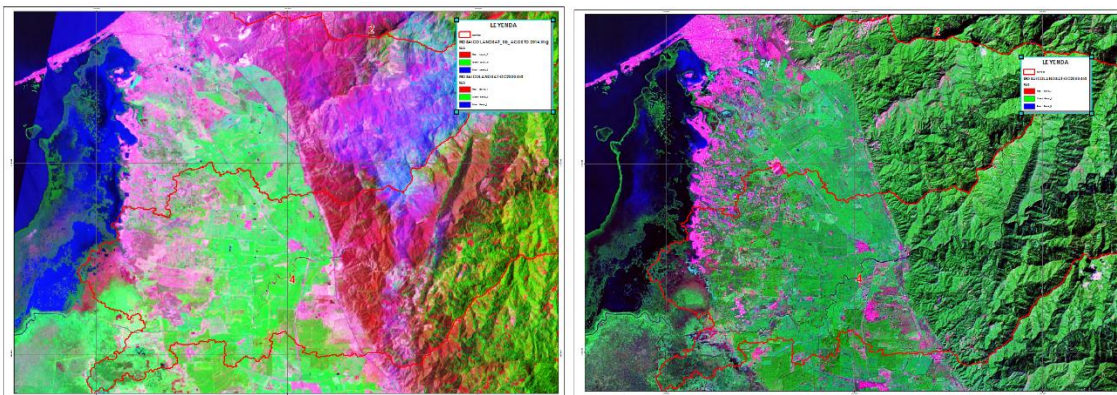


Figura 3.4.6.4 Variaciones en las plantaciones forestales y núcleos urbanos al oriente de la zona de trabajo

3.4.6.5. NIEVE

Corresponde a las masas glaciares de las cuencas altas, ocupadas permanentemente por nieves, su variabilidad es extrema, más aún por el retroceso glacial debido al cambio climático, la siguiente ilustración muestra la variación de las masa glaciares, curiosamente para el 2014 había una extensión mayor que en el año 2000.

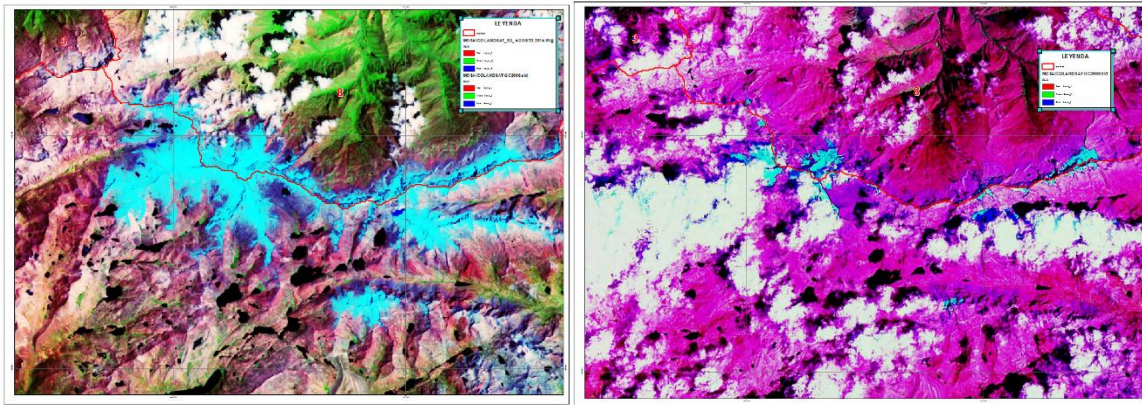


Figura 3.4.6.5 Diferencias en las masas glaciares a la izquierda la imagen 2014, a la derecha imagen 2000

3.4.6.6. NUBES

Para los momentos de la captura de la escena de satélite en algunos lugares aparecen nubes y sombras que dificultan la interpretación, donde fue posible se generaron mosaicos con otras escenas para eliminar estas áreas.

3.4.6.7. PÁRAMO

Corresponde a vegetación de las áreas periglaciares con dominio de las plantas arrosetadas principalmente de la familia compositae y los cordones de ericáceas, con arbustales poco densos.

3.4.6.8. PASTOS

Comprende las tierras cubiertas con hierba densa de composición florística dominada principalmente por la familia Poaceae, dedicadas a pastoreo permanente por un período de dos o más años. Algunas de las categorías definidas pueden presentar anegamientos temporales o permanentes cuando están ubicadas en zonas bajas o en depresiones del terreno. Una característica de esta cobertura es que en un alto porcentaje su presencia se debe a la acción antrópica, referida especialmente a su plantación, con la introducción de especies no nativas principalmente, y en el manejo posterior que se le hace. Para su clasificación se consideraron las siguientes unidades de pastos:

3.4.6.8.1. PASTOS LIMPIOS

Esta cobertura comprende las tierras ocupadas por pastos limpios con un porcentaje de cubrimiento mayor a 70%; la realización de prácticas de manejo (limpieza, enclamiento y/o fertilización, etc.) y el nivel tecnológico utilizados impiden la presencia o el desarrollo de otras coberturas.

En Colombia, se encuentran coberturas de pastos limpios asociadas con una amplia variedad de relieves y climas, con un desarrollo condicionado principalmente a las prácticas de manejo utilizadas según el nivel tecnológico disponible o las costumbres de cada región.

Incluye:

- Pastos limpios con área mayor o igual a 25 ha
- Cuerpos de agua asociados (lagunas) con área menor a 25 ha
- Zonas de pastos limpios sujetas a inundaciones temporales con área menor a 25 ha
- Pastos con presencia esporádica a ocasional de arbustales o árboles, con cubrimiento menor a 30% del área de pastos
- Pastos limpios con presencia de áreas de cultivos, con cubrimiento menor a 30% del área de pastos
- Infraestructuras asociadas con los pastos manejados (viviendas rurales, cercas vivas, setos).
- Coberturas de pastos ubicadas en zonas inundables, que durante el período de estiaje (niveles bajos del agua) de los ríos y las ciénagas permiten el uso para pasturas, con un nivel mínimo de manejo.

No incluye:

- Pastos limpios en áreas de entrenamiento militar -1.4.2.
- Césped de las áreas deportivas-1.4.2.
- Pastos naturales y pastos no aptos para el ganado -3.2.1.
- Cultivos de forraje -2.1.1.
- Pasto en rotación con cultivos anuales o transitorios -2.1.1.
- Pastos con densidad de árboles mayor a 30% del área -2.3.2.
- Pastos con densidad de malezas o rastrojos mayor al 30% del área -2.3.3.
- Pastos limpios con presencia de cultivos y espacios naturales distribuidos en forma dispersa, con área menor a 25 ha -2.4.2. / 2.4.3. / 2.4.4.

Notas: En el proceso de interpretación, la cobertura de pastos limpios puede confundirse con la clase herbazal denso de tierra firme no arbolado (3.2 1.11.1.). Su diferenciación debe apoyarse en la ubicación geográfica de las sabanas naturales conformadas por herbazales, para lo cual se hace necesaria la utilización de información complementaria.

La cobertura de pastos limpios con alto grado de manejo también puede presentar confusión con las coberturas de cultivos herbáceos transitorios o permanentes, especialmente cuando los pastos presentan arreglos espaciales geométricos, debido a la variedad de tonos y colores que se observan en la imagen. Para su diferenciación se hace necesaria la utilización de información auxiliar como

fotografías aéreas, mapas temáticos y otra información agrícola, así como un buen nivel de referencia local del intérprete.

Cuando las áreas cubiertas por pastos limpios son abandonadas por períodos largos (seis meses a tres años, según la región del país) se puede presentar el crecimiento de arbustales y el desarrollo de vegetación de sucesiones tempranas, debiéndose clasificar como pastos enmalezados o vegetación secundaria o en transición, dependiendo de la cobertura dominante presente (unidades 2.3.3./3.2.3.).

3.4.6.8.2. PASTOS Y VEGETACIÓN NATURAL

Son las coberturas representadas por tierras con pastos y malezas conformando asociaciones de vegetación secundaria, debido principalmente a la realización de escasas prácticas de manejo o la ocurrencia de procesos de abandono. En general, la altura de la vegetación secundaria es menor a 1,5 m.

Incluye:

- Pastos enmalezados bordeados con setos
- Pastos enmalezados que incluyen zonas inundables o pantanos con área menor a 25 ha
- Pequeñas áreas de cultivos que no representan más de 25% del área de la superficie de pastos enmalezados.

No incluye:

- Pastos enmalezados con área menor a 25 ha; deben asociarse con otras coberturas - 2.3.1. / 2.3.2. / 2.4.3. / 2.4.4.

3.4.6.8.3. ÁREAS CON VEGETACIÓN HERBÁCEA Y/O ARBUSTIVO (HERBAZAL ABIERTO)

Comprende un grupo de coberturas vegetales de tipo natural y producto de la sucesión natural cuyo hábito de crecimiento es arbustivo y herbáceo desarrolladas sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales, con poca o ninguna intervención antrópica.

Para la leyenda de CORINE Land Cover adaptada para Colombia, en esta clase se incluyen otros tipos de cobertura tales como las áreas cubiertas por vegetación principalmente arbustiva con dosel irregular y presencia de arbustos, palmas, enredaderas y vegetación de bajo porte. Las coberturas definidas para el área de trabajo son las siguientes:

Esta cobertura esta constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente herbáceos desarrollados en forma natural en diferentes sustratos, los cuales forman una cobertura abierta (30% a 70% de ocupación). Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original ni sus características funcionales (IGAC, 1999).

De acuerdo con la información complementaria disponible y la escala de trabajo, esta unidad puede ser dividida en las siguientes clases:

3.4.6.8.4. ARBUSTAL ABIERTO ESCLERÓFILO

Este tipo de arbustal abierto está caracterizado por presentar una vegetación esclerófila compuesta por arbustos achaparrados y por árboles pequeños, caracterizados por tener hojas duras y caducifolias, con cutícula gruesa y succulenta, por ejemplo, los cactus y/o plantas espinosas. Comprende numerosas especies adaptadas a los climas áridos tales como el Trupillo (*Prosopis juliflora* DC.) y el Dividivi (*Caesalpinia coriaria* (Jacq.) Willd.), entre otros.

Incluye:

- Otras coberturas incluidas con área inferior al área mínima cartografiable de acuerdo con la escala de trabajo y que representen menos de 30% de la unidad, tales como
- Cobertura de arbustales densos
- Cobertura de pastos
- Tierras desnudas y degradadas
- Zonas quemadas.

No incluye:

- Zonas arenosas naturales.-3.3.1.

3.4.6.9. ZONAS URBANIZADAS

Las zonas urbanizadas incluyen los territorios cubiertos por infraestructura urbana y todos aquellos espacios verdes y redes de comunicación asociados con ellas, que configuran un tejido urbano. Presenta dos unidades:

3.4.6.9.1. TEJIDO URBANO CONTINUO

Son espacios conformados por edificaciones y los espacios adyacentes a la infraestructura edificada. Las edificaciones, vías y superficies cubiertas artificialmente cubren más de 80% de la superficie del terreno. La vegetación y el suelo desnudo representan una baja proporción del área del tejido urbano. La superficie de la unidad debe ser superior a dos hectáreas.

Incluye:

- Centro de aglomeraciones y centros históricos
- Zonas de habitación periféricas
- Parqueaderos y áreas cubiertas por asfalto o cemento
- Casas individuales y de jardín
- Red de carreteras, con ancho de la vía inferior a 8 m
- Áreas deportivas, pequeños parques y zonas peatonales con tamaño inferior a 1 ha
- Áreas verdes urbanas (parques y prados) cuando representan menos del 20% del área de la unidad

- Edificaciones de servicios públicos (escuelas, hospitales), mercados o industrias, con sus infraestructuras asociadas (parqueaderos, infraestructuras de comunicación, áreas asfaltadas y verdes) con tamaño inferior a 1 ha
- Escombreras y vertederos con área inferior a 1 ha
- Cementerios con vegetación o sin vegetación con un área inferior a 1 ha
- Infraestructura vacacional y recreativa con su red vial, edificios y áreas de recreación, si el tamaño es inferior a 5 ha y si está conectado al ‘tejido urbano continuo’.

No Incluye:

- Áreas verdes urbanas que representan más de 20% del área del polígono -1.4.1.
- Instalaciones de servicios públicos (escuelas, hospitales), mercados o industria, con sus infraestructuras asociadas (parqueaderos, infraestructuras de comunicación, áreas asfaltadas y verdes) de un tamaño superior a 5 ha-1.2.1. / 1.2.3. / 1.2.4.
- Áreas deportivas, pequeños parques y zonas peatonales con tamaño superior a 1 ha - 1.4.1. / 1.4.2.
- Red de carreteras, con ancho de la vía superior a 50 m -1.2.2.
- Escombreras y vertederos con tamaño superior a 1 ha -1.3.2.
- Cementerios con tamaño superior a 1 ha -1.4.1.

Aunque el nivel permite diferenciar diversos elementos del territorio, la cobertura en mención se localiza en el extremo oriental del límite de la cuenca abastecedora de la ciénaga de Mallorquín en lo que se conoce como el sector occidental del municipio de Barranquilla comprende entre otros los siguientes barrios: Los Olivos, La Paz, Villa del Rosario, Malvinas, El Bosque, Santo Domingo de Guzman, etc. Y el municipio de Galapa.

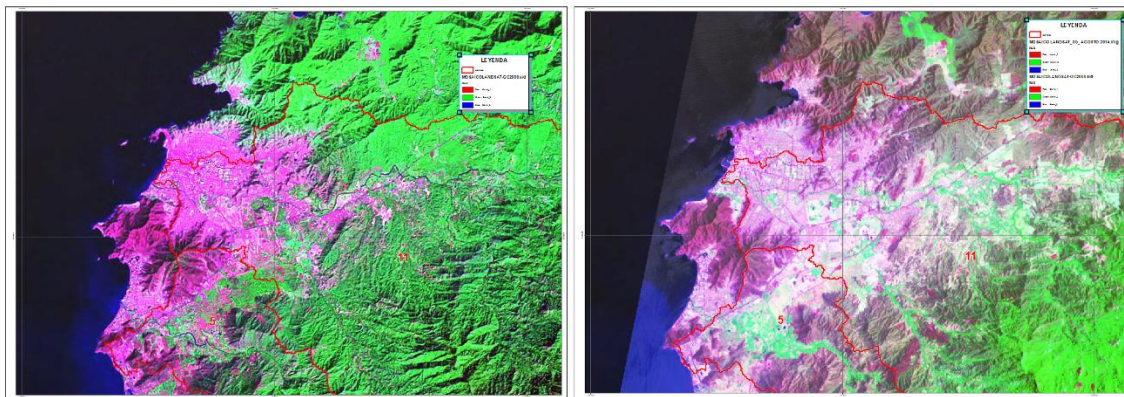


Figura 3.4.6.6 Panorámicas de tejido Urbano continuo y discontinuo

3.4.6.9.2. TEJIDO URBANO DISCONTINUO

Son espacios conformados por edificaciones y zonas verdes. Las edificaciones, vías e infraestructura construida cubren la superficie del terreno de manera dispersa y discontinua, ya que el resto del área está cubierta por vegetación. Esta unidad puede presentar dificultad para su delimitación cuando otras coberturas de tipo natural y seminatural se mezclan con áreas clasificadas como zonas urbanas.

Incluye:

- Casas individuales, con jardín y espacios verdes
- Manzanas menos densas con espacios verdes al interior
- Parqueaderos y áreas cubiertas por asfalto o cemento
- Red de carreteras, con ancho de la vía menor a 50 m
- Áreas deportivas, pequeños parques y zonas peatonales menores a 5 ha
- Áreas verdes urbanas (parques y prados) cuando representan hasta el 20% del área de la unidad delimitada
- Instalaciones de servicios públicos (escuelas, hospitales), mercados o industrias, con sus infraestructuras asociadas (parqueaderos, infraestructuras de comunicación, áreas asfaltadas y verdes) con área menor a 1 ha
- Escombreras y vertederos con área menor a 1 ha
- Cementerios con vegetación o sin vegetación con área menor a 5 ha
- Infraestructuras vacacionales y recreativas con sus redes viales, edificios y áreas de recreación, con área menor a 1 ha y si está conectada al centro poblado.

No incluye:

- Áreas verdes urbanas con área mayor o igual a 2 ha-1.4.1.
- Áreas deportivas, pequeños parques y zonas peatonales con área superior a 1 ha-1.4.1. / 1.4.2.
- Instalaciones de servicios públicos (escuelas, hospitales), mercados o industrias, con su infraestructura asociada (parqueaderos, infraestructuras de comunicación, áreas asfaltadas y verdes) con área superior a 1 ha -1.2.1. / 1.2.3. / 1.2.4.
- Red de carreteras con ancho de la vía mayor o igual a 50 m -1.2.2.
- Escombreras y vertederos con área mayor o igual a 5 ha-1.3.2.
- Cementerios con área mayor o igual a 1 ha -1.4.1.

3.4.6.9.3. SUELOS DESNUDOS

Corresponde a las zonas desprovistas de vegetación bien sea playas o escarpes en rocas.

3.4.6.10. VEGETACIÓN HIGROFÍTICA

Comprende aquellas coberturas constituidas por terrenos anegadizos, que pueden ser temporalmente inundados y estar parcialmente cubiertos por vegetación acuática, localizados en los bordes marinos y al interior del continente. Las unidades se agrupan en las siguientes dos categorías:

Tabla 12. Unidades de coberturas de la tierra para las áreas húmedas

NIVEL		
1	2	3
4. ÁREAS HÚMEDAS	4.1. Áreas húmedas continentales	4.1.1. Zonas Pantanosas
		4.1.2. Turberas
		4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
	4.2. Áreas húmedas costeras	4.2.1. Pantanos costeros
		4.2.2. Salitral
		4.2.3. Sedimentos expuestos en bajamar

Unidades presentes en el área de trabajo:

3.4.6.10.1. PANTANOS COSTEROS

Son áreas costeras bajas cubiertas por vegetación herbácea y arbustiva rala, adaptada a los ambientes salobres, las cuales están bajo la influencia de la marea. Se localizan en zonas asociadas con deltas, estuarios, lagunas costeras y planicies marinas de inundación, generalmente ocupando espacios cóncavos detrás de la barra de playa. Son susceptibles a la inundación durante períodos de nivel alto del mar, tormentas y oleaje fuerte. Se encuentran colonizadas por plantas halófilas diferentes al mangle.

Incluye:

- Coberturas de vegetación herbácea y arbustiva halófila que crece sobre arenas y arcillas intermareales con área menor a 5 ha
- Pantanos de estuario que reciben aguas dulces o salobres que están recubiertos por vegetación, con área inferior a 5 ha.

No incluye:

- Marismas terrestres cubiertas por comunidades de mangle con área mayor a 10 ha - 3.1.4.
- Lagunas costeras-5.2.1.
- Playas, arenales y dunas-3.3.1.
- Salitral-4.2.2.

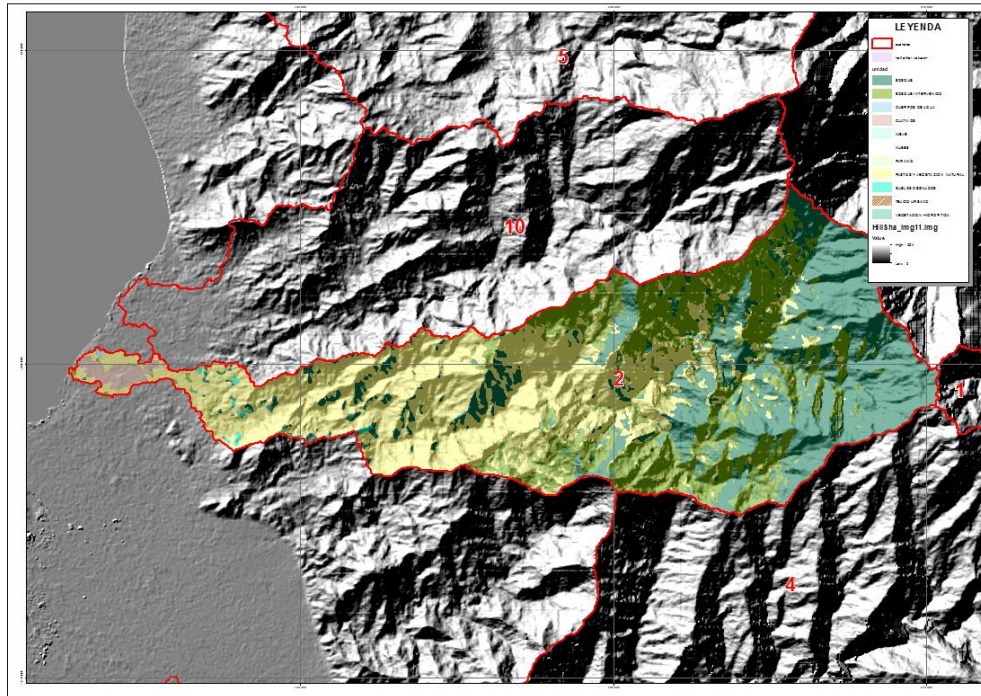


Figura 3.4.6.8 Clasificación de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat 2014 para la cuenca del río Córdoba

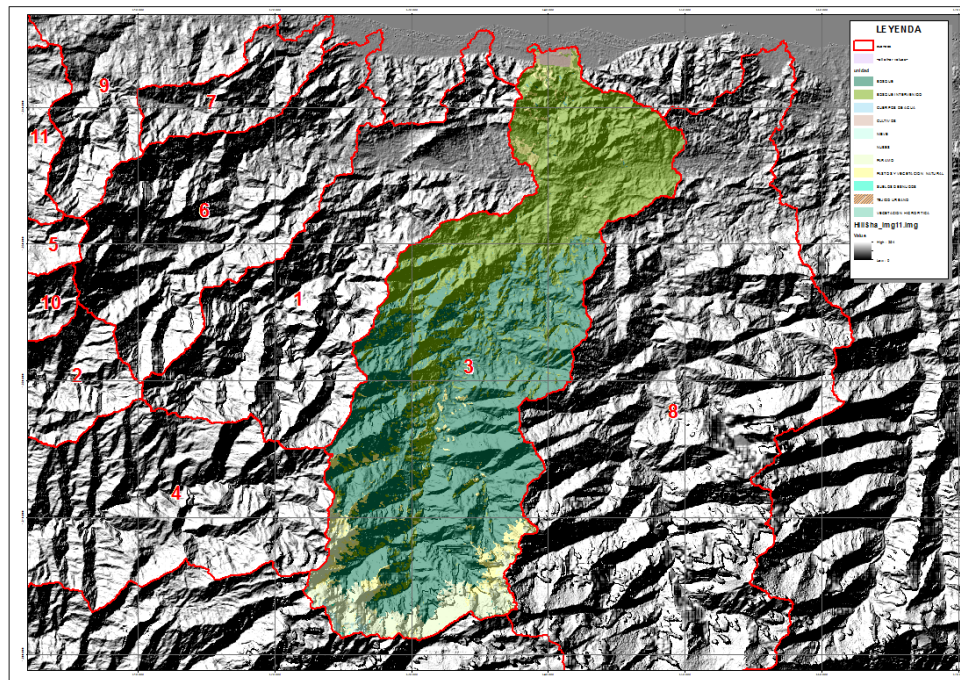


Figura 3.4.6.9. Clasificación de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat 2014 para la cuenca del río Don Diego

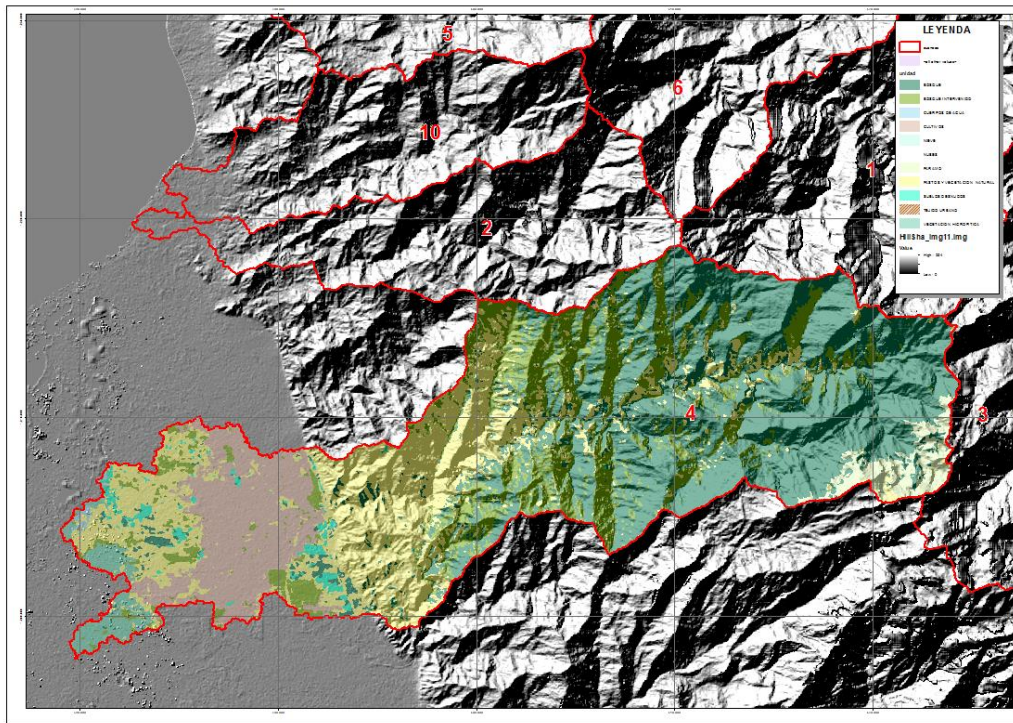


Figura 3.4.6.10 Clasificación de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat 2014 para la cuenca del río Frío

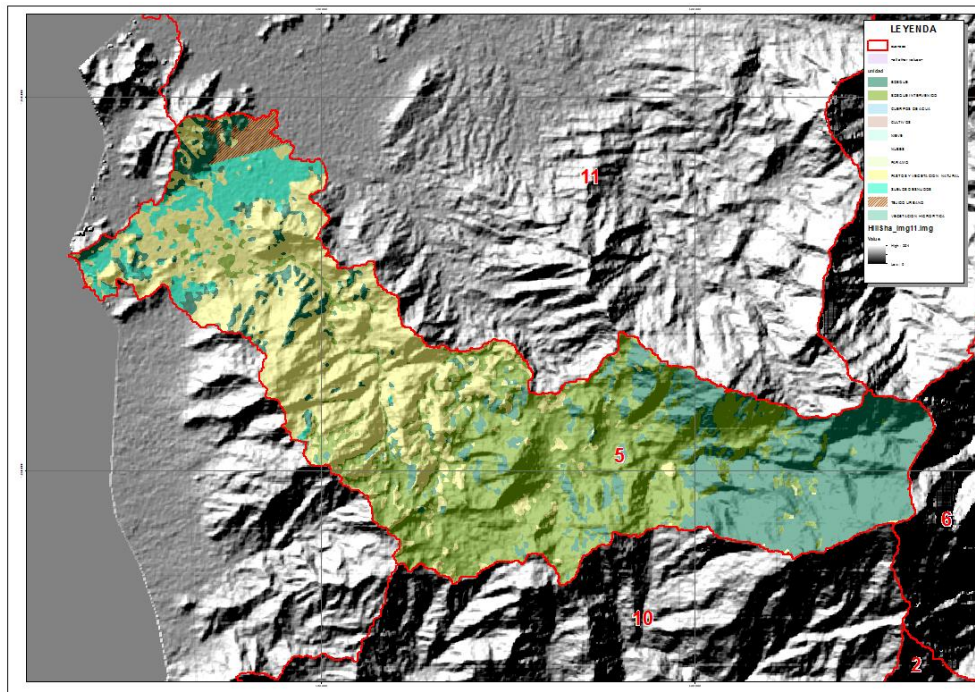


Figura 3.4.6.11 Clasificación de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat 2014 para la cuenca del río Gaira

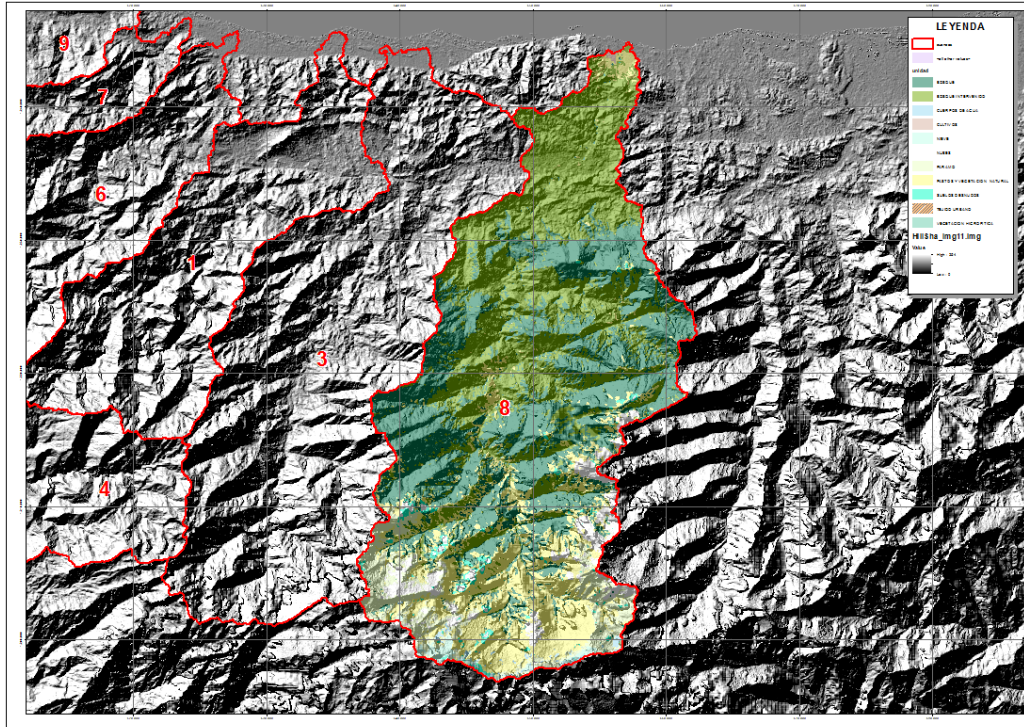


Figura 3.4.6.14 Clasificación de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat 2014 para la cuenca del río Palomino

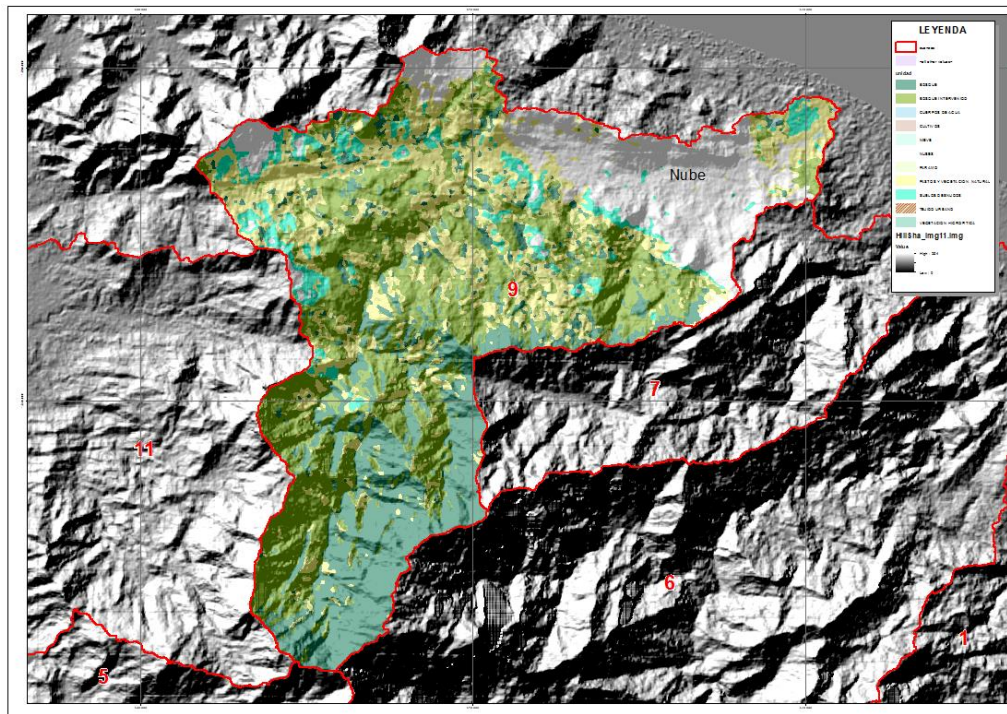


Figura 3.4.6.15 Clasificación de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat 2014 para la cuenca del río Piedras

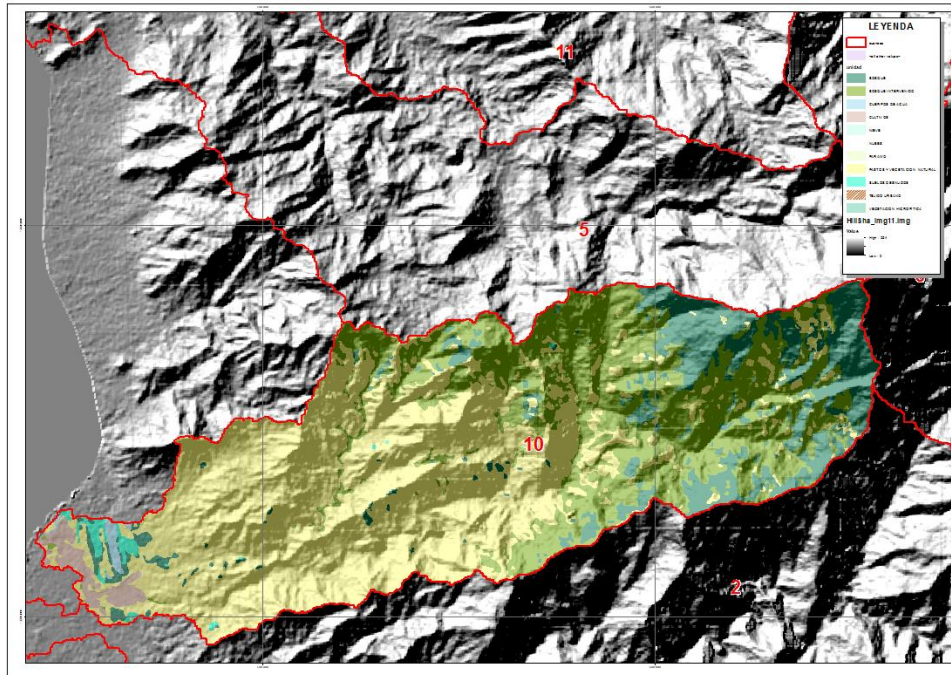


Figura 3.4.6.16 Clasificación de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat 2014 para la cuenca del río Toribio

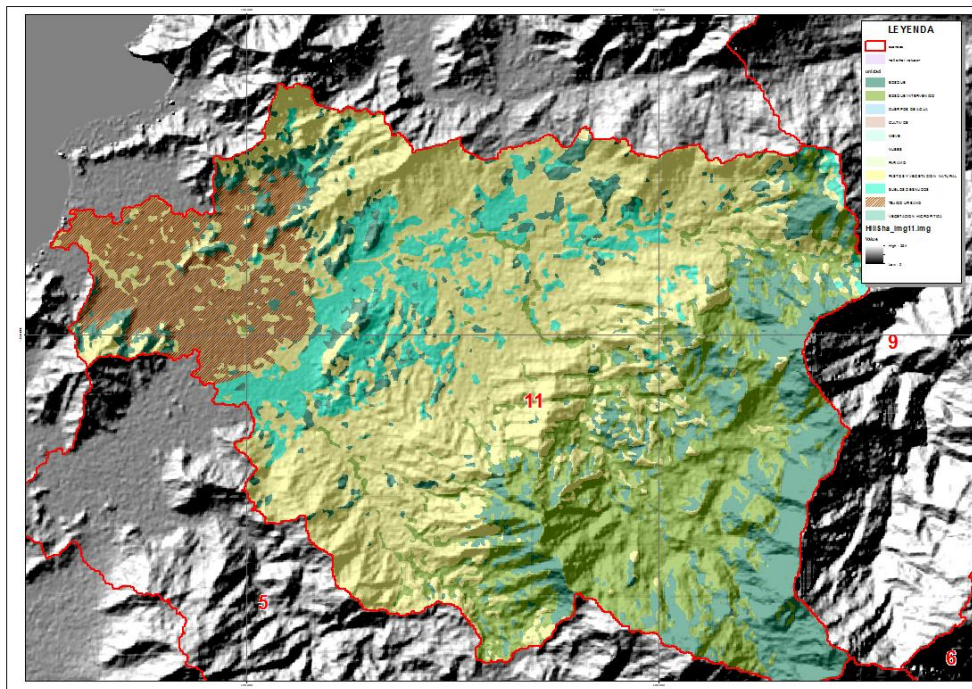
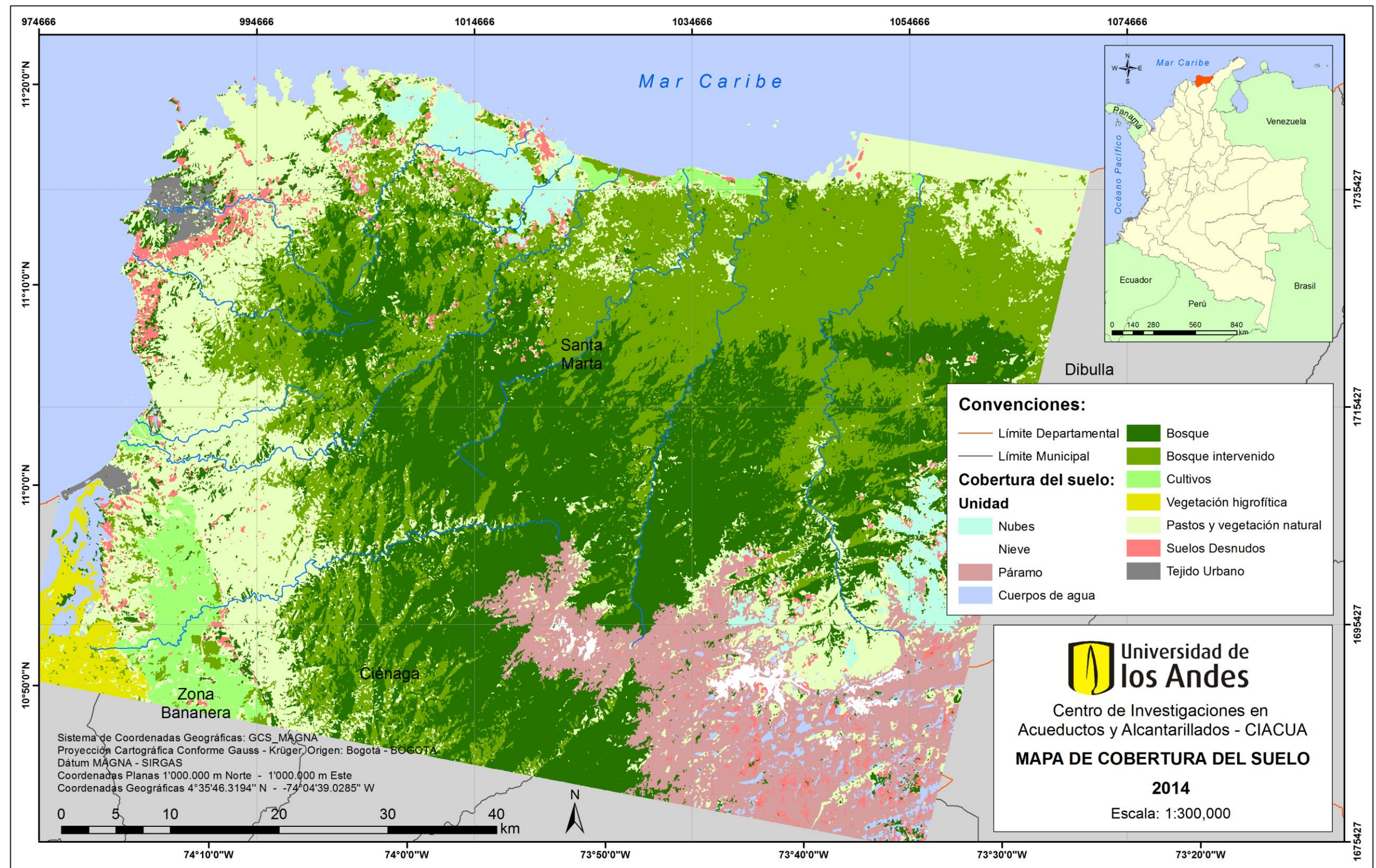


Figura 3.4.6.17 Clasificación de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat 2014 para la cuenca del río Manzanares



3.5. CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LAS CUENCAS

La medición y el análisis matemático de la configuración de la superficie de la tierra, la forma y las dimensiones del relieve proporcionan la base de la investigación de los estudios geomorfológicos (Bates y Jackson, 1980). Este enfoque se ha denominado recientemente como morfometría. Dentro de los principales parámetros que están involucrados en esta área de estudio se encuentran el área, altura, volumen, pendiente, perfil y textura de las formas terrestres. Para los estudios morfométricos se debe tener en cuenta los siguientes conceptos.

3.5.1. PARÁMETROS GENERALES DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA

- *Área de drenaje (A):*

El área de drenaje se define como la proyección horizontal de toda el área plana de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural. El cálculo del área de drenaje de las cuencas hidrográficas se realizó en ArcGIS 10.2.2, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 13. Área de las cuencas hidrográficas

Cuenca	Área de Drenaje (km ²)	Cuenca	Área de Drenaje (km ²)
Río Buritaca	304.27	Río Manzanares	185.21
Río Córdoba	124.59	Río Mendihuaca	61.67
Río Don Diego	561.95	Río Palomino	690.19
Río Frío	442.99	Río Piedras	159.69
Río Gaira	111.09	Río Toribio	108.32
Río Guachaca	267.33		

La cuenca con menor área de drenaje corresponde al río Mendihuaca con 61.67 km² y la cuenca con mayor área de drenaje pertenece al río Palomino con 690.19 km². Según Aparicio (1992), las cuencas se pueden clasificar con respecto a su área de la siguiente manera:

Tabla 14. Clasificación de una cuenca con respecto a su área

Área de la cuenca en km ²	Descripción
< 25	Cuenca muy pequeña
25 – 250	Cuenca pequeña
250 – 500	Cuenca intermedia – pequeña
500 – 2500	Cuenca intermedia – grande
2500 – 5000	Cuenca grande
> 5000	Cuenca muy grande

A partir de los parámetros de clasificación establecidos por Aparicio (1992) descritos en la Tabla 2, se puede determinar que los ríos Mendihuaca, Toribio, Gaira, Córdoba, Piedras y Manzanares tienen cuencas pequeñas. Por otra parte, los ríos Guachaca, Buritaca y Frío, reciben aportes de cuencas de tamaño intermedio – pequeño. Por último, las cuencas de los ríos Don Diego y Palomino se pueden considerar de tamaño intermedio – grande.

- *Perímetro de la cuenca (P):*

El perímetro de la cuenca es el límite exterior de la cuenca que encierra su área, depende de la superficie y de la forma de la cuenca (Pareta & Pareta, 2011). Se mide a lo largo de las divisiones entre cuencas hidrográficas y puede ser usado como un indicador del tamaño y forma de la cuenca (Pareta & Pareta, 2011). El perímetro de las cuencas hidrográficas se calculó en ArcGIS 10.2.2. y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 15. Perímetro de las cuencas hidrográficas

Cuenca	Perímetro (km)	Cuenca	Perímetro (km)
Río Buritaca	111.54	Río Manzanares	76.02
Río Córdoba	74.25	Río Mendihuaca	46.72
Río Don Diego	147.30	Río Palomino	158.25
Río Frío	143.70	Río Piedras	77.73
Río Gaira	73.31	Río Toribio	60.56
Río Guachaca	91.56		

- *Longitud de la cuenca (L):*

La longitud de la cuenca se define como la longitud de una línea recta paralela a la corriente principal (Schumm, 1956).

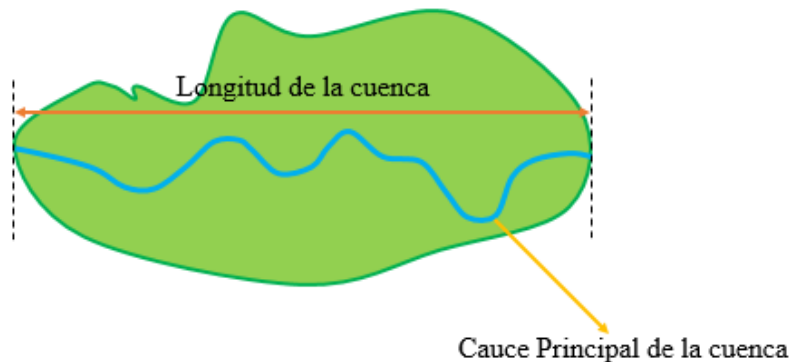


Figura 3.4.6.18 Longitud de una cuenca hidrográfica

El cálculo de la longitud de las cuencas se realizó trazando una línea perpendicular al cauce principal de la red hídrica correspondiente a cada una de las cuencas hidrográficas. Posteriormente,

se calculó la longitud de la línea perpendicular utilizando el software ArcGIS 10.2.2. El cauce principal de la cuenca se determinó a partir del Método de Ordenamiento de Corrientes de Horton & Strahler (1952) haciendo uso de la herramienta *Hydrology* → *Stream Order* del mismo software.

