



UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
FACULTAD DE INGENIERIA
CENTRO DE INVESTIGACIONES AMBIENTALES
Y DE INGENIERIA



UNIVERSIDAD PONTIFICIA
BOLIVARIANA
GRUPO DE INVESTIGACIONES
AMBIENTALES



UNIVERSIDAD DE MEDELLIN
UNIVERSIDAD DE MEDELLIN
FACULTAD DE INGENIERIA



UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE MINAS
POSGRADO EN RECURSOS
HIDRAULICOS

“Diseño y Puesta en Marcha de la Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Río Medellín en Jurisdicción del Área Metropolitana”

Fase 1

Convenio 366/2003

RESUMEN CALIDAD DE LAS AGUAS DEL RÍO MEDELLÍN Y SUS PRINCIPALES AFLUENTES

MEDELLÍN

DICIEMBRE DE 2004

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO.....	I
1 PRESENTACIÓN GENERAL DEL PROYECTO.....	4
2 JUSTIFICACIÓN.....	5
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
4 DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO.....	9
4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA	9
4.1.1 Orografía.....	9
4.1.2 Geología.....	9
4.1.3 Edafología.....	10
4.1.4 Vegetación	11
4.1.5 Clima.....	11
5 OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	14
5.1 OBJETIVO GENERAL	14
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
6 COMPONENTE CALIDAD DE AGUAS.....	15
INTRODUCCION	15
6.1 HIPÓTESIS DE TRABAJO	16
6.2 PREGUNTA DE INVESTIGACION.....	16
6.3 SELECCIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO.....	16
6.3.1 Metodología De Selección De Los Puntos Y Criterios De Selección.....	16
6.3.2 Ubicación de las estaciones.....	19
6.4 PROGRAMA DE MONITOREO	20
6.4.1 Tipo de muestras	20
6.4.2 Forma de muestreo.....	21
6.4.3 Programa de monitoreo.....	21
6.4.4 Aforos y muestreos de calidad.....	21
6.5 RESULTADOS COMPONENTE CALIDAD DEL AGUA.....	24
6.6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	48
7 COMPONENTE DE GESTIÓN RED DEL RÍO MEDELLÍN.....	50
7.1 PRECISIONES.....	50
7.1.1 El Concepto De Gestión Ambiental.....	50
7.1.2 Área De Estudio	51
7.1.3 Manejo De La Información.....	52
7.2 MARCO NORMATIVO DE ORDENACIÓN DE MICROCUENCAS.....	54
7.3 OBJETIVOS.....	55
7.3.1 Objetivo General.....	55
7.3.2 Objetivos Específicos.....	55
7.4 METODOLOGÍA	56

7.5	ETAPAS DEL COMPONENTE DE GESTIÓN	57
7.5.1	Etapa I - momento del “antes”	57
7.5.2	Etapas II Y III - Situación actual e Identificación de variables claves.....	57
7.5.3	Etapa IV - el papel de los actores.....	58
7.5.4	Etapas V y VI - los escenarios posibles y elección de opciones estratégicas.....	58
7.5.5	Etapa VII - puesta en marcha.....	58
8	COMPONENTE SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA	60
8.1	APLICACIÓN DE UN SIG AL RIO MEDELLÍN.....	60
8.2	OBJETIVOS.....	61
8.2.1	Objetivos Generales.....	61
8.2.2	Objetivos Específicos.....	61
8.3	METODOLOGIA	62
8.3.1	Estructura metodológica para el desarrollo de actividades del componente de SIG.....	62
8.3.2	Procesamiento de información espacial	63
8.4	ESTADÍSTICAS DE LA PRODUCCIÓN DEL COMPONENTE DE SIG.....	66
8.4.1	Estructura de la geodatabase red río.....	67
8.5	CONCLUSIONES COMPONENTE SIG	69
8.6	PROSPECCIÓN COMPONENTE SIG	70
8.7	SUB-COMPONENTE BASES DE DATOS.	70
8.7.1	Diseño y desarrollo de bases de datos.....	70
8.7.2	Desarrollo de actividades complementarias.....	71
8.7.3	Documentos y productos entregados por el componente.....	71
8.7.4	Conclusiones.....	72
9	COMPONENTE MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	73
9.1	GENERALIDADES.....	73
9.2	MODELO QUAL2.....	73
9.2.1	Representación conceptual.....	74
9.3	APLICACION DEL MODELO QUAL2 PARA LA ZONA DE ESTUDIO DEL RÍO MEDELLÍN	75
9.3.1	Régimen hidráulico del sistema de corrientes.....	76
9.3.2	Consideraciones para la modelación.....	77
9.4	RESULTADOS OBTENIDOS.....	78
9.4.1	Etapa de calibración del modelo	80
9.5	RECOMENDACIONES MODELACIÓN.....	86
9.5.1	Nitrógeno	86
9.5.2	Fósforo y fosfato.....	87
10	COMPONENTE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA	88
10.1	CAMPAÑAS DE AFORO	88
10.1.1	Metodología.....	88
10.1.2	Resultados.....	89
10.2	RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA	91
10.3	PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD	93
10.3.1	Metodología.....	93
10.4	METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES MEDIOS	94
TOTAL.....		96
10.5	METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES EXTREMOS (MÍNIMOS) ..	97
10.5.1	Regionalización de características medias	98
10.5.2	Modelo de tanques	99
10.5.3	Curva de recesión.....	101