Tabla 16. Longitud de las cuencas hidrográficas

Cuenca	Longitud de la cuenca (km)	Cuenca	Longitud de la cuenca (km)
Río Buritaca	33.64	Río Manzanares	21.71
Río Córdoba	24.23	Río Mendihuaca	16.97
Río Don Diego	45.12	Río Palomino	48.53
Río Frío	44.92	Río Piedras	22.46
Río Gaira	23.04	Río Toribio	21.56
Río Guachaca	29.83		

- *Longitud de la corriente principal (Lc):*

La longitud de la corriente principal de una cuenca hidrográfica es la distancia entre su nacimiento y su desembocadura. Para calcular la longitud de la corriente principal se utilizó la herramienta *Hydrology* → *Flow Length* de ArcGIS 10.2.2., que permite calcular la longitud de la ruta de flujo más larga dentro de una cuenca a partir de una capa en formato raster con la dirección de flujo.

Tabla 17. Longitud del cauce principal de las cuencas hidrográficas

Cuenca	Longitud de la Corriente Principal (km)	Cuenca	Longitud de la Corriente Principal (km)
Río Buritaca	57.87	Río Manzanares	33.48
Río Córdoba	44.55	Río Mendihuaca	25.34
Río Don Diego	67.22	Río Palomino	77.89
Río Frío	68.65	Río Piedras	37.84
Río Gaira	33.55	Río Toribio	33.01
Río Guachaca	44.46		

- *Ancho de la cuenca (W):*

El ancho de la cuenca se define como la relación entre el área y la longitud de la cuenca:

$$W = \frac{A}{L}$$

Donde:

A: Área de la cuenca

L: Longitud de la cuenca

Tabla 18. Ancho de las cuencas hidrográficas

Cuenca	Ancho (km)	Cuenca	Ancho (km)
Río Buritaca	9.05	Río Manzanares	8.53
Río Córdoba	5.14	Río Mendihuaca	3.63
Río Don Diego	12.45	Río Palomino	14.22
Río Frío	9.86	Río Piedras	7.11
Río Gaira	4.82	Río Toribio	5.02
Río Guachaca	8.96		

- *Desnivel altitudinal (DA):*

El desnivel altitudinal es la diferencia entre la cota más alta de la cuenca y la más baja.

$$DA = H_{max} - H_{min}$$

Tabla 19. Desnivel altitudinal de las cuencas hidrográficas

Cuenca	H_{min} (msnm)	H_{max} (msnm)	DA (msnm)	Cuenca	H_{min} (msnm)	H_{max} (msnm)	DA (msnm)
Río Buritaca	0	3285	3285	Río Manzanares	0	2407	2407
Río Córdoba	0	2484	2484	Río Mendihuaca	0	1889	1889
Río Don Diego	0	5230	5230	Río Palomino	0	5698	5698
Río Frío	0	4209	4209	Río Piedras	0	2424	2424
Río Gaira	0	2842	2842	Río Toribio	0	2849	2849
Río Guachaca	0	2861	2861				

Los ríos que nacen en la Estrella Hídrica de San Lorenzo como el río Córdoba, Gaira, Guachaca, Manzanares, Mendihuaca, Piedras y Toribio tienen longitudes entre 25.3 y 44.55 km y su nacimiento se ubica en un gradiente altitudinal de 1889 a 2961 msnm. Por otra parte, los ríos que nacen en el Pico Colón como el río Buritaca, Don Diego, Frío y Palomino, nacen entre los 3285 y 5698 msnm y tienen longitudes entre 57.87 y 77.89 km. En consecuencia, los ríos que nacen en el Pico Colón tienen mayor desnivel altitudinal y mayor longitud que los ríos que nacen en la estrella de San Lorenzo.

- *Coordenadas geográficas del centroide:*

El centroide coincide con el centro de gravedad de un cuerpo con la forma de la cuenca y un espesor constante.

Tabla 20.a. Coordenadas del centroide de las cuencas hidrográficas

Cuenca	X (m)	Y (m)	Z (msnm)
Río Buritaca	1024434.714886	1720272.217446	416
Río Córdoba	999201.196785	1711580.10194	929

Tabla 8.b. Coordenadas del centroide de las cuencas hidrográficas

Cuenca	X (m)	Y (m)	Z (msnm)
Río Don Diego	1034421.902364	1713629.287105	985
Río Frío	1002344.677173	1700585.098867	1042
Río Gaira	993365.714316	1724376.169986	480
Río Guachaca	1015888.405012	1725195.143265	272
Río Manzanares	995627.246383	1731308.971936	139
Río Mendihuaca	1016490.911562	1733398.396343	979
Río Palomino	1048892.747423	1709473.593796	1345
Río Piedras	1008978.400041	1735170.935071	688
Río Toribio	994908.235227	1716274.753665	667

Sistema de Coordenadas Geográficas: GCS_MAGNA. Proyección Cartográfica Conforme Gauss - Krüger.

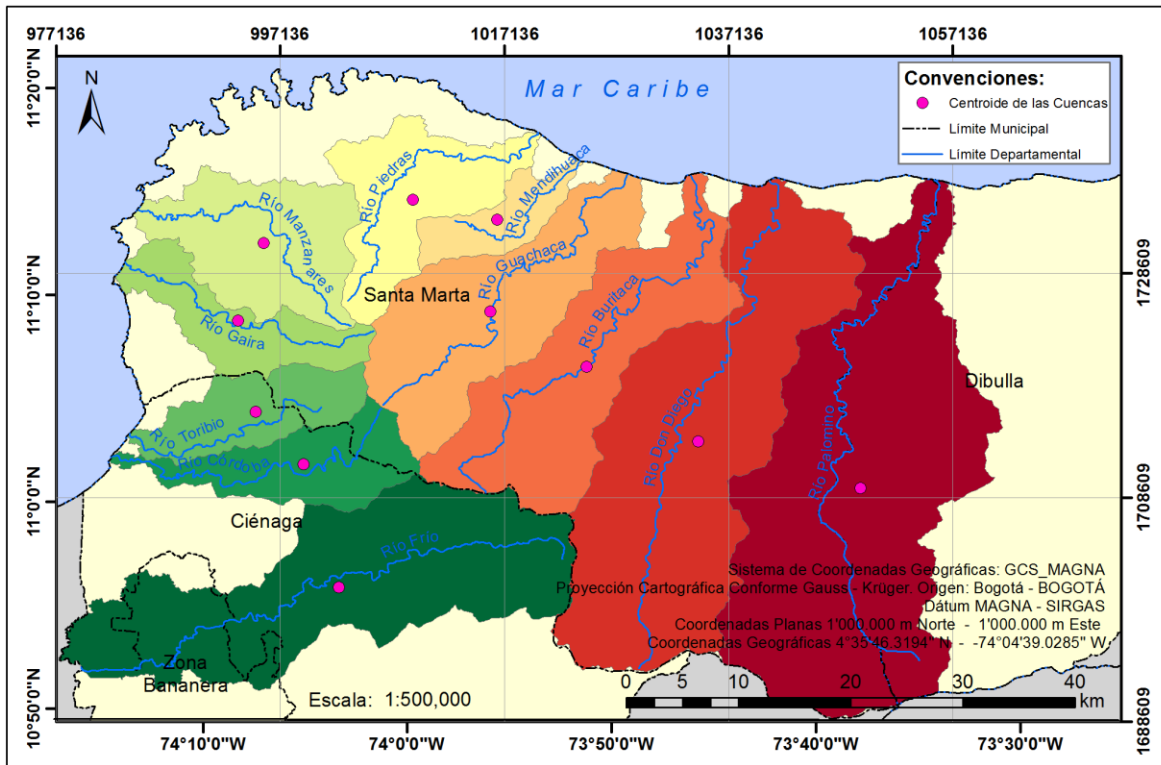


Figura 3.4.6.19 Mapa de Centroides de las Cuencas Hidrográficas

3.5.2. PARÁMETROS QUE CARACTERIZAN LA FORMA DE LA CUENCA

La forma de la cuenca es determinante de su comportamiento hidrológico. El índice de Gravelius y el factor de forma, utilizados para determinar la forma de la cuenca, permiten relacionar el movimiento del agua dentro de la cuenca y las respuestas de ésta a tal movimiento.

- *Índice de Gravellius o coeficiente de compacidad (Kc):*

El coeficiente de compacidad (Kc) es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que la cuenca. Llamas (1993) establece la siguiente expresión para calcular el coeficiente de compacidad:

$$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

A: Área de la cuenca

P: Perímetro de la cuenca

Tabla 21. Coeficiente de Compacidad (Kc) de las cuencas hidrográficas

Cuenca	Coeficiente de Compacidad (Kc)	Cuenca	Coeficiente de Compacidad (Kc)
Río Buritaca	1.79	Río Manzanares	1.56
Río Córdoba	1.86	Río MendiHuaca	1.67
Río Don Diego	1.74	Río Palomino	1.69
Río Frío	1.91	Río Piedras	1.72
Río Gaira	1.95	Río Toribio	1.63
Río Guachaca	1.57		

El Kc se encuentra definido entre valores mayores o iguales a 1. Donde Kc = 1 indica que la forma de la cuenca es equivalente a una circunferencia e indica mayor tendencia a concentrar grandes volúmenes de agua. Según el valor de kc correspondiente la cuenca se puede determinar su forma y la tendencia a presentar inundaciones como se presenta a continuación:

Tabla 22. Clasificación de las cuencas hidrográficas según su valor de Kc

Rango de Kc	Forma de la cuenca	Tendencia a presentar inundaciones
1.00 – 1.25	Redonda a oval redonda	Grado de inundación crítica
1.25 – 1.50	Oval redonda a oval oblonga	Alto grado de inundación
1.50 – 1.75	Oval oblonga a rectangular oblonga	Grado de inundación moderado
> 1.75	Rectangular	Grado de inundación bajo

A partir de los valores de kc obtenidos para las cuencas de los ríos en estudio es posible afirmar que las cuencas aferentes a los ríos Don Diego, Guachaca, Manzanares, MendiHuaca, Palomino, Piedras y Toribio tienen forma oval oblonga a rectangular oblonga y por lo tanto presentan un grado de inundación moderado. Con respecto a los valores de kc obtenidos para las cuencas de los ríos Buritaca, Córdoba, Frío y Gaira se puede establecer que sus cuencas tienen forma rectangular, característica que permite que éstas tengan un grado de inundación bajo.

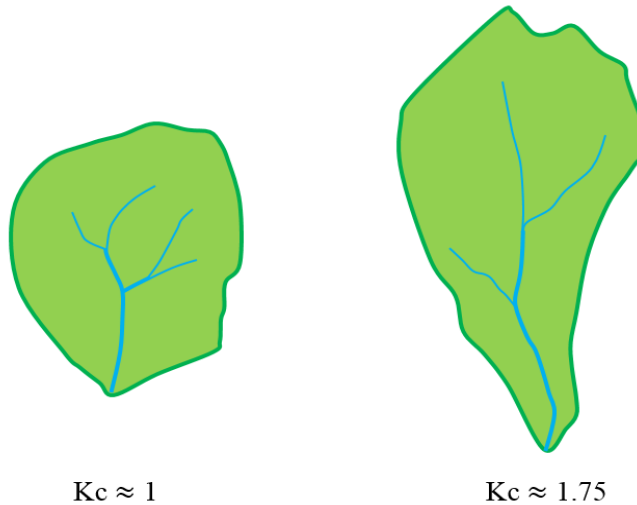


Figura 3.4.6.20 Forma de la cuenca según el coeficiente de compacidad (K_c)

Por otra parte, se ha establecido que existe una relación proporcional entre el coeficiente de compacidad de la cuenca y el tiempo de concentración en la misma. Es decir, el tiempo de concentración de una cuenca con $K_c \approx 1.75$ es mayor que el tiempo de concentración de una cuenca con $K_c \approx 1$. Por lo tanto, se espera que la magnitud de escorrentía generada por una cuenca con mayor K_c sea menor que la escorrentía generada por la cuenca con menor K_c . Para el caso en estudio, si se comparan las cuencas de los ríos Manzanares y Gaira cada una con K_c asociado de 1.56 y 1.95 respectivamente, se puede esperar que el tiempo de concentración sea mayor en el río Gaira y a su vez su tendencia a presentar inundaciones será menor que el río Manzanares.

- *Factor de forma (K_f)*

El factor de forma (K_f) según Horton (1932), puede ser definido como la relación entre el área y la longitud del cauce mayor o corriente principal de la cuenca siguiendo el curso del agua más largo.

$$K_f = \frac{A}{L_c^2}$$

Tabla 23. Factor de forma (K_f) de las cuencas hidrográficas

Cuenca	Factor de forma (K_f)	Cuenca	Factor de forma (K_f)
Río Buritaca	0.09	Río Manzanares	0.17
Río Córdoba	0.06	Río Mendihuaca	0.10
Río Don Diego	0.12	Río Palomino	0.11
Río Frío	0.09	Río Piedras	0.11
Río Gaira	0.10	Río Toribio	0.10
Río Guachaca	0.14		

4. ESTIMACIÓN DE CAUDALES

4.1 INFORMACIÓN HISTÓRICA DE CAUDALES MEDIOS

En este aparte se analiza las mediciones históricas, con que cuenta el IDEAM, de caudales medios diarios en las corrientes de interés para la presente consultoría. Esta información es de gran valor toda vez que hace referencia a caudales reales medidos y no a valores obtenidos de modelos lluvias escorrentía.

4.1.1 Estaciones consultadas

A continuación se relacionan las estaciones limnimétricas y Limnigráficas que fueron tenidas en cuentas para la estimación de caudales.

Código	Nombre	Tipo	Coordenadas		Elevación (m.s.n.m.)	Periodo Medido	Medición	Corriente	Total de datos
			N	W					
15017030	Minca	Limnigráfica	1108	7407	650	1995-2012	Diaria	Gaira	6210
15017040	Guachaca	Limnigráfica	1114	7350	40	1995-2000, 2003, 2007-2011	Diaria	Guchaca	4383
15017080	Buritaca	Limnimétrica	1114	7345	28	2005-2012	Diaria	Buritaca	2922
15027010	Pte Carretera	Limnigráfica	1114	7341	40	1995-2012	Diaria	Don Diego	6210
15027020	Pte Carretera	Limnigráfica	1114	7334	30	1995-2012	Diaria	Palomino	6210
29067050	Canal Florida	Limnigráfica	1045	7405	60	1995-2011	Diaria	Piedras	5841
29067070	Río Frío	Limnigráfica	1054	7409	30	1995-2008	Diaria	Frío	5114

Como se puede ver en la tabla anterior, 7 corrientes de las 11 corrientes que se estudian como posibles alternativas de abastecimiento de agua para el acueducto de la Ciudad de Santa Marta, cuentan con medición de caudales medios diarios. Esta situación permite conocer con un alto grado de confiabilidad los caudales ofertados por estas cuencas.

De acuerdo con lo anterior 4 corrientes no cuentan con mediciones de caudal medio diario: Río Manzanares, Río Toribio, Río Córdoba y el Río Mendiaguaca. Este último Río por su corto recorrido y por contar con una cuenca reducida no se puede considerar como una posible fuente de agua superficial. Por su parte, para estimar los caudales medios de los Ríos Toribio y Córdoba, se generaron modelos lluvias escorrentía, que serán presentados el próximo Numeral.

4.2 Caudales medios

Debido a que el fin de este estudio hidrológico es determinar la oferta hídrica de las diferentes cuencas en estudio, con fines de aprovechamiento para un sistema de acueducto, no es representativo estimar el caudal medio anual. Por tal razón se determinaron los caudales medios mensuales multianuales, con el fin de establecer los caudales medios de aquellas épocas del ciclo hidrológicos en las menos precipitación se presente. De esta manera se podrá conocer la oferta de las cuencas en su estado más crítico.

4.2.1 Río Palomino

Las mediciones registradas por el IDEAM en esta corriente, las efectúa al nivel la carretera que desde Santa Marta conduce a la Ciudad de Riohacha, a altitud de 30 m.s.n.m. De esta manera estas mediciones tienen en cuenta el aporte de prácticamente toda la cuenca de este río. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 24. Caudales medios mensuales en el río Palomino

CORRIENTE RÍO PALOMINO												
CAUDALES MEDIOS MENSUALES (M ³ /S)												
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1995	9,584	7,868	8,287	13,12	16,51	25,22	30,08	43,78	38,73	37,67	35,81	30,51
1996	16,7	26,71	37,9	17,34	25,8	24,16	22,79	25,82	29,23	36,38	42,94	31,12
1997	18,43	11,78	10,34	10,42	10,37	14,24	10,75	10,14	30,98	21,22	19,82	8,634
1998	6,016	5,011	5,594	16,9	15,16	22,02	20,42	18,47	23,12	25,63	24,8	26,58
1999	10,75	7,389	8,352	22,06	19	24,18	17,45	15,38	23,42	28,48	31,37	35,14
2000	18,17	10,5	9,006	6,783	18,29	17,89	14,02	12,36	15,01	39,99	22,14	13,77
2001	10,99	7,239	6,506	5,403	17,07	9,367	7,242	8,042	10,35	26,86	42,17	13,64
2002	35,61	6,4975	4,529	12,54	18,33	19,69	11,34	14	12,89	17,91	15,13	13,51
2003	8,348	5,756	7,419	19,47	18,46	34,91	18,37	23,63	25,12	51,94	84,7	54,08
2004	19,81	14,78	12,81	30,99	40,66	32,65	31,39	39,8	72,75	81,97	99,77	56,83
2005	16,855	7,775	16,9	36,6	27,97	46,37	40,62	22,36	20,11	33,61	54,27	44,29
2006	13,9	12,67	11,45	14,51	30,62	21,47	17,23	15,72	39,92	55,34	64,05	15,77
2007	14,02	11,86	11,62	14,29	15,69	17,51	18,82	40,79	54,64	64,12	65,81	24,17
2008	15,57	9,832	9,068	21,43	23,84	21,24	42,09	52,51	45,02	54,31	89,07	46,18
2009	26,75	36,46	41,16	94,01	64,13	61,22	16,89	17,68	19,43	24,53	35,1	17,23
2010	15,87	10,83	14,82	12,91	17,39	31,44	29,77	45,82	57,14	40,57	46,62	59,45
2011	17	12,015	11,01	11,71	14,89	19,8	16,2	21,33	24,45	34,15	45,3	41,11
2012	13,06	13,2	12,83	20,3	17,905	18,8525	15,51	16,27	20,45	35,27	51,61	36,45
PROMEDIO	15,97	12,12	13,31	21,15	22,89	25,68	21,17	24,66	31,26	39,44	48,36	31,58

En la anterior tabla se puede observar que el Río Palomino en el peor de sus escenarios hidrológicos, presenta una oferta con fines de aprovechamiento en sistemas de acueducto, de 13,3 m³/s. Esos caudales mostrados en la Tabla 24, hacen referencia a caudales medio mensuales.

4.2.2 Río Don Diego

Las mediciones registradas por el IDEAM en esta corriente, las efectúa al nivel la carretera que desde Santa Marta conduce a la Ciudad de Riohacha, a altitud de 40 m.s.n.m. De esta manera estas mediciones tienen en cuenta el aporte de prácticamente toda la cuenca de este río. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 25. Caudales medios mensuales del río Don Diego

CORRIENTE RÍO DON DIEGO												
CAUDALES MEDIOS MENSUALES (M ³ /s)												
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1995	21,09	24,755	28,42	26,99	26,48	48,8	77,62	84,51	50,77	62,16	38,9	23,83
1996	19,73	24,79	29,85	18,51	21,33	34,97	56,28	36,03	41,95	57,69	78,93	57,92
1997	22,73	16,35	13,87	14,79	14,76	25,11	15,84	10,4	23,91	30,33	24,5	19,32
1998	16,83	16,3	15,57	43,32	51,45	73	56,91	68,38	74,39	77,95	93,12	97,87
1999	27,7	25	17,21	64,49	20,23	47,13	44,22	72,37	79,27	79,49	67,87	157,3
2000	40,88	27,08	22,07	16,54		43,84	36,66	54,58	68,47	82,59	70,69	27,81
2001	28,49	19,45	17,61	12,84	36,11	42,77	34,45	44,48	48,79	90,45	79,78	104,7
2002	46,92	27,52	23,23	52,46	48,42	61,49	39,28	40,46	57,25	76,33	66,77	30,38
2003	13,85	11,62	8,603	13,99	14,67	43,98	43,52	50,83	55,04	88,73	68,9	55,36
2004	23,75	16,75	14,65	43,01	56,67	54,47	49,84	44,85	69,88	81,48	97,48	40,31
2005	44,26	30,45	21,38	19,37	51,84	63,18	44,095	43,6	32,38	18,88	245,7	21,33
2006	7,969	4,923	16,04	17,87	63,96	47,88	38,35	42,35	67,59	50,1	69,21	26,36
2007	14,55	11,74	10,7	7,006	5,875		28,82	54,39	57,9	55,05	68,63	56,36
2008	23,68	13,11	11,42	11,68	16,68	20,45	31,64	55,98	49	67,08	76,48	52,72
2009	27,5	29,58	23,43	20,2	33,28	24,16	27,39	52,8	34,23	27,74	44,63	20,03
2010	14,17	12,31	14,42	13,82	16,19	28,03	54,59	61,72	70,49	52,5	76,82	71,3
2011	41,56	13,48	12,29	14,63	26,4	20,7	38,99	43,72	55,18	43,44	53,29	73,27
2012	23,13	12,18	12,4	12,57	22,41	13,37	29,6	21,44	35,49	52,86	71,56	28,91
PROMEDIO	25,49	18,74	17,40	23,56	30,99	40,78	41,56	49,05	54,00	60,83	77,40	53,62

En la anterior tabla se puede observar que el Río Don Diego en el peor de sus escenarios hidrológicos, presenta una oferta promedio mensual con fines de aprovechamiento en sistemas de acueducto, de 17,4 m³/s. Esos caudales mostrados en la Tabla 25, hacen referencia a caudales medio mensuales.

4.2.3 Río Buritaca

Las mediciones registradas por el IDEAM en esta corriente, las efectúa al nivel la carretera que desde Santa Marta conduce a la Ciudad de Riohacha, a altitud de 28 m.s.n.m. De esta manera estas mediciones tienen en cuenta el aporte de prácticamente toda la cuenca de este río. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 26. Caudales medios mensuales del río Buritaca

CORRIENTE RÍO BURITACA												
CAUDALES MEDIOS MENSUALES (M ³ /s)												
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2005	43,54	27,84	16,07	10,59	28,12	30,73	35,07	27,5	29,25	30,65	59,18	23,44
2006	9,589	9,545	9,589	15,13	37,85	34,4	41,87	41,52	45,48	46,14	60,07	37,47
2007	27,2	17,49	16,32	29,75	40,51	43,93	45,7	68,28	62,87	74,92	126,5	131,5
2008	190,6	147,2	168,6	204,2	218,1	193,8	264,7	252,4	258,7	271,2	275,4	253
2009	215,8	230	214,2	203,5	192,3	177,2	212	259,3	243,4	131	15,7	8,795
2010	6,495	5,155	6,293	8,229	7,162	12,33	18,03	19,19	17,83	16,36	19,98	64,46
2011	58,3	20,54	29,13	25,81	29,71	34,36	34,85	29,39	27,98	29,63	32,25	47,64
2012	23,81	18,35	19,22	20,43	25,22	20,62	24,06	26,86	27,36	29,02	28,5	24,52
PROMEDIO	71,92	59,52	59,93	64,70	72,37	68,42	84,54	90,56	89,11	78,62	77,20	73,85

En la anterior tabla se puede observar que el Río BURITACA en el peor de sus escenarios hidrológicos, presenta una oferta promedio mensual con fines de aprovechamiento en sistemas de acueducto, de 59,52 m³/s. Esos caudales mostrados en la Tabla 26, hacen referencia a caudales medio mensuales.

4.2.4 Río Guachaca

Las mediciones registradas por el IDEAM en esta corriente, las efectúa al nivel la carretera que desde Santa Marta conduce a la Ciudad de Riohacha, a altitud de 40 m.s.n.m. De esta manera estas mediciones tienen en cuenta el aporte de prácticamente toda la cuenca de este río. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 27. Caudales medios mensuales del río Guachaca

CORRIENTE GUACHACA												
CAUDALES MEDIOS MENSUALES (M ³ /S)												
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1995	6,683	5,39	6,358	7,442	7,071	9,713	18,38	18,87	17,7	12,06	22,45	12,18
1996	8,694	6,99	14,04	10,85	15,91	18,96	32,54	16,7	15,79	19	24,93	24,08
1997	15	10,8	9,197	8,058	8,008	18,35	11,21	9,989	10,59	9,621	10,37	7,881
1998	6,658	6,436	6,5	13,96	16,74	24,98	21,5	19,94	21,15	25,73	22,98	25,9
1999	14,86	13,84	12,68	29,07	15,72	16,59	18,74	22,1	19,32	16,44	16,32	82,23
2000	11,002	9,6465	44,5	16,8975	11,01	13,295	15,55	18,315	16,905	19,345	16,065	72,65
2003	7,144	5,453	4,154	4,725	6,3	10	12,36	14,53	14,49	22,25	15,81	6,639
2007	5,788	4,07	2,041	3,97	2,658	5,051	10,77	12,68	14,03	10,66	21,44	31,59
2008	17,47	7,84	4,833	8,665	8,227	12,92	16,04	16,63	10,42	27,42	56,9	42,25
2009	22,33	31,41	14,8	5,747	3,425	3,747	3,552	5,854	4,235	8,407	17,59	1,682
2010	4,249	3,754	7,802	6,508	6,284	13,21	27,19	28,97	25,21	23,94	19,02	57,87
2011	19,55	6,717	14,07	9,131	8,903	17,71	18,74	13,73	11,59	18,52	16,5	55,58
PROMEDIO	11,62	9,36	11,75	10,42	9,19	13,71	17,21	16,53	15,12	17,78	21,70	35,04

En la anterior tabla se puede observar que el Río Guachaca en el peor de sus escenarios hidrológicos, presenta una oferta promedio mensual con fines de aprovechamiento en sistemas de acueducto, de 9,36 m³/s. Esos caudales mostrados en la Tabla 27, hacen referencia a caudales medio mensuales.

4.2.5 Río Piedras

Las mediciones registradas por el IDEAM en esta corriente, las efectúa al nivel la carretera que desde Santa Marta conduce a la Ciudad de Riohacha, a altitud de 60 m.s.n.m. De esta manera estas mediciones tienen en cuenta el aporte de prácticamente toda la cuenca de este río. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 28. Caudales medios mensuales del río Piedras

CORRIENTE PIEDRAS												
CAUDALES MEDIOS MENSUALES (M ³ /S)												
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1995	1,585	1,188	1,079	1,012	0,969	1,044	1,468	6,612	4,391	5,403	7,321	4,183
1996	3,012	1,876	7,534	2,077	2,572	3,259	8,336	3,287	2,839	7,253	9,808	15,05
1997	4,475	2,811	2,026	1,507	0,851	1,726	2,116	1,09	1,237	1,957	2,807	0,936
1998	0,446	0,679	0,542	2,36	1,961	2,238	2,838	3,079	5,735	8,997	9,96	7,011
1999	2,919	1,096	0,613	5,713	1,119	1,05	1,026	1,768	4,593	4,768	3,76	
2002	4,576	1,702	1,185	1,877	2,394	2,85	1,15	1,425	2,429	2,38	3,228	1,152
2003	0,943	0,764	0,69	0,875	0,672	1,825	1,278	0,732	2,964	3,047	6,97	14,59
2005	5,587	4,388	3,387	2,417	3,225	4,658	5,261	2,733	2,241	4,488	18,71	7,648
2006	2,93	1,835	1,439	1,146	2,905	3,633	2,231	2,789	3,552	4,861	8,454	6,447
2007	3,082	2,488	1,994	2,187	2,255	2,147	2,4	4,446	4,438	7,401	14,25	6,992
2008	4,284	2,956	2,139	2,229	2,321	1,347	2,575	2,549	2,681	9,309	17,88	15,84
2009	5,875	11,06	4,077	2,652	2,356	1,602	1,482	1,353	1,203	1,162	1,4	1,161
2010	0,923	0,769	3,091	1,452	2,34	1,828	12,15	9,942	9,991	11,64	24,47	40,69
2011	11,07	1,018	0,997	0,413	0,99	10,39	6,879	4,796	6,711	13,35	8,939	26,82
PROMEDIO	3,69	2,47	2,20	1,99	1,92	2,83	3,66	3,33	3,93	6,14	9,85	11,42

En la anterior tabla se pudo observar que el Río Guachaca en el peor de sus escenarios hidrológicos, presenta una oferta promedio mensual con fines de aprovechamiento en sistemas de acueducto, de 1,99 m³/s. Esos caudales mostrados en la Tabla 28, hacen referencia a caudales medio mensuales.

4.2.6 Río Gaira

Las mediciones registradas por el IDEAM en esta corriente, las efectúa al nivel la carretera que desde Santa Marta conduce a la Ciudad de Riohacha, a altitud de 650 m.s.n.m. La estación se encuentra localizada por antes de la captación operada por METROAGUA. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 29. Caudales medios mensuales del río Gaira

CORRIENTE RÍO GAIRA												
CAUDALES MEDIOS MENSUALES (M ³ /S)												
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1995	0,48	0,346	0,321	0,281	0,711	2,403	5,989	6,842	7,887	6,8	2,855	1,195
1996	0,694	0,497	1,981	0,327	3,942	2,198	6,053	2,237	3,302	7,068	6,064	3,023
1997	1,545	0,989	0,617	0,521	0,502	3,044	2,117	0,652	2,118	1,844	0,987	0,535
1998	0,428	0,331	0,286	0,552	1,398	2,203	2,308	3,141	7,571	8,52	3,604	2,205
1999	0,719	0,414	0,284	0,771	0,523	3,193	4,936	9,883	7,801	11,94	6,301	13
2000	1,728	2,657	0,723	0,411	1,536	3,287	5,066	4,528	6,285	5,002	3,874	2,486
2001	0,703	0,493	0,39	0,28	2,035	0,546	0,954	2,117	2,905	2,112	4,693	2,317
2002	0,785	0,41	0,273	0,75	0,474	1,682	1,251	1,957	2,804	4,26	1,919	0,67
2003	0,321	0,19	0,18	0,241	0,3	1,1	1,9	2,7	2,823	3,641	2,588	1,147
2004	0,421	0,329	0,244	0,547	0,866	0,949	0,984	2,199	2,842	3,022	3,257	1,624
2005	1	0,642	0,437	0,451	0,669	2,33	1,123	0,93	2,24	2,514	4,239	1,583
2006	0,806	0,541	0,431	0,526	1,437	1,821	1,076	1,172	2,632	2,155	2,321	1,432
2007	0,687	0,497	0,4	0,489	1,317	1,004	1,115	5,19	2,659	5,774	2,665	1,683
2008	0,945	0,617	0,452	0,439	0,706	1,637	2,985	2,966	3,332	4,506	4,914	1,696
2009	0,833	0,88	0,552	0,414	0,907	1,258	1,182	1,28	1,156	1,675	2,477	0,634
2010	0,455	0,362	0,449	0,365	0,438		3,766	3,639	3,826	3,015	3,755	3,322
2011	1,663	0,907	0,813	0,8	1,003	1,851	2,946	2,988	2,593	3,783	2,529	2,663
2012	1,592	0,885	1,374	1,963	2,899	2,362	2,157	3,414	2,145	4,362	2,119	1,503
PROMEDIO	0,88	0,67	0,57	0,56	1,20	1,93	2,66	3,21	3,72	4,56	3,40	2,37

En la anterior tabla se pudo observar que el Río Gaira en el peor de sus escenarios hidrológicos, presenta una oferta promedio mensual con fines de aprovechamiento en sistemas de acueducto, de 0,56 m³/s. Esos caudales mostrados en la Tabla 29, hacen referencia a caudales medio mensuales.

4.2.6 Río Fío

Las mediciones registradas por el IDEAM en esta corriente, las efectúa al nivel la carretera que desde Santa Marta conduce al Municipio de La Zona Bananera, a altitud de 30 m.s.n.m. De esta manera estas mediciones tienen en cuenta el aporte de prácticamente toda la cuenca de este río. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 30. Caudales medios mensuales del río Frío

CORRIENTE RÍO FRÍO												
CAUDALES MEDIOS MENSUALES (M ³ /S)												
AÑOS	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1995	7,59	6,761	6,4	6,833	9,194	9,753	32,85	21,05	24,92	28,48	10,38	6,461
1996	4,427	3,181	3,116	3,242	7,418	9,355	17,72	10,97	17,48	23,27	20,37	13,41
1997	7,659	7,466	4,567	5,139	7,819	18,2	10,82	10,75	18,35	17,29	12,36	7,925
1998	6,232	9,057	9,332	10,16	16,96	23,18	35,87	41,64	59,47	45,64	27,88	23,11
1999	11,99	10,02	8,532	15,87	15,93	30,23	28,41	28,25	18,65	28	22,5	23,65
2000	8,535	4,823	4,606	5,594	13,13	7,808	13,96	11,64	16,27	15,13	12,83	8,914
2001	4,609	3,802	3,881	4,117	14,69	7,37	7,721	19,34	14,84	18,62	17,01	9,01
2002	4,454	3,794	5,853	5,615	9,573	18,74	14,99	21,57	25,6	27,05	16,33	7,526
2003	5,877	5,134	4,296	6,285	10,89	19,22	19,35	19,23	23,72	29,12	17,97	10,49
2004	5,839	4,582	4,25	4,638	11,68	11,81	16,31	17,83	22,24	28,83	27,09	9,561
2005	6,704	4,91	4,23	4,626	9,145	16,72	13,86	11,82	13,46	25,38	22,52	8,456
2006	4,68	6,085	4,157	5,214	9,016	11,04	11,37	11,09	21,56	19,59	15,1	8,767
2007	4,885	4,129	4,538	7,806	17,26	17,46	16,38	28,54	32,05	45,77	22,9	18,4
2008	12,41	9,495	7,711	10,52	13,5	15,63	27,27	37,07	32,67	41,94	40,28	26,07
PROMEDIO	6,85	5,95	5,39	6,83	11,87	15,47	19,06	20,77	24,38	28,15	20,39	12,98

En la anterior tabla se puede observar que el Río Frío en el peor de sus escenarios hidrológicos, presenta una oferta promedio mensual con fines de aprovechamiento en sistemas de acueducto, de 5,39 m³/s. Esos caudales mostrados en la Tabla 30, hacen referencia a caudales medio mensuales.

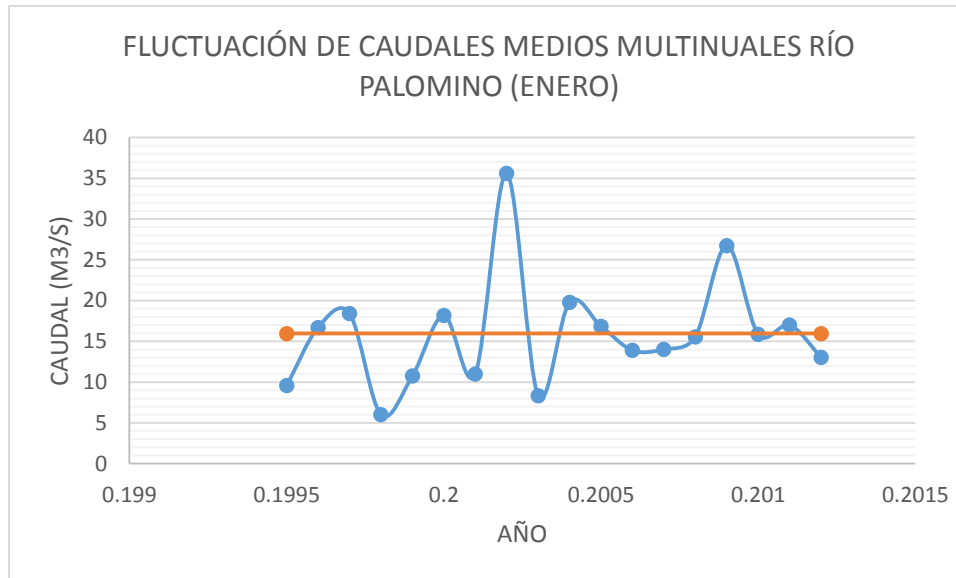
4.3 Caudales mínimos

En el Numeral 4,2 se estimaron los caudales medios mensuales multianuales de aquellas corrientes que cuentan con medición de caudal por parte del IDEAM. Sin embargo, teniendo en cuenta que estos ríos se están analizando con fines de establecer su potencial como fuente de abastecimiento del sistema de acueducto de la Ciudad de Santa Marta, se considera indispensable establecer los caudales mensuales mínimos históricos. Lo anterior debido a que la Ciudad de Santa Marta, por su condición turística, recibe una gran cantidad de población flotante en los meses de estiaje; coincidiendo las temporadas de mayor demanda, con las de menor oferta.

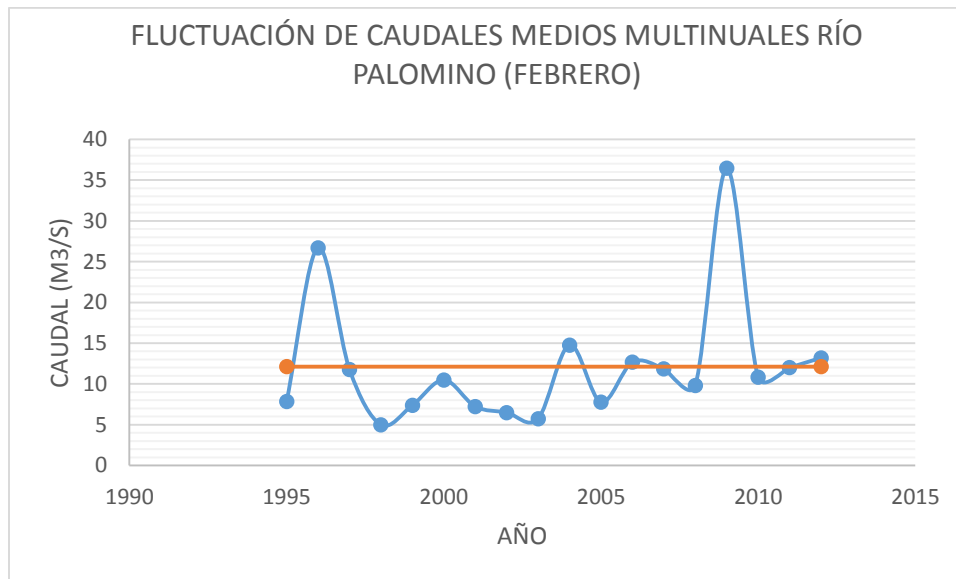
Debido a que los caudales mínimos mensuales se presentan en estas cuencas durante el primer trimestre de año, a continuación se analizarán solo este período para cada uno de los ríos.

4.3.1 Río Palomino

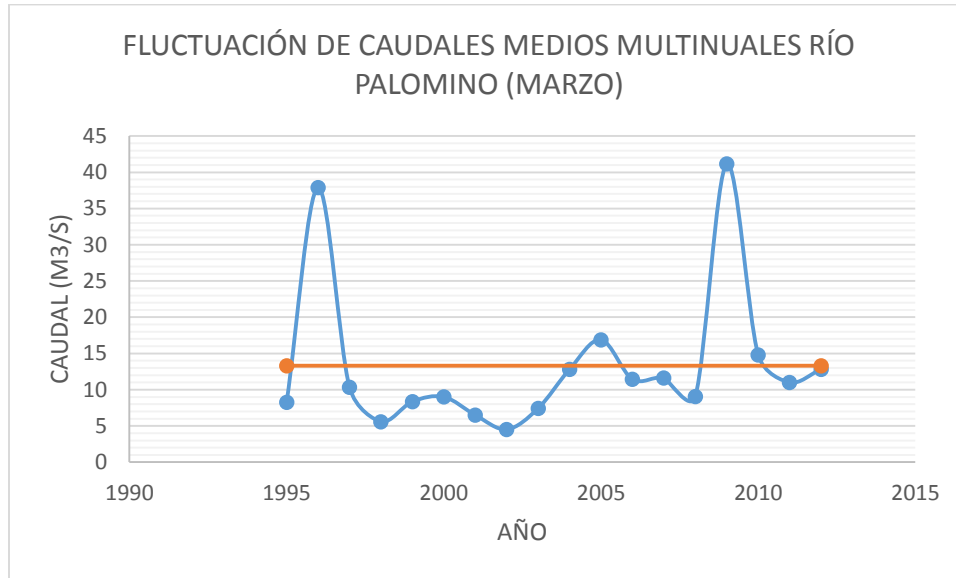
A continuación se muestran las gráficas de fluctuación multianual de caudales medios mensuales para los meses de enero, febrero y marzo del Río Palomino. En las gráficas se pueden observar también el promedio mensual multianual.



Gráfica 4-1 Caudales medios multianuales del río Palomino en el mes de Enero



Gráfica 4-2 Caudales medios multianuales del río Palomino en el mes de Febrero

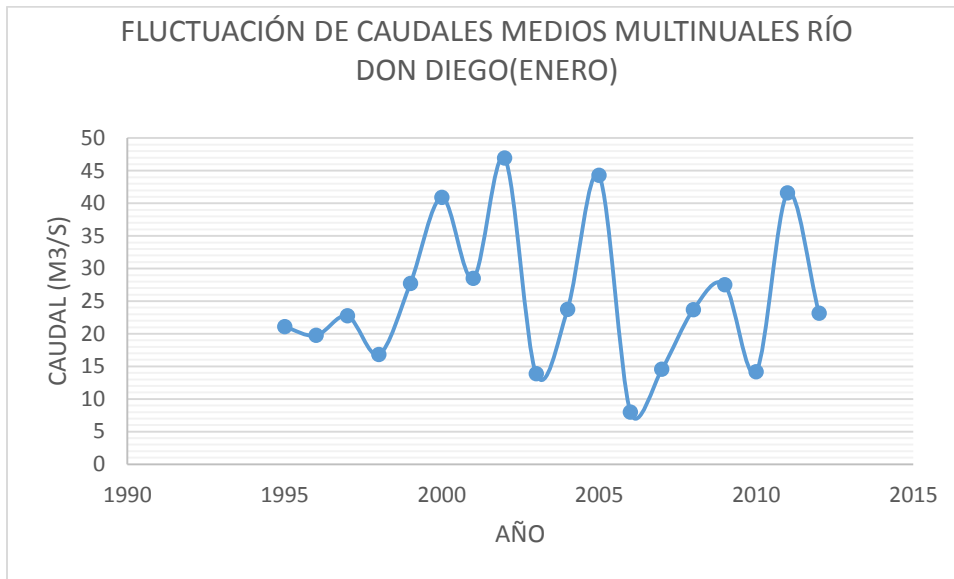


Gráfica 4-3 Caudales medios multianuales del río Palomino en el mes de Marzo

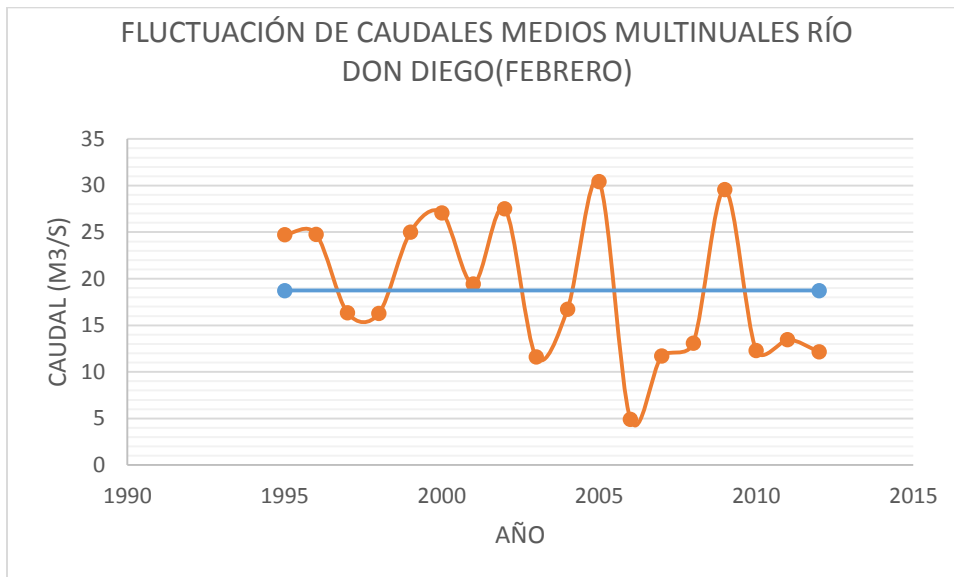
Como se puede observar en las gráficas, los caudales mínimos mensuales registrados para el Río Palomino son $6 \text{ m}^3/\text{s}$, $5 \text{ m}^3/\text{s}$ y $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$; para los meses de enero, febrero y marzo, respectivamente. Es importante resaltar que este río presenta un comportamiento homogéneo a lo largo del tiempo, manteniendo los caudales medios mensuales muy cercanos en su mayoría al promedio mensual multianual. Esta condición hace de esta corriente, una posible fuente confiable en términos de oferta.