10.6	METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES EXTREMOS (MÁXIMOS)	
	104	
10.6.1	Método gradex	104
10.6.2	Regionalización de características medias	106
10.6.3	Caudales máximos: modelación en HEC-HMS.	107
10.7	MODELACIÓN HIDRÁULICA	115

1 PRESENTACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

La Universidad de Antioquia, a través del Centro de Investigaciones Ambientales y de Ingeniería, la Universidad Nacional de Colombia –Seccional Medellín- a través del Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, la Universidad Pontificia Bolivariana y su Grupo de Investigaciones Ambientales, y la Universidad de Medellín y su Facultad de Ingeniería Ambiental, han decidido hacer una alianza estratégica con el propósito de desarrollar una propuesta conjunta que permita realizar una red de monitoreo de la calidad del agua de la cuenca hidrográfica del río Medellín. Para ello se pone en consideración del Área Metropolitana y el Fondo Regional de Inversiones para la Descontaminación Hídrica, creado por Acuerdo Metropolitano 013 de octubre 10 de 2001, el proyecto “ DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DE LA RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO MEDELLÍN EN JURISDICCION DEL AREA METROPOLITANA”.

Sin duda alguna, cada una de las instituciones que integran esta alianza, poseen las mejores calidades, experiencia, recurso humano calificado e infraestructura de apoyo que les permiten ser garantes de una excelente ejecución y alcance de las metas trazadas en el proyecto propuesto; por ello han decidido unir sus voluntades para generar sinergia al potenciar sus fortalezas investigativas, como parte sustantiva de su quehacer, en bien de la ciudad y las instituciones que la regentan, se propone por ello realizar un trabajo coordinado en el cual participarían profesores investigadores y estudiantes de los programas de posgrados (maestrías y doctorados dentro del área ambiental, de la hidráulica, la modelación y la simulación y la ingeniería en general).

Estamos seguros que el proyecto que ofrecemos las Universidades arrojará resultados que de un lado le permitirá a las Autoridades Ambientales en este caso el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Corantioquia y el Municipio de Envigado, disponer de una herramienta integrada y novedosa para la planeación urbano regional que más que una Red de Monitoreo sería un instrumento de gestión para la planeación urbano – regional; así mismo en el proceso de concepción y diseño de la Red de Monitoreo se desarrolle un Plan Integral de Acción que permita, que desde un proceso de planeación asociado con la gestión del recurso hídrico se provea de estrategias, programas y proyectos para la toma de decisiones dentro del quehacer de las Instituciones referidas con miras al ordenamiento del territorio de la cuenca Hidrográfica en su conjunto, ello como proceso planificador estratégico, conducente a desarrollar programas y proyectos que no dan espera a que la Red de Monitoreo se ponga en marcha, pues se convierten en acciones muy evidentes dentro del macroproyecto de recuperación y descontaminación del río Medellín, de otro lado, para nuestras Universidades sería un reto y una oportunidad de trabajar mancomunadamente y dejar muy en alto sus nombres en la búsqueda y compromiso de hacer investigación aplicada, que solucione problemas reales y que impacten positivamente a la comunidad.