4.3.2 Río Don Diego

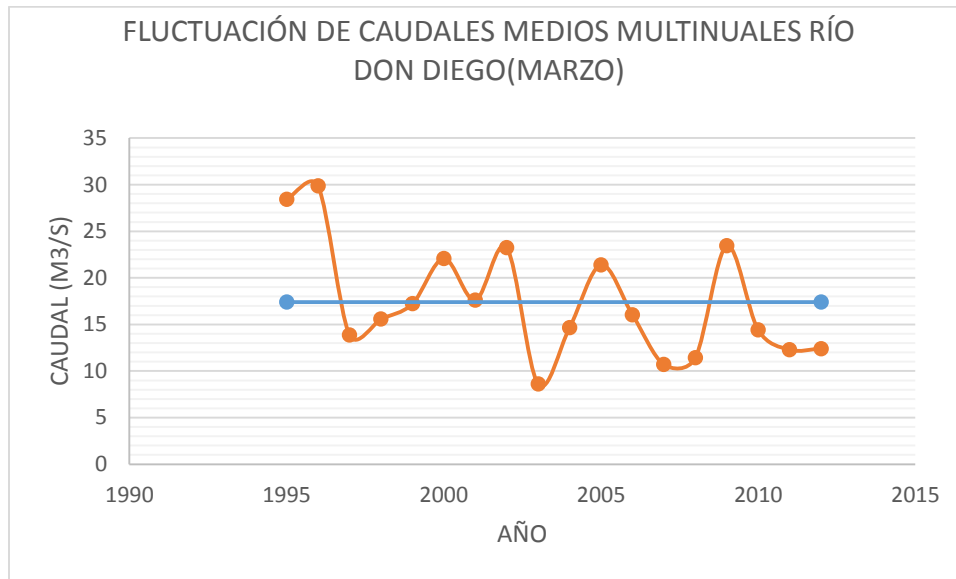
A continuación se muestran las gráficas de fluctuación multianual de caudales medios mensuales para los meses de enero, febrero y marzo del Río Don Diego. En las gráficas se pueden observar también el promedio mensual multianual.



Gráfica 4-4 Caudales medios multianuales del río Don Diego en el mes de Enero



Gráfica 4-5 Caudales medios multianuales del río Don Diego en el mes de Febrero

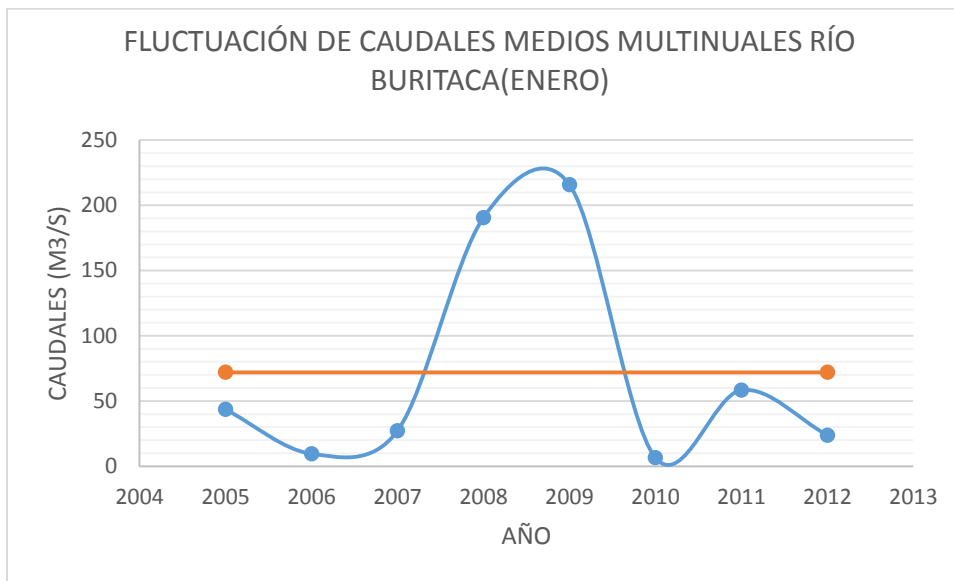


Gráfica 4-6 Caudales medios multianuales del río Don Diego en el mes de Marzo

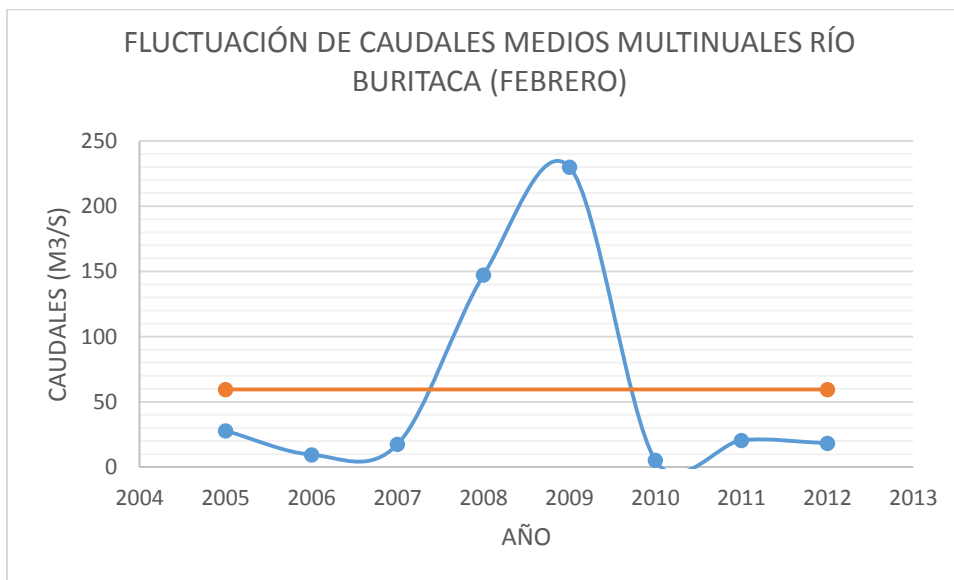
Como se puede observar en las gráficas, los caudales mínimos mensuales registrados para el Río Don Diego son 7,9 m³/s, 4,9 m³/s y 8,6 m³/s; para los meses de enero, febrero y marzo, respectivamente. Es importante resaltar que este río presenta un comportamiento homogéneo a lo largo del tiempo, manteniendo los caudales medios mensuales muy cercanos en su mayoría al promedio mensual multianual. Esta condición hace de esta corriente, una posible fuente confiable en términos de oferta.

4.3.3 Río Buritaca

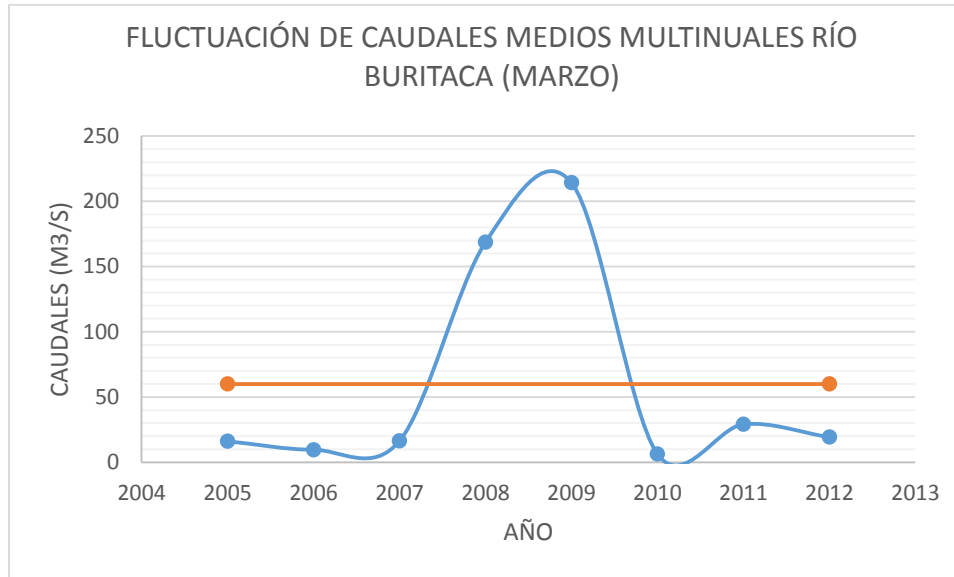
A continuación se muestran las gráficas de fluctuación multianual de caudales medios mensuales para los meses de enero, febrero y marzo del Río Buritaca. En las gráficas se pueden observar también el promedio mensual multianual.



Gráfica 4-7 Caudales medios multianuales del río Buritaca en el mes de Enero



Gráfica 4-8 Caudales medios multianuales del río Buritaca en el mes de Febrero

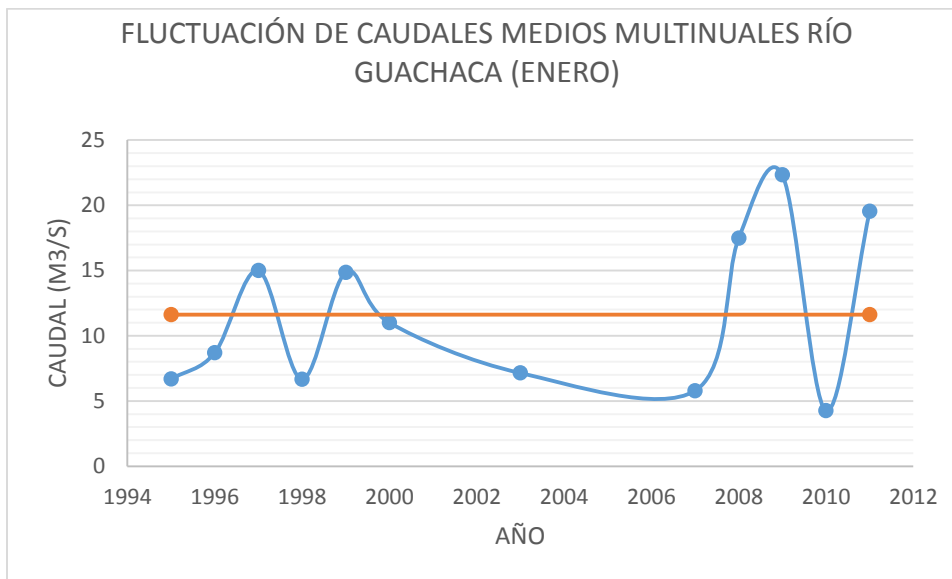


Gráfica 4-9 Caudales medios multianuales del río Buritaca en el mes de Marzo

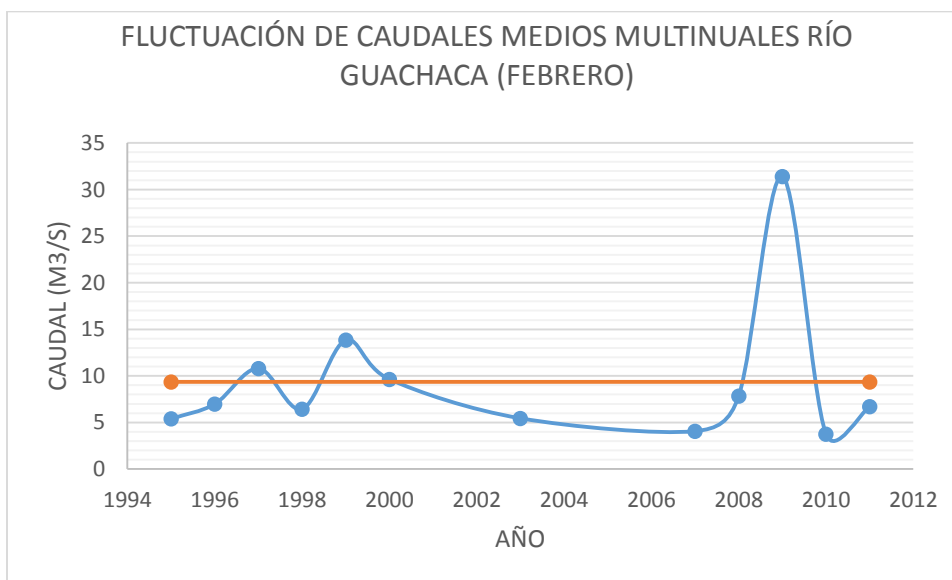
Como se puede observar en las gráficas, los caudales mínimos mensuales registrados para el Río Buritaca son 6,5 m³/s, 5,1 m³/s y 6,3 m³/s; para los meses de enero, febrero y marzo, respectivamente. Es importante resaltar que este río presenta un comportamiento homogéneo a lo largo del tiempo, manteniendo los caudales medios mensuales muy cercanos en su mayoría al promedio mensual multianual. Esta condición hace de esta corriente, una posible fuente confiable en términos de oferta.

4.3.4 Río Guachaca

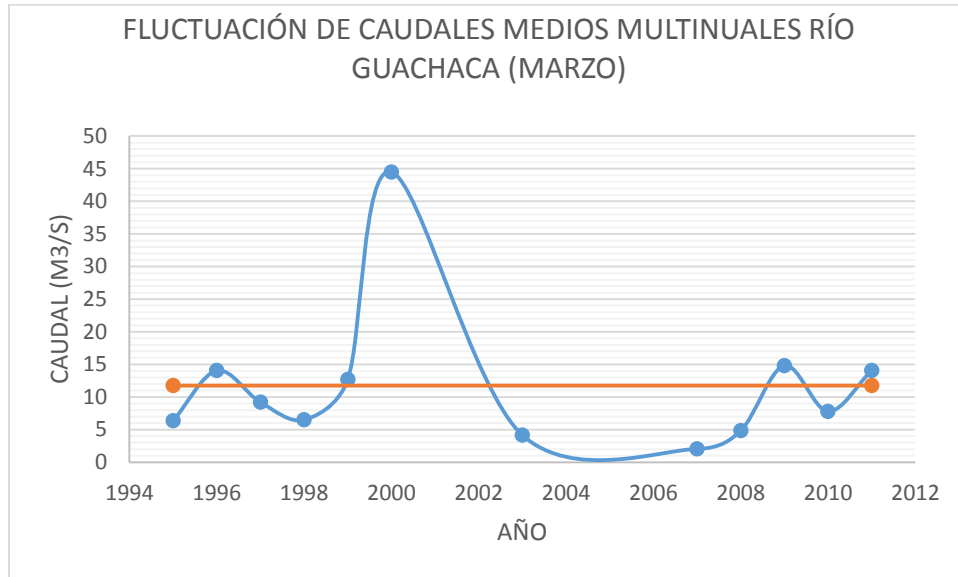
A continuación se muestran las gráficas de fluctuación multianual de caudales medios mensuales para los meses de enero, febrero y marzo del Río Guachaca. En las gráficas se pueden observar también el promedio mensual multianual.



Gráfica 4-10 Caudales medios multianuales del río Guachaca en el mes de Enero



Gráfica 4-11 Caudales medios multianuales del río Guachaca en el mes de Febrero

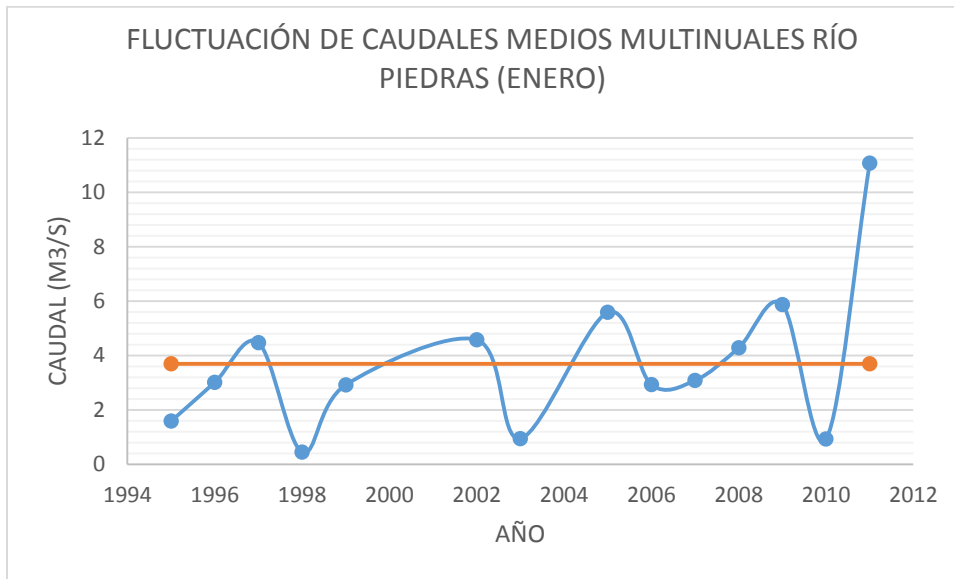


Gráfica 4-12 Caudales medios multianuales del río Guachaca en el mes de Marzo

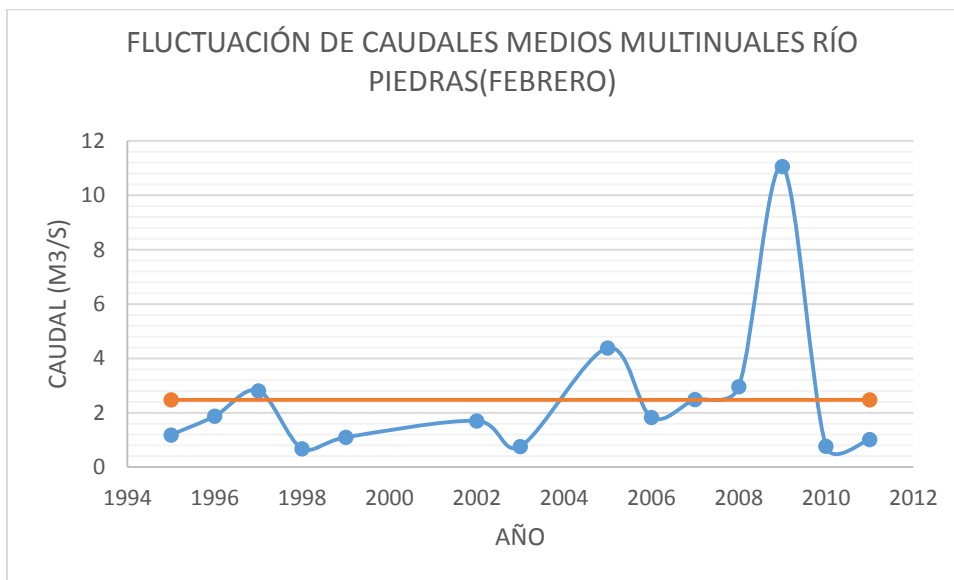
Como se puede observar en las gráficas, los caudales mínimos mensuales registrados para el Río Guachaca son $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$, $3,7 \text{ m}^3/\text{s}$ y $2 \text{ m}^3/\text{s}$; para los meses de enero, febrero y marzo, respectivamente. Es importante resaltar que este río presenta un comportamiento homogéneo a lo largo del tiempo, manteniendo los caudales medios mensuales muy cercanos en su mayoría al promedio mensual multianual. Esta condición hace de esta corriente, una posible fuente confiable en términos de oferta.

4.3.5 Río Piedras

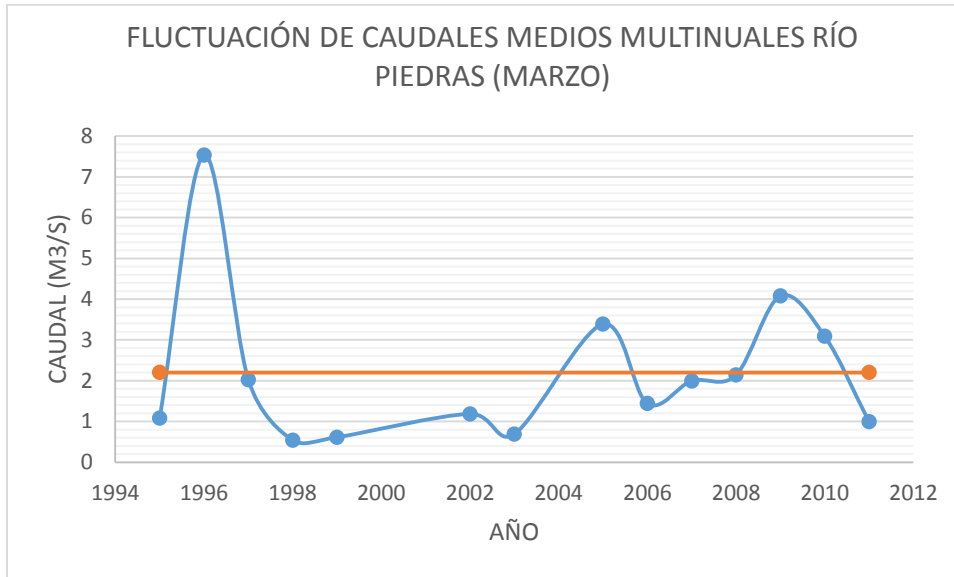
A continuación se muestran las gráficas de fluctuación multianual de caudales medios mensuales para los meses de enero, febrero y marzo del Río Piedras. En las gráficas se pueden observar también el promedio mensual multianual.



Gráfica 4-13 Caudales medios multianuales del río Piedras en el mes de Enero



Gráfica 4-14 Caudales medios multianuales del río Piedras en el mes de Febrero

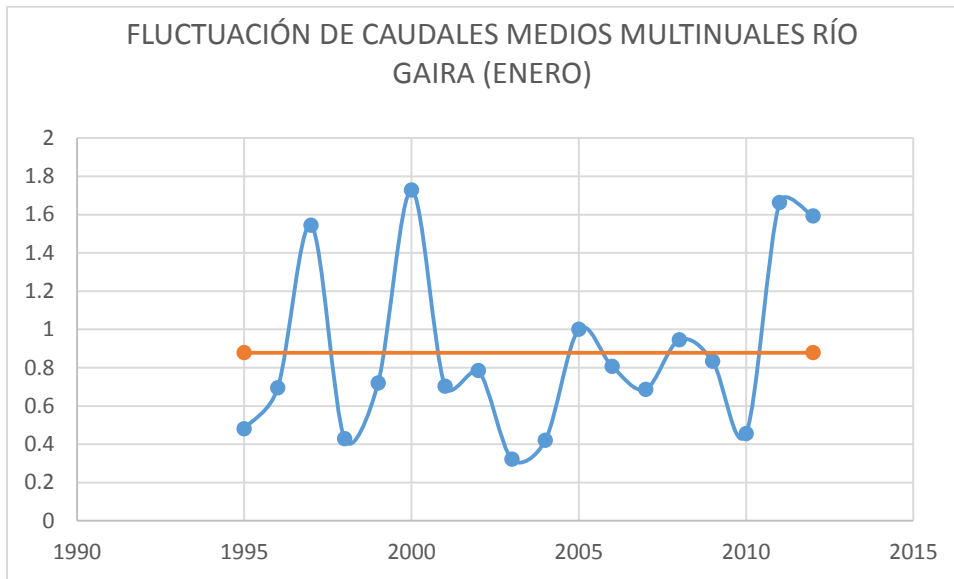


Gráfica 4-15 Caudales medios multianuales del río Piedras en el mes de Marzo

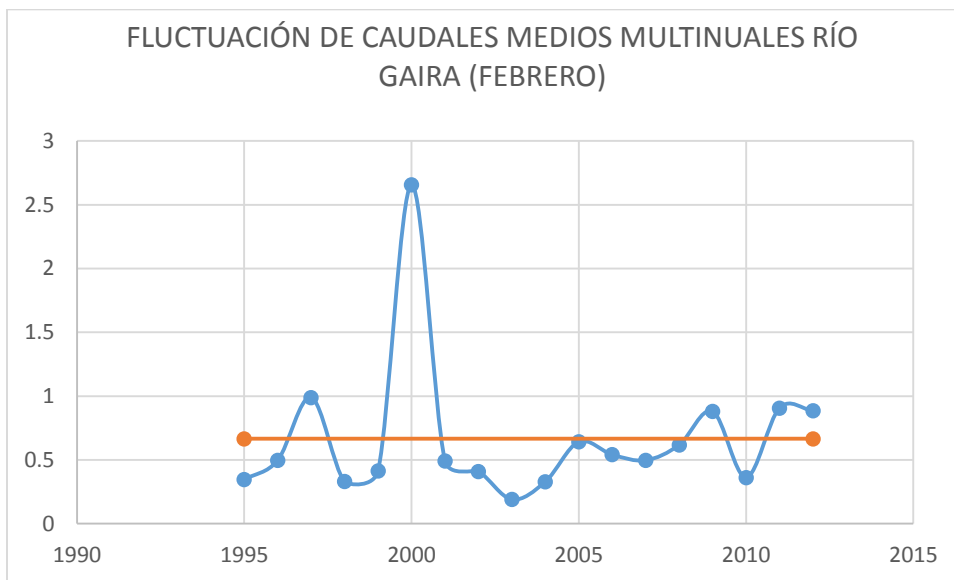
Como se puede observar en las gráficas, los caudales mínimos mensuales registrados para el Río Piedras son 0,4 m³/s, 0,7 m³/s y 0,5 m³/s; para los meses de enero, febrero y marzo, respectivamente. Es importante resaltar que este río un número significativo de años en los que los caudales de estiaje están por debajo de la media mensual multianual de esos meses. Esta condición hace de esta corriente, presente baja confiabilidad como fuente de abastecimiento.

4.3.6 Río Gaira

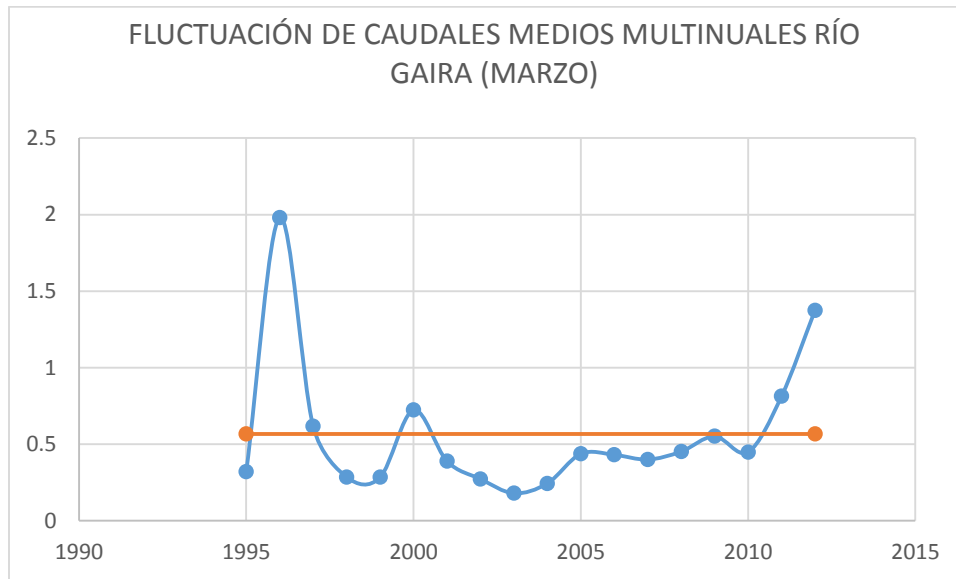
A continuación se muestran las gráficas de fluctuación multianual de caudales medios mensuales para los meses de enero, febrero y marzo del Río Gaira. En las gráficas se pueden observar también el promedio mensual multianual.



Gráfica 4-16 Caudales medios multianuales del río Gaira en el mes de Enero



Gráfica 4-17 Caudales medios multianuales del río Gaira en el mes de Febrero

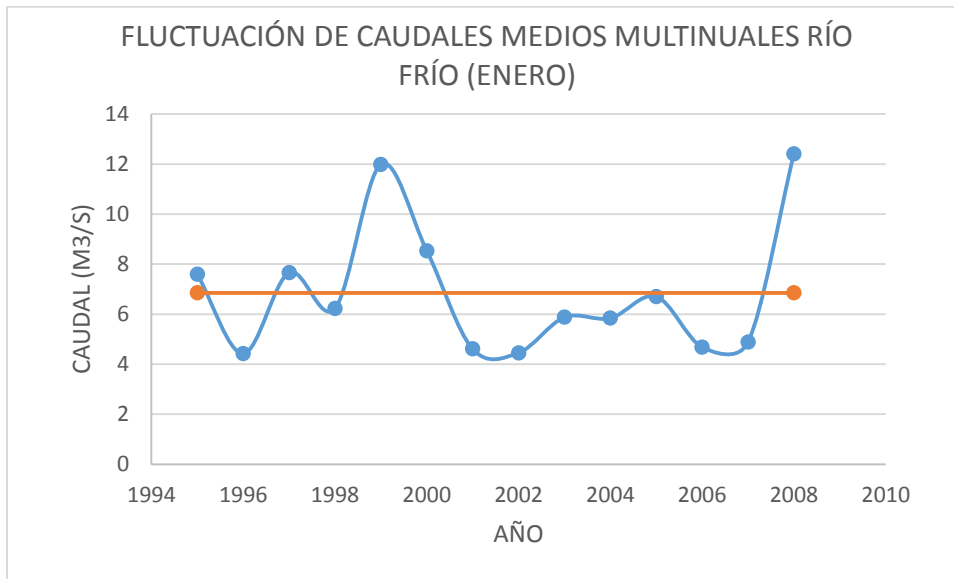


Gráfica 4-18 Caudales medios multianuales del río Gaira en el mes de Marzo

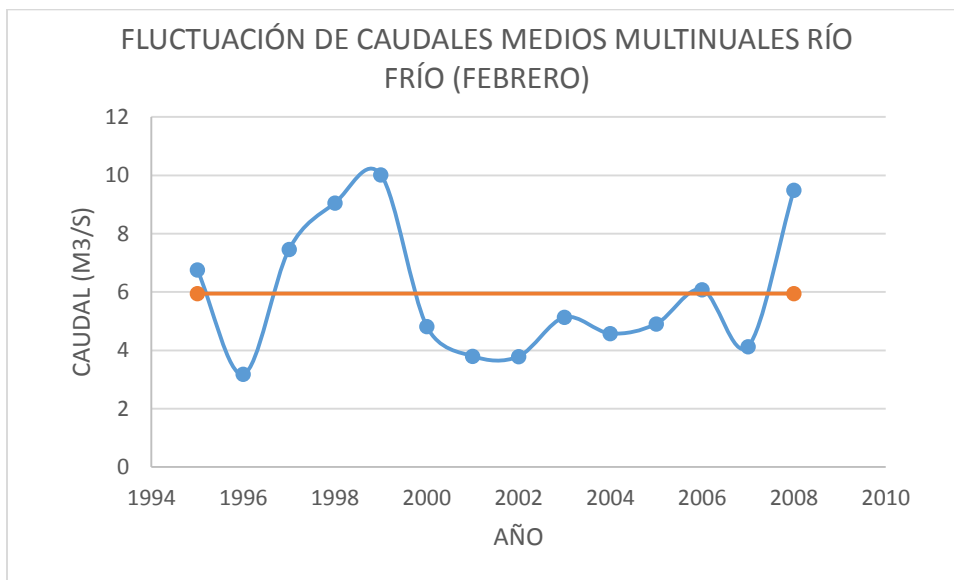
Como se puede observar en las gráficas, los caudales mínimos mensuales registrados para el Río Gaira son $0,32 \text{ m}^3/\text{s}$, $0,19 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$; para los meses de enero, febrero y marzo, respectivamente. Es importante resaltar que este río un número significativo de años en los que los caudales de estiaje están por debajo de la media mensual multianual de esos meses. Esta condición hace de esta corriente, presente baja confiabilidad como fuente de abastecimiento.

4.3.7 Río Frío

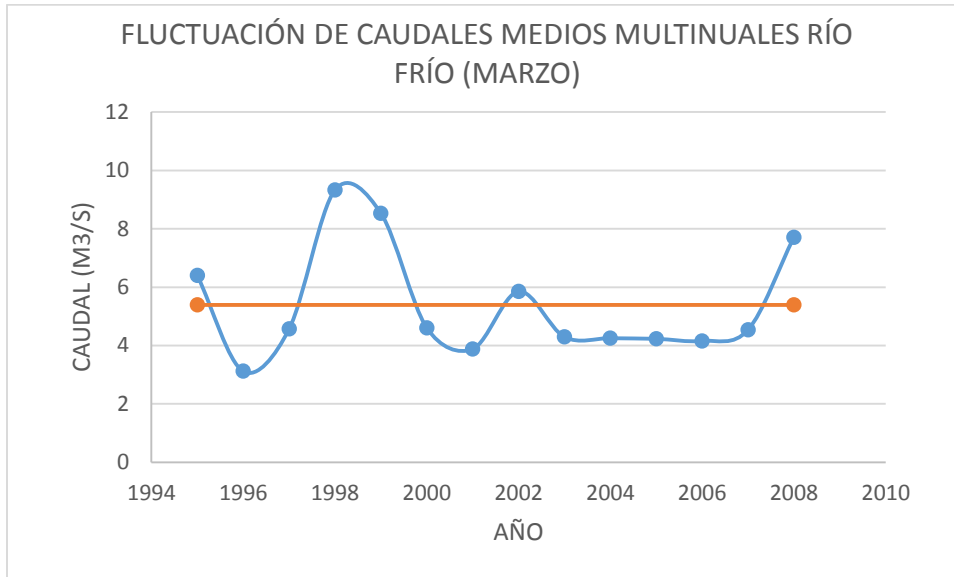
A continuación se muestran las gráficas de fluctuación multianual de caudales medios mensuales para los meses de enero, febrero y marzo del Río Frío. En las gráficas se pueden observar también el promedio mensual multianual.



Gráfica 4-19 Caudales medios multianuales del río Frío en el mes de Enero



Gráfica 4-20 Caudales medios multianuales del río Frío en el mes de Febrero



Gráfica 4-21 Caudales medios multianuales del río Frío en el mes de Marzo

Como se puede observar en las gráficas, los caudales mínimos mensuales registrados para el Río Frío son 4,4 m³/s, 3,2 m³/s y 3,1 m³/s; para los meses de enero, febrero y marzo, respectivamente. Es importante resaltar que este río presenta un comportamiento homogéneo a lo largo del tiempo, manteniendo los caudales medios mensuales muy cercanos en su mayoría al promedio mensual multianual. Esta condición hace de esta corriente, una posible fuente confiable en términos de oferta.

4.4 Cuadro resumen de caudales

En el siguiente cuadro se muestra los meses de menor oferta de cada río, el caudal promedio mensual multianual de ese mes y el caudal mensual mínimo.

Tabla 31 Resumen de caudales

CAUDALES MENSUALES (M³/S)			
CORRIENTE	MES MÍNIMO	CAUDAL MEDIO	CAUDAL MÍNIMO
PALÓMINO	MARZO	13,3	4,5
DON DIEGO	FEBRERO	18,7	4,9
BURITACA	FEBRERO	59,5	5,1
GUACHACA	MARZO	11,7	2
PIEDRAS	MARZO	2,2	0,4
GAIRA	MARZO	0,57	0,18
FRÍO	MARZO	5,4	3,1

5. ESTIMACIÓN DE CAUDALES POR BALANCE HÍDRICO

Debido a que dos de los ríos que se están estudiando como alternativa de fuente de abastecimiento para el sistema de acueducto de la Ciudad de Santa Marta, no cuentan mediciones de caudales medios diarios, se hizo necesario estimar la oferta de fuente mediante la aplicación de método de balance hídrico. Estas fuentes son el Río Toribio y el Río Córdoba. A continuación se muestra el proceso que se adelantó con tal fin.

5.1. PRECIPITACIÓN

Con el fin de establecer las características de precipitación en estas dos cuencas, se localizaron las estaciones del IDEAM con que se cuenta información y se trazaron los Polígonos de Thiessen. De este procedimiento se obtuvo el siguiente resultado.

Tabla 32. Áreas aferentes de las estaciones pluviométricas

RÍO TORIBIO		RÍO CÓRDOBA	
ESTACIÓN	AREA (Km ²)	ESTACIÓN	AREA (Km ²)
YE La	25,95	YE La	32,91
APTO SIMÓN	4,83	PALMA LA	0,39
SAN LOREN	2,23	SAN LOREN	27,38
MINCA	35,67	VISTA NIEVES	63,92
VISTA NIEVES	39,64		

En la tabla anterior se puede observar el área de influencia de cada estación sobre áreas total de la cuenca en estudio.

Para cada una las estaciones se cuenta con la precipitación media mensual multianual. Sin embargo, debido a que en los meses de estiaje las estaciones localizadas en la parte baja cuenca, presentan déficit hídrico; para la estimación de la oferta hídrica de la cuenca, solo se tendrán en cuenta las estaciones de San Lorenzo y Vista Nieve.

Tabla 33. Precipitación mensual multianual

ESTACION	PARAMETROS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL ANUAL
SAN L ALTO	Precipitación (mm)	15,14	23,73	60,15	152,05	291,75	359,81	363,26	405,45	403,19	397,67	289,88	158,03	2920,10
	Precipitación (mm)	72,30	88,85	119,92	267,21	376,28	498,93	430,64	499,34	426,98	438,31	422,49	342,05	3983,30
VISTA NIEVES	Precipitación (mm)	7,60	18,80	27,60	151,45	289,25	325,72	326,79	357,02	375,64	372,74	220,33	93,11	2566,04
	ETP (mm)	49,96	48,28	57,05	59,70	66,53	65,24	66,89	64,25	59,99	58,68	55,05	51,96	703,59
	ETR (mm)	7,60	17,63	24,86	53,94	62,87	62,10	63,61	61,46	57,67	56,45	51,77	44,24	657,55

5.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN

Con el fin de estimar la Evapotranspiración potencial y la real, se utilizó el modelo de Thornthwaite, obteniendo como resultado lo siguiente:

Tabla 34. Evapotranspiración potencial mensual

ESTACION	PARAMETROS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL ANUAL
SAN LORENZO	Temperatura media °C	12,28	12,78	13,33	13,77	14,36	14,41	14,29	14,11	13,73	13,59	13,39	12,77	
	Indice Calorico	3,90	4,14	4,41	4,64	4,94	4,97	4,90	4,81	4,61	4,55	4,45	4,14	54,45
	Coeficiente a	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	
	Correccion por altitud k	0,99	0,91	1,03	1,02	1,07	1,05	1,08	1,06	1,00	1,01	0,96	0,98	
	ETPk	47,37	45,97	55,03	56,97	63,23	62,33	63,38	61,16	55,59	55,43	51,64	49,43	667,54
ALTO DE MIRA	Temperatura media °C	19,91	19,93	20,46	21,07	21,66	21,58	21,51	21,62	21,63	21,21	20,92	20,45	
	Indice Calorico	8,10	8,12	8,44	8,83	9,20	9,15	9,11	9,18	9,19	8,92	8,73	8,44	105,39
	Coeficiente a	2,31	2,31	2,31	2,31	2,31	2,31	2,31	2,31	2,31	2,31	2,31	2,31	
	Correccion por altitud k	0,99	0,91	1,03	1,02	1,07	1,05	1,08	1,06	1,00	1,01	0,96	0,98	
	ETPk	68,97	63,55	76,38	80,97	90,52	88,06	89,94	89,32	84,40	81,45	74,95	72,62	961,14
VISTA NIEVES	Temperatura media °C	13,7	14,2	14,6	15,1	15,8	15,8	15,7	15,5	15,4	15,1	14,9	14,2	
	Indice Calorico	4,60	4,85	5,06	5,35	5,69	5,69	5,67	5,55	5,49	5,31	5,24	4,84	63,35
	Coeficiente a	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	
	Correccion por altitud k	0,99	0,91	1,03	1,02	1,07	1,05	1,08	1,06	1,00	1,01	0,96	0,98	
	ETPk	49,96	48,28	57,05	59,70	66,53	65,24	66,89	64,25	59,99	58,68	55,05	51,96	703,59

Tabla 35. Evapotranspiración potencial y real mensual

ESTACION	PARAMETROS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL ANUAL
SAN LORENZO	Precipitación (mm)	15,14	23,73	60,15	152,05	291,75	359,81	363,26	405,45	403,19	397,67	289,88	158,03	2920,10
	ETP (mm)	47,37	45,97	55,03	56,97	63,23	62,33	63,38	61,16	55,59	55,43	51,64	49,43	667,54
	ETR (mm)	14,56	21,06	39,79	51,78	59,95	59,72	60,72	58,93	53,73	53,55	49,42	45,73	631,04
ALTO DE MIRA	Precipitación (mm)	72,30	88,85	119,92	267,21	376,28	498,93	430,64	499,34	426,98	438,31	422,49	342,05	3983,30
	ETP (mm)	68,97	63,55	76,38	80,97	90,52	88,06	89,94	89,32	84,40	81,45	74,95	72,62	961,14
	ETR (mm)	48,93	50,53	62,91	75,11	85,32	84,31	85,44	85,47	80,39	77,81	71,74	68,93	905,74
VISTA NIEVES	Precipitación (mm)	7,60	18,80	27,60	151,45	289,25	325,72	326,79	357,02	375,64	372,74	220,33	93,11	2566,04
	ETP (mm)	49,96	48,28	57,05	59,70	66,53	65,24	66,89	64,25	59,99	58,68	55,05	51,96	703,59
	ETR (mm)	7,60	17,63	24,86	53,94	62,87	62,10	63,61	61,46	57,67	56,45	51,77	44,24	657,55

Se puede observar que los meses de enero, febrero y marzo son, en los que estas porciones de las cuencas en estudio, presentan menores excesos de precipitación; por tanto en estos meses los caudales en los ríos disminuyen de manera considerable.

5.3. CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN

Para estima la capacidad de infiltración de las porciones de estas cuencas que se encuentran bajo la influencia de las Estaciones San Lorenzo y Vista Nieves, se empleó el Modelo desarrollado por La SCS de Los estados Unidos de Norte América.

El modelo matemático desarrollado por la SCS, es un método para calcular la precipitación efectiva en una cuenca, por medio de las abstracciones de una tormenta, las cuales incluyen la interceptación, la detención superficial y la infiltración propiamente dicha. El número de curva en condiciones de humedad normal (CNII) varía en un rango de 1 a 100, existiendo una función de las siguientes propiedades productoras de escorrentía de la cuenca hidrográfica: tipo de suelo hidrológico, utilización y tratamiento del suelo, condiciones de la superficie del terreno y condición de humedad antecedente del suelo. El método del número de curva de escorrentía, fue desarrollado basado en datos de precipitación y escorrentía de 24 horas.

La precipitación neta para este método es

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}$$

Donde

Pe: es la precipitación efectiva.

P: es la precipitación Total.

S: es la Retención Potencial Máxima.

La Retención Potencial Máxima se estima por medio de la Curva Número de Escorrentía para condiciones de humedad antecedente normal CNII.

$$S = \frac{25400}{CNII} - 254$$

El fin de la aplicación de este modelo, para este caso particular, fue estimar la capacidad de infiltración máxima S de la cuenca, teniendo en cuenta los tipos de suelos y las coberturas presentes en ella.

5.3.1 Estimación de la Curva Número

A continuación se estimará a Curva Numero Ponderada para cada una de las dos cuencas objeto de estudio.

- Clasificación de suelos

El suelo debe clasificarse dependiendo de su potencial, a continuación se ilustran las categorías utilizadas.

A. Bajo potencial de escorrentía: Suelos que tienen alta tasa de infiltración aun cuando estén muy húmedos.

B. Moderadamente bajo potencial de escorrentía: Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos, moderadamente profundos a profundos, bien drenados.

C. Moderadamente alto potencial de escorrentía: Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo.

D. Alto potencial de escorrentía: Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente.

Los suelos de las dos cuencas objeto de estudio se caracterizaron teniendo en cuenta el mapa de suelos desarrollado por el INGEOMINAS para este sector de La Sierra Nevada de Santa Marta. Los suelos fueron clasificados de la siguiente manera:

Tabla 36. Área de cada tipo de suelo de los Ríos Toribio y Córdoba

Tipo de Suelo Toribio	Área (km²)
A	9,86
B	71,77
C	26,69
Total	108,32

Tipo de Suelo Córdoba	Área (km²)
A	4,85
B	84,84
C	34,89
Total	124,59

- Cobertura Vegetal

Mediante la interpretación de imágenes satelitales se pudo establecer para cada una de las cuencas las coberturas existentes. A continuación se presenta un cuadro resumen con esta información.

Tabla 37. Cobertura vegetal Río Córdoba

Río Córdoba						
	TIPO A		TIPO B		TIPO C	
AREA (Km²)	4,85		84,84		34,89	
Tipo Suelo Cobertura Vegetal	Porcentaje	CN	Porcentaje	CN	Porcentaje	CN
Bosque	3,10%	38,00	36,15%	66,00	29,34%	77,00
Bosque intervenido	3,62%	45,00	27,36%	60,00	23,83%	70,00
Cuerpos de agua	2,23%	100,00	0,00%	100,00	0,00%	100,00
Cultivos	30,99%	72,00	0,00%		0,00%	
Pastos y vegetación natural	58,08%	68,00	36,18%	79,00	46,83%	74,00
Suelos Desnudos	1,98%	40,00	0,30%		0,00%	
CN PONDERADO POR TIPO DE SUELO	67,63		68,86		73,93	
CN PONDERADO CUENCA	70,23					
S (mm)	107,65					

Tabla 38. Cobertura vegetal Río Córdoba

Río Toribio						
	TIPO A		TIPO B		TIPO C	
AREA (Km ²)	18,21		54,62		35,4	
Tipo Suelo Cobertura Vegetal	Porcentaje	CN	Porcentaje	CN	Porcentaje	CN
Bosque	9,66%	38,00	16,04%	66,00	12,31%	77,00
Bosque intervenido	0,92%	45,00	25,37%	60,00	54,25%	70,00
Cuerpos de agua	4,05%	100,00	0,00%	100,00	0,00%	100,00
Cultivos	18,21%	72,00	0,00%		0,00%	
Pastos y vegetación natural	59,29%	68,00	58,56%	79,00	33,40%	74,00
Suelos Desnudos	7,87%	40,00	0,03%	77,00	0,04%	77,00
CN PONDERADO POR TIPO DE SUELO	64,71		72,09		72,20	
CN PONDERADO CUENCA	70,89					
S (mm)	104,32					

En los anteriores cuadros se presentan los tipos de cobertura por cada tipo de suelo, la Curva Número ponderada de cada cuenca y la infiltración máxima.

5.4. BALANCE HÍDRICO

Con el fin de estimar la oferta hídrica de los Ríos Córdoba y Toribio, se empleó el modelo denominado ABCD, que es un modelo no lineal de balance hídrico que toma como datos de entrada la precipitación y la evapotranspiración potencial, y da como resultado el flujo en el cauce. Internamente el modelo representa también la capacidad de almacenamiento del suelo, el almacenamiento subterráneo, el escurrimiento directo, el aporte del almacenamiento Subterráneo al cauce y la evapotranspiración actual.

Fue introducido originalmente por Thomas (1981) y Thomas *et al.* (1983) como una estructura de modelo conveniente para su utilización en el manejo de recursos hídricos a nivel regional, utilizando una escala de tiempo anual. Más tarde el Modelo ABCD fue comparado con numerosos modelos de balance mensual por Alley (1984 y 1985) y Vandewiele *et al.* (1992), mostrándose eficaz en comparación con los otros modelos.

El parámetro **a** puede ser interpretado como la posibilidad de escurrimiento antes de que el suelo se encuentre completamente saturado. Para obtener una buena calibración regional, este parámetro puede variar en cada cuenca.

El parámetro **b** es el límite superior para la suma de la evapotranspiración y el almacenamiento de agua en el suelo.

$$b = K_{ETP} \times ETP_0 + K_{AD} \times AD$$

El parámetro c , que distribuye el escurrimiento superficial y el almacenamiento de agua subterránea se calibra en cada cuenca. Este parámetro puede además contener a los posibles errores de medición de caudales, precipitaciones y evapotranspiraciones.

El recíproco del parámetro d puede ser interpretado como el tiempo medio de residencia del agua subterránea en la cuenca. Dicho parámetro puede ser relacionado con el coeficiente de recesión, pero dado el tamaño de la cuenca se toma este parámetro constante e igual a 1.

El Modelo ABCD de Thomas se basa en la combinación de las siguientes ecuaciones:

$$W_t = P_t - S_{t-1}$$

$$Y_t = E_t - S_t$$

$$Y_t = \frac{W_t + b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{W_t + b}{2a}\right)^2 - \frac{W_t b}{a}}$$

$$S_t = Y_t e^{-\frac{PE_t}{b}}$$

$$G_t = G_{t-1} + c(W_t - Y_t) - dG_t$$

$$Q_t = (1 - c)(W_t - Y_t) + dG_t$$

donde:

W_t : agua existente en el mes t .

Y_t : oportunidad de evapotranspiración en el mes t .

S_{t-1} : almacenamiento del suelo al comienzo del mes t .

S_t : almacenamiento del suelo al final del mes t .

PE_t : evapotranspiración potencial.

G_t : almacenamiento de aguas subterráneas al final del mes t .

Q_t : suma del escurrimiento directo y la descarga de aguas subterráneas.

5.4.1 Consideraciones Especiales

Para esta aplicación particular del Modelo ABCD, se hicieron las siguientes consideraciones especiales:

1. Los parámetros G y d fueron considerados como cero (0), debido a que la oferta como ya se dijo se estimará solamente con la porción de cuenca que se encuentra por encima de los 700 m.s.n.m; razón por la cual el cauce del Río no se encuentran en contacto con el acuífero.

5.4.1 Caudales Medios Mensuales

Luego de aplicar el modelo ABC se obtuvieron los resultados mostrados a continuación:

- Río Córdoba

Tabla 39. Balance Hídrico Río Córdoba, área bajo influencia de la estación San Lorenzo
BALANCE HIDRICO DEL RIO CORDOBA (ESTACIÓN SAN LORENZO)

a		0,8
c		0
d		1

Mes	P media Mensual (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	W_t (mm)	b (mm)	Y_t (mm)	S_t (mm)	G_t (mm)	Q_t (mm)	Q_t (L/s)
Enero	15,14	47,37	14,56	103,29	102,71	71,17	44,87	0,00	32,1	328,343
Febrero	23,73	45,97	21,06	68,60	66,83	46,78	23,51	0,00	21,8	247,004
Marzo	60,15	55,03	29,79	83,66	63,30	49,23	20,64	0,00	34,4	352,019
Abril	152,05	56,97	51,78	172,69	72,42	64,67	29,45	0,00	108,0	1140,990
Mayo	291,75	63,23	59,95	321,20	89,40	83,53	41,18	0,00	237,7	2429,599
Junio	359,81	62,33	59,72	400,99	100,90	95,00	51,22	0,00	306,0	3005,987
Julio	363,26	63,38	60,72	414,48	111,94	104,84	59,52	0,00	309,6	3041,850
Agosto	405,45	61,16	58,93	464,97	118,45	111,42	66,49	0,00	353,5	3473,153
Septiembre	403,19	55,59	53,73	469,68	120,22	113,05	71,19	0,00	356,6	3503,448
Octubre	397,67	55,43	53,55	468,86	124,74	116,97	106,00	0,00	351,9	3456,968
Noviembre	290,00	51,64	49,42	396,00	155,42	140,08	100,48	0,00	255,9	2514,078

Diciembre	158,30	49,43	45,73	258,78	146,21	123,61	88,15	80,00	215,2	2113,851
-----------	--------	-------	-------	--------	--------	--------	-------	-------	-------	----------

Tabla 40. Balance Hídrico Río Córdoba, área bajo influencia de la estación Vita Nieves.

BALANCE HIDRICO DEL RIO CORDOBA (VISTA NIEVES)

a		0,8
c		0
d		0

Mes	P media Mensual (mm)	ETP (mm)	ER (mm)	W _t (mm)		Y _t (mm)	S _t (mm)	G _t (mm)	Q _t (mm)	Q _t (L/s)
Enero	7,60	49,96	7,60	169,90	169,90	117,40	118,14	0,00	52,5	1204,069
Febrero	18,80	48,28	17,63	136,94	135,77	94,22	94,92	0,00	42,7	1128,853
Marzo	27,50	57,05	24,86	122,42	119,78	83,66	84,28	0,00	38,8	888,869
Abril	151,45	59,70	53,94	235,73	138,22	115,84	116,49	0,00	119,9	2749,674
Mayo	289,25	66,53	62,87	405,74	179,36	158,90	159,59	0,00	246,8	5661,044
Junio	325,72	65,24	62,10	485,31	221,69	195,36	196,11	0,00	289,9	6649,710
Julio	326,80	66,89	63,61	522,91	259,72	225,52	226,29	0,00	297,4	6820,468
Agosto	357,02	64,25	61,46	583,31	287,75	250,17	250,97	0,00	333,1	7640,194
Septiembre	375,64	60,00	57,67	626,61	308,64	268,42	106,00	0,00	358,2	8214,997
Octubre	272,74	58,68	56,45	378,74	162,45	144,59	145,29	0,00	234,1	5370,008
Noviembre	220,33	55,05	51,77	365,62	197,06	168,33	169,09	0,00	197,3	4524,605
Diciembre	93,11	51,96	44,24	262,20	213,33	161,51	162,30	0,00	100,7	2309,177

A continuación se presentan los caudales ofertados por la cuenca para una altura por debajo de los 700 m.s.n.m:

Tabla 41. Caudales ofertados del Río Córdoba

Mes	Q _t (Vista Nieves)	Q _t (San Lorenzo)	Q _t Total
	(L/s)	(L/s)	(L/s)
Enero	1204,069	328,343	1532,4
Febrero	1128,853	247,004	1375,9
Marzo	888,869	352,019	1240,9
Abril	2749,674	1140,990	3890,7
Mayo	5661,044	2429,599	8090,6
Junio	6649,710	3005,987	9655,7
Julio	6820,468	3041,850	9862,3
Agosto	7640,194	3473,153	11113,3

Septiembre	8214,997	3503,448	11718,4
Octubre	5370,008	3456,968	8827,0
Noviembre	4524,605	2514,078	7038,7
Diciembre	2309,177	2113,851	4423,0

- Río Toribio

Tabla 42. Balance Hídrico Río Toribio, área bajo influencia de la estación San Lorenzo

BALANCE HIDRICO DEL RIO TORIBIO (ESTACIÓN SAN LORENZO)

AD		104,30
a		0,8
c		0
d		0

Mes	P media Mensual (mm)	ETP	ETR	W _t	b	Y _t	S _t	G _t	Q _t	Q _t
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(L/s)
Enero	15,14	47,37	14,56	102,26	101,68	70,46	44,22	0,00	31,8	26,478
Febrero	23,73	45,97	21,06	67,95	66,18	46,33	23,13	0,00	21,6	19,931
Marzo	60,15	55,03	37,79	83,28	62,92	48,96	20,42	0,00	34,3	28,578
Abril	152,05	56,97	51,77	172,47	72,20	64,49	29,30	0,00	108,0	92,894
Mayo	291,75	63,23	59,95	321,05	89,25	83,39	41,06	0,00	237,7	197,866
Junio	359,81	62,33	59,72	400,87	100,78	94,90	51,13	0,00	306,0	244,816
Julio	363,26	63,38	60,72	414,39	111,85	104,76	59,44	0,00	309,6	247,739
Agosto	405,45	61,16	58,93	464,89	118,37	111,36	66,42	0,00	353,5	282,869
Septiembre	403,19	55,59	53,73	469,61	120,15	112,99	71,14	0,00	356,6	285,337
Octubre	397,67	55,43	53,55	468,81	124,69	116,92	104,30	0,00	351,9	281,553
Noviembre	290,00	51,64	49,42	394,30	153,72	138,67	99,11	0,00	255,6	204,530
Diciembre	158,30	49,43	45,73	257,41	144,84	122,56	87,12	80,00	134,8	107,894

Tabla 43. Balance Hídrico Río Toribio, área bajo influencia de la estación Vista Nieves

BALANCE HIDRICO DEL RIO TORIBIO (ESTACIÓN VISTA NIEVES)

a		0,8
c		0
d		0

Mes	P media	ETP	ETR	W _t	b	Y _t	S _t	G _t	Q _t	Q _t
-----	---------	-----	-----	----------------	---	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

	Mensual (mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(L/s)
Enero	7,60	49,96	7,60	169,90	169,90	117,40	118,14	0,00	52,5	746,704
Febrero	18,80	48,28	17,63	136,94	135,77	94,22	94,92	0,00	42,7	700,059
Marzo	27,50	57,05	24,86	122,42	119,78	83,66	84,28	0,00	38,8	551,232

Mes	P media Mensual (mm)	ETP	ETR	W _t	b	Y _t	S _t	G _t	Q _t	Q _t
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(L/s)
Abril	151,45	59,70	53,94	235,73	138,22	115,84	116,49	0,00	119,9	1705,211
Mayo	289,25	66,53	62,87	405,74	179,36	158,90	159,59	0,00	246,8	3510,697
Junio	325,72	65,24	62,10	485,31	221,69	195,36	196,11	0,00	289,9	4123,819
Julio	326,80	66,89	63,61	522,91	259,72	225,52	226,29	0,00	297,4	4229,714
Agosto	357,02	64,25	61,46	583,31	287,75	250,17	250,97	0,00	333,1	4738,068
Septiembre	375,64	60,00	57,67	626,61	308,64	268,42	106,00	0,00	358,2	5094,532
Octubre	272,74	58,68	56,45	378,74	162,45	144,59	145,29	0,00	234,1	3330,211
Noviembre	220,33	55,05	51,77	365,62	197,06	168,33	169,09	0,00	197,3	2805,935
Diciembre	93,11	51,96	44,24	262,20	213,33	161,51	162,30	0,00	100,7	1432,036

A continuación se presentan los caudales ofertados por la cuenca para una altura por debajo de los 700 m.s.n.m:

Tabla 44. Caudales ofertados del Río Córdoba.

Mes	Q _t (San Lorenzo)	Q _t (Vista Nieves)	Q _t
	(L/s)	(L/s)	(L/s)
Enero	26,478	743,396	769,9
Febrero	19,931	697,421	717,4
Marzo	28,578	549,646	578,2
Abril	92,894	1704,336	1797,2
Mayo	197,866	3510,180	3708,0
Junio	244,816	4123,387	4368,2
Julio	247,739	4229,340	4477,1
Agosto	282,869	4737,775	5020,6
Septiembre	285,337	5094,302	5379,6
Octubre	281,553	3325,711	3607,3
Noviembre	204,530	2801,415	3005,9
Diciembre	171,903	1427,509	1599,4

6. ALTERNATIVAS

6.1. Metodología de evaluación: Teoría de Utilidad Multiatributo

Dentro de lo que se ha denominado como *Teoría de la Decisión* o *Análisis de decisiones*², se han identificado varios problemas en la práctica de distintas organizaciones, donde los resultados están relacionados con diferentes atributos, aspectos o dimensiones. Este tipo de problemas se conocen como problemas de decisión multiatributo o multicriterio.

En ese orden de ideas, se han desarrollado varias estrategias para la solución de este tipo de problemas. Una de estas estrategias es aquella que inicia su proceso racional desde una aproximación de la teoría de la utilidad; es decir, a través de funciones de utilidad que contemplan un conjunto de objetivos de manera simultánea y, en particular, funciones de utilidad aditivas.

El modelo de Función de Utilidad Aditiva, parte del supuesto de que se tienen tantas funciones de utilidad unidimensionales $u_1(x_1), \dots, u_n(x_n)$, como atributos tiene el problema. En ese sentido, la función de utilidad aditiva se define como el promedio ponderado de estas funciones de utilidad unidimensionales. Para una alternativa que tiene resultados x_1, \dots, x_n en los n atributos identificados, la utilidad estaría dada por:

$$u(x_1, \dots, x_n) = w_1 u_1(x_1) + \dots + w_n u_n(x_n)$$

Donde los w_1, \dots, w_n corresponden a los pesos de cada una de las funciones individuales. Todos los pesos son positivos y deben sumar 1.

De esta forma, una vez fijados los objetivos, es necesario establecer una forma de medirlos dentro de una escala adecuada. Igualmente se hace necesario establecer la metodología a seguir para el cálculo de los pesos de cada una de los atributos. Finalmente, en la evaluación de varias alternativas que dan respuesta a un determinado problema, la solución será aquella que presente una mayor utilidad comparada a las de las otras alternativas, la cual habrá tenido en cuenta las características de cada uno de los atributos considerados, como se explicó previamente (Castillo Hernández, 2006).

Para la obtención de las funciones de utilidad individuales existen diferentes metodologías de acuerdo al tipo de atributos en consideración: atributos cuantitativos o cualitativos. De esta manera, la metodología de las *Razones* hace uso del siguiente sistema de ecuaciones para el cálculo de la utilidad $u_s(\cdot)$, de cada alternativa para el atributo en cuestión:

$$u_s(\cdot) = a + b(x_i)$$

$$0 = a + b(x_{peor\ valor})$$

$$1 = a + b(x_{mejor\ valor})$$

² Disciplina que utiliza conceptos y herramientas de modelos matemáticos, así como aportes de otras disciplinas con el fin de realizar una estructuración racional de los procesos de decisión respecto a la solución de un problema.

Donde se asigna un valor de cero a la utilidad que genera el peor valor considerado para el atributo x dentro de la escala establecida para éste, y una utilidad de 1 para el mejor valor que se tiene del atributo. Así, con el cálculo de a (intercepto con el eje de las ordenadas para la función de utilidad) y b (pendiente de la función de utilidad) se obtiene la utilidad para cada uno de los atributos que se tienen de acuerdo a las alternativas a evaluar.

Los atributos que se plantearon para evaluar las diferentes alternativas propuestas en este estudio son los siguientes:

- ***Analizar la rapidez a punto de equilibrio de la alternativa***

El tiempo a punto de equilibrio se refiere al tiempo en el que la demanda de agua es igual a la oferta. Este atributo se evaluará de forma cuantitativa según el número de años en que se va a llegar al punto de equilibrio.

- ***Analizar la rapidez de entrada de la primera etapa de la alternativa***

En el tiempo de entrada de la primera etapa es el tiempo requerido para que la primera intervención entre en funcionamiento. Para esto se debe tener en cuenta obras como ampliaciones de Plantas de Tratamiento de Agua Potable, conducciones y captaciones. Este atributo se evaluará de forma cuantitativa según el número de años en que va a entrar la primera etapa de la alternativa.

- ***Analizar la confiabilidad del sistema***

Esta medida indica qué tan confiable es el sistema en términos de la oferta hídrica. Es decir, mide la seguridad con la que se puede captar agua de los ríos pertenecientes a la alternativa teniendo en cuenta la disponibilidad del recurso. De esta manera, el objetivo se va a evaluar de manera cuantitativa determinando una relación entre el caudal mínimo que el río puede ofrecer y el caudal requerido por la población al final del periodo de diseño. De esta manera, la confiabilidad se mide de acuerdo con la relación de caudales.

- ***Evaluar los costos de implementar la alternativa en términos de construcción.***

Esta medida permite comparar, de forma cuantitativa, las diferentes alternativas de acuerdo con los costos de construcción. Para esto se debe tener en cuenta los costos de excavación, costos de tuberías, costos de construcción de estaciones de bombeo y Plantas de Tratamiento de Agua Potable.

Los costos de la construcción y de ampliación de las plantas de tratamiento se obtuvieron con base en los presupuestos de las PTAP's de Pasto, Cisneros y el proyecto Arjona – Turbaco. Con la información recolectada se estableció una ecuación para la obtención el costo unitario de la planta en función de la capacidad de tratamiento.

$$\text{Costo (COP)} = 5E7 - 5E6 \ln \left(\text{capacidad} \left(\frac{L}{S} \right) \right)$$

Para obtener el costo de las ampliaciones se utilizó la misma ecuación multiplicada por un factor de 0.75. El costo de las plantas desalinizadoras se obtuvo al multiplicar la ecuación de costos de un PTAP por un factor de 2.

En cuanto a los costos de la tubería y su instalación se tomaron de referencia los costos de la tubería de GRP producida por PAVCO S.A. El cálculo del volumen de excavación y de relleno se hizo siguiendo las recomendaciones del manual de GRP de PAVCO S.A, y utilizando los precios de excavación por metro cúbico suministrados por la empresa METROAGUA S.A. E.S.P.

El costo de las estaciones de bombeo, al igual que el número de estaciones requeridas, se obtuvo con base en el dato de potencia requerida generado en el proceso de diseño de cada una de las alternativas. Por lo tanto, teniendo en cuenta la energía que se requiere se puede estimar el costo con la siguiente gráfica:

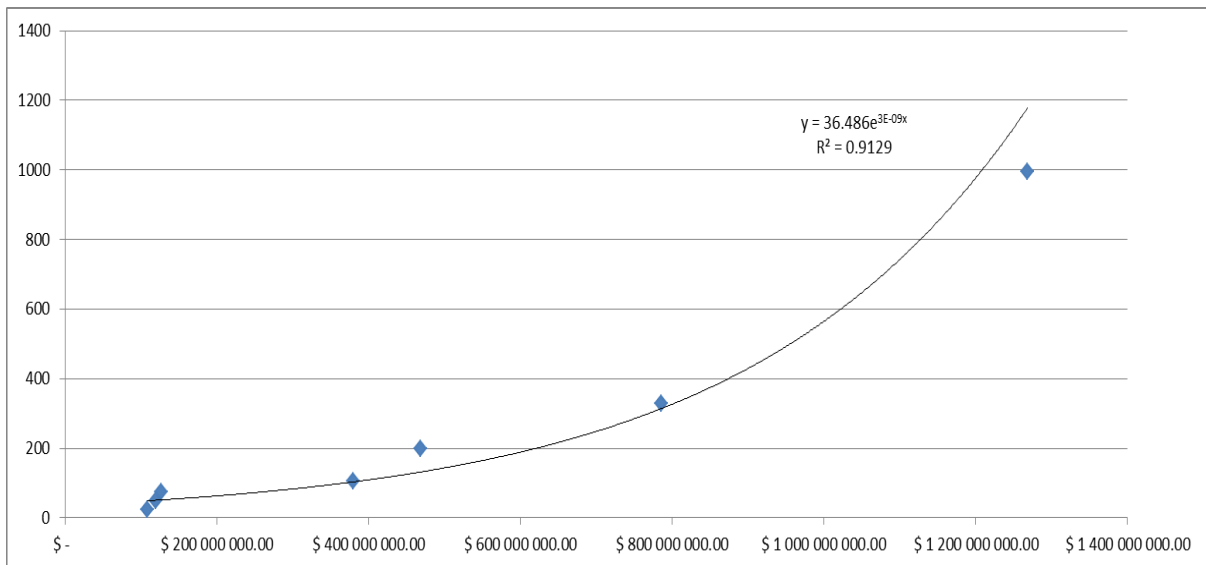


Figura 6-1. Gráfica de energía vs costos

Este objetivo se va a evaluar de manera cuantitativa utilizando los costos obtenidos para cada alternativa. De acuerdo con la metodología de decisión, se tomó el valor máximo y mínimo para obtener una regresión lineal y de esta manera poder normalizar el costo de cada alternativa y evaluarla en la función de utilidad individual.

- ***Evaluar la factibilidad de las alternativas desde el punto de vista de la problemática indígena.***

Este objetivo permite determinar la factibilidad de la alternativa teniendo en cuenta factores sociales y culturales de la población indígena que se encuentra en la zona de estudio. Para esto se deben tener en cuenta las áreas de influencia de los resguardos indígenas y las zonas que están proyectadas a expansión de estas mismas comunidades. De esta manera, la

evaluación de este objetivo se realizará de manera cualitativa, indicando si la alternativa afecta o no alguna de estas áreas de influencia.

- ***Evaluar la factibilidad de las alternativas desde el punto de vista de invasión de Parques Nacionales Naturales.***

Este objetivo permite determinar la factibilidad de la alternativa teniendo en cuenta las restricciones legales de protección de los Parques Nacionales Naturales de la zona de influencia. De esta manera, este objetivo se va a evaluar de manera cualitativa determinando si la alternativa cruza o no, alguna zona correspondiente a Parques Nacionales Naturales.

- ***Evaluar la factibilidad de las alternativas teniendo en cuenta los Sitios Sagrados para la población indígena.***

De acuerdo con la información cartográfica de la ubicación de los sitios sagrados para las comunidades indígenas, se va a determinar, de manera cualitativa, la factibilidad de la implementación de alguna alternativa teniendo en cuenta la existencia de alguno de estos sitios sagrados dentro del área de influencia del proyecto.

- ***Determinar la facilidad de operación de la alternativa.***

Esta medida permite establecer la facilidad de operación con respecto a la infraestructura que requiera la alternativa. Este objetivo se va a medir de manera cuantitativa determinando el número de estaciones de bombeo y operación de plantas de tratamiento que corresponda.

- ***Evaluar la posibilidad de expansiones futuras.***

Este objetivo permite medir la facilidad que tiene el sistema y la infraestructura para ser ampliada en un futuro. Para esto se debe tener en cuenta la capacidad del sistema y la demanda futura, espacio disponible para ampliaciones, etc. Este objetivo se va a medir de manera cualitativa, asignando un atributo entre Fácil, Medio y Difícil.

- ***Minimizar el impacto ambiental que pueda generar la alternativa.***

Dentro de los impactos ambientales que se pueden generar al implementar alguna alternativa, se encuentra la remoción de cobertura vegetal de la zona y la disponibilidad del agua de los ríos involucrados para la preservación de los ecosistemas acuáticos. De esta manera, se va a realizar una evaluación cuantitativa de la magnitud del impacto ambiental con respecto a la longitud de excavación para la construcción de tuberías y el porcentaje de caudal extraído con respecto al caudal ecológico.

- ***Maximizar los beneficios sociales atribuidos a la implementación de la alternativa.***

Para determinar los beneficios sociales que pueda generar la implementación de una alternativa se debe evaluar la posibilidad de suplir las necesidades sanitarias de poblaciones cercanas. Entonces, este objetivo se va a medir de manera cualitativa indicando si existe la posibilidad de que la alternativa pueda brindar agua a otras poblaciones.

- ***Evaluar la vulnerabilidad al cambio climático***

Se evaluará de forma cualitativa cada alternativa definiéndolas con una vulnerabilidad alta, media o baja al cambio climático, en términos de la capacidad de los ríos para el final del periodo de diseño.

- ***Evaluar la vulnerabilidad del sistema.***

Este objetivo permite medir qué tan vulnerable es el sistema en términos de eventos extremos, fenómenos de altas presiones en tuberías y redundancia del sistema. La vulnerabilidad del sistema a eventos extremos se va a medir cuantitativamente y de la misma manera se va a medir la redundancia del sistema.

- ***Evaluar el escenario donde se tenga pérdidas de agua en aducción.***

Para analizar este objetivo se debe tener en cuenta que las pérdidas de agua en la aducción tienen origen antropogénico. Esto quiere decir que se va a medir la accesibilidad que tienen las personas de acceder a las tuberías de conducción y obtener agua cruda para fines diferentes al consumo humano. De acuerdo con lo anterior, este objetivo se va a evaluar de manera cuantitativa determinando la longitud de tubería de conducción que se encuentre en zonas pobladas.

- ***Evaluar el costo por m³ de agua tratado.***

El costo por m³ de agua está directamente relacionado con la calidad de agua de las fuentes hídricas y de la cantidad de agua a tratar. En este se incluyen químicos de tratamiento y operación de la planta. Este objetivo se va a evaluar de manera cuantitativa utilizando los costos obtenidos para cada alternativa. De acuerdo con la metodología de decisión, se tomó el valor máximo y mínimo para obtener una regresión lineal y de esta manera poder normalizar el costo y evaluarlo en la función de utilidad individual.

- ***Costo de potencia requerida en aducción***

En primer lugar, la potencia que deben tener las estaciones de bombeo con el fin de poder llevar el agua desde el punto de captación hasta la planta de tratamiento se obtiene teniendo en cuenta el perfil topográfico, el material y el diámetro de la tubería a utilizar en la aducción. Luego se determina el costo de la potencia requerida a partir de los datos suministrados por METROAGUA S.A. E.S.P. Este objetivo se va a evaluar de manera cuantitativa utilizando los costos obtenidos para cada alternativa. De acuerdo con la metodología de decisión, se tomó el valor máximo y mínimo para obtener una regresión lineal y de esta manera poder normalizar el costo y evaluarlo en la función de utilidad individual.

A partir de lo anterior, se le asignaron pesos locales y globales con criterios de priorización determinados por el personal experto del proyecto. Estos valores se encuentran a continuación:

Tabla 6.1. Pesos de los atributos

ATRIBUTOS			Pesos locales	Pesos globales
Rapidez (Tiempo de entrada)			10	10
Rapidez (Tiempo a punto de equilibrio)			8	8
Confiabilidad			12	12
Costo Construcción (COP)	PTAP		6	10
	Instalación Tubería		4	
	Total			
Factibilidad: Problemática indígena			4	4
Factibilidad: Sitios sagrados			4	4
Factibilidad: Parques Nacionales			4	4
Facilidad Operación	# PTAP'S		2	8
	# Estaciones de Bombeo		6	
	Total			
Expansiones futuras			6	6
Minimizar Impacto Ambiental	Longitud Trazados (Km)		1	5
	% Caudal Removido	Río		
		Temporada Promedio	1	
		Temporada Seca	3	
Maximizar beneficio social			6	6
Vulnerabilidad a cambio climático			3	3
Vulnerabilidad	Presión Max (m.c.a.)		2	4
	Líneas de Conducción		2	
Pérdidas de agua en aducción (Km de tubería en área poblada)			4	4
Costo m ³ /tratado (USD\$)			6	6
Potencia requerida en aducción (COP\$)			6	6

6.2. Alternativas consideradas

De acuerdo con la información presentada en este informe y los resultados de proyección de demanda presentados en el informe de Producto I.2 se plantearon diferentes alternativas para suministrar agua a la ciudad de Santa Marta en los próximos 50 años.

Las alternativas comprenden la captación de los diferentes ríos que se están estudiando, teniendo en cuenta la oferta de caudal que cada uno de ellos ofrece. Se consideró la captación de los siguientes ríos como nuevas fuentes de abastecimiento:

- Río Guachaca.
- Río Buritaca.
- Río Toribio.
- Río Córdoba.
- Río Don Diego.
- Río Magdalena.

Dentro de las alternativas siempre se incluyeron los ríos Manzanares, Piedras y Gaira, los cuales abastecen actualmente a la ciudad de Santa Marta. De la misma manera, se consideró dentro de los cálculos de oferta un aporte de caudal por parte del acuífero de 300L/s, el cual representa un valor conservador que permitiría la rehabilitación del acuífero.

Para el planteamiento de las alternativas, se tuvo en cuenta la oferta hídrica de los ríos en época de verano y de invierno. Los valores que se utilizaron para saber el valor de caudal que se podía extraer del río en cada época se encuentran a continuación:

Tabla 6.2. Caudales de ríos

Río	Caudal Medio	Caudal Mínimo
Palomino	13,3	4,5
Don Diego	18,7	4,9
Buritaca	59,5	5,1
Guachaca	11,7	2
Piedras	2,2	0,4
Gaira	0,57	0,18
Frío	5,4	3,1
Manzanares	0,57	0,15

Por otro lado, se utilizaron los resultados de proyección de la demanda tanto para Caudal Máximo Diario como para Caudal Medio Diario calculado para las temporadas baja y alta como se puede ver a continuación:

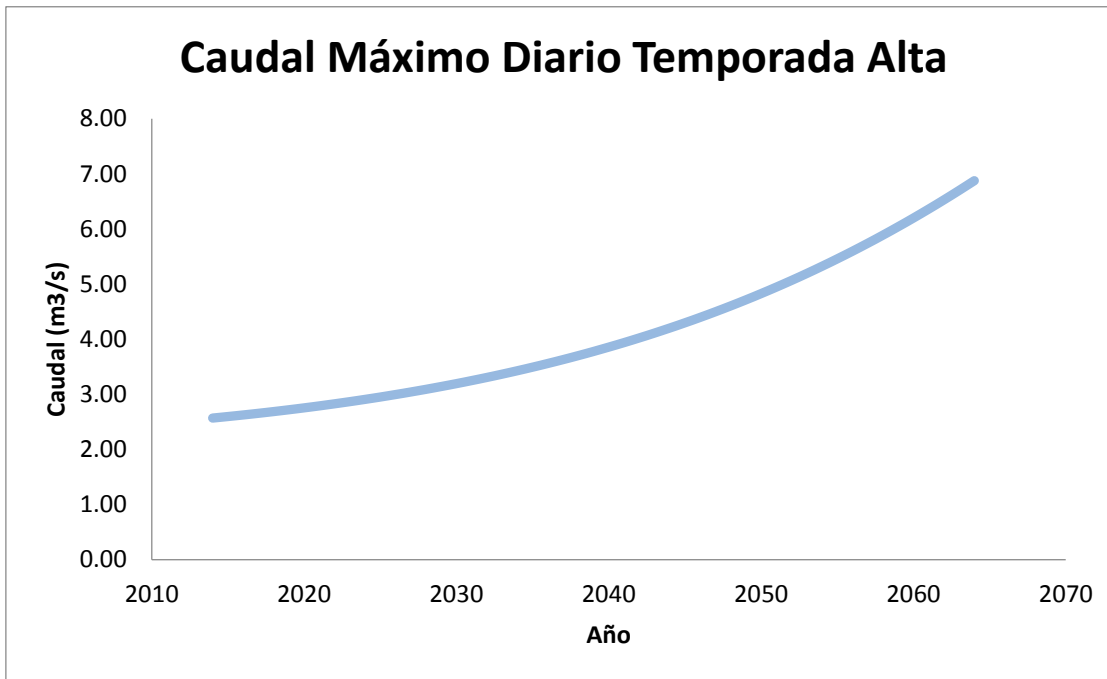


Figura 6-2. Caudal Máximo Diario en Temporada alta

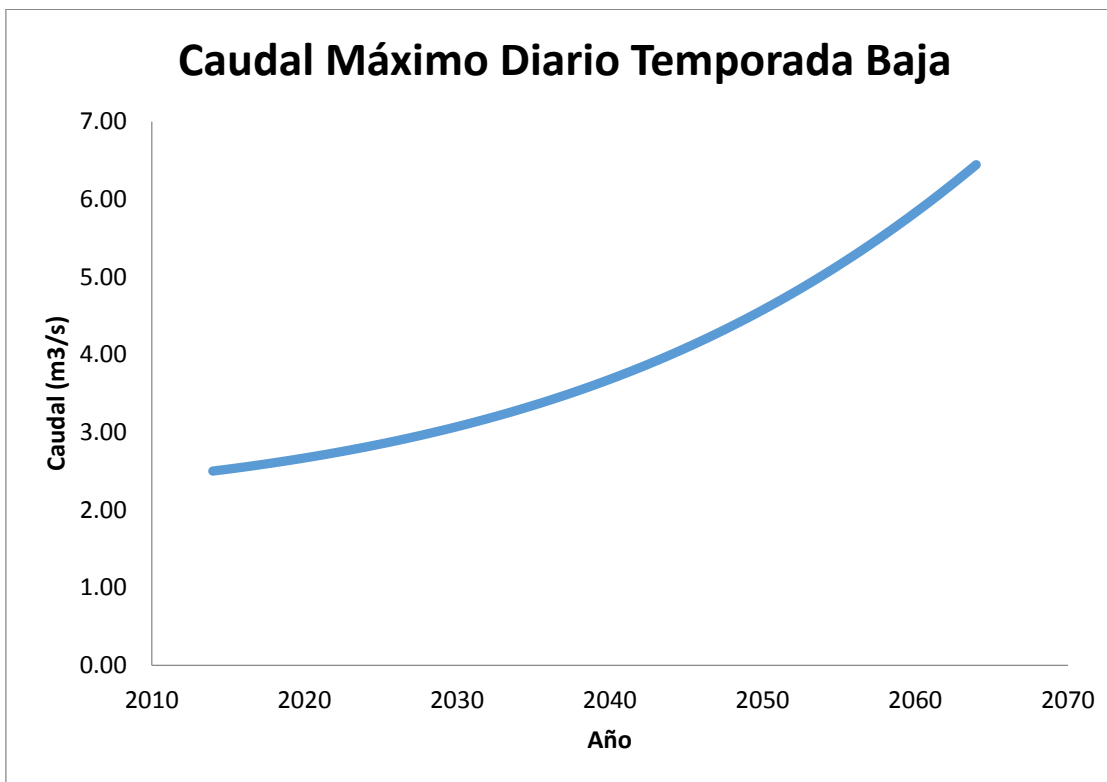


Figura 6-3. Caudal Máximo diario en Temporada Baja

Para cada una de las alternativas se graficó el caudal de captación que corresponde a la suma de los caudales que se deben extraer de la respectiva combinación de ríos para las épocas húmedas y de estiaje.

De la misma manera, se graficó la capacidad de tratamiento, la cual se determina como la suma de la capacidad que tienen las diferentes Plantas de Tratamiento de Agua Potable. Para esto se consideraron las plantas que actualmente están en funcionamiento: PTAP Mamatoco y PTAP El Roble. Adicionalmente, dependiendo de la alternativa, se consideró la implementación y/o ampliación de otras dos plantas: PTAP Curval (Localizada en la misma zona propuesta por METROAGUA S.A. E.S.P. para la PTAP Curval) y PTAP Toribio (Localizada en las cercanías de la intersección del Río Toribio con la Troncal del Caribe). Finalmente, en algunas de las alternativas se incluyó la posibilidad de incluir una planta desalinizadora (Localizada en las cercanías a la bahía de Santa Marta) cuya capacidad de tratamiento también fue incluida dentro de la capacidad global de tratamiento del sistema.

Estas dos curvas se compararon con la curva de demanda para la población en temporada alta y en temporada baja. Por lo tanto se analizaron dos escenarios extremos, en el primero se comparó la curva de demanda para temporada baja con la curva de captación en temporada promedio. En el segundo, se comparó la curva de demanda para temporada alta con la curva de captación para temporada de verano.

Para determinar cuánto caudal extraer, de qué fuente, en qué momento y a qué planta de tratamiento enviar el agua, se determinó que las curvas de capacidad de tratamiento y captación debían ser mayores a la curva de demanda una vez se superara el déficit actual en el que se encuentra el sistema, y ello debería incluir un margen de seguridad acorde con la demanda de agua en cada instante de tiempo. Esto quiere decir, que no se permitió un futuro déficit de agua en ninguna de las dos temporadas ni en ningún año del periodo de estudio.

De acuerdo con lo anterior, las alternativas propuestas se explican a continuación:

Alternativa 1: Ríos Guachaca, Buritaca y Don Diego

Para esta alternativa se tiene el siguiente cronograma:

- **2014:** Se inicia con un déficit de 950L/s en temporada promedio y de 1690L/s en temporada seca.
- **2017:** Se inicia la operación de la PTAP Curval con el primer tren de tratamiento con una capacidad de 400 L/s. Adicionalmente se realiza la captación del Río Guachaca con capacidad para 1600 L/s. La tubería que conduce el agua desde el Río Guachaca hasta la PTAP Curval tiene un diámetro de 1 m con una longitud de 33,23 Km y 3 estaciones de bombeo. Con esto se alcanza un déficit de 630 L/s en temporada promedio y de 1380 L/s en temporada seca.
- **2018:** Ampliación de la PTAP Curval con el inicio de operación del segundo tren de tratamiento que tiene una capacidad de 1000 L/s, esto le proporciona una capacidad total a la planta de 1400 L/s. Con esto se alcanza un déficit de 410 L/s solo en temporada seca.

- **2019:** Ampliación de la PTAP Curval con el inicio de operación del tercer tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 1000 L/s, esto le proporciona una capacidad total a la planta de 2400 L/s. Adicionalmente, se realiza la captación del Río Buritaca con capacidad para 1500 L/s, lo cual requiere una tubería de 1,3 m de diámetro con una longitud de 41,75 Km y 3 estaciones de bombeo. Con esto el sistema se encuentra sin déficit para las temporadas promedio y verano.
- **2024:** Ampliación de la PTAP Curval con el inicio de operación del cuarto tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 1000 L/s; esto le proporciona una capacidad total a la planta de 3400L/s.
- **2034:** Ampliación de la PTAP Curval con el inicio de operación del quinto tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 1000 L/s; esto le proporciona una capacidad total a la planta de 4400L/s. Adicionalmente, se realiza la ampliación de la captación del Río Buritaca a 2500L/s, esto quiere decir que la nueva captación tiene una capacidad de 1000 L/s, lo que requiere una tubería de 1,3 m de diámetro con una longitud de 41,75 Km y 3 estaciones de bombeo.
- **2047:** Ampliación de la PTAP Curval con el inicio de operación del sexto tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 1000 L/s; esto le proporciona una capacidad total a la planta de 5400 L/s. Adicionalmente, se realiza la ampliación de la captación del Río Buritaca a 4100 L/s, esto quiere decir que la nueva captación tiene una capacidad de 1600 L/s, lo que requiere una tubería de 1 m de diámetro con una longitud de 41,75Km y 3 estaciones de bombeo.
- **2057:** Ampliación de la PTAP Curval con el inicio de operación del séptimo tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 1000 L/s; esto le proporciona una capacidad total a la planta de 6400 L/s. Adicionalmente, se realiza la captación del Río Don Diego con una capacidad de 1000 L/s, lo que requiere una tubería de 1 m de diámetro con una longitud de 49,35 Km y 4 estaciones de bombeo.

Durante todo el periodo de análisis los ríos Manzanares y Piedras continuaron enviando agua a la PTAP Mamatoco y el río Gaira continuó enviando agua a la PTAP El Roble. Los ríos Guachaca, Buritaca y Don Diego enviaron agua a la PTAP Curval. Adicionalmente, se tomaron 300 L/s del Acuífero en temporadas secas.