La propuesta que se presenta, busca en primera instancia entregar al Área Metropolitana del Valle de Aburrá, como Autoridad Ambiental Urbana, una herramienta que le permita la planeación de su quehacer en materia de gestión del recurso hídrico,

mediante la construcción de una red de monitoreo ambiental de la cuenca hidrográfica del río Medellín que incluye un modelo de simulación hidrodinámico y de calidad de agua, además de una estrategia de planeación ambiental del territorio.

El alcance de la propuesta compromete no solamente la gestión del Área Metropolitana, sino la de las demás Autoridades Ambientales del Valle a Aburrá y el área de influencia directa de la cuenca hidrográfica como son la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, CORANTIOQUIA y la Administración Municipal de Envigado.

2 JUSTIFICACIÓN

Acorde con la visión del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, los municipios que comprenden su territorio evidencian fuertes desequilibrios ambientales territoriales y ambientales que afectan la calidad de vida y la salud de los habitantes. En el recuento de tales desequilibrios, el río y su sistema hidrológico aparece categorizado como un “hecho metropolitano”¹ que afronta problemáticas de contaminación asociadas a las prácticas económicas insostenibles y a los desequilibrios de la ocupación del espacio, fruto de vacíos en su planeación.

El Área Metropolitana ha identificado la problemática del río Medellín a partir de la configuración de la cuenca hidrográfica como unidad de manejo. Esto implica para el Ente, centrarse en las dinámicas internas de la cuenca y en sus relaciones complejas con otros territorios. Este enfoque ha propiciado la formulación de líneas estratégicas y de programas encaminados a la administración, ordenamiento y manejo integral de esta cuenca y otras de importancia metropolitana e interregional, con énfasis en el agua, el suelo y la biodiversidad.

Se trata entonces de una visión holística que busca involucrar en el análisis de la cuenca variables como la distribución físico-espacial, el fenómeno de conurbación, la población asentada a lo largo del río, las dinámicas territoriales, las potencialidades ambientales y competencias sectoriales, las relaciones interregionales y otras asociadas al uso y aprovechamiento de los recursos naturales, entre las más destacadas.

Con base en lo anterior, el Área Metropolitana ha dimensionado la necesidad de que se desarrolle un modelo de gestión territorial enmarcado en su Plan Integral de Desarrollo Metropolitano para el Valle de Aburrá –Proyecto Metrópolis 2002/2020-.

De otro lado, la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia - CORANTIOQUIA en su Plan de Acción Regional 1998 – 2006 orienta gran parte de su quehacer institucional hacia el conocimiento y mejoramiento de la oferta natural presente en el territorio de su jurisdicción, buscando garantizar un inventario mínimo de bienes y servicios ambientales, capaces de abastecer las necesidades del desarrollo. Todo esto involucra la ejecución de acciones de conservación y restauración de

¹ Los hechos metropolitanos son entendidos por el AMVA como fenómenos económicos, sociales, físico territoriales, ambientales y político institucionales que modifican total o parcialmente la estructura supramunicipal en su composición o en su funcionamiento, dando origen a funciones públicas metropolitanas

ecosistemas, el mejoramiento de coberturas vegetales y forestales, la recuperación y mejoramiento de suelos, la protección y redoblamiento de especies de flora y fauna, la investigación, caracterización y cuantificación de los recursos como agua, suelo, fauna, flora, bosque, aire y espacio público.

No obstante, este Plan no identifica como una prioridad el ordenamiento integral de la cuenca hidrográfica del río Medellín, presentando acciones sectorizadas por recursos, sin proponer actuaciones específicas para el manejo del recurso agua, con un carácter integrador.