Con estas intervenciones el sistema se encuentra sin déficit desde el año 2019 hasta el 2064. Para esta alternativa se obtuvieron las siguientes graficas de oferta y demanda de caudal:

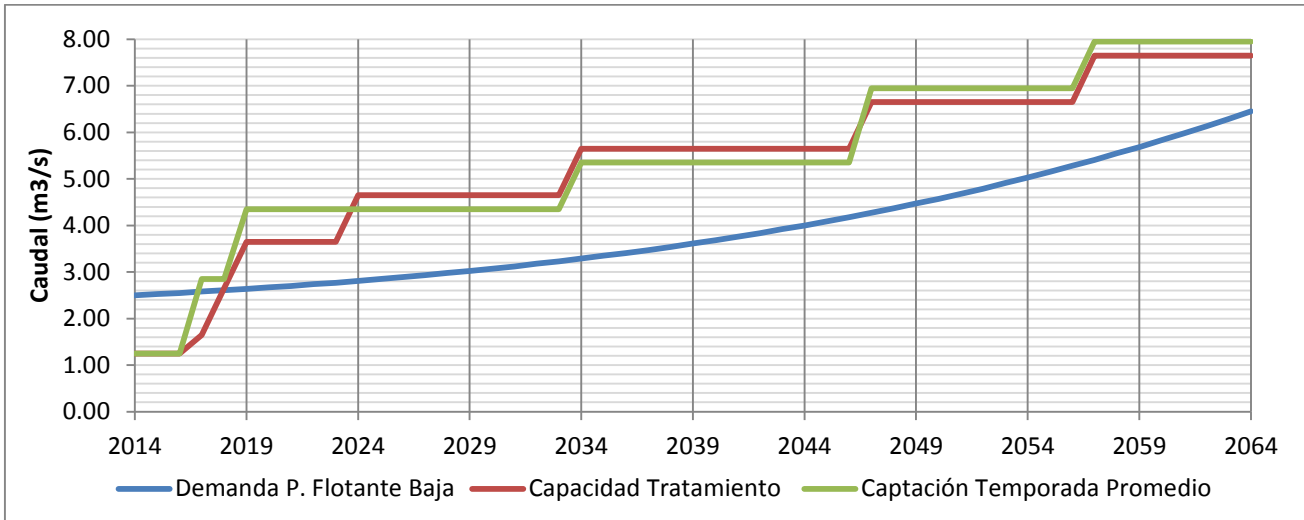


Figura 6-4. Gráfica de oferta - demanda para población baja y temporada promedio-Alternativa 1

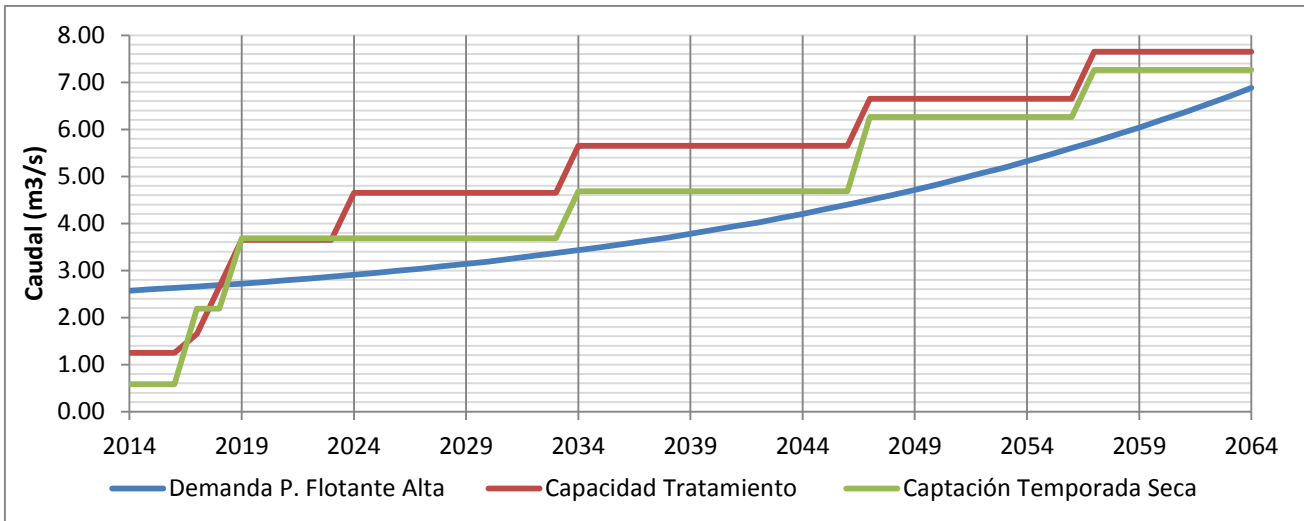


Figura 6-5. Gráfica de oferta - demanda para población alta y temporada seca- Alternativa 1

El trazado horizontal de esta alternativa se encuentra a continuación:

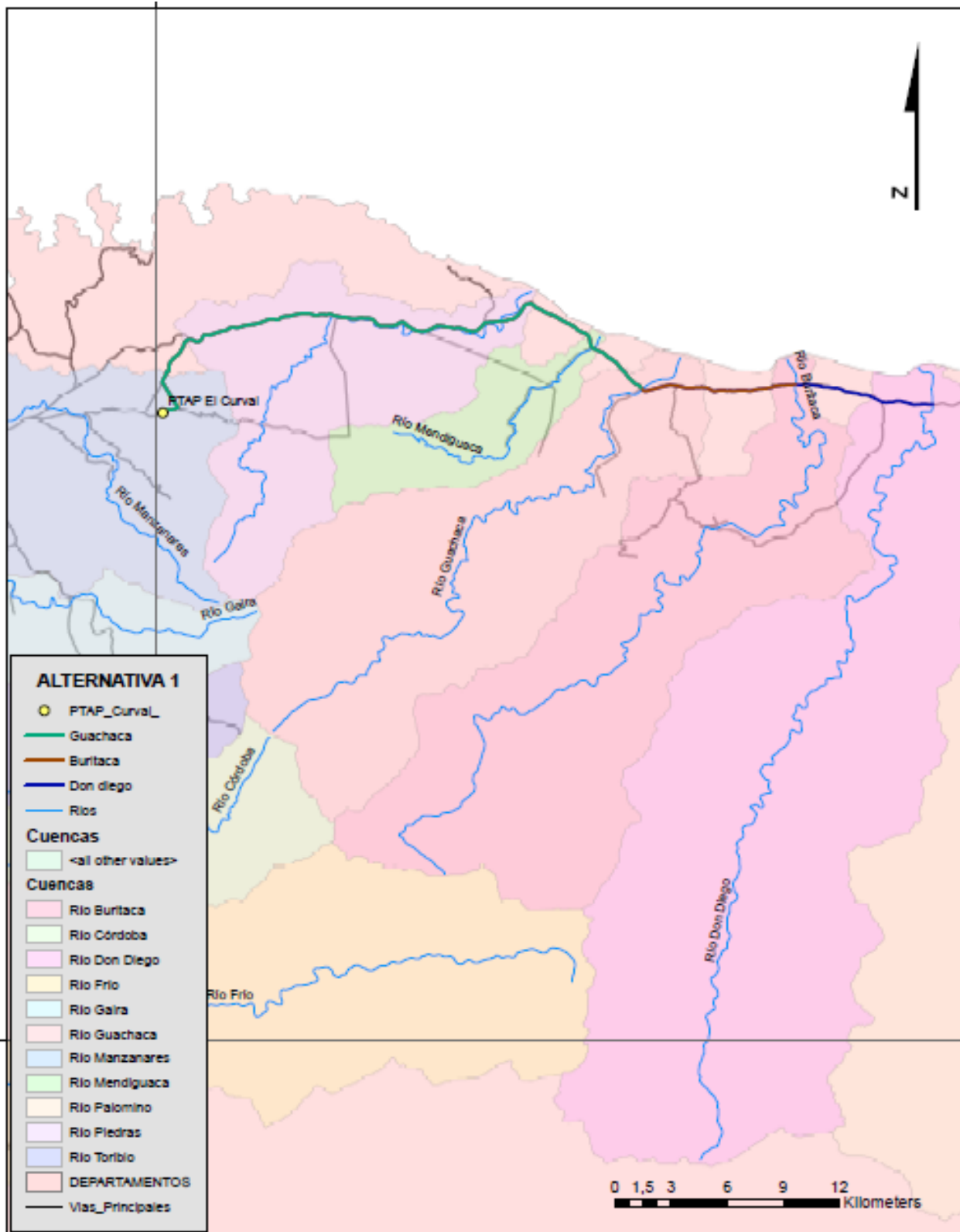


Figura 6-6. Trazado horizontal alternativa 1

Los trazados longitudinales de cada uno de los ríos utilizados en esta alternativa se muestran a continuación:

Perfil Longitudinal : Alternativa 1- Guachaca (Q=1600 L/s)

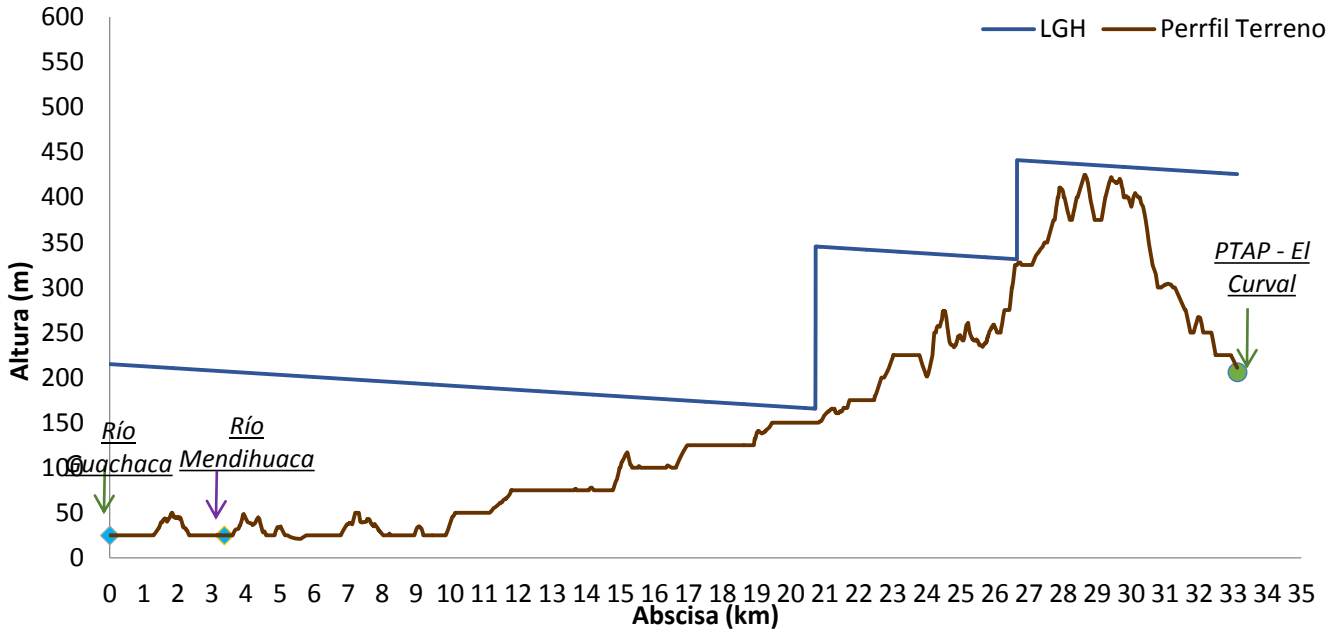


Figura 6-7. Perfil longitudinal río Guachaca-Alternativa 1

Perfil Longitudinal : Alternativa 1- Buritaca (Q=2500 L/s)

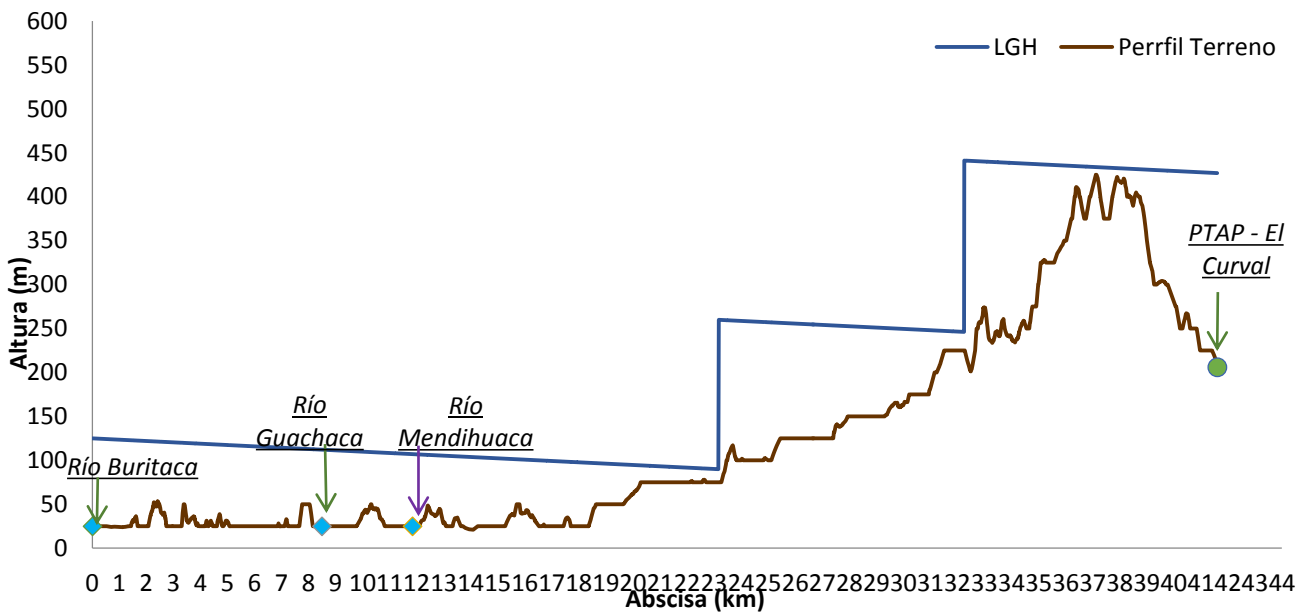


Figura 6-8. Trazado longitudinal río Buritaca 1- Alternativa 1

Perfil Longitudinal : Alternativa 1 - Buritaca (Q=1600 L/s)

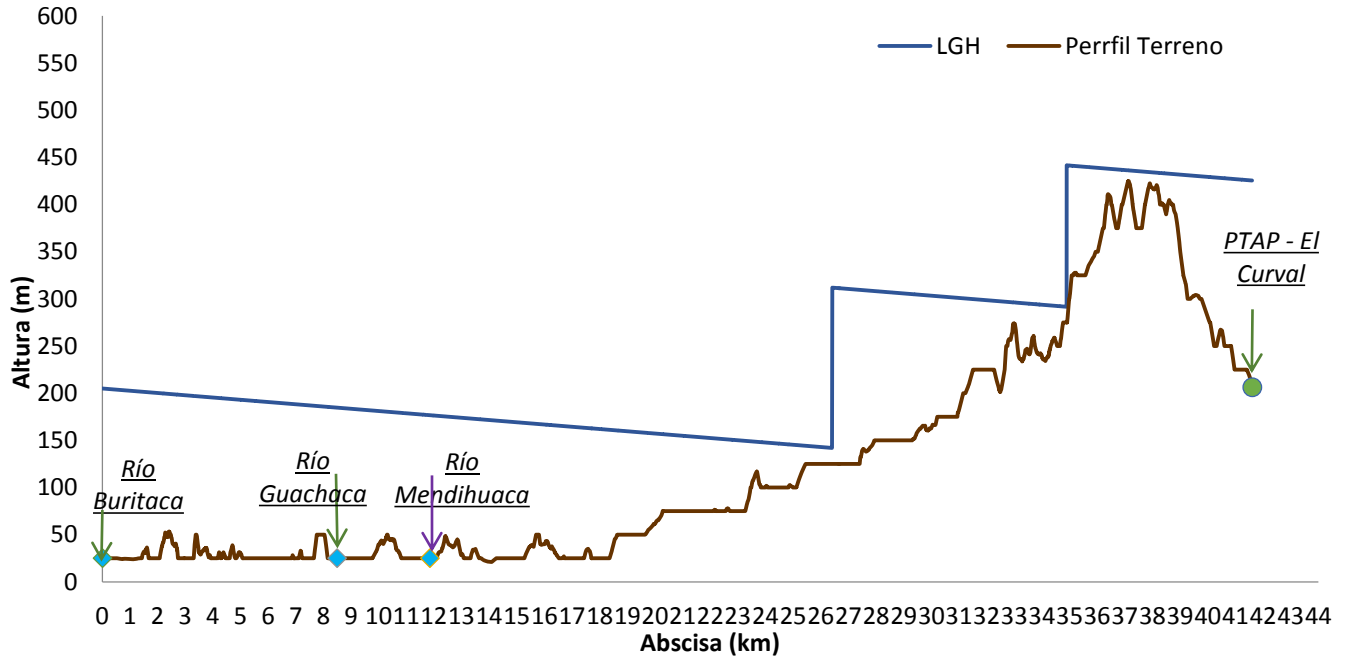


Figura 6-9. Trazado longitudinal río Buritaca 2- Alternativa 1

Perfil Longitudinal : Alternativa 1 - Don Diego (Q=1000 L/s)

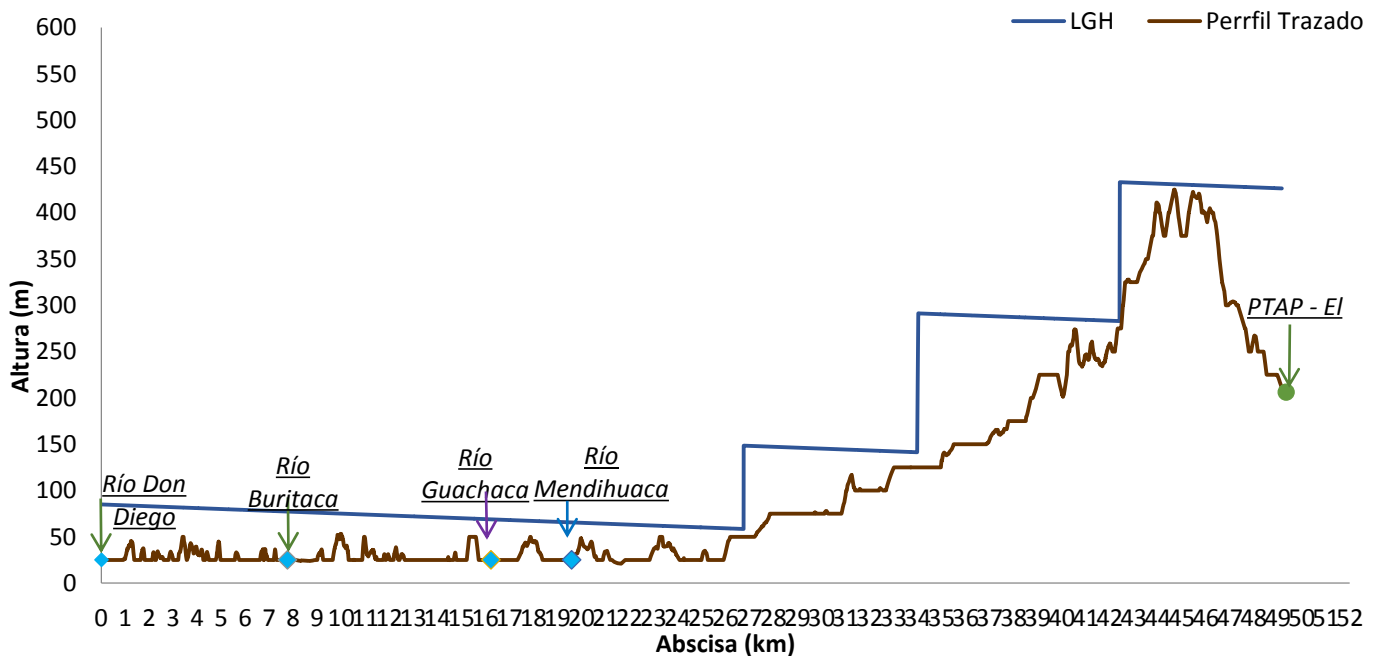


Figura 6-10. Trazado longitudinal río Don Diego- Alternativa 1

Alternativa 2: Río Magdalena

Para esta alternativa se tiene el siguiente cronograma:

- **2014:** Se inicia con un déficit de 950L/s en temporada promedio y de 1690L/s en temporada seca.
- **2018:** Se inicia la operación de la PTAP Toribio con el primer tren de tratamiento con una capacidad de 1500 L/s. Adicionalmente, se realiza la captación del Río Magdalena de 1500L/s, para esto se requiere de una tubería de 1,1 m de diámetro con una longitud de 70,23 Km, 3 estaciones de bombeo y un pretratamiento ubicado en Sitio Nuevo. Con esto se alcanza un déficit de 310 L/s en temporada seca y sin déficit en temporada promedio.
- **2020:** Se inicia la operación del segundo tren de la PTAP Toribio con capacidad de 1500L/s, lo que proporciona una capacidad total a la planta de 3000 L/s. Adicionalmente, se realiza la ampliación de la captación del Río Magdalena de 1500 L/s, para esto se va a utilizar el mismo sistema construido en el 2018. Con esto el sistema se encuentra sin déficit para las temporadas promedio y verano.
- **2036:** Ampliación de la PTAP Toribio con el tercer tren de tratamiento con capacidad de 1500 L/s, lo que le proporciona a la planta una capacidad total de 4500 L/s. Adicionalmente, se realiza la ampliación de la captación del Río Magdalena de 1500 L/s, para esto se requiere de una tubería de 1,1m de diámetro con una longitud de 70,23 Km, 3 estaciones de bombeo y un pretratamiento ubicado en Sitio Nuevo.
- **2047:** Ampliación de la PTAP Toribio con el cuarto tren de tratamiento con capacidad de 1500 L/s, lo que le proporciona a la planta una capacidad total de 6000 L/s. Adicionalmente, se realiza la ampliación de la captación del Río Magdalena de 1500 L/s, se va a utilizar el mismo sistema construido en el 2036.

Durante todo el periodo de análisis los ríos Manzanares y Piedras continuaron enviando agua a la PTAP Mamatoco, el río Gaira continuó enviando agua a la PTAP El Roble. El Río Magdalena envió agua a la PTAP Toribio. Adicionalmente, se tomaron 300L/s del Acuífero en temporadas secas.

Con estas intervenciones el sistema se encuentra sin déficit desde el año 2020 hasta el 2064. Para esta alternativa se obtuvieron las siguientes graficas de oferta y demanda de caudal:

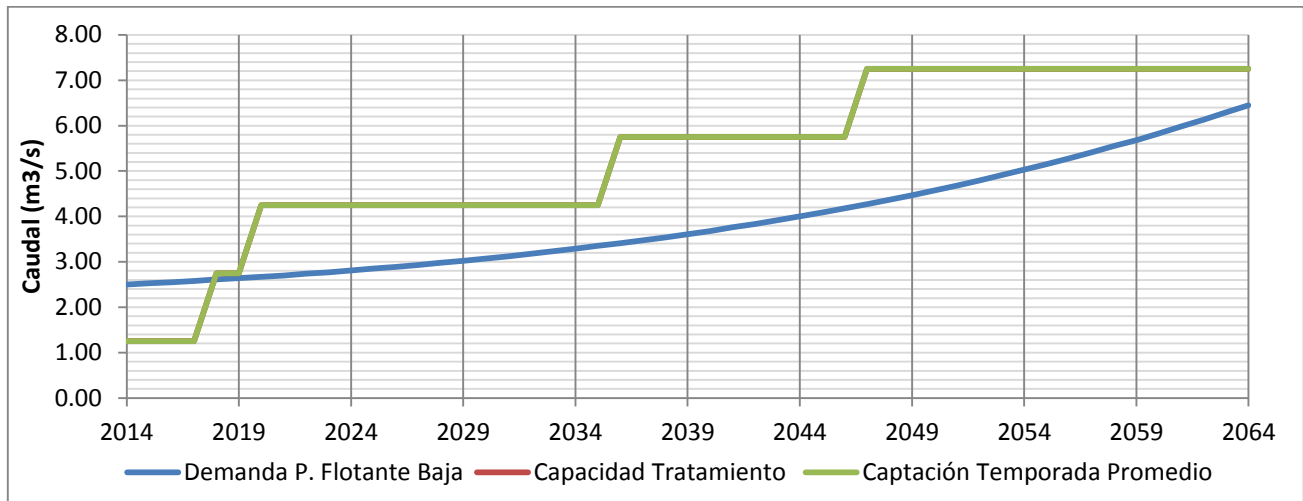


Figura 6-11. Gráfica de oferta - demanda para población baja y temporada seca- Alternativa 2

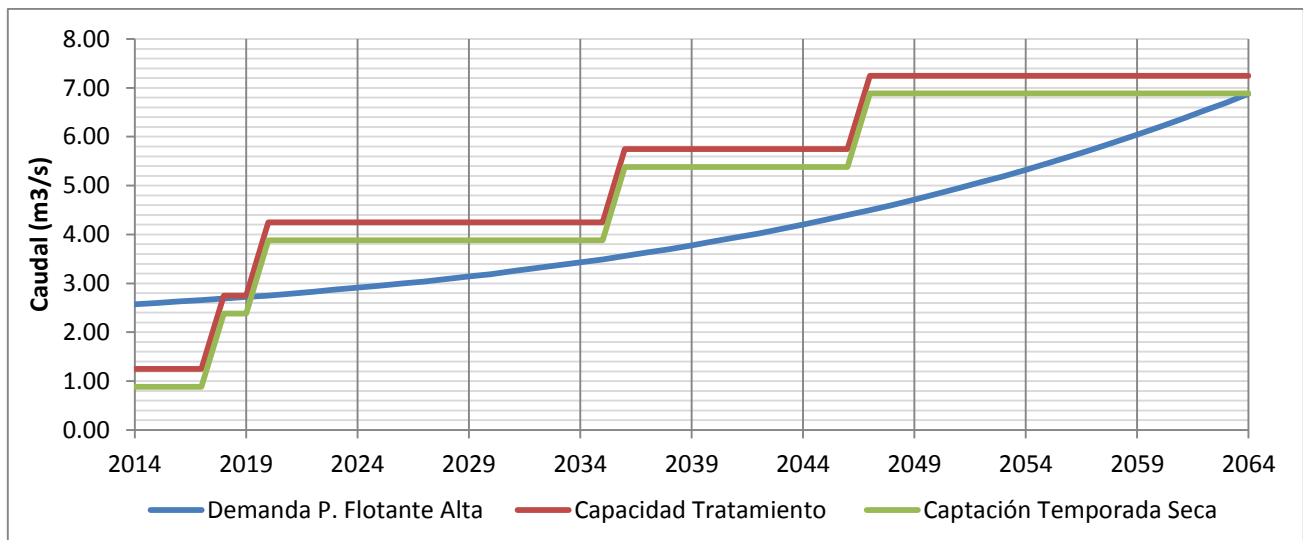


Figura 6-12. Gráfica de oferta - demanda población alta y temporada seca- Alternativa 2

El trazado horizontal de esta alternativa se encuentra a continuación:

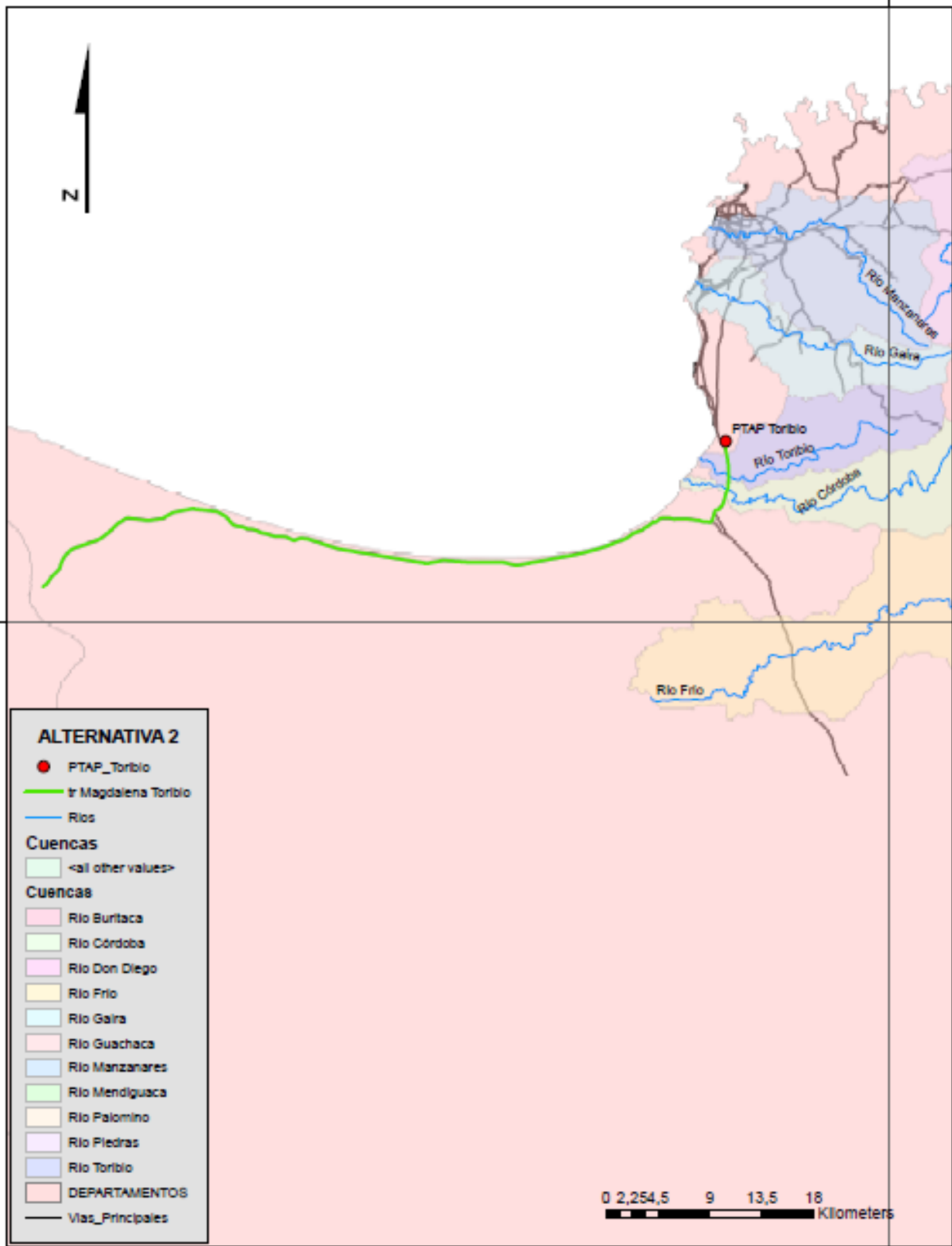


Figura 6-13. Trazado horizontal Alternativa 2

El trazado longitudinal de esta alternativa se muestra a continuación:

Perfil Longitudinal : Alternativa 2 - Río Magdalena

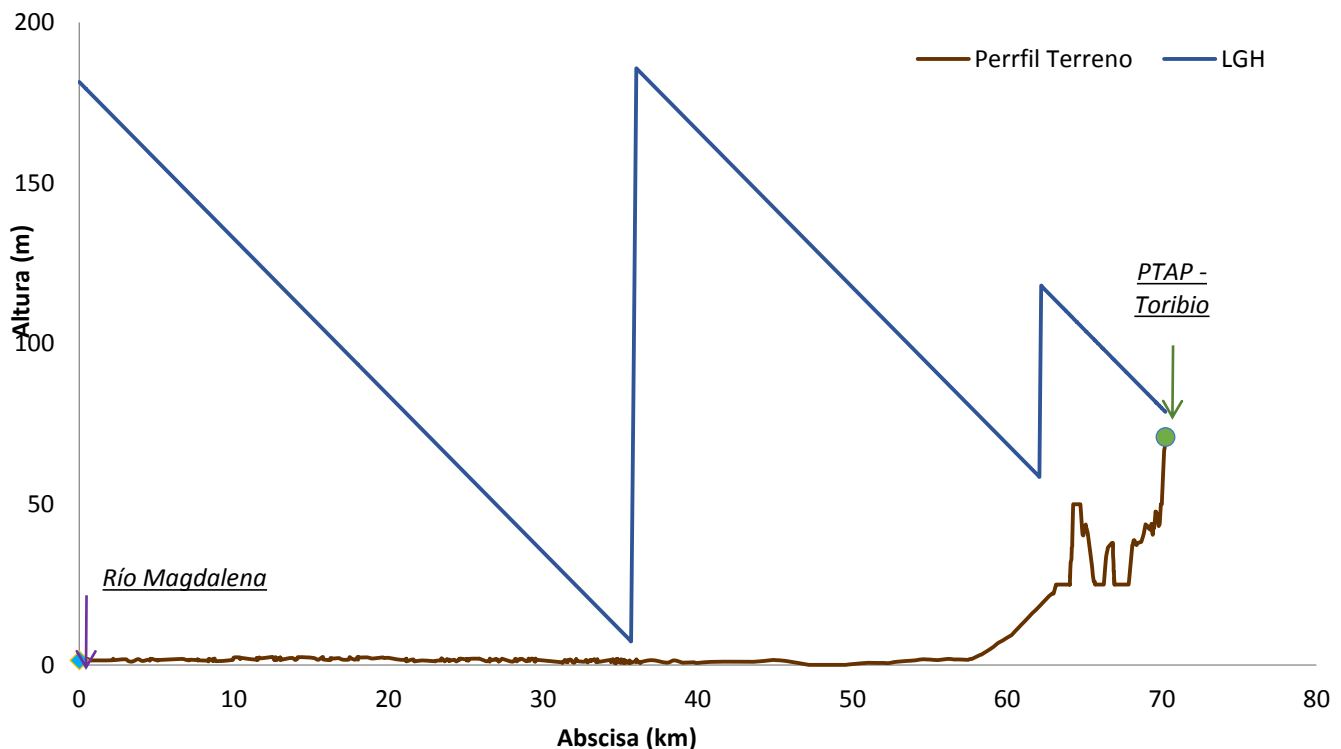


Figura 6-14. Trazado longitudinal Río Magdalena- Alternativa 2

Alternativa 3: Ríos Toribio, Córdoba, Guachaca y Buritaca.

Para esta alternativa se tiene el siguiente cronograma:

- **2014:** Se inicia con un déficit de 950L/s en temporada promedio y de 1690L/s en temporada de verano.
- **2016:** Se inicia la operación del primer tren de la PTAP Toribio con una capacidad de 1000 L/s. Adicionalmente, se realiza la captación del Río Toribio con capacidad para 400 L/s y del Río Córdoba con capacidad para 400 L/s. Para la captación del Río Toribio se va a utilizar una tubería de diámetro 0,7 m con una longitud de 3,07 Km de longitud y 1 estación de bombeo. Para la captación del Río Córdoba se necesita una tubería de 0,9 m de diámetro con una longitud de 4,26 Km y 1 estación de bombeo. Con esto se alcanza un déficit de 200L/s en temporada promedio y 950 L/s en temporada de verano.
- **2017:** Se Inicia la operación de la PTAP Curval con el primer tren de tratamiento, el cual debe tener una capacidad de 400 L/s. También se inicia la operación del segundo tren de

tratamiento de la PTAP Toribio con una capacidad de 1000 L/s, lo que le proporciona una capacidad total a la planta de 2000 L/s. Adicionalmente, se realiza la captación del Río Guachaca con capacidad para 1600 L/s. La tubería que conduce el agua desde el Río Guachaca hasta la PTAP Curval debe tener un diámetro de 1 m con una longitud de 33,23 Km y se requieren 3 estaciones de bombeo. Por otro lado, se realiza la ampliación de las captaciones del Río Toribio a 1000 L/s y Córdoba a 1000 L/s. Para la ampliación de la captación se va a utilizar el mismo sistema construido en el 2016. Con esto el sistema se encuentra sin déficit para las temporadas promedio y verano.

- **2018:** Ampliación de la PTAP Curval con un segundo tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 1200 L/s, lo que le proporciona la planta una capacidad total de 1600 L/s.
- **2039:** Ampliación de la PTAP Curval con un tercer tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 500 L/s, lo que proporciona una capacidad total a la planta de 2100 L/s. Adicionalmente, se realiza la captación del Río Buritaca con capacidad para 1000 L/s, esto requiere una tubería con un diámetro de 1m con una longitud de 41,75 Km y 4 estaciones de bombeo.
- **2047:** Ampliación de la PTAP Curval con un cuarto tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 1000 L/s, lo que proporciona a la planta una capacidad total de 3100 L/s. Adicionalmente, se realiza la ampliación de la captación del Río Buritaca a 2000 L/s, esto quiere decir que la capacidad de la nueva captación es de 1000 L/s, Para esto se va a utilizar el mismo sistema construido en el 2047.
- **2055:** Ampliación de la PTAP Curval con un quinto tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 1300 L/s, lo que proporciona a la planta una capacidad total de 4400L/s. Adicionalmente, se realiza la ampliación de la captación del Río Buritaca a 3000L/s esto quiere decir que la capacidad de la nueva captación es de 1000 L/s, lo que requiere una tubería con un diámetro de 0,9 m con una longitud de 41,75 Km y 3 estaciones de bombeo.

Durante todo el periodo de análisis los ríos Manzanares y Piedras continuaron enviando agua a la PTAP Mamatoco y el Río Gaira continuó enviando agua a la PTAP El Roble. Los ríos Guachaca y Buritaca enviaron agua a la PTAP Curval y los ríos Toribio y Córdoba enviaron agua a la PTAP de Toribio. Adicionalmente, se tomaron 300L/s del Acuífero en temporadas secas.

Con estas intervenciones el sistema se encuentra sin déficit desde el año 2017 hasta el 2064. Para esta alternativa se obtuvieron las siguientes graficas de oferta y demanda de caudal:

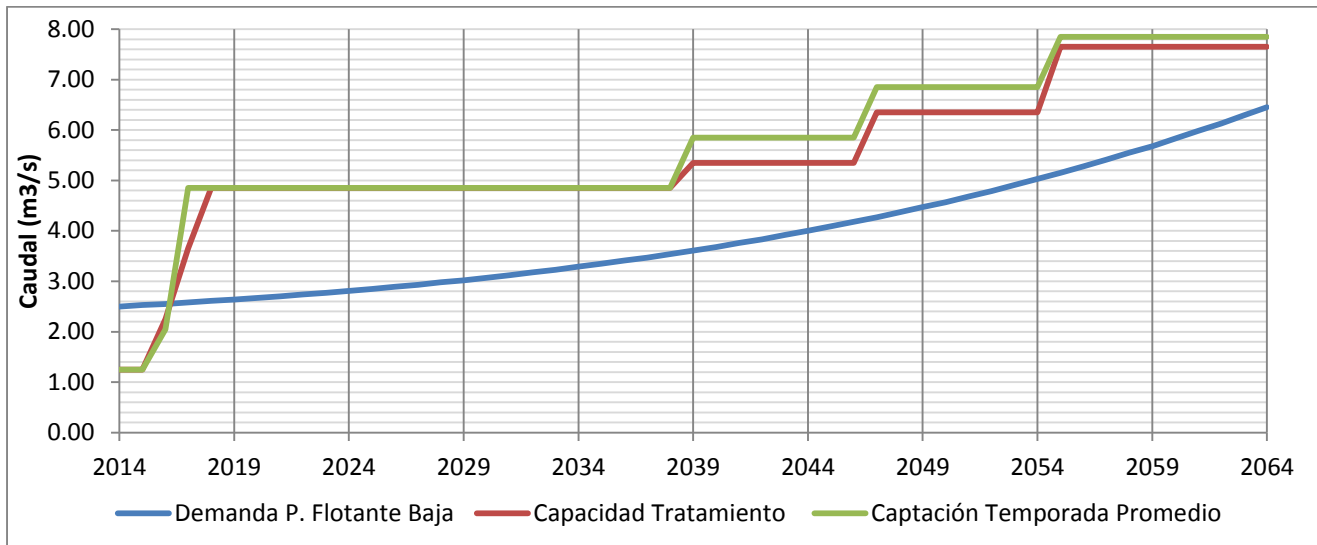


Figura 6-15. Gráfica de oferta - demanda para población baja y temporada promedio- Alternativa 3

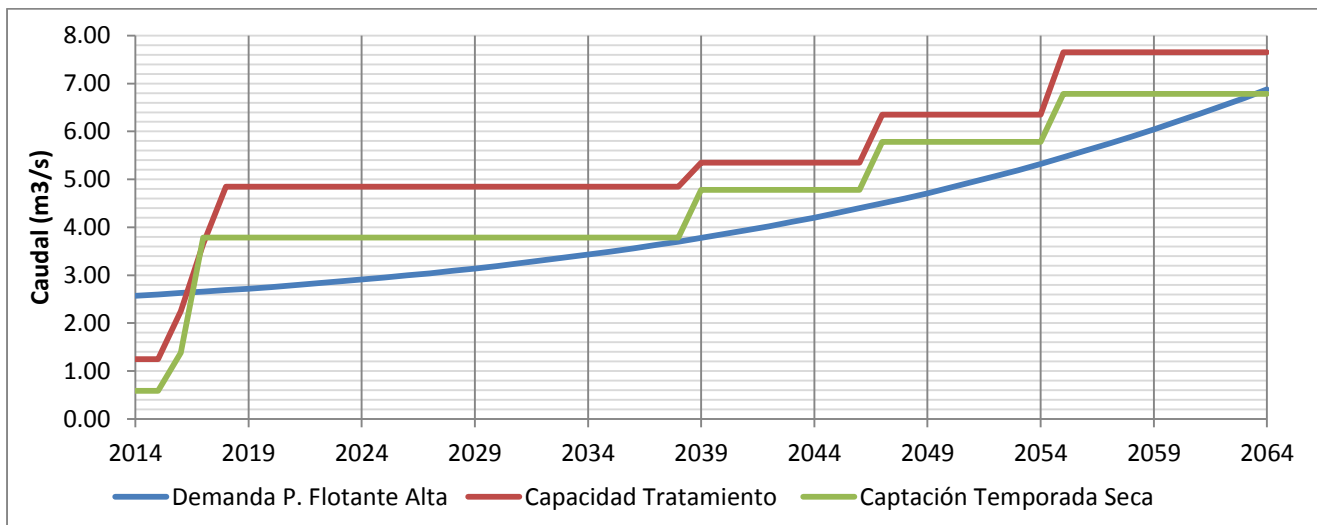


Figura 6-16. Gráfica de oferta - demanda para población alta y temporada seca- Alternativa 3

El trazado de esta alternativa se encuentra a continuación:

Los trazados longitudinales de cada uno de los ríos utilizados en esta alternativa se muestran a continuación:

Perfil Longitudinal : Alternativa 3 - Río Toribio (Q=1000 L/s)

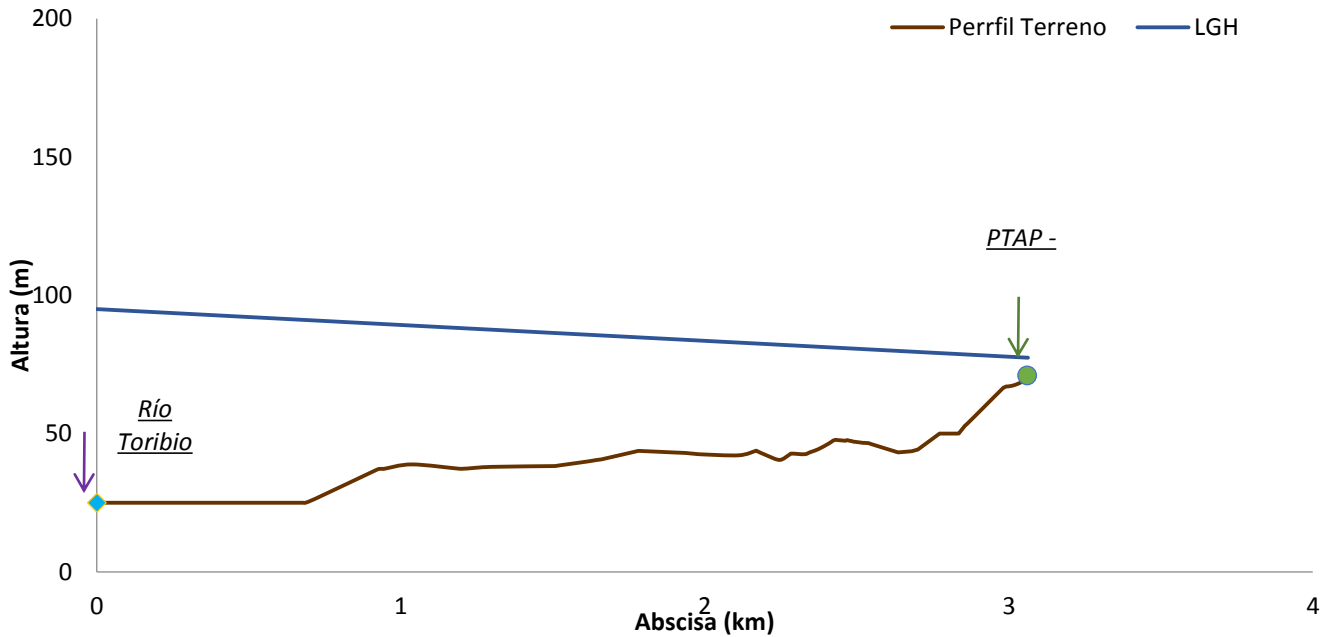


Figura 6-18. Trazado longitudinal Río Toribio - Alternativa 3

Perfil Longitudinal : Alternativa 3 - Río Córdoba (Q=1000 L/s)

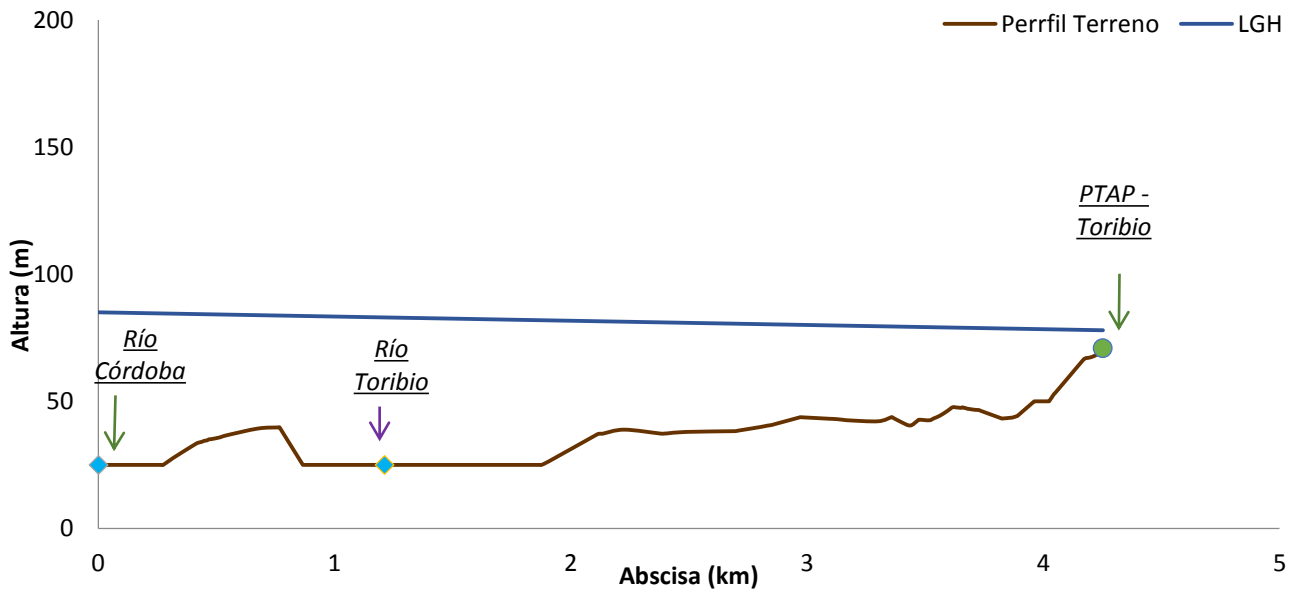


Figura 6-19. Trazado longitudinal Río Córdoba - Alternativa 3

Perfil Longitudinal: Alternativa 3- Río Buritaca (Q=2000 L/s)