Por otro lado, el análisis de la literatura disponible sobre investigaciones y trabajos hechos en la cuenca del Río Medellín con énfasis en el recurso agua, demuestra que no se poseen criterios de unificación en la selección de estaciones, en las frecuencias de muestreo, en los procedimientos de laboratorio, en los métodos para el cálculo de las concentraciones letales medias, así como tampoco en la definición de especies estándares para los estudios de toxicología.

Los diversos estudios realizados en el Río Medellín han planteado dentro de sus recomendaciones la reiterada necesidad de diseñar y operar una Red de Monitoreo de Calidad de las Aguas y de recarga de acuíferos en la hoya hidrográfica del Río Medellín. En relación con esto, los estudios realizados hasta ahora sobre la calidad del agua del río, evidencian la necesidad de centralizar dicha información con el propósito de evaluar las necesidades actuales y pertinentes de la cuenca y proponer marcos de actuación para el futuro en función de la formulación de un Plan de Acción que le permita al Área Metropolitana orientar sus acciones.

Un esfuerzo de esta naturaleza tiene mucho mayor sentido, cuando puede servir de base y de complemento para explicar la compleja gama de procesos sociales, industriales y de uso del suelo, entre otros, que interactúan para configurar la realidad de la Cuenca Hidrográfica del río Medellín. Realidad que, sistematizada, permite posibilidades de actuación acordes con objetivos de planificación del territorio con el fin de incidir positivamente sobre sus problemáticas más relevantes.

Es por ello que se requiere avanzar en el trabajo interinstitucional e interdisciplinario coordinado para el **“DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DE LA RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO MEDELLÍN EN JURISDICCION DEL AREA METROPOLITANA”** previo conocimiento del comportamiento de los principales contaminantes para una evaluación integral de la calidad del agua en la cual se incluyan numerosos aspectos no considerados en las investigaciones precedentes.

Adicionalmente, la construcción de la Red de Monitoreo, permite identificar elementos para la formulación y puesta en marcha de un plan de manejo ambiental a largo plazo de la cuenca del río, como herramienta fundamental que permitiría enriquecer la red y fortalecerla en el tiempo, en la medida que existan los criterios ambientales de actuación generales para el manejo del recurso agua y la problemática que lo circunda.

Con base en todo lo anterior y de acuerdo con las reuniones realizadas con los profesionales del Área Metropolitana sobre la pertinencia del proyecto, las Instituciones comprometidas en esta alianza, desde nuestro ejercicio académico y científico

consideramos que ésta sería una magnífica oportunidad para pretende desarrollar un macroproyecto que se convertirá en la brújula que señale el Norte en los procesos territoriales de largo aliento que las entidades de Control y Planeación Ambiental del Valle de Aburrá deberán seguir, para que de una forma cohesionada, se desaten dinámicas de Gestión Ambiental sobre la Cuenca del Río Medellín, principal arteria fluvial de la Región y del Área Metropolitana, en especial relación con su recurso hídrico superficial y subterráneo, el cual demanda acciones inmediatas, pero ordenadas, hacia el reestablecimiento del equilibrio ecológico y el pago de los pasivos ambientales generados desde hace cientos de años.

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La gestión ambiental institucional del río Medellín y en consecuencia su relación con la problemática propia, la podemos resumir en los siguientes juicios, no ordenados jerárquicamente.

- La falta de Planeación y de acciones efectivas con mirada holística.
- El desarrollo de la normatividad y el bajo grado de sensibilización de la comunidad.
- La estética y el paisaje urbano, los imaginarios que produce el río
- La calidad de las aguas superficiales y subterráneas en la jurisdicción
- El deterioro y las amenazas por la contaminación producida por vertimientos puntuales, areales, escorrentías, procesos productivos y los usos del suelo a escala industrial, doméstico y agroindustrial.
-
- El papel de las Autoridades Ambientales en desarrollo del proyecto de calidad ambiental, el cual tiene como uno de sus objetivos específicos el contribuir en la construcción de instrumentos de Gestión Ambiental que permitan la sostenibilidad del uso de los recursos renovables, tiene programada la caracterización cuantitativa de la cantidad y calidad del recurso hídrico en las cuencas de su jurisdicción.
- La implementación y cobro de tasas retributivas por el uso del recurso.
- La priorización por el alto deterioro y el conflicto ambiental urbano.
- La Privatización de los servicios públicos y la de los recursos naturales, hoy latente.
- Los balances de masa y energía, el desarrollo sostenible.
- El aumento poblacional, el desarrollo industrial, el incremento del uso de compuestos recalcitrantes, el grado de sensibilización de la comunidad y la falta de acciones efectivas han favorecido el incremento de la contaminación de la microcuenca del Río Medellín.
-
- La falta o casi nula protección y gestión de las aguas, lo que requiere una planificación hidrológica que regule la disponibilidad, calidad y utilización de los recursos hídricos, para llevar a cabo un control adecuado del impacto de la actividad humana sobre la calidad del agua.