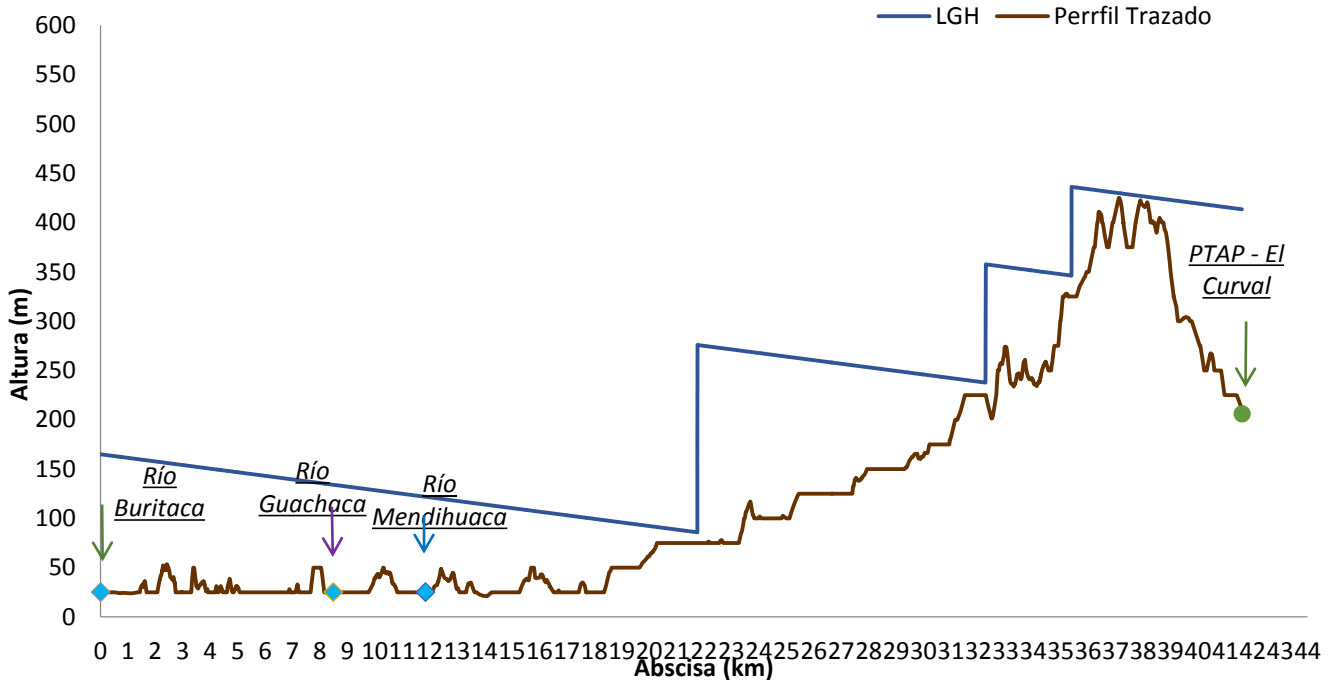


Figura 6-20. Trazado longitudinal Río Buritaca 1 - Alternativa 3

Perfil Longitudinal: Alternativa 3 - Río Buritaca (Q=1000 L/s)

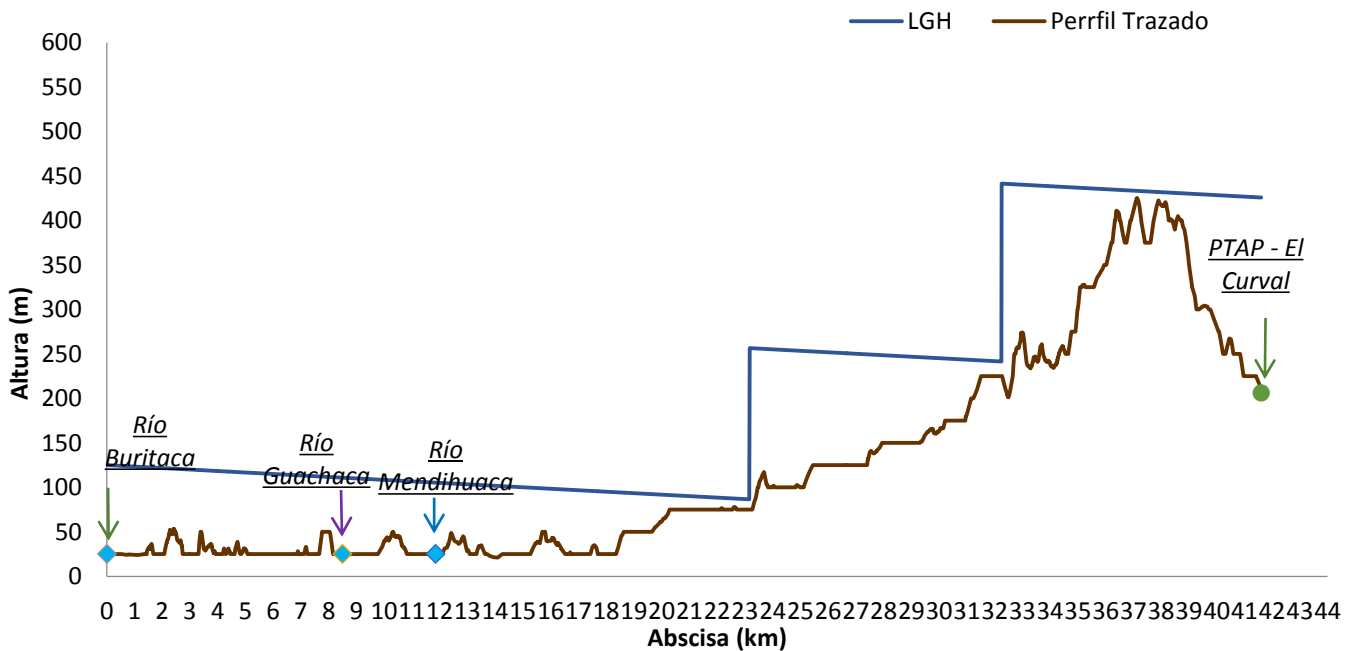


Figura 6-21. Trazado longitudinal Río Buritaca 2 - Alternativa 3

Perfil Longitudinal: Alternativa 3 - Río Guachaca (Q=1600 L/s)

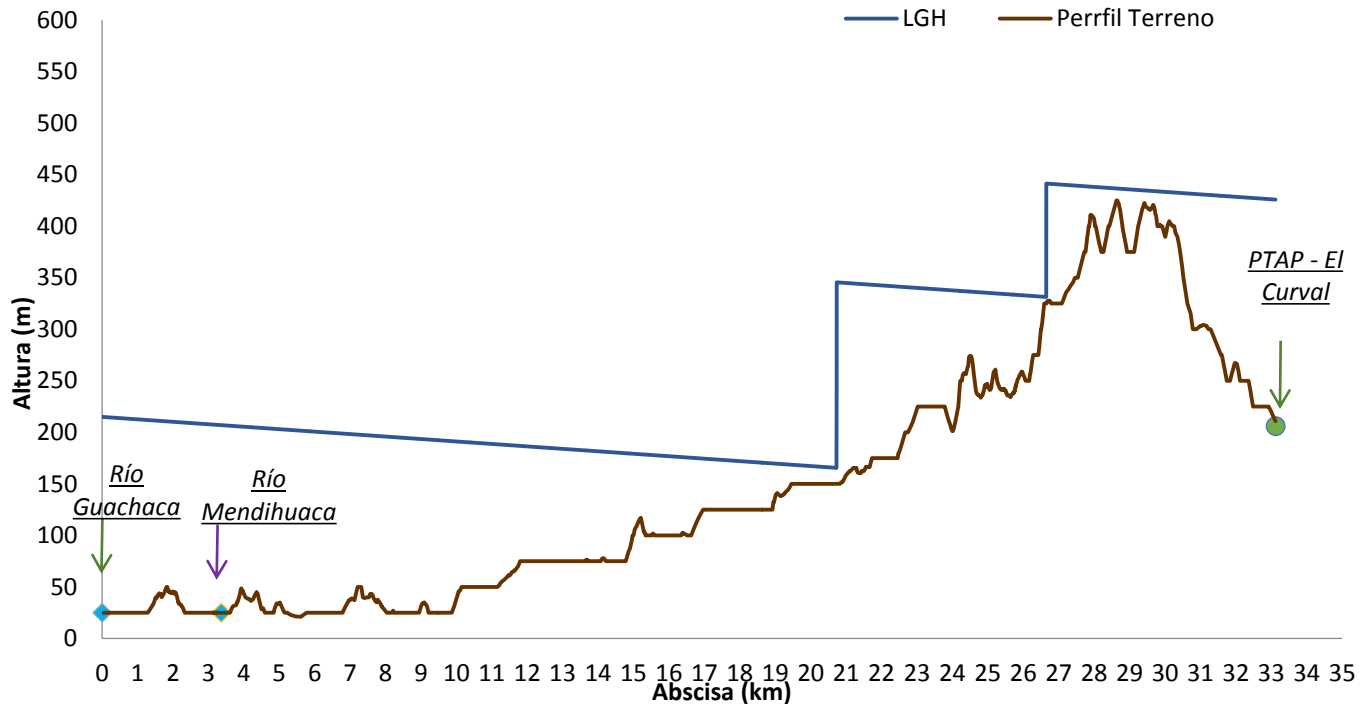


Figura 6-22. Trazado longitudinal Río Guachaca - Alternativa 3

Alternativa 4: Planta desalinizadora y Río Magdalena

Para esta alternativa se tiene el siguiente cronograma:

- **2014:** Se inicia con un déficit de 950 L/s en temporada promedio y de 1690 L/s en temporada seca.
- **2016:** Inicio de operación de la planta desalinizadora con capacidad de 1000 L/s. Con esto se logra un déficit de 750 L/s solamente en temporada seca.
- **2018:** Inicio de operación de la PTAP Toribio con dos trenes de tratamiento, cada uno con una capacidad de 1000 L/s, esto proporciona una capacidad total a la planta de 2000 L/s. Adicionalmente, se realiza la captación del Río Magdalena con una capacidad de 2000 L/s. Para la conducción de agua desde el Río Magdalena hasta la PTAP Toribio se requiere una tubería de 1 m de diámetro con una longitud de 70,23 Km y 2 estaciones de bombeo. Con esto el sistema se encuentra sin déficit.
- **2034:** Ampliación de la PTAP Toribio con el tercer tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 1500 L/s, lo que proporciona a la planta una capacidad total de 3500 L/s. Adicionalmente, se realiza la ampliación de la captación del Río Magdalena a 3500 L/s, esto indica que la nueva captación tendrá una capacidad de 1500 L/s, lo que requiere una tubería de 1 m de diámetro con una longitud de 70,23 Km y 1 estación de bombeo.

- **2051:** Ampliación de la PTAP Toribio con el cuarto tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 2000 L/s, lo que proporciona a la planta una capacidad total de 5500 L/s. Adicionalmente, se realiza la ampliación de la captación del Río Magdalena a 5500 L/s, esto indica que la nueva captación tendrá una capacidad de 2000 L/s, lo que requiere una tubería de 1 m de diámetro con una longitud de 70,23 y 2 estaciones de bombeo.

Durante todo el periodo de análisis los ríos Manzanares y Piedras continuaron enviando agua a la PTAP Mamatoco y el Río Gaira continuó enviando agua a la PTAP El Roble. El Río Magdalena envía agua a la PTAP de Toribio. Adicionalmente, se tomaron 300L/s del Acuífero en temporadas secas.

Con estas intervenciones el sistema se encuentra sin déficit desde el año 2018 hasta el 2064. Para esta alternativa se obtuvieron las siguientes graficas de oferta y demanda de caudal:

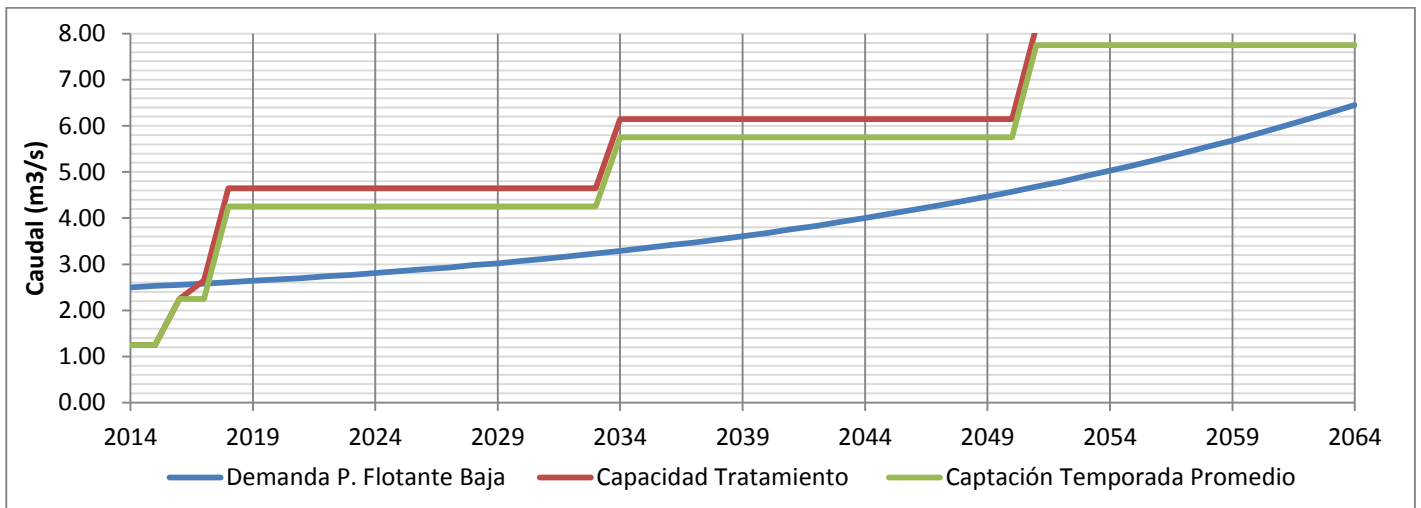


Figura 6-23. Gráfica de oferta - demanda para población baja y temporada promedio - Alternativa 4

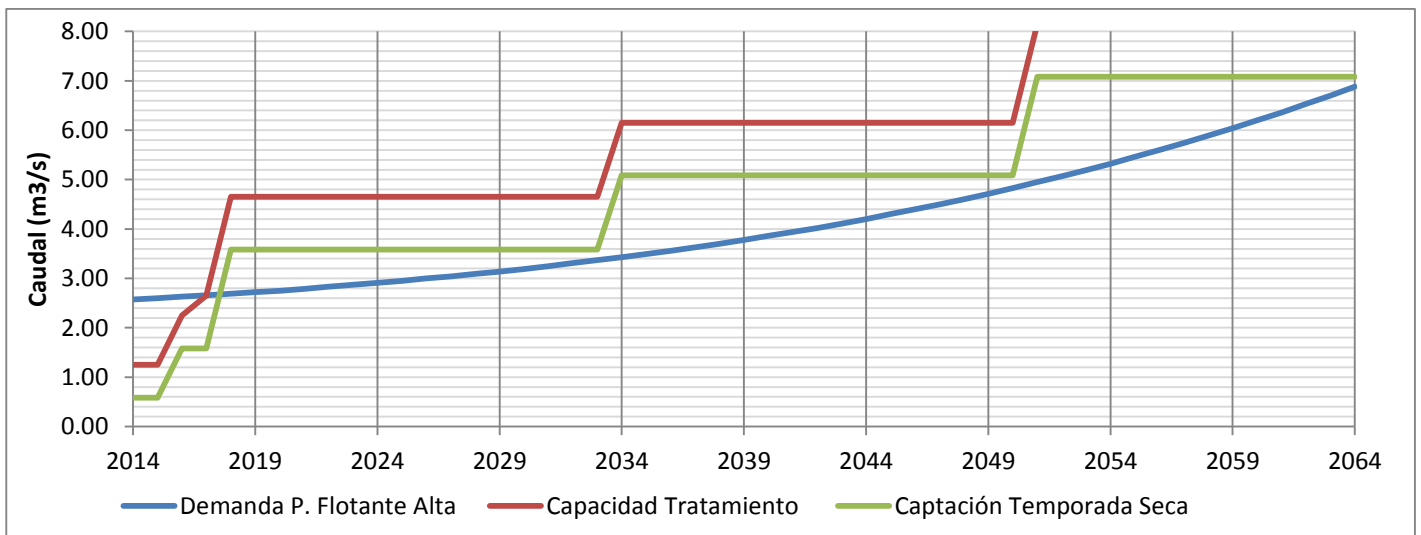


Figura 6-24. Gráfica de oferta - demanda para temporada alta y temporada seca - Alternativa 4

El trazado de esta alternativa es el mismo presentado para la alternativa 2, teniendo en cuenta que la diferencia con respecto a la alternativa 4 es la planta desalinizadora, donde la mejor ubicación sería en el norte de la ciudad. Por otro lado, el trazado longitudinal se muestra a continuación:

Perfil Longitudinal: Alternativa 4 - Río Magdalena

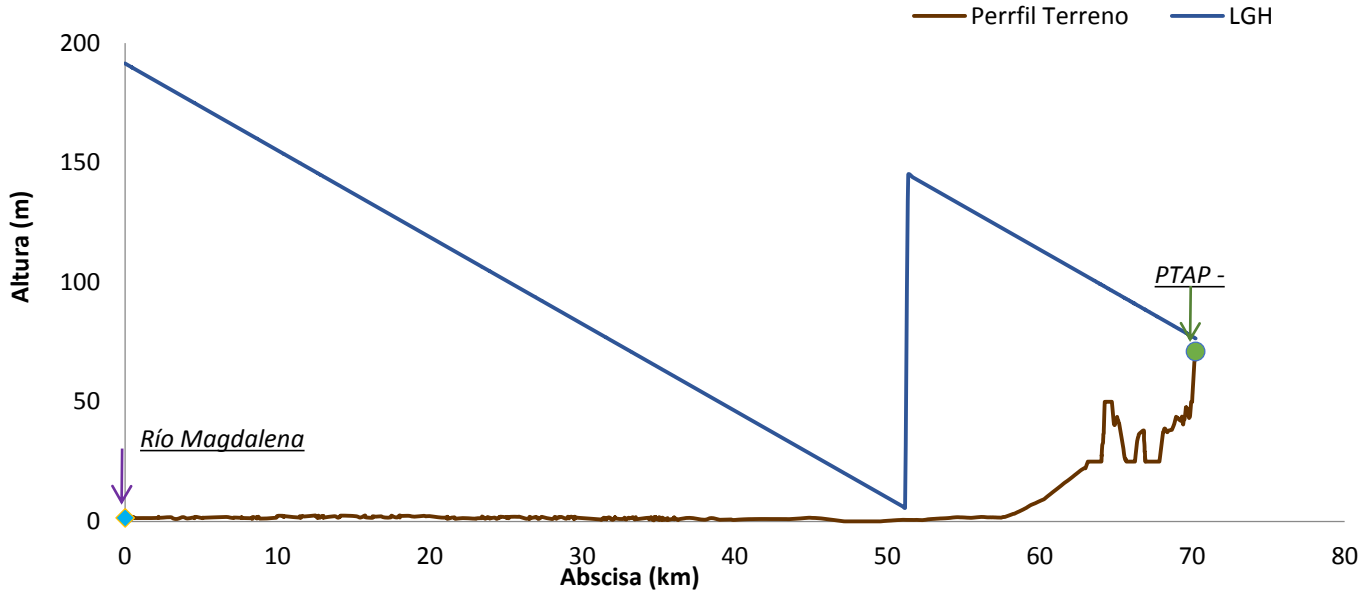


Figura 6-25. Trazado longitudinal Río Magdalena 1 - Alternativa 4

Perfil Longitudinal: Alternativa 4 - Río Magdalena

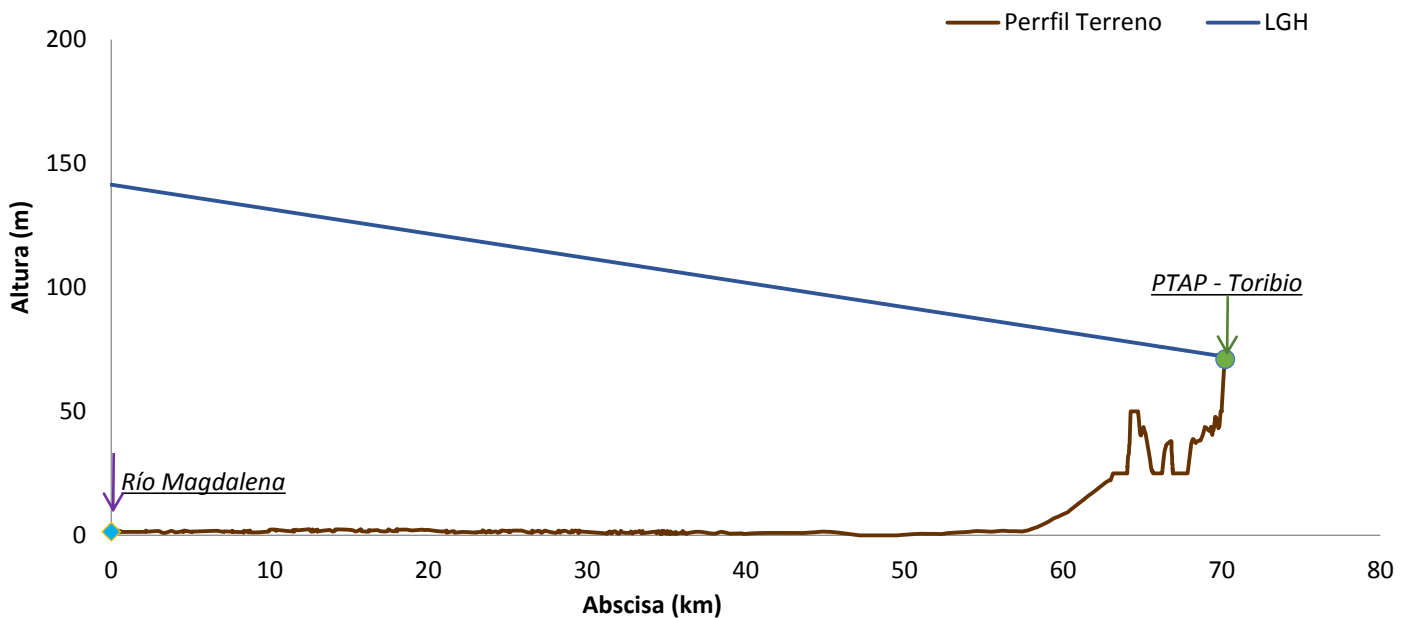


Figura 6-26. Trazado longitudinal Río Magdalena 2 - Alternativa 4

Alternativa 5: Ríos Toribio, Córdoba y planta desalinizadora

Para esta alternativa se tiene el siguiente cronograma:

- **2014:** Se inicia con un déficit de 950 L/s en temporada promedio y de 1690 L/s en temporada seca.
- **2016:** Instalación de planta desalinizadora con capacidad de 1000 L/s. Adicionalmente, se realizan las captaciones de los ríos Toribio y Córdoba, cada una con una capacidad de 400 L/s. Estas conducciones requieren una tubería de 0,7 m de diámetro con una longitud de 3,07 Km y 1 estación de bombeo para el Río Toribio y una tubería de 0,9 m de diámetro con una longitud de 4,26 Km y 1 estación de bombeo para el Río Córdoba. Por otro lado, se inicia la operación del primer tren de tratamiento de la PTAP Toribio con una capacidad de 1000 L/s. Con esto el sistema se encuentra sin déficit para las temporadas promedio y verano.
- **2017:** Ampliaciones de la captación del Río Toribio de 600 L/s y de la captación del Río Córdoba de 600 L/s, por lo tanto la captación total para cada río es de 1000 L/s; para esto se va a utilizar el mismo sistema construido en el 2016. Adicionalmente, se realiza la ampliación de la PTAP Toribio con el segundo tren de tratamiento con capacidad de 1000 L/s, lo que le proporciona a la planta una capacidad total de 2000 L/s.
- **2030:** Ampliación de la capacidad de la planta desalinizadora en 1000 L/s, lo que le proporciona una capacidad total de 2000 L/s.
- **2043:** Ampliación de la capacidad de la planta desalinizadora en 1000 L/s, lo que le proporciona una capacidad total de 3000 L/s.
- **2051:** Ampliación de la capacidad de la planta desalinizadora en 1000 L/s, lo que le proporciona una capacidad total de 4000 L/s.
- **2060:** Ampliación de la capacidad de la planta desalinizadora en 1000 L/s, lo que le proporciona una capacidad total de 5000 L/s.

Durante todo el periodo de análisis los ríos Manzanares y Piedras continuaron enviando agua a la PTAP Mamatoco y el Río Gaira continuó enviando agua a la PTAP El Roble. Los ríos Toribio y Córdoba enviaron agua a la PTAP Toribio. Adicionalmente, se tomaron 300 L/s del Acuífero en temporadas secas.

Con estas intervenciones el sistema se encuentra sin déficit desde el año 2016 hasta el 2064. Para esta alternativa se obtuvieron las siguientes graficas de oferta y demanda de caudal:

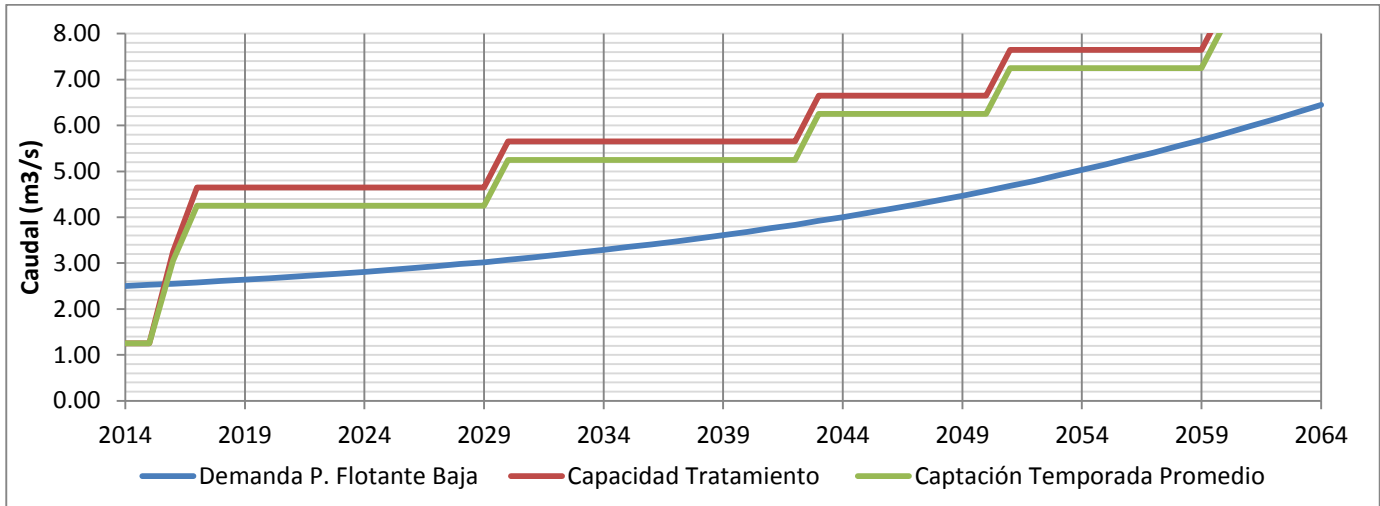


Figura 6-27. Gráfica de oferta- demanda para población baja y temporada promedio- Alternativa 5

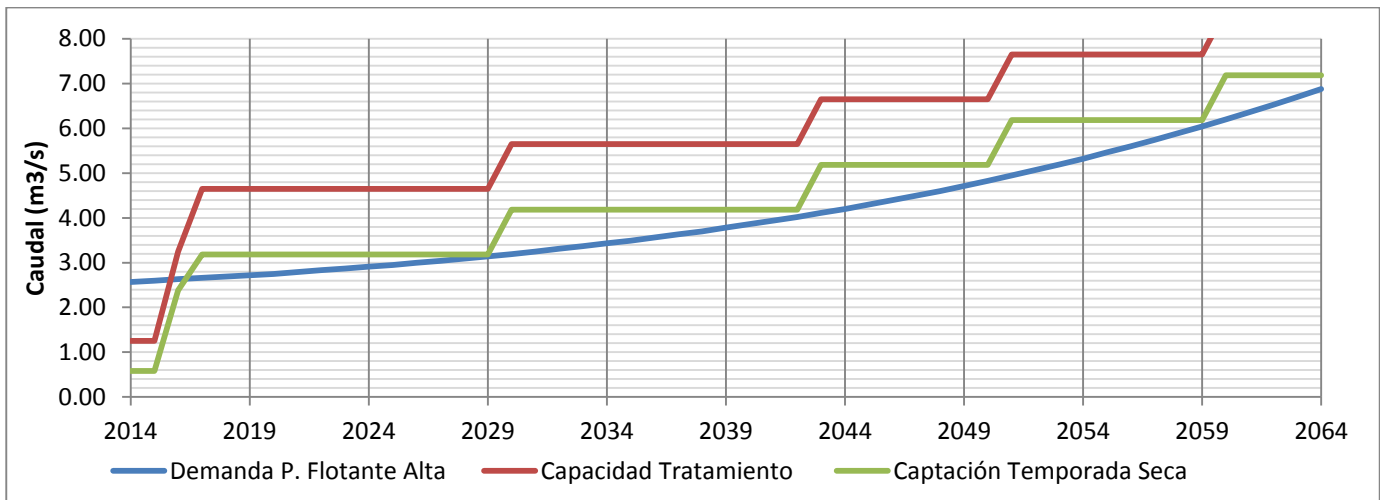


Figura 6-28. Gráfica de oferta - demanda para población alta y temporada seca - Alternativa 5

El trazado de esta alternativa se encuentra a continuación:

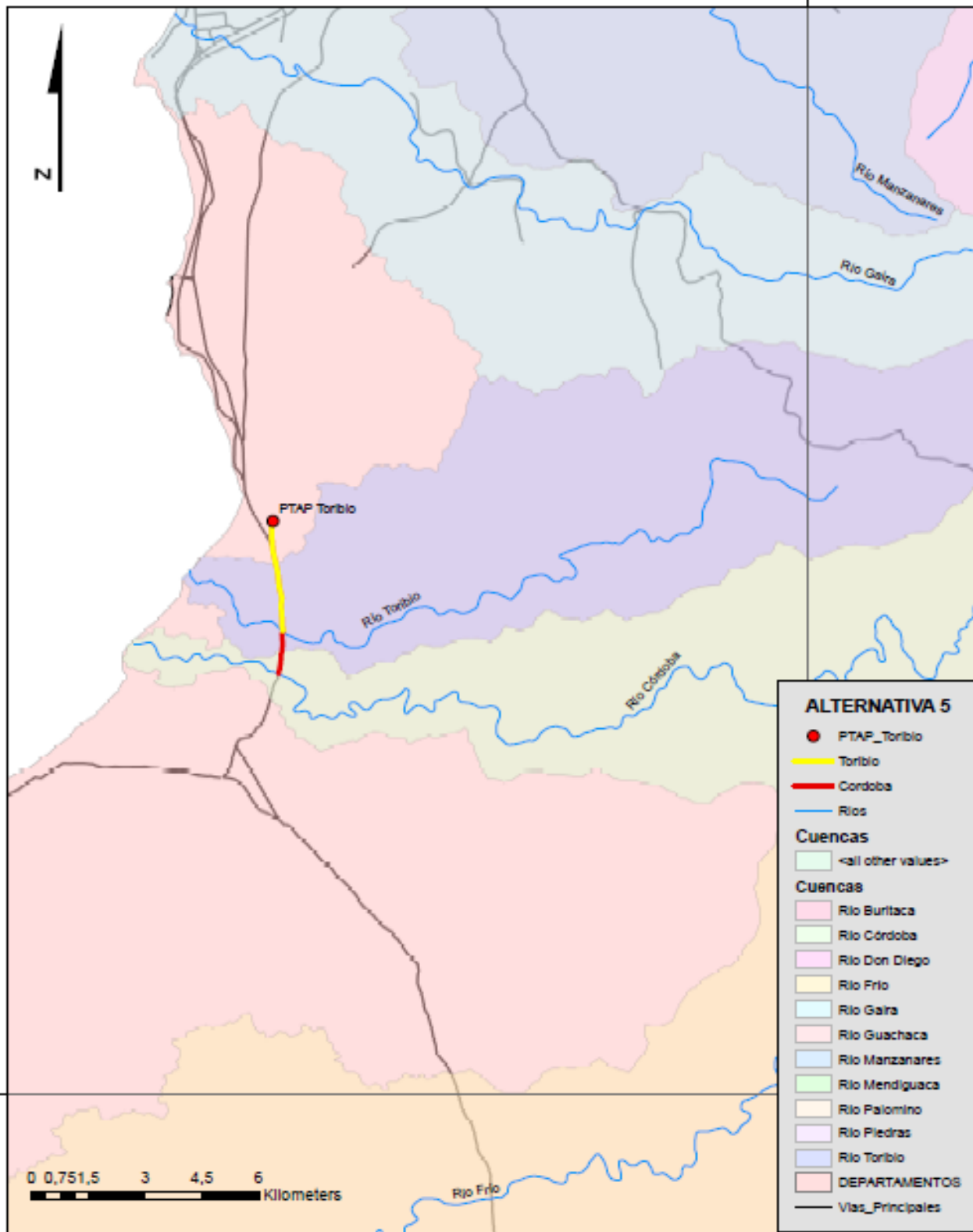


Figura 6-29. Trazado Horizontal Alternativa 5

El trazado longitudinal de cada uno de los ríos utilizados en esta alternativa se muestra a continuación:

Perfil Longitudinal: Alternativa 5 - Río Toribio (Q=1000 L/s)

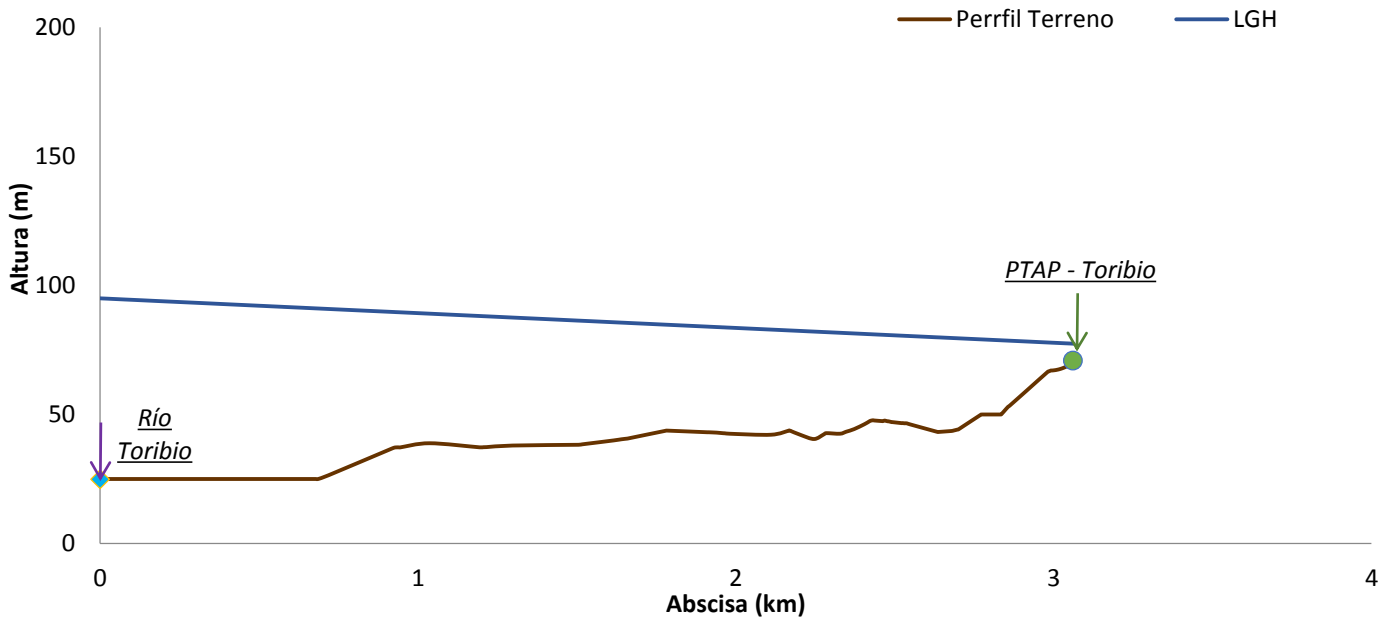


Figura 6-30. Trazado longitudinal Río Toribio - Alternativa 5

Perfil Longitudinal: Alternativa 5 - Río Córdoba (Q=1000 L/s)

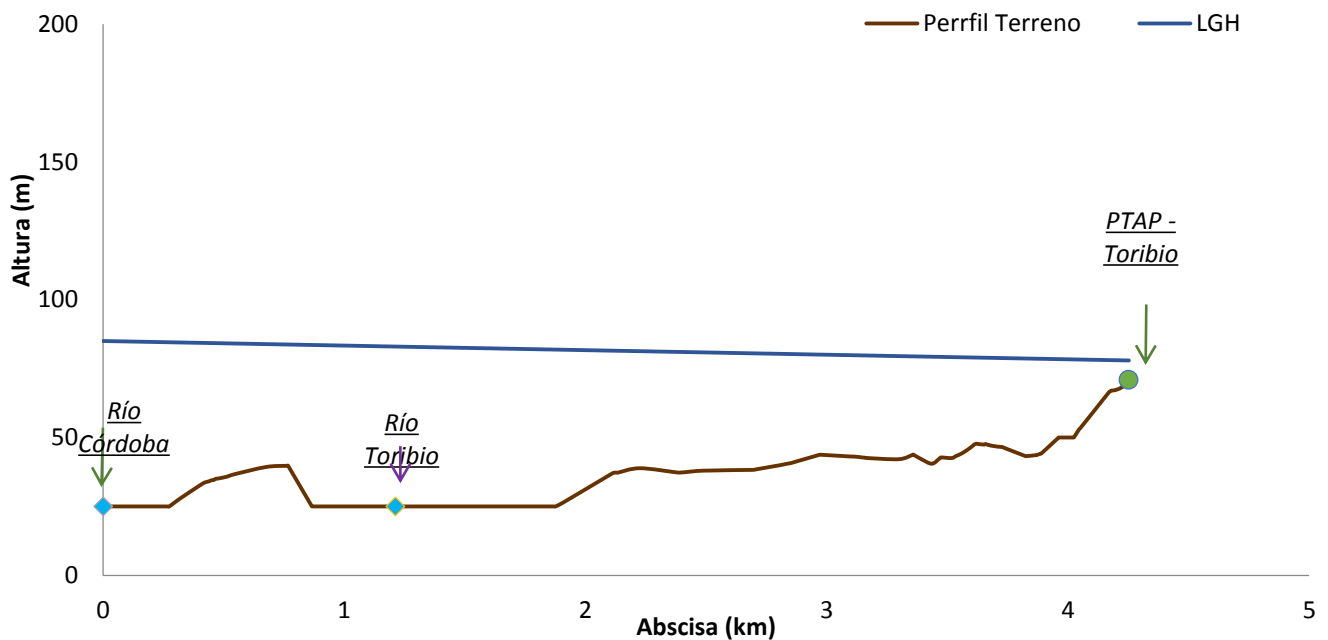


Figura 6-31. Trazado longitudinal Río Córdoba - Alternativa 5

Alternativa 6: Ríos Piedras, Guachaca, Buritaca y Toribio

Para esta alternativa se tiene el siguiente cronograma:

- **2014:** Se inicia con un déficit de 950 L/s en temporada promedio y de 1690 L/s en temporada seca.
- **2017:** Inicio de operación de la PTAP Curval con el primer tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 1500 L/s. Adicionalmente, se realiza la ampliación de la captación actual del Río Piedras con una capacidad de 1000 L/s, por lo tanto la capacidad total de la captación en el Río Piedras sería de 1400 L/s. La nueva captación del Río Piedras requiere una tubería de 0,7 m de diámetro con una longitud de 8,67 Km y 1 estación de bombeo. Con esto se tiene un déficit de 30L/s en temporada promedio y de 1780 L/s en temporada seca.
- **2018:** Ampliación de la PTAP Curval con un segundo tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 1500 L/s, esto proporciona una capacidad total a la planta de 3000 L/s. Adicionalmente, se realiza la captación del Río Guachaca con una capacidad de 1600 L/s, para esto se requiere una tubería de 1 m de diámetro con una longitud de 33,23 Km y 3 estaciones de bombeo. Con esto se logra un déficit solamente en la temporada seca de 210 L/s.
- **2021:** Ampliación de la PTAP Curval con un tercer tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 1000 L/s, esto proporciona a la planta una capacidad total de 4000 L/s. Adicionalmente, se realiza la captación del Río Buritaca con capacidad de 1000 L/s, lo que requiere una tubería de 1 m diámetro con una longitud de 41,75 Km y 4 estaciones de bombeo. Con esto el sistema se encuentra sin déficit.
- **2028:** Ampliación de la PTAP Curval con un cuarto tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 1000 L/s, esto proporciona a la planta una capacidad total de 5000L/s. Adicionalmente, se realiza la ampliación de la captación del Río Buritaca con capacidad de 1000 L/s, para esto se va a utilizar el mismo sistema construido en el 2021. Por lo tanto la capacidad total de captación del Río Buritaca es de 2000 L/s.
- **2042:** Ampliación de la PTAP Curval con un quinto tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 1000 L/s, esto proporciona a la planta una capacidad total de 6000L/s. Adicionalmente, se realiza la ampliación de la captación del Río Buritaca con capacidad de 1000 L/s, lo que requiere una tubería de 0,9 m de diámetro con una longitud de 41,75 Km y 3 estaciones de bombeo. Por lo tanto la capacidad total de captación del Río Buritaca es de 3000 L/s.
- **2052:** Ampliación de la PTAP Curval con un sexto tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 1000 L/s, esto proporciona a la planta una capacidad total de 7000 L/s. Adicionalmente, se realiza la ampliación de la captación del Río Buritaca con capacidad de 1000 L/s, para esto se requiere una tubería de 0,9 m de diámetro con una longitud de 41,75 Km y 3 estaciones de bombeo. Por lo tanto la capacidad total de captación del Río Buritaca es de 4000 L/s.

- **2059:** Inicio de operación de la PTAP Toribio con el primer tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 1000 L/s. Adicionalmente, se realiza la captación del Río Toribio con capacidad para 800 L/s, para esto se requiere una tubería de 0,9 m de diámetro con una longitud de 3,07 Km y 1 estación de bombeo.

Durante todo el periodo de análisis el Río Manzanares continuó enviando agua a la PTAP Mamatoco y el Río Gaira continuó enviando agua a la PTAP El Roble. El Río Piedras, Guachaca y Buritaca envían agua a la PTAP Curval y el Río Toribio a la PTAP Toribio. Adicionalmente, se tomaron 300 L/s del Acuífero en temporadas secas.