Para las aguas superficiales, la planificación de las acciones que permitan mejorar la calidad de las aguas y controlar su deterioro necesita del conocimiento, y del seguimiento en el tiempo, de su estado. Por lo tanto, la gestión de la microcuenca del Río Medellín, requiere conocer su estado histórico y actual de calidad, un seguimiento del mismo, es decir sus variaciones en el espacio y en el tiempo, y su respuesta frente a actuaciones concretas, como puede ser el control de los vertidos. Para obtener, y tratar, toda esta información es preciso disponer de un programa de monitoreo de calidad de aguas. El monitoreo de la calidad del agua es el esfuerzo para obtener información cuantitativa sobre las características físicas, químicas y biológicas del agua, preferentemente mediante un muestreo estadístico.

La misma Area Metropolitana del Valle de Aburra, mediante la realización de dos proyectos para la evaluación de las aguas subterráneas en la cuenca del río Medellín estableció la existencia de actividades que amenazan la calidad de este recurso y definió las zonas de vulnerabilidad de los acuíferos. Ya allí se planteo la necesidad de instalar una red de monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas, dentro de las medidas de manejo de ellas. La conexión hidráulica que existe entre el ciclo hidrológico superficial y subterránea constituyen un argumento para plantear la necesidad de implementar una red de monitoreo integrada del recurso hídrico en toda cuenca.

4 DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA

La cuenca hidrográfica del Río Medellín está conformada por los ramales Central y Oriental Antioqueños, los cuales, pertenecen a la cordillera Central de los Andes, se elevan a alturas del orden de 2500 a 3000 metros sobre el nivel del mar y están separados por el Valle del Río Medellín que corre en dirección sur-norte. En el presente estudio se propone desarrollar una herramienta que sea utilizada desde el área de nacimientos del río y sus afluentes, hasta su entrega al río Porce en el paraje conocido como el puente Gabino

4.1.1 Orografía

Aproximadamente en el Alto de San Miguel, al sur del Valle de Aburrá se produce la bifurcación de la Cordillera Central del los Andes en los ramales Central y Oriental Antioqueño, separados por el Valle del Río Medellín que corre en dirección sur-norte hasta las cercanías de Bello, en donde quiebra hacia el nor-este.

Los ramales que rodean la cuenca se elevan a alturas del orden de 2500 a 3000 metros sobre el nivel del mar. Los altos más sobresalientes son: San Miguel, Boquerón y el Padre Amaya, principalmente. El ramal Central corresponde a la banda occidental y separa los Valles del Río Medellín y del Río Cauca.

El Valle del Río Medellín se extiende desde la elevación 1.795 metros (Caldas) a 1.048 (desembocadura del Río Grande). Tiene un fondo plano, con un ancho máximo de 10 km, luego va cerrándose en su curso inferior hasta adquirir forma de V profunda.

4.1.2 Geología

En la Cuenca Hidrográfica del Río Medellín se distinguen algunas formaciones geológicas de distinta naturaleza que incluyen: rocas ígneas, metamórficas y sedimentos no consolidados.

Las laderas incluyendo el Valle, entre Caldas y Barbosa, están compuestas esencialmente de materiales derivados de las rocas ígneas y metamórficas, terrazas y aluviones cuaternarios y mantos de ceniza depositados sobre las rocas mencionadas, altamente meteorizados.

El material ígneo: lo constituyen el Batolito Antioqueño, además de las serpentinitas y el Batolito de Altavista.

El material metamórfico: esta constituido por anfibolitas (presentes en grandes cantidades) y metasedimentos formando lo que se conoce como Grupo Ayurá Montebello.

El material no consolidado (sedimentario): esta constituido por terrazas y depósitos coluviales

Otra unidad geológica reciente corresponde a los depósitos de flujos de lodo (talud) hacia las laderas, derivados de la descomposición de las rocas preexistentes.

Las formas que va tomando el relieve están estrechamente relacionadas con la composición geológica del terreno. Asimismo, existe una relación directa entre las corrientes de agua, erosión y la geología. Es evidente que en el transcurso de las eras geológicas, las quebradas han ido desgastando y erosionando el terreno.

Estos factores nos permiten agrupar y caracterizar las quebradas según el tipo de roca por el cual discurren. Por ejemplo, las quebradas Piedras Blancas, Malpaso, Santa Elena, Zúñiga, entre otras, tienen sus nacimientos sobre anfibolitas, muy resistentes a la erosión. Otras quebradas, principalmente, La Guayabala, Altavista y la Picacha, tienen sus nacimientos sobre la roca ígnea que al meteorizarse se convierte en arcilla. Botero (1963) afirma que el actual Valle de Aburrá se encontraba antiguamente a nivel de los Valles de Oriente y de San Pedro, y a causa de movimientos tectónicos ocurridos durante las orogenias (proceso de formación de montañas) terciarias, el Valle quedó encajado entre los dos altiplanos, separado de éstos por fallas casi verticales. No obstante, ésta no parece ser una amenaza real para el Valle de Aburrá.

En resumen, el Valle de Aburrá es una depresión alta en la Cordillera Central con sus laderas en parte escarpadas y en partes escalonadas, constituidas por rocas descompuestas, asentados donde se suaviza la pendiente y con terrazas y aluviones recientes, en el fondo, depositado por el Río.

4.1.3 Edafología

Los suelos derivados de los Batolitos, son profundos, bastante sueltos, arcillosos, de poco a medianamente permeables. La fertilidad es baja, la erosión de ligera a moderada y el relieve fuertemente inclinado. Están localizados a lo largo del cañón del Río, desde Giradota hasta el Río Grande y en un sector alto al occidente de Medellín.

Los suelos se caracterizan por un drenaje natural de bueno a moderado y escorrentía muy rápida. Son notoriamente estériles, la erosión es severa y el relieve aparece quebrado y escarpado.

Son poco evolucionados, arcillosos, con texturas de medianas a finas, tonos amarillentos y rojizos, con buen drenaje natural y escorrentía rápida. La fertilidad es baja, la erosión severa y el relieve aparece quebrado y escarpado.

Los suelos de origen coluvial y/o aluvial se presentan a lo largo del Río Medellín desde Caldas hasta Barbosa. Los suelos coluviales, localizados en las laderas del Valle amplio, presentan buenas condiciones de drenaje y buena permeabilidad, con profundidad variable, de texturas moderadamente gruesas y de tonos pardos.

En resumen los suelos que se presentan en la Cuenca Hidrográfica del Río Medellín, poseen las siguientes características generales: secos, estériles por falta de nutrientes y humedad, con texturas y colores heterogéneos ya que ambas características dependen fundamentalmente de la roca madre, de muy variada naturaleza; el drenaje y permeabilidad variables, en parte por la misma razón. Referente a la erosión, los suelos son erosionados y erosionables debido a causas naturales y humanas.

4.1.4 Vegetación

Por motivo de la situación geográfica de la cuenca del Río Medellín, la mayoría de las zonas de vida o formaciones vegetales están comprendidas entre un bosque húmedo Premontano (bh-PM) y un bosque húmedo Montano Bajo (bh-MB). Existen además otras fajas pertenecientes a los bosques muy húmedos Premontano y Montano Bajo.

Los factores climáticos y la posición geográfica de la cuenca, tienen una influencia muy relevante sobre la vegetación