Con estas intervenciones el sistema se encuentra sin déficit desde el año 2021 hasta el 2064. Para esta alternativa se obtuvieron las siguientes graficas de oferta y demanda de caudal:

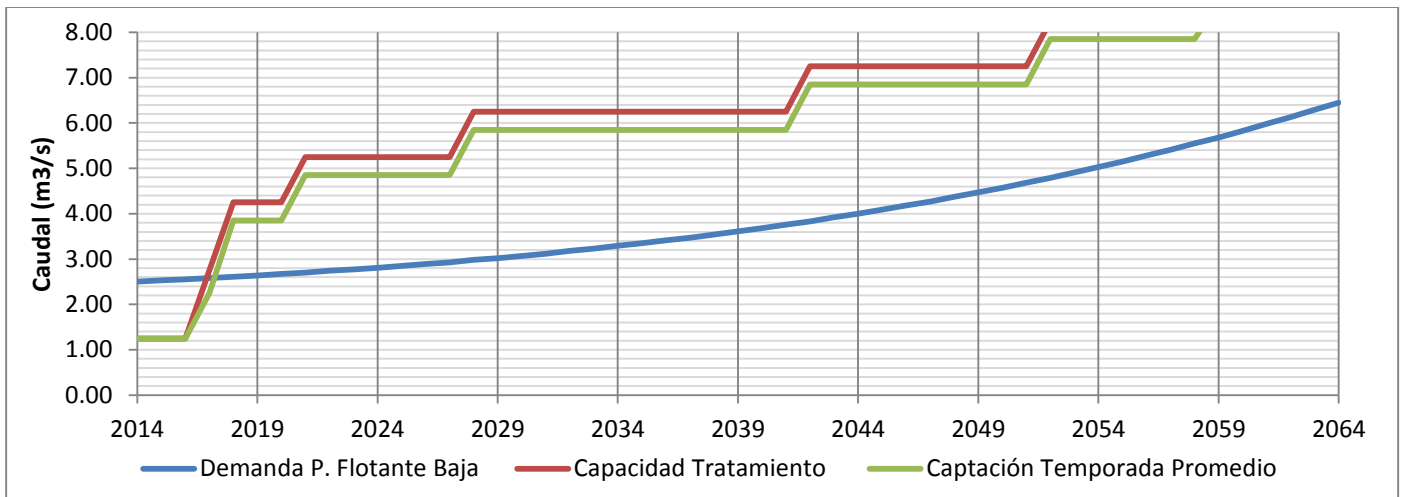


Figura 6-32. Gráfica de oferta - demanda para población baja y temporada promedio - Alternativa 6

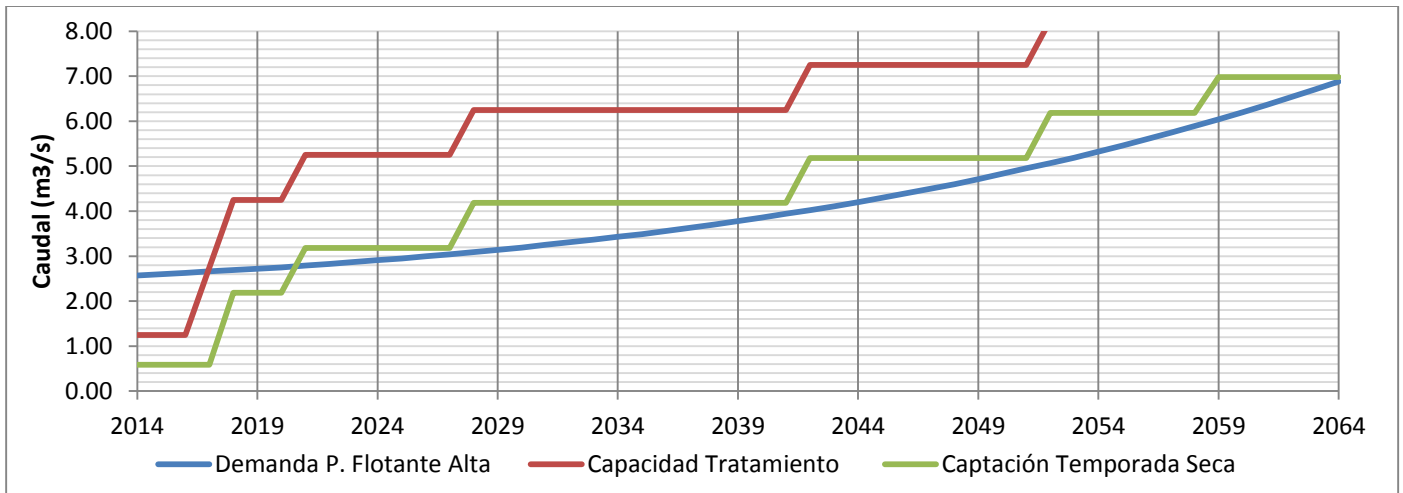


Figura 6-33. Gráfica de oferta- demanda para población alta y temporada seca - Alternativa 6

El trazado de esta alternativa se muestra a continuación:

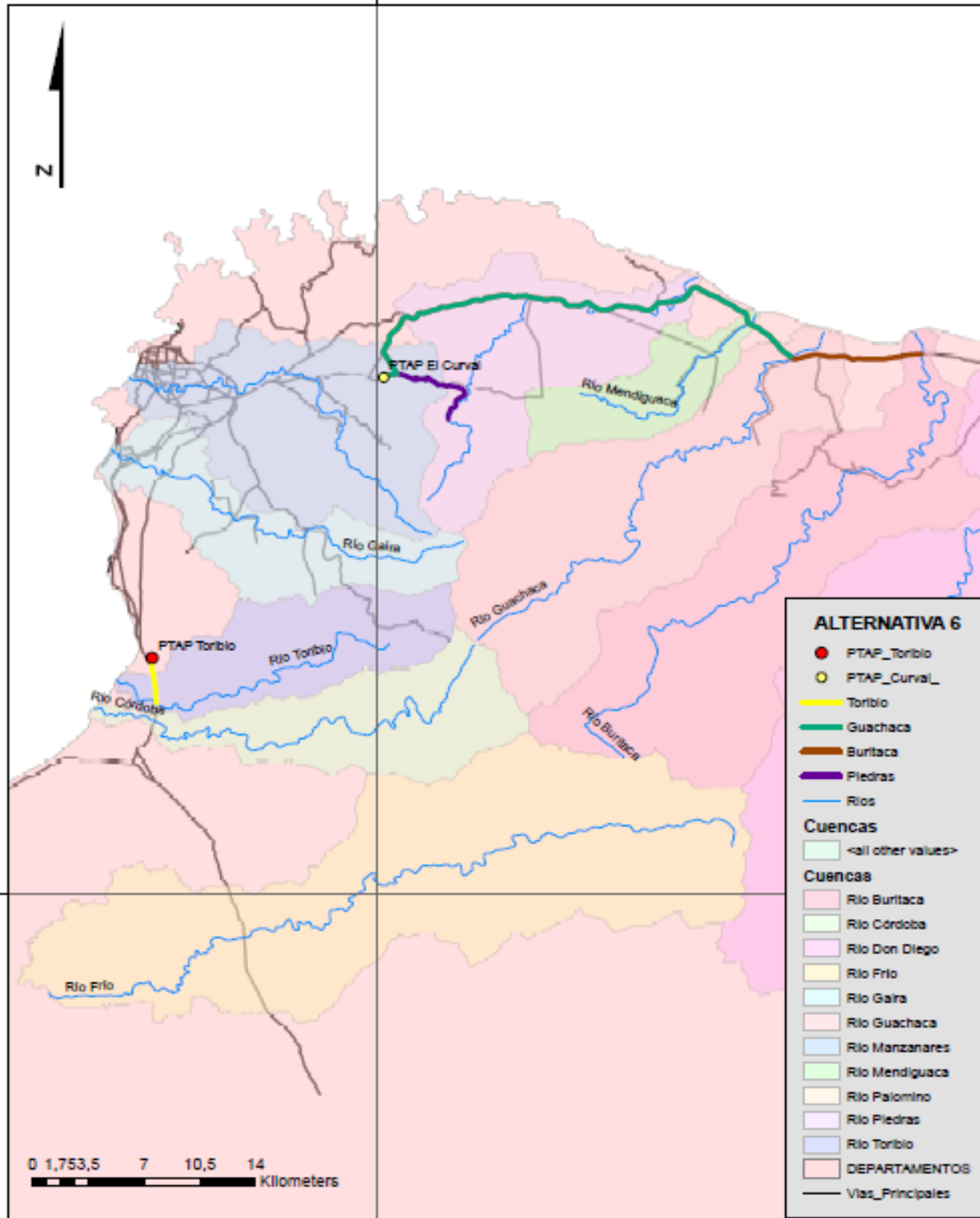


Figura 6-34. Trazado horizontal Alternativa 6

Los trazados longitudinales de cada uno de los ríos utilizados en esta alternativa se muestran a continuación:

Perfil Longitudinal: Alternativa 6 - Río Piedras (Q=1400 L/s)

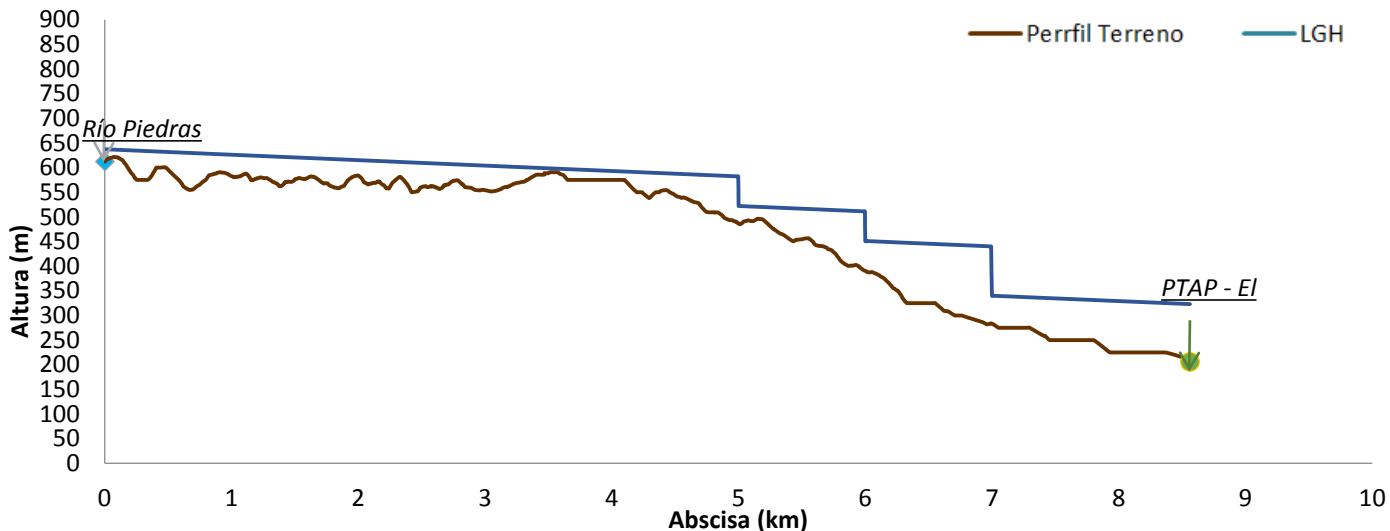


Figura 6-35. Trazado longitudinal Río Piedras - Alternativa 6

Perfil Longitudinal: Alternativa 6 - Río Guachaca (Q=1600 L/s)

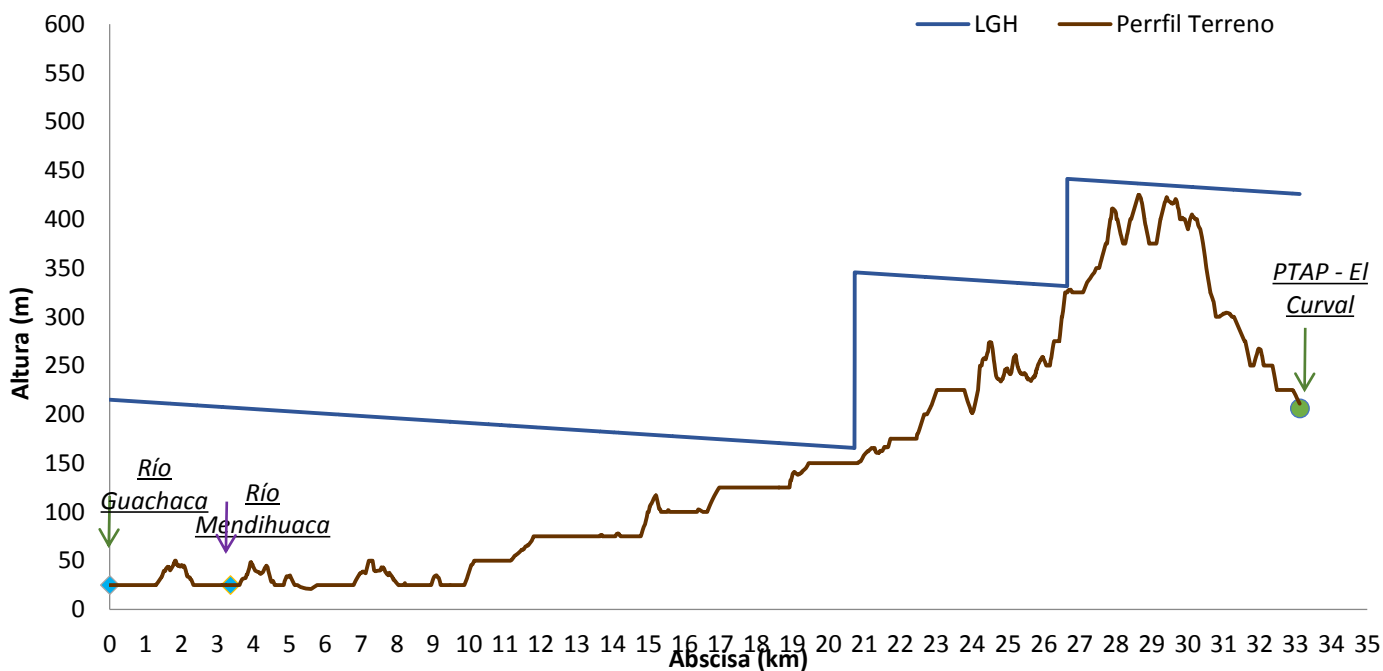


Figura 6-36. Trazado longitudinal Río Guachaca- Alternativa 6

Perfil Longitudinal: Alternativa 6 - Río Buritaca (Q=2000 L/s)

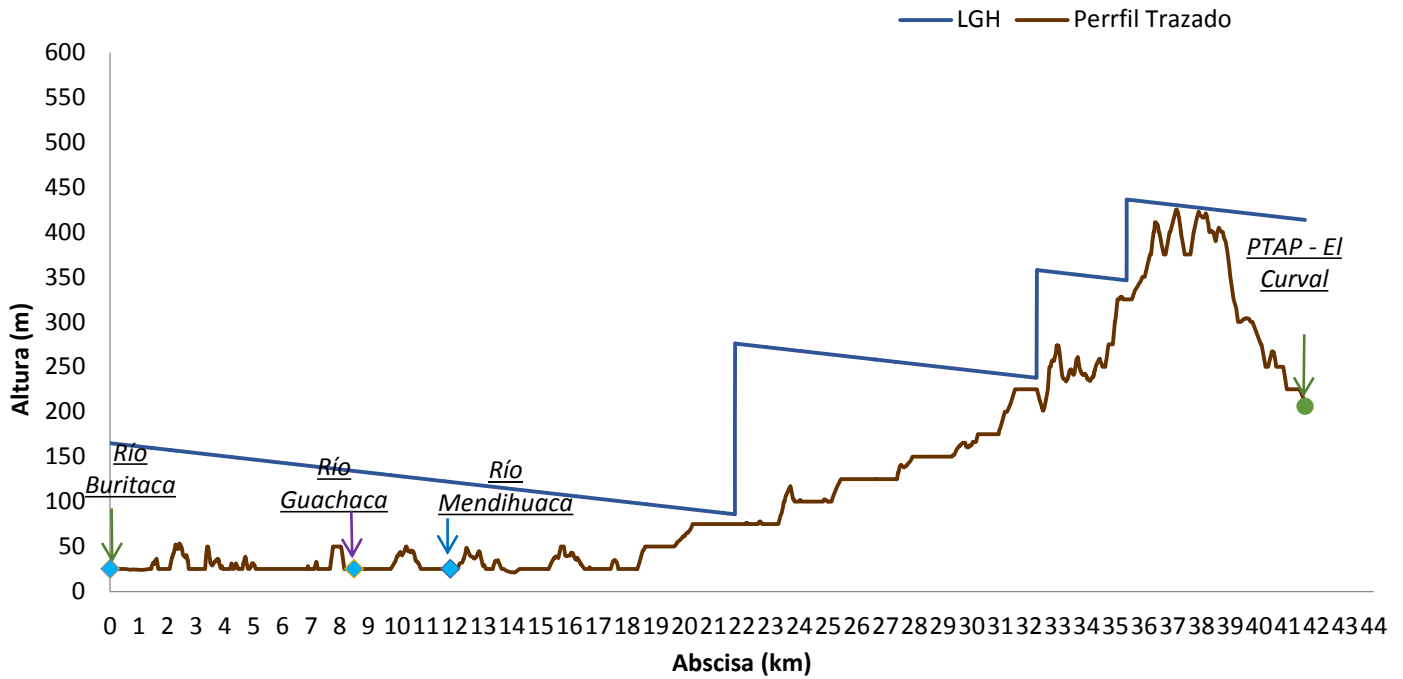


Figura 6-37. Trazado longitudinal Río Buritaca 1 - Alternativa 6

Perfil Longitudinal: Alternativa 6- Río Buritaca (Q=1000 L/s)

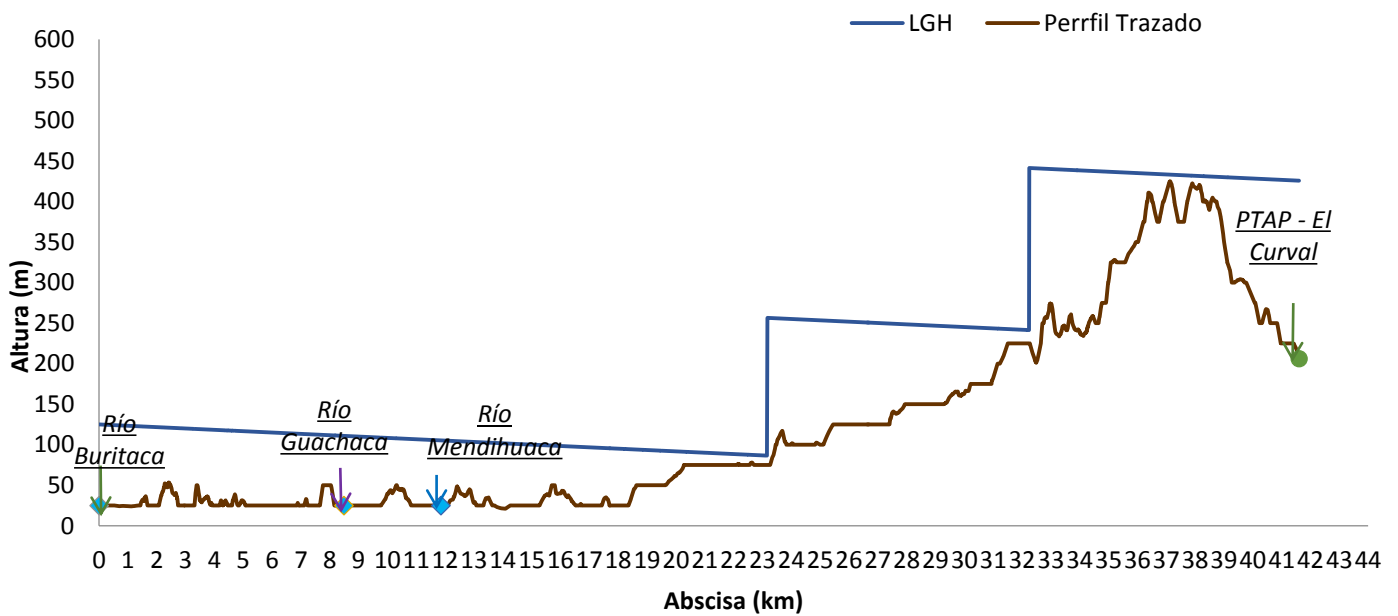


Figura 6-38. Trazado longitudinal Río Buritaca 2 - Alternativa 6

Perfil Longitudinal : Alternativa 6- Río Toribio (Q=800 L/s)

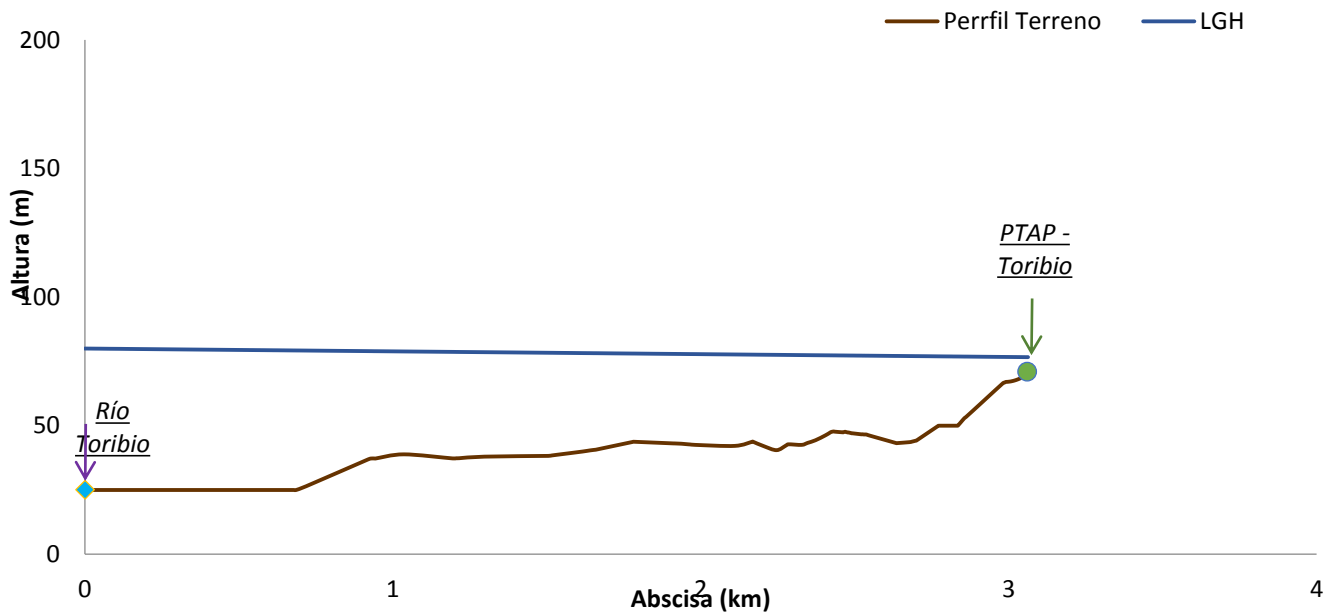


Figura 6-39. Trazado longitudinal Río Toribio - Alternativa 6

Alternativa 7: Ríos Toribio, Córdoba y Magdalena

Para esta alternativa se tiene el siguiente cronograma:

- **2014:** Se inicia con un déficit de 950L/s en temporada promedio y de 1690L/s en temporada seca.
- **2016:** Inicio operación de la PTAP Toribio con el primer tren de tratamiento el cual tiene una capacidad de 1000 L/s. Adicionalmente, se realizan las captaciones del Río Toribio de 400L/s y del Río Córdoba de 400 L/s. Esto requiere una tubería de conducción desde el Río Toribio con un diámetro de 0,7 m con longitud de 3,07 Km y 1 estación de bombeo. Por otro lado, para la conducción desde el Río Córdoba se necesita una tubería con un diámetro de 0,9 m con una longitud de 4,26 Km y 1 estación de bombeo. Con esto se alcanza un déficit de 200 L/s en temporada promedio y 950 L/s en temporada seca.
- **2017:** Ampliación de la PTAP Toribio con el segundo tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 1000 L/s, esto le proporciona una capacidad total a la planta de 2000L/s. Adicionalmente, se realiza la ampliación de las captaciones del Río Toribio a 1000 L/s y del Río Córdoba a 1000 /s. Esto quiere decir que la capacidad de las nuevas captaciones para los dos ríos es de 600 L/s, Para esto se va a utilizar el mismo sistema construido en el 2016. Con esto se alcanza un déficit solamente en temporada seca de 180 L/s.
- **2018:** Ampliación de la PTAP Toribio con el tercer tren de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 1500 L/s, lo que le proporciona una capacidad total a la planta de 3500 L/s. Adicionalmente, se realiza la captación del Río Magdalena con una capacidad de 2000 L/s, lo que requiere una tubería con un diámetro de 1 m con una longitud de 70,24 Km, 2

estaciones de bombeo y un pretratamiento ubicado en Sitio Nuevo. Con esto el sistema se encuentra sin déficit.

- **2036:** Ampliación de la PTAP Toribio con el tercer cuarto de tratamiento, el cual tiene una capacidad de 2500 L/s, lo que le proporciona una capacidad total a la planta de 6000 L/s. Adicionalmente, se realiza la ampliación de la captación del Río Magdalena con una capacidad de 2500 L/s, lo que requiere una tubería con un diámetro de 1,1 m con una longitud de 70,24 Km, 2 estaciones de bombeo y un pretratamiento ubicado en Sitio Nuevo.

Durante todo el periodo de análisis los ríos Manzanares y Piedras continuaron enviando agua a la PTAP Mamatoco y el Río Gaira continuó enviando agua a la PTAP El Roble. Los ríos Toribio, Córdoba y Magdalena enviaron agua a la PTAP Toribio. Adicionalmente, se tomaron 300 L/s del Acuífero en temporadas secas.

Con estas intervenciones el sistema se encuentra sin déficit desde el año 2018 hasta el 2064. Para esta alternativa se obtuvieron las siguientes graficas de oferta y demanda de caudal:

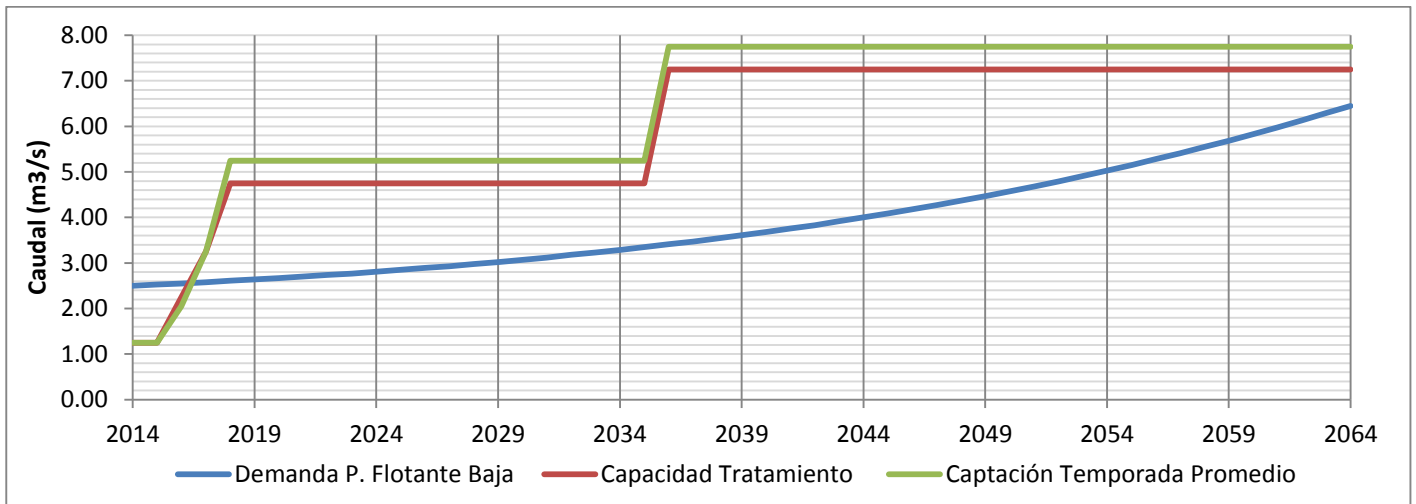


Figura 6-40. Gráfica de oferta - demanda para población baja y temporada promedio - Alternativa 7

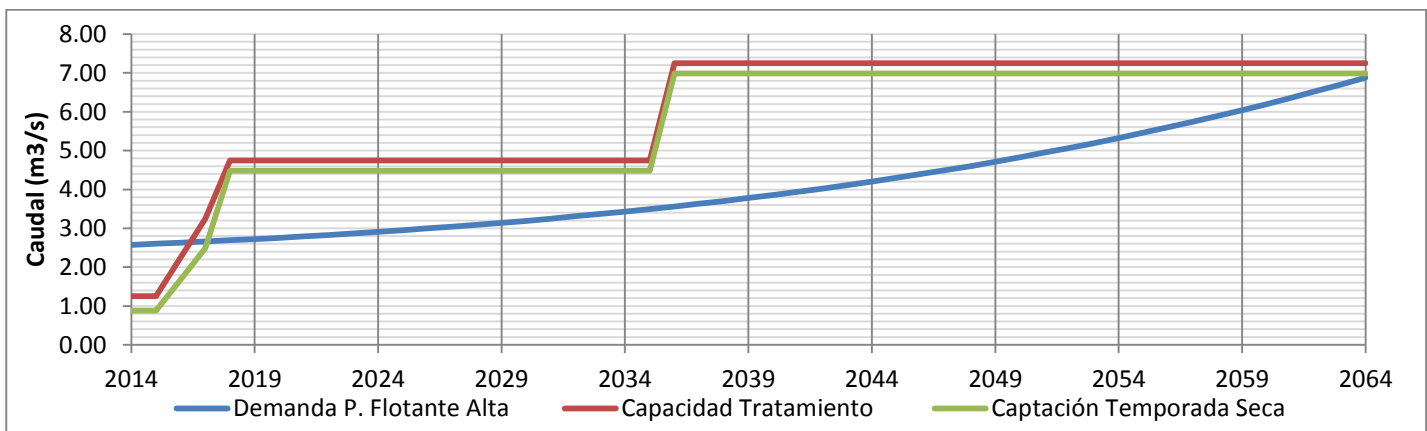


Figura 6-41. Gráfica de oferta - demanda para población alta y temporada seca - Alternativa 7

El trazado de esta alternativa se encuentra a continuación:

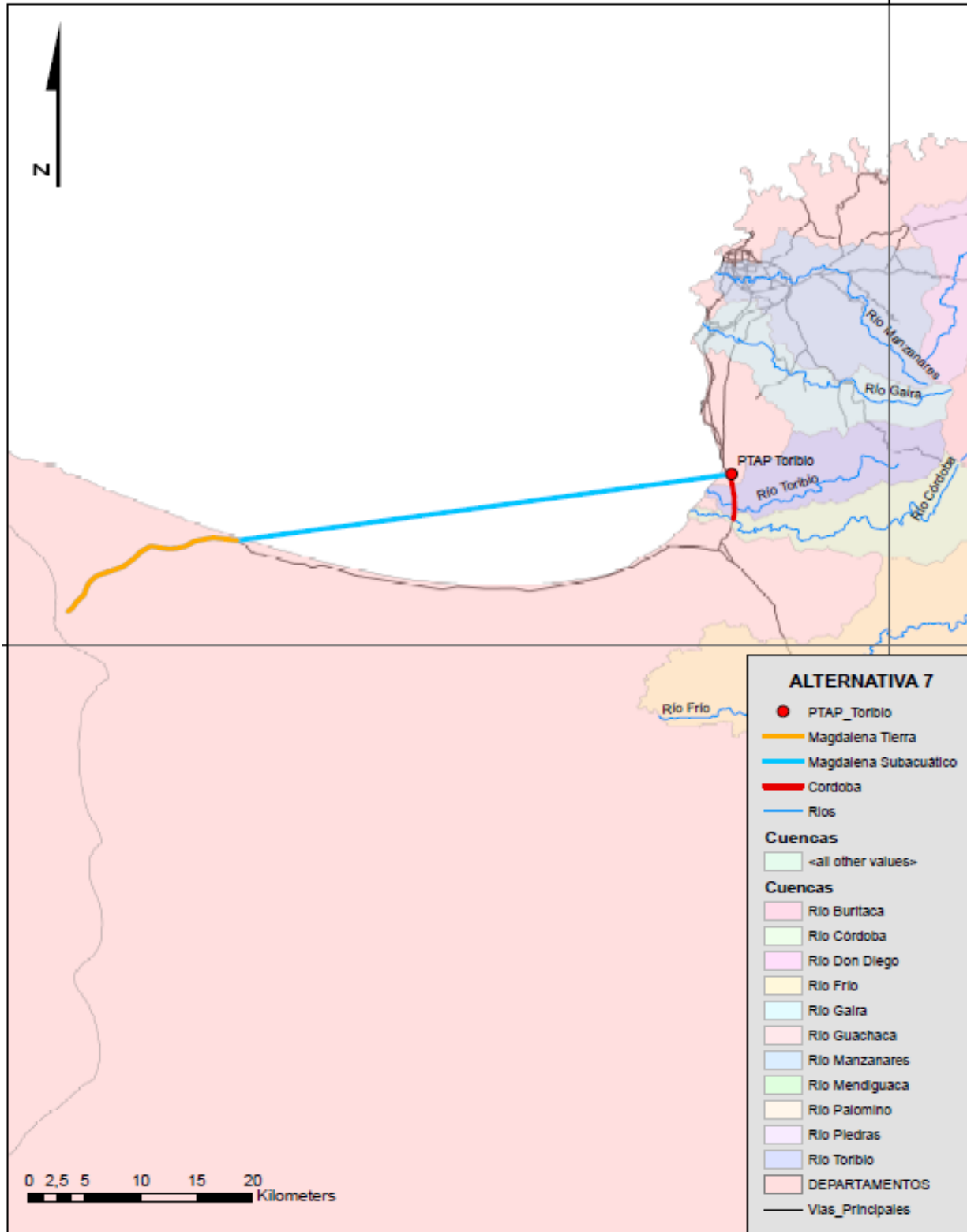


Figura 6-42. Trazado horizontal Alternativa 7

Los trazados longitudinales de los ríos utilizados en esta alternativa se muestran a continuación:

Perfil Longitudinal: Alternativa 7 -Río Toribio (Q=1000 L/s)

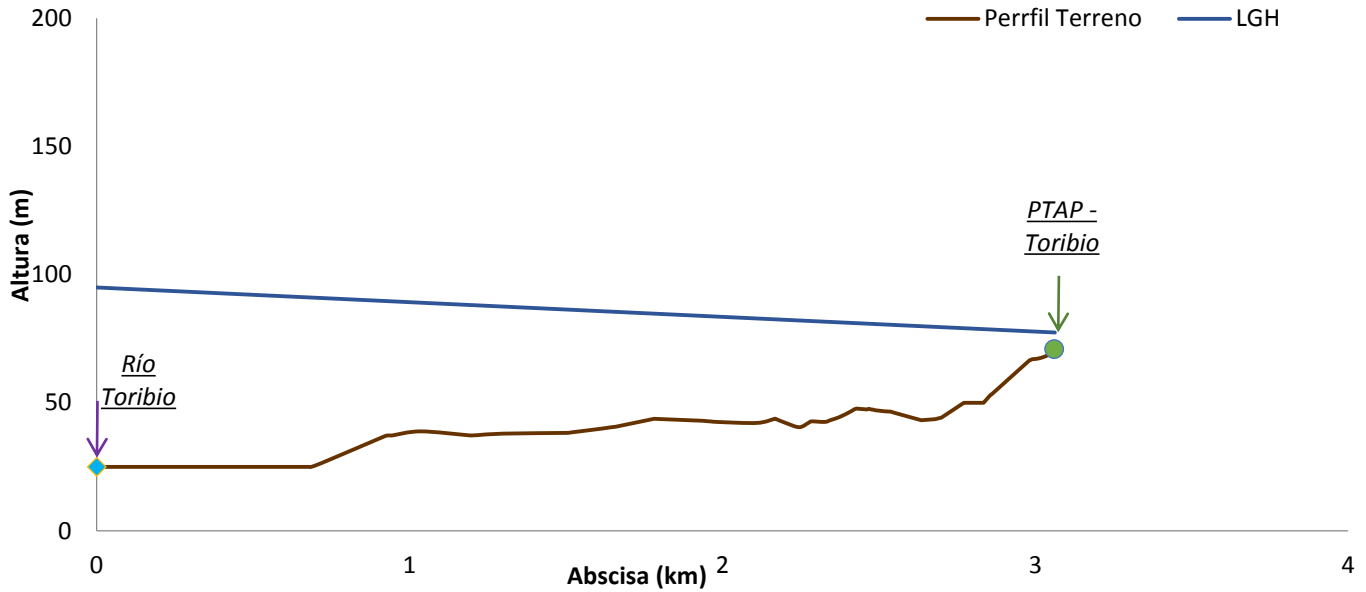


Figura 6-43. Trazado longitudinal Río Toribio - Alternativa 7

Perfil Longitudinal: Alternativa 7 - Río Córdoba (Q=1000 L/s)

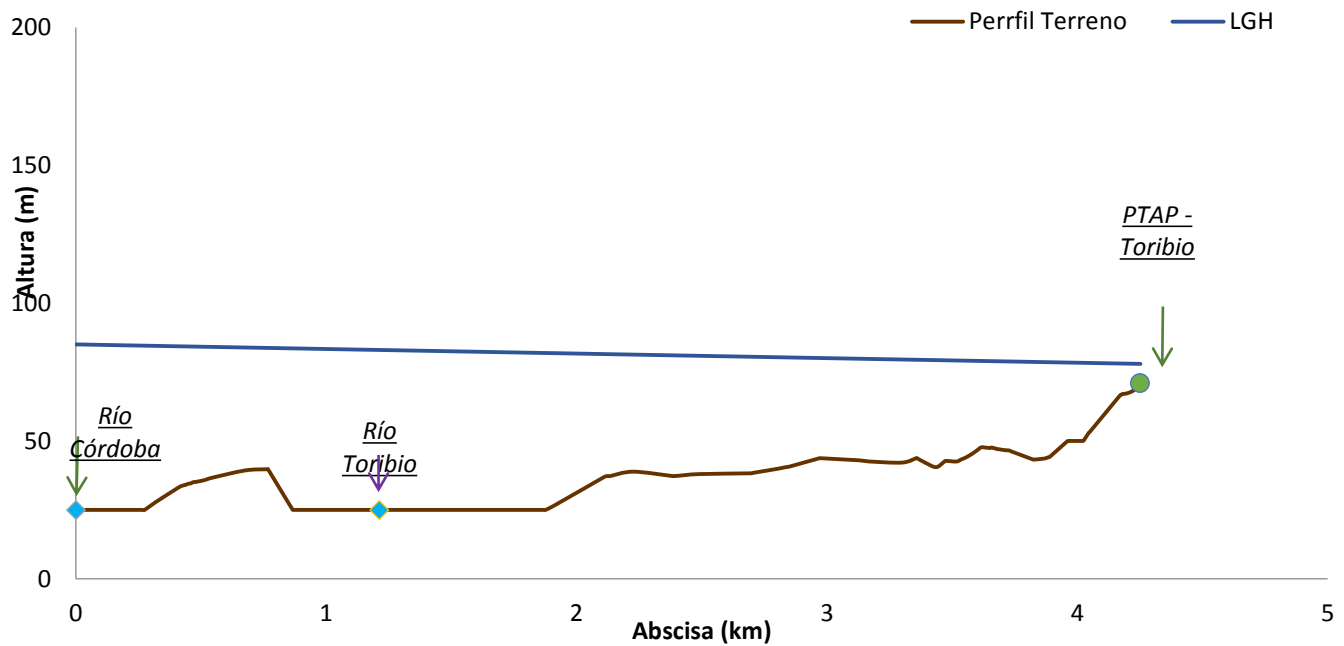


Figura 6-44. Trazado longitudinal Río Córdoba - Alternativa 7

Perfil Longitudinal: Alternativa 7 - Río Magdalena (Q=2000 L/s)

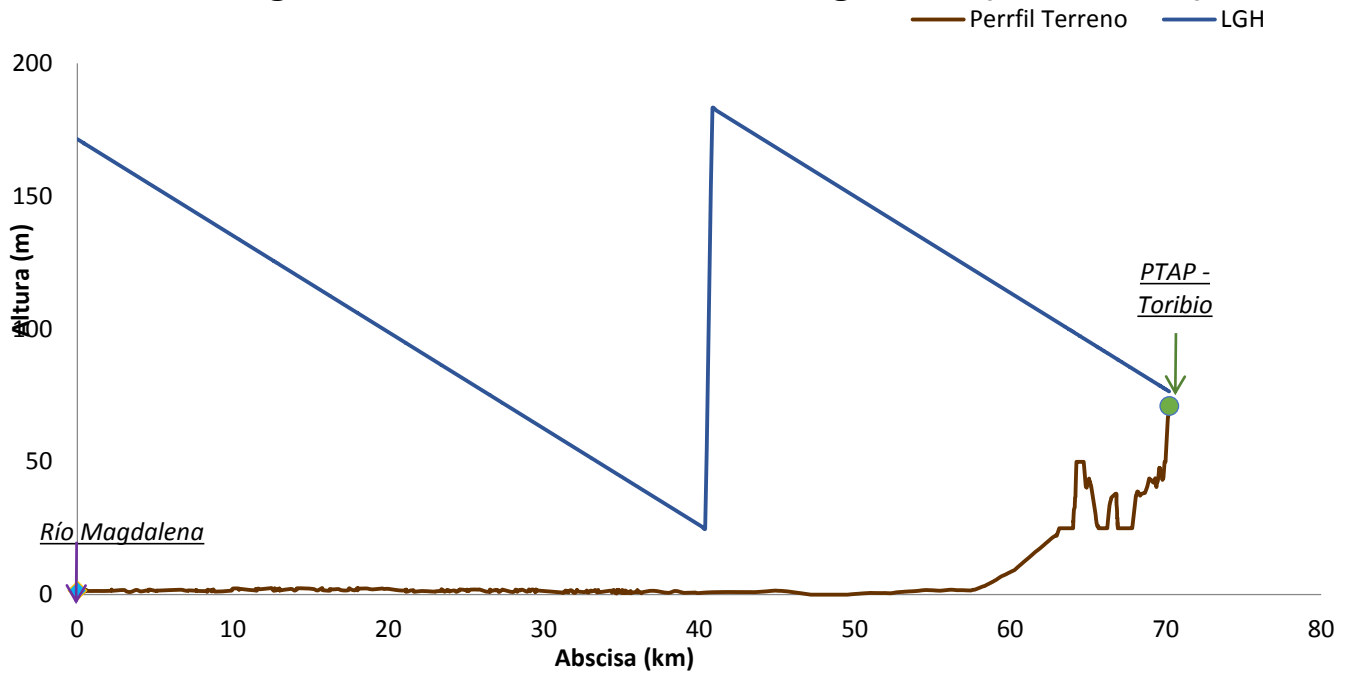


Figura 6-45. Trazado longitudinal Río Magdalena 1 - Alternativa 7

Perfil Longitudinal: Alternativa 7 - Río Magdalena (Q=2500 L/s)

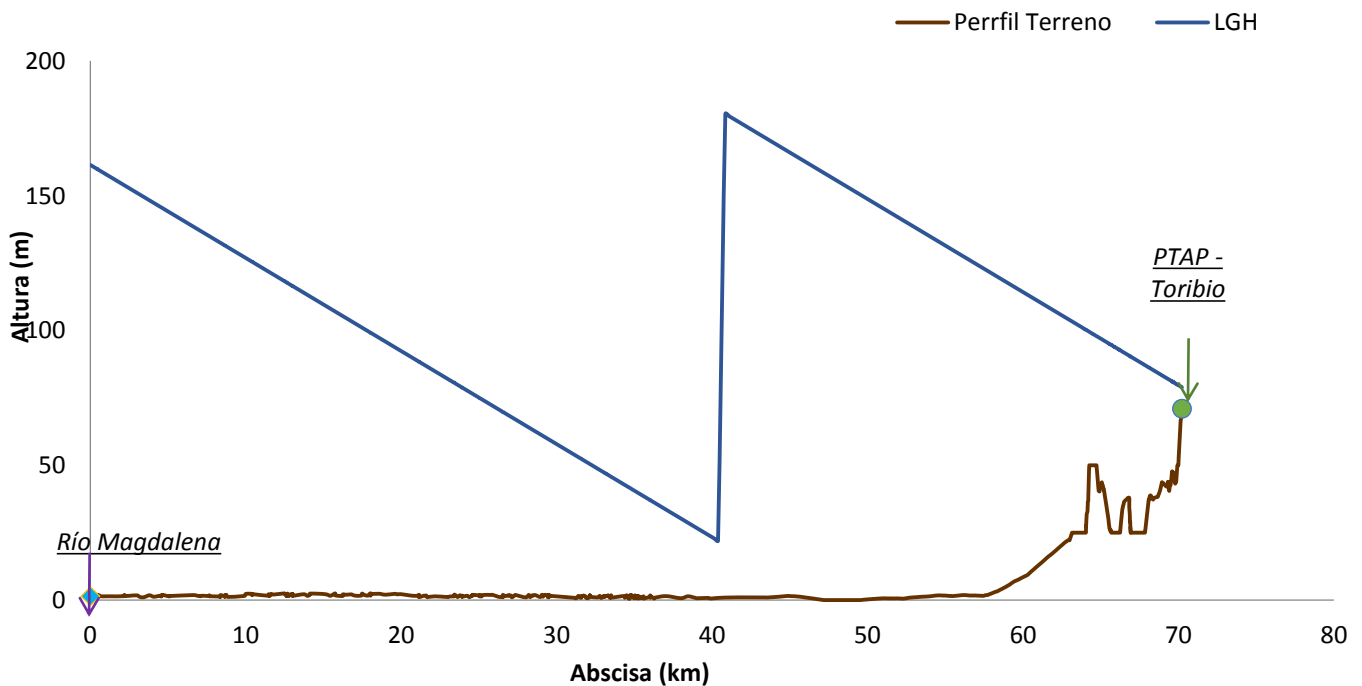


Figura 6-46. Trazado longitudinal Río Magdalena 2 - Alternativa 7

6.3. Resultado de la evaluación

De acuerdo con las alternativas propuestas y los objetivos a evaluar, se obtuvieron los siguientes resultados para cada una de las alternativas

Tabla 6.3. Resultados de los atributos para cada alternativa

Parámetro	Pesos globales	Pesos locales	ATRIBUTOS	Alternativas								
				Guachaca, Buritaca y Don Diego	Río Magdalena solamente	Toribio, Córdoba, Guachaca y Buritaca	Planta Desalinizadora y Río Magdalena	Planta Desalinizadora y Ríos Toribio y Córdoba	Piedras, Guachaca, Buritaca y Toribio	Córdoba, Toribio, Magdalena		
1	10	10	Rapidez (Tiempo de entrada)	3	4	2	2	2	3	2		
2	8	8	Rapidez (Tiempo a punto de equilibrio)	5	6	3	4	2	7	4		
3	12	12	Confiabilidad	1,85	2	1,37	2	2	1,25	2		
4	10	6	Costo Construcción (COP)	PTAP	\$77.592.577.128,69	\$72.039.278.371,14	\$80.658.061.198,66	\$116.278.407.869,51	\$150.746.930.149,62	\$97.108.876.839,80	\$62.569.845.279,75	
		4		Instalación TB	\$24.025.537.043,49	\$20.738.130.732,25	\$15.728.224.610,36	\$28.002.021.089,59	\$794.114.466,92	\$16.112.607.636,46	\$20.501.642.483,75	
				Total	\$101.618.114.172,18	\$92.777.409.103,39	\$96.386.285.809,02	\$144.280.428.959,10	\$151.541.044.616,54	\$113.221.484.476,26	\$83.071.487.763,50	
5	4	4	Factibilidad: Problemática indígena	si	si	si	si	si	si	si		
6	4	4	Factibilidad: Sitios sagrados	si	no	si	no	si	si	no		
7	4	4	Factibilidad: Parques Nacionales	si	si	si	si	si	si	si		
8	8	2	Facilidad Operación	# PTAP'S	3	3	4	10	10	4	3	
		6		# Estaciones de Bombeo	13	6	12	10	10	15	6	
				Total	16	9	16	8	6	19	9	
9	6	6	Expansiones futuras	Fácil	Fácil	Medio	Fácil	Medio	Medio	Fácil		
10	5	1	Minimizar Impacto Ambiental	Longitud Trazados (km)	166	140,4509246	124	211	7	128	148	
		1		% Caudal Removido	Río	Guachaca - Buritaca - Don Diego	Magdalena	Toribio - Córdoba - Guachaca - Buritaca	Magdalena	Toribio - Córdoba	Piedras - Guachaca - Buritaca - Toribio	Córdoba - Toribio - Magdalena
					Temporada Promedio	14%	0,045%	59%	0,055%	50%	64%	50%
					Temporada Seca	80%	0,045%	100%	0,055%	100%	100%	100%
3												
11	6	6	Maximizar beneficio social	no	si	no	no	no	si	si		
12	3	3	Vulnerabilidad a cambio climático	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	Alto	Medio	Bajo		
13	4	2	Vulnerabilidad	Presión Max (m.c.a.)	239	184	240	190	70	240	182	
		2		Líneas de Conducción	4	2	5	3	2	6	6	
14	4	4	Pérdidas de agua en aducción (km de TB en área poblada)	0	11,92	0	17,88	0	0	11,918		
15	6	6	Costo m3/tratado (USD\$)	\$0.401	\$0.1541	\$0.1401	\$0.6000	\$0.6000	\$0.1401	\$0.1541		
16	6	6	Potencia requerida en aducción (COP\$)	\$55.788	\$66.303	\$29.948	\$25.610	\$2.280	\$50.289	\$27.890		

A partir de lo anterior, en las siguientes tablas se resumen los valores de a , b , $x_{mejor\ valor}$, $x_{peor\ valor}$, obtenidos para cada uno de los atributos u objetivos, para el cálculo de las funciones de utilidad individuales.

Tabla 6.4. Resumen de los valores para análisis de alternativas (a)

Us(.)	Rapidez-Ira Etapa	Rapidez-equilibrio	Confiabilidad	Costos de Construcción		Facilidad de operación	
				Costos de Inversión-PTAP	Costos de Inversión-Tuberías	# PTAP	# Estaciones de Bombeo
$x_{mejor\ valor}$	2	2	2	\$62,569,845,279.85	\$794,114,466.92	3	6
$x_{peor\ valor}$	4	7	1.25	\$150,746,930,149.62	\$28,002,021,089.59	10	15
a	2.00	1.40	-1.67	1.71	1.03	1.43	1.67
b	-0.50	-0.20	1.33	0.00	0.00	-0.14	-0.11

Tabla 6.5. Resumen de los valores para análisis de alternativas (b)

Us(.)	Mín impacto ambiental			Vulnerabilidad		Pérdidas en aducción	Costo agua tratada	Potencia requerida
	Longitud Trazados (km)	% Q Removido - Promedio	% Q Removido - Seco	Presión Max	Líneas de Conducción			
$x_{mejor\ valor}$	7	0.045%	0.045%	70	6	0	14	2280
$x_{peor\ valor}$	211	64.00%	100.00%	240	2	18	60	66303
a	1.04	1.00	1.00	1.41	-0.50	1.00	1.30	1.04
b	0.00	-1.56	-1.00	-0.01	0.25	-0.06	-0.02	0.00

De esta forma, con el uso del software Hi-View, especializado en análisis multiatributo, como el planteado en este estudio, se construyó y evaluó el siguiente esquema jerarquizado de objetivos o criterios y sub-criterios.

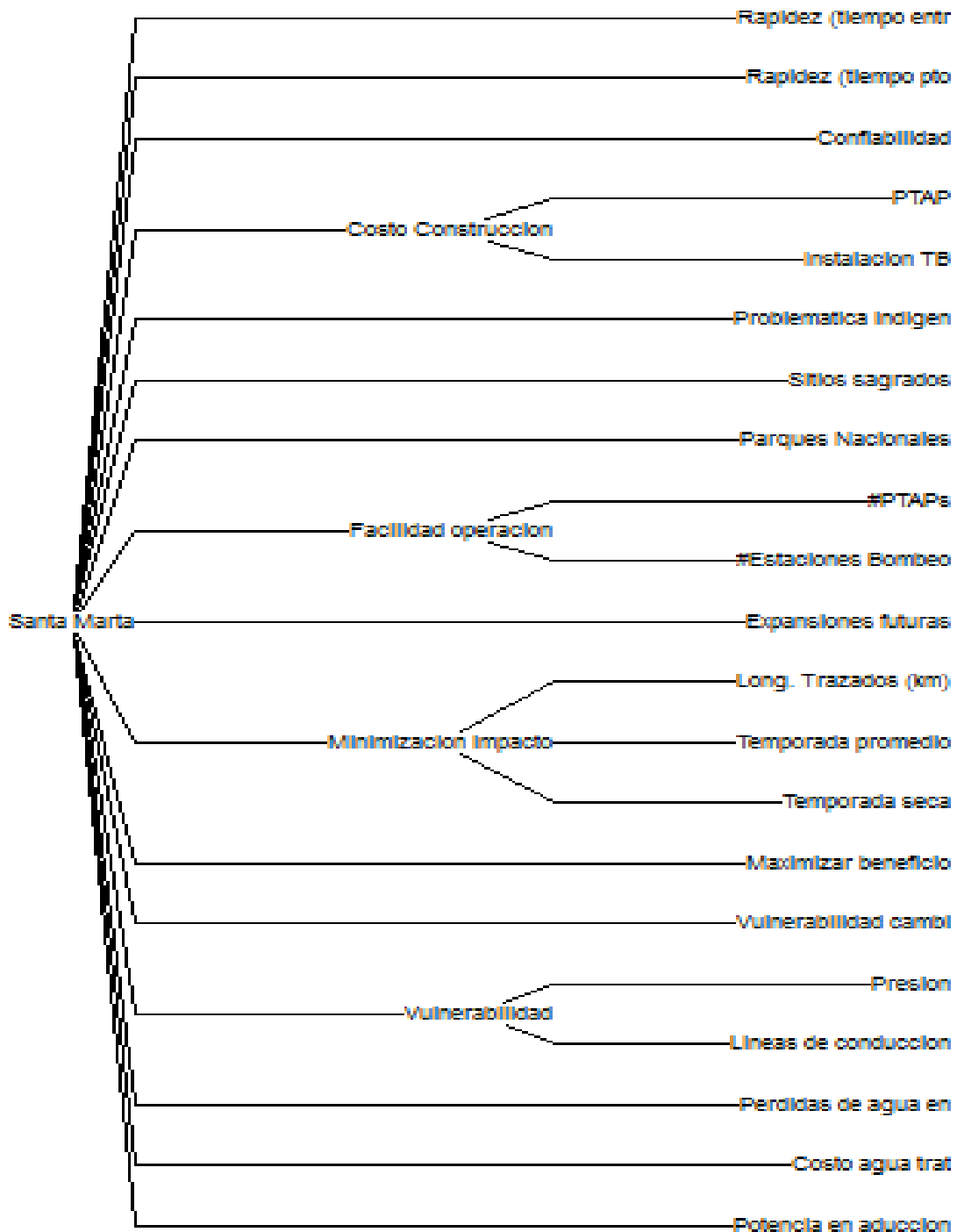
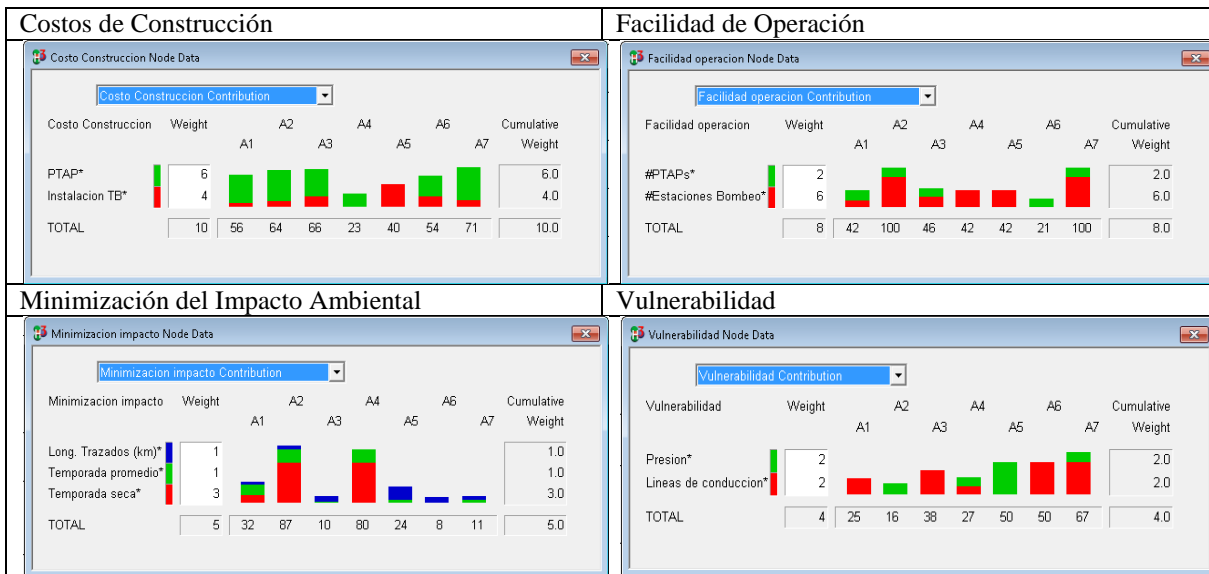


Figura 6-47. Esquema de análisis multiatributo

A partir del cual se adoptó la siguiente notación:

A1	Guachaca, Buritaca y Don Diego
A2	Río Magdalena solamente
A3	Toribio, Córdoba, Guachaca y Buritaca
A4	Planta Desalinizadora y Río Magdalena
A5	Planta Desalinizadora y Ríos Toribio y Córdoba
A6	Piedras, Guachaca, Buritaca y Toribio
A7	Córdoba, Toribio, Magdalena

Teniendo en cuenta que para el desarrollo de la Función de Utilidad Aditiva de las alternativas, cada criterio requiere de un peso global, como ya se explicó, cabe mencionar que dentro de aquellos criterios en los que se tienen sub-criterios es necesario establecerles a estos un peso local respecto al criterio que pertenecen. En ese sentido, a continuación se muestran los pesos locales establecidos a los sub-criterios de los criterios *Costos de construcción*, *Facilidad de operación*, *Minimización del Impacto Ambiental* y *Vulnerabilidad*, a los cuales se les asignó un peso global de 10%, 8%, 5% y 4%, respectivamente.



Finalmente, luego de establecida la jerarquía de criterios y sub-criterios, las alternativas a evaluar, los pesos locales y globales, se obtiene la Función de Utilidad Aditiva para cada una de las alternativas como se muestra en la siguiente gráfica.

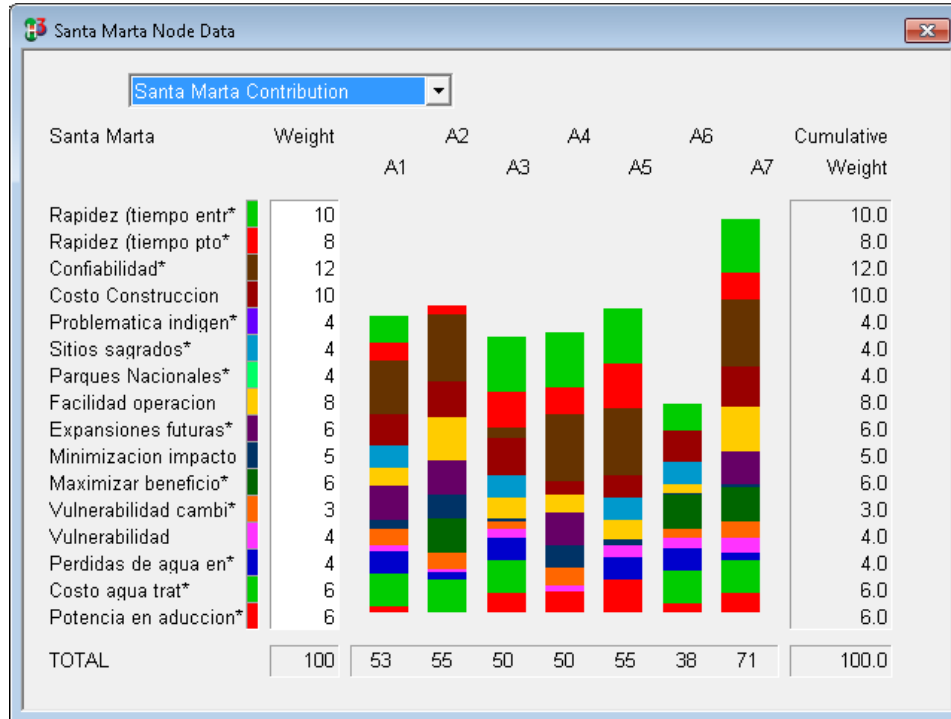


Figura 6-48. Resultados HiView

De acuerdo con la anterior gráfica, se observa que la Alternativa 7 es la mejor de todas las evaluadas, pues es aquella con una utilidad mayor a las otras alternativas, donde los criterios de *Rapidez (tiempo entrada)*, *Confiabilidad* y *Facilidad de operación* son las que más peso le dan a esta opción.

En ese orden de ideas, puede verse como en la mayoría de casos los criterios de *Rapidez (tiempo entrada)* y *Confiabilidad* aportan pesos significativos en la evaluación de las alternativas. Finalmente, puede decirse que de no seleccionarse la Alternativa 7 como la mejor por parte de los decisores, éstos podrían escoger de acuerdo a la siguiente escala:

Orden de selección	Alternativa (s)
1 (Mejor opción)	A7
2	A2 y A5
3	A1
4	A3 y A4
5 (Peor opción)	A6

Teniendo en cuenta que la utilidad de cada una de las alternativas depende fuertemente del peso global asignado a cada uno de los criterios, el software utilizado para este estudio permite desarrollar distintos tipos de análisis de sensibilidad para observar la variabilidad posible de los resultados.

Así, a continuación se muestran algunos de estos análisis:

En primer lugar, Hi-View permite evaluar la sensibilidad del resultado del modelo a cada uno de los atributos evaluados. La Figura 6-49 muestra con barras de colores qué tan sensible es cada atributo, asignándole un color rojo a los atributos más sensibles. Estos necesitarían un aumento de 5 puntos sobre el peso del atributo para cambiar la alternativa preferida inicialmente (Alternativa 7: Ríos Córdoba, Toribio y Magdalena). Así mismo el color amarillo indica que se requeriría un cambio de entre 5 y 15 puntos sobre el peso del atributo para generar el cambio de la alternativa preferida a la listada a la derecha de la barra. Finalmente, la barra verde indica que se necesitaría un cambio de más de 15 puntos sobre el peso del atributo para que la mejor alternativa pase a ser la que se indica en la figura. En este sentido los atributos se clasifican como muy sensibles, sensibles y poco sensibles con los colores rojo, amarillo y verde, respectivamente.

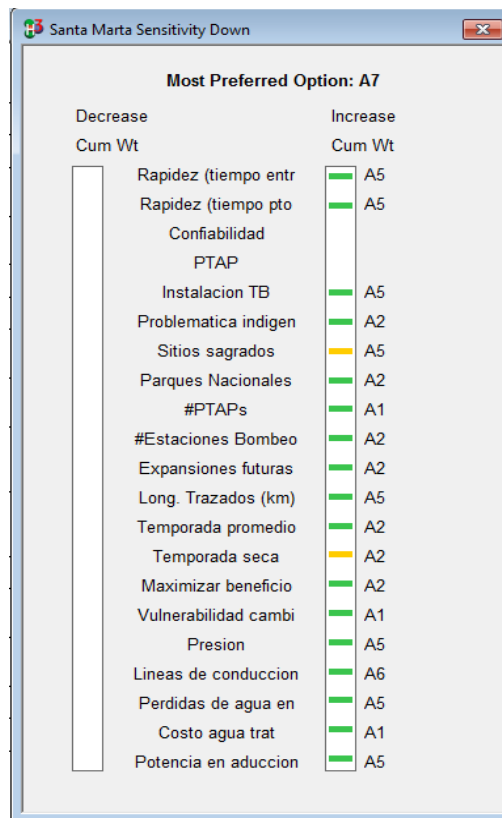


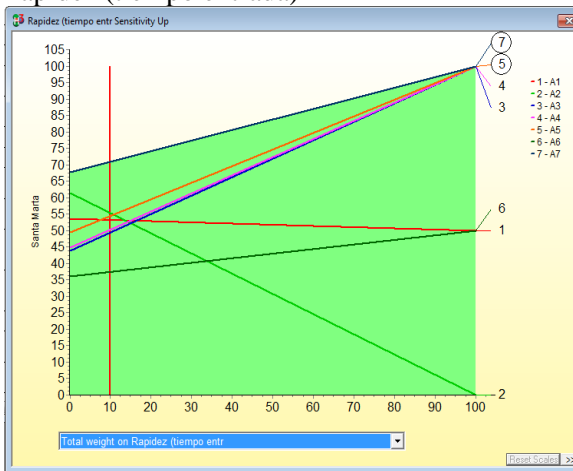
Figura 6-49. Análisis de sensibilidad

Según lo anterior, como se puede observar ningún atributo es muy sensible, por lo cual se le debería aumentar su peso en más de 5 puntos para que la Alternativa 7 deje de ser la mejor. Los atributos para los cuales se presentaría un cambio con un aumento en su peso de 5 puntos son: la factibilidad del proyecto teniendo en cuenta si este pasa por sitios sagrados de algunas comunidades indígenas o el impacto ambiental en temporada seca. En estos casos, las mejores alternativas pasarían a ser la A5: Planta Desalinizadora y Ríos Toribio y Córdoba y la A2: Río Magdalena solamente, respectivamente.

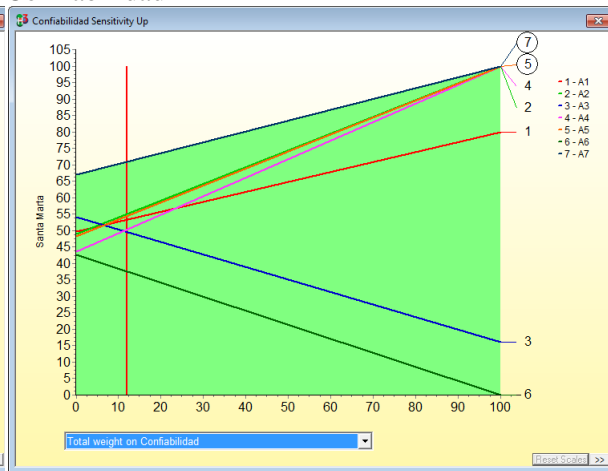
Como segunda medida, Hi-View permite ver como de acuerdo a la variación que se le haga al peso de un criterio puede empezar a tenerse como mejor opción otra alternativa distinta a la mejor obtenida. Así, en una gráfica de pesos vs. Utilidad, el software indica con una línea vertical roja el peso actual del criterio analizado, sombrea un área verde bajo la línea de la alternativa con mejor utilidad hasta el punto en donde ésta deja de serlo, es decir, A7 en este caso particular. De igual forma, muestra la variación de la utilidad de cada una de las alternativas de acuerdo a la variación del peso del criterio.

En ese orden de ideas, y de acuerdo a la explicación anteriormente dada, a continuación se muestran aquellos criterios que demuestran que sin importar la variación que se les haga, siempre A7 será la mejor de las alternativas a seleccionar.

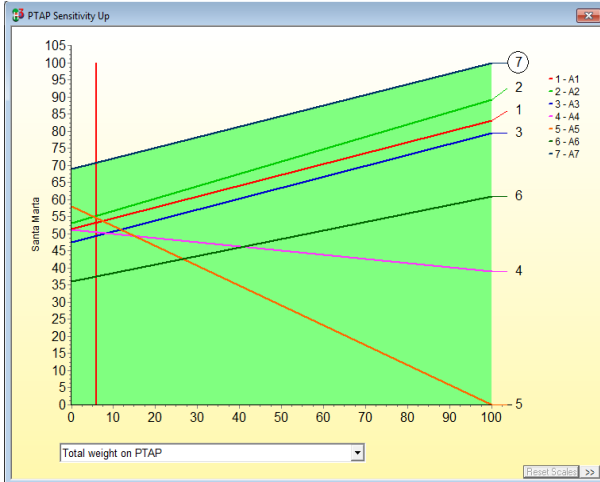
Rapidez (tiempo entrada)



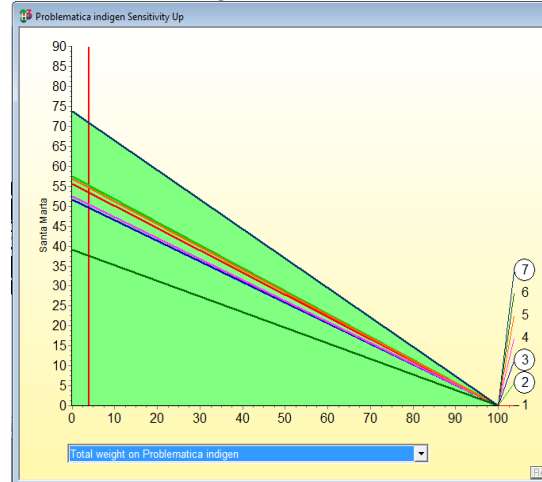
Confiabilidad



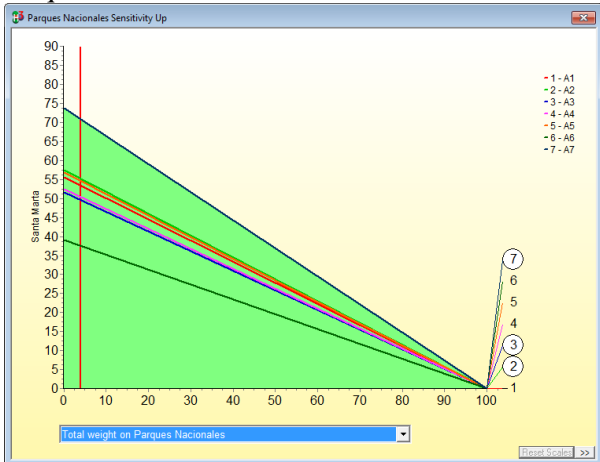
Costos de construcción: PTAP



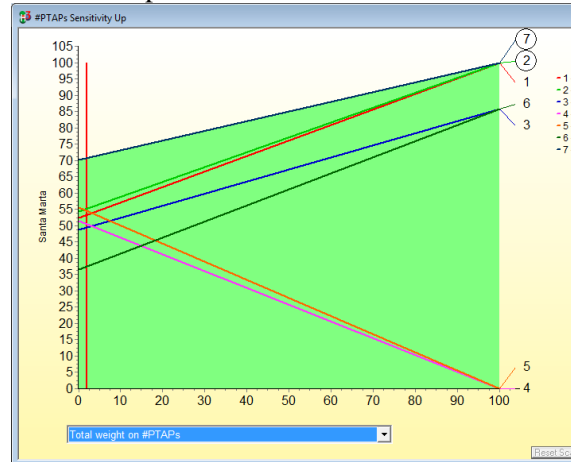
Problemática indígena



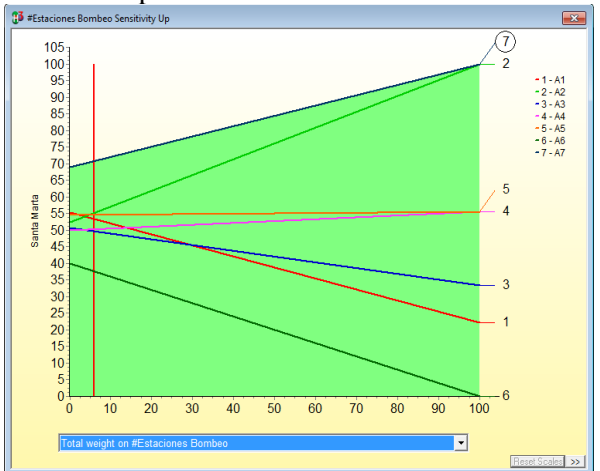
Parques Nacionales



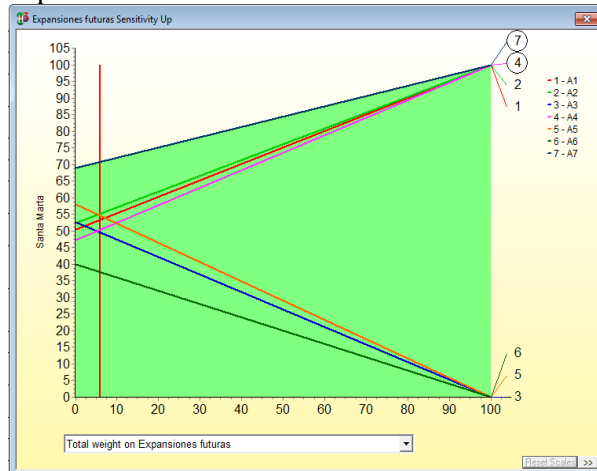
Facilidad Operación: #PTAPs



Facilidad Operación: #Estaciones Bombeo



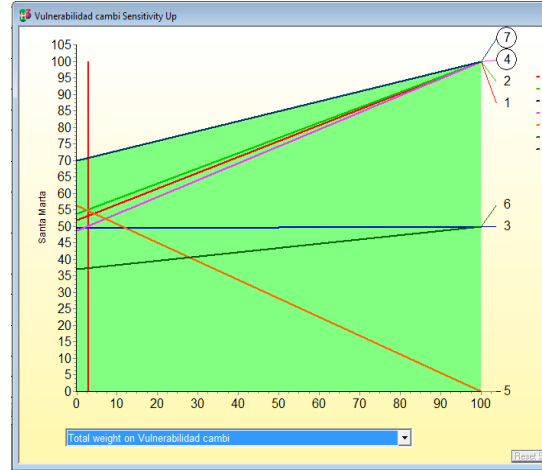
Expansiones futuras



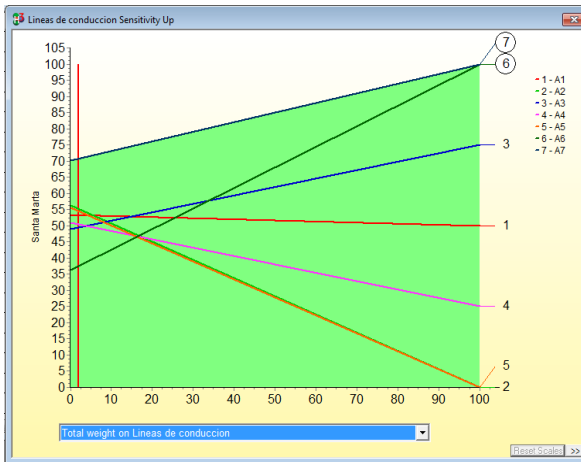
Maximizar beneficio social



Vulnerabilidad a Cambio Climático



Líneas de Conducción



Costo agua tratada

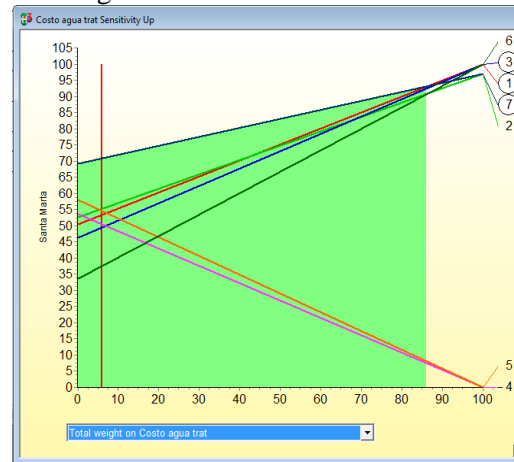


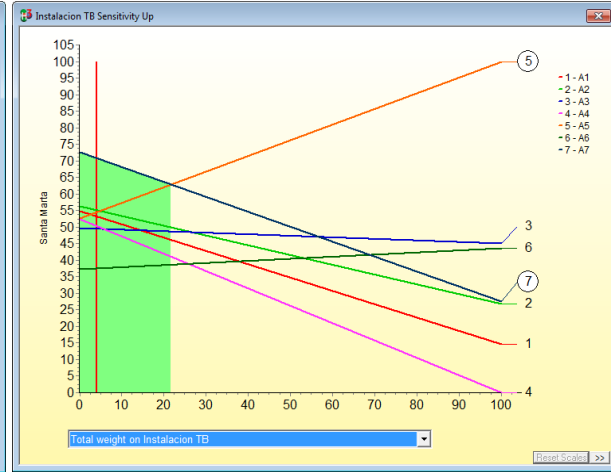
Figura 6-50. Resultados de análisis de sensibilidad individual para atributos que no generan cambio de decisión

Por otro lado, en las siguientes gráficas se muestran aquellos criterios que al adoptar otro peso (punto de corte del área sombreada con el Eje x) pueden generar como mejor alternativa una diferente a A7. A partir de estas se podrá observar como las Alternativas 2 y 5 serán las que empiecen a volverse mejor que A7 en ciertos puntos, lo cual es consistente con el resultado reportado en la Tabla de Orden de Selección de Alternativas.

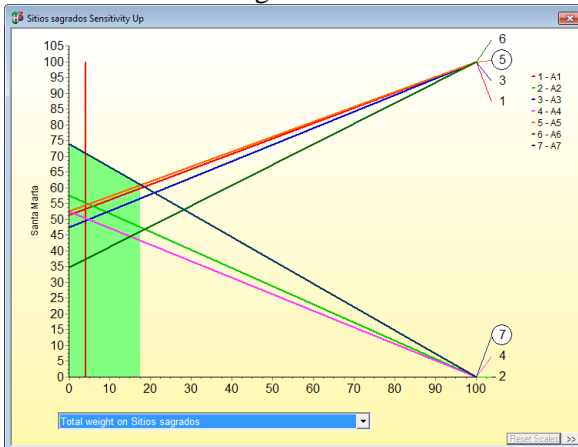
Rapidez (tiempo al punto de equilibrio)



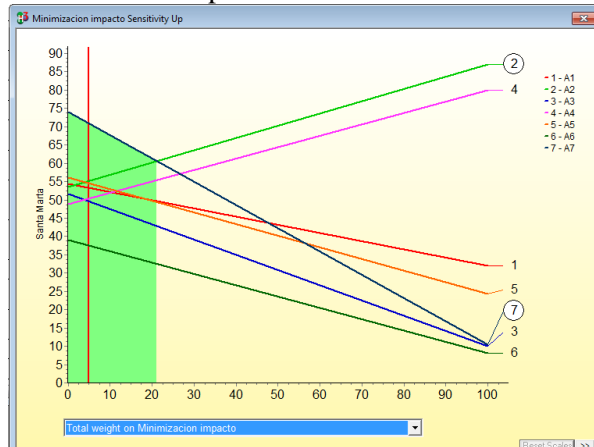
Costos: Instalación de tuberías



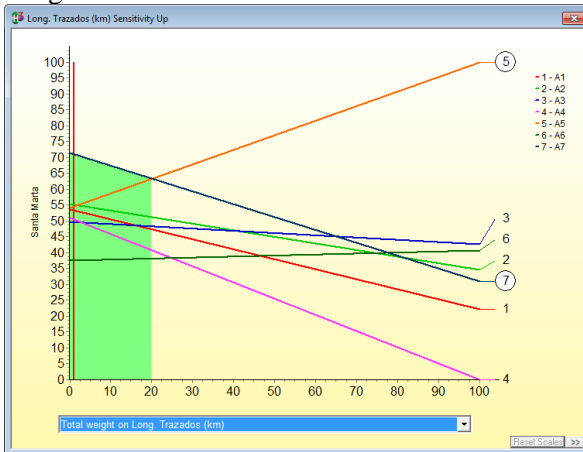
Factibilidad: Sitios sagrados



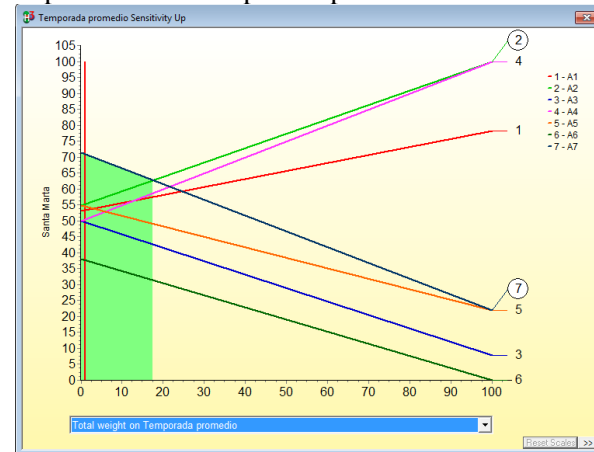
Minimización Impacto Ambiental



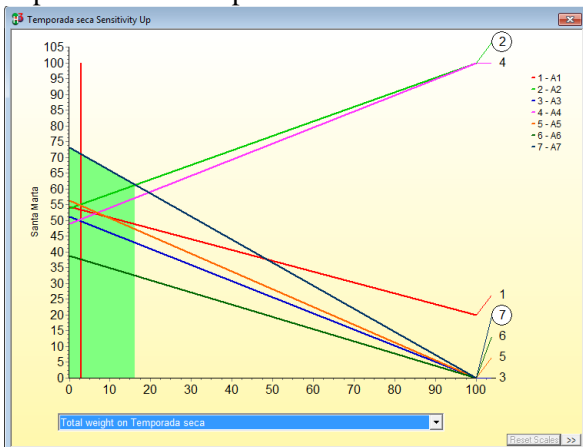
Longitud trazados



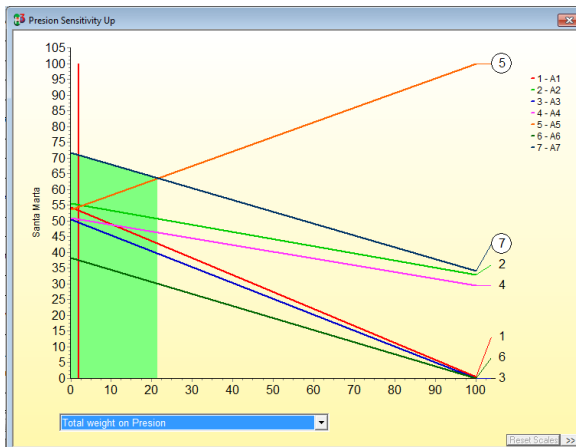
Impacto Amb: Temporada promedio



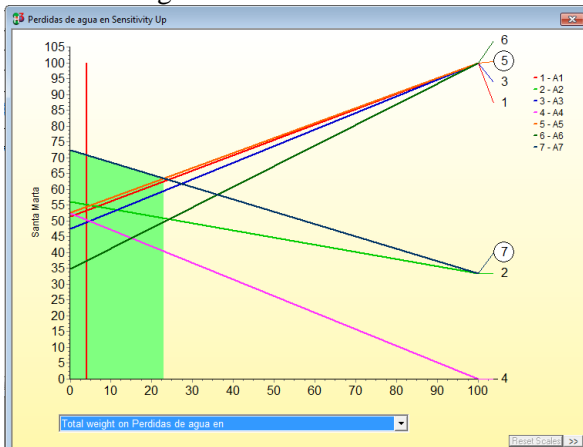
Impacto Amb: Temporada seca



Vulnerabilidad: Presión



Pérdidas de agua en la aducción



Costo de potencia en aducción

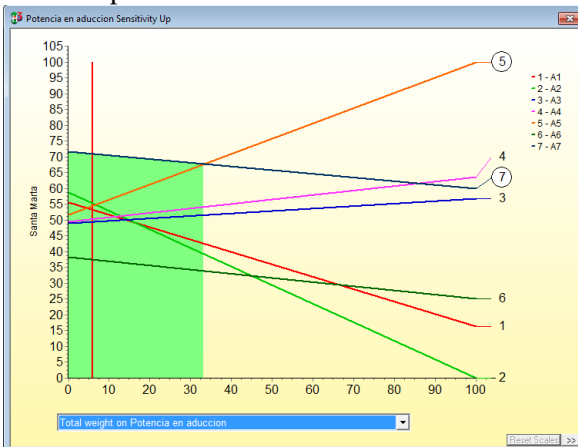


Figura 6-51. Resultados de análisis de sensibilidad individual para atributos que generan cambio de decisión

Este mismo ejercicio se realizó en Microsoft Excel, en donde se obtuvo el mismo resultado de Hi-View.

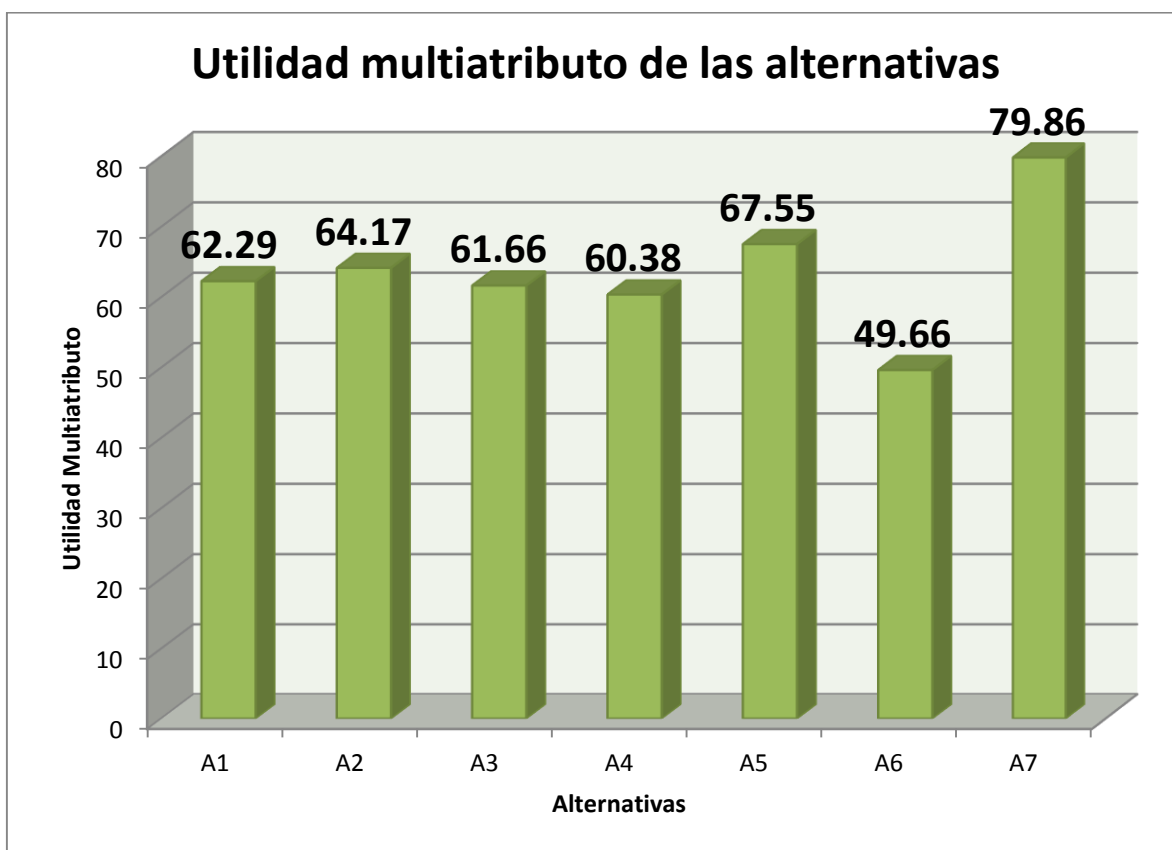


Figura 6-52. Resultados de análisis de alternativas

De acuerdo con lo anterior, la alternativa que genera una mayor utilidad individual es la alternativa 7, la cual comprende la captación de los ríos Córdoba, Toribio y Magdalena.

7. CONCLUSIONES

A partir del análisis hidrológico realizado para cada una de las cuencas involucradas en el estudio, se pudo obtener todas las características morfológicas que describen su comportamiento. Esto permitió determinar los caudales promedio y mínimo de cada uno de los ríos principales y a partir de estos valores, poder plantear las posibles combinaciones de ríos para cada alternativa. El estudio hidrológico y geomorfológico se realizó detalladamente de tal manera que la estimación de caudales representara adecuadamente las condiciones actuales y de alguna manera, las proyectadas a 50 años. Lo anterior permite obtener una visión más profunda de los componentes de la cuenca para tenerlos en cuenta en las próximas intervenciones que se realicen de acuerdo con la alternativa escogida. Adicionalmente, es importante que este tipo de estudios y resultados puedan ser de utilidad para otros estudios que se realicen en un futuro.

En cuanto a la alternativa escogida como la mejor, es importante que esta información se difunda públicamente, en especial el cronograma con las fechas de intervenciones tales como captaciones y ampliaciones de Plantas de Tratamiento de Agua Potable. Lo anterior, para que la población Samaria esté enterada de los proyectos de infraestructura que se deben realizar con el fin de mejorar su calidad de vida en términos de necesidades sanitarias. Esto también proporciona un incentivo al Gobierno de Santa Marta y a la empresa prestadora de servicio de acueducto a cumplir con la hoja de ruta que se debe seguir para llevar a cabo la alternativa de la mejor manera posible.

Teniendo en cuenta el análisis de alternativas, según los criterios seleccionados y el peso que se le dio a cada uno, se pudo establecer que la mejor alternativa es aquella que contempla los Ríos Córdoba, Toribio y Magdalena. Esta alternativa cuenta con una alta confiabilidad, bajos costos de operación y mantenimiento, es fácilmente expandible para otros municipios cercanos, es poco vulnerable a cambios climáticos, entre otras. Por otro lado, de acuerdo al análisis de sensibilidad, se pudo observar que esta solución es poco sensible a cambios en los pesos de sus atributos, lo cual quiere decir que se necesitarían variar mucho los pesos de los atributos para que alguna de las otras alternativas pasara a ser la mejor opción.

8. BIBLIOGRAFÍA

Alves Moreira, Maurício (2001): *Fundamento do Sensoriamento Remoto e Metodologías de Aplicação*, 1ª Edição – Sao José dos Campos – SP –.

Chuvieco, Emilio (1996): *Fundamentos de Teledetección Espacial*, 3ª edición revisada – España –

Congalton, Rusell G; Green, Kass (1999): *Assesing the accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*,. Lewis Publishers –.

Galliotti Florenzano, Teresa (2002): *Imagens de Satélite para Estudos Ambientais*. Oficina de Textos– São Paulo –.

IDEAM, 2010. *Leyenda Nacional de coberturas de la tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia. Escala 1/100.000. Instituto Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales. Bogotá, D.C. 72p.*

IDEAM. 2008. *Mapa de cobertura de la tierra Cuenca Magdalena-Cauca Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. IDEAM, IGAC, Cormagdalena. Bogotá, D. C., 200 p.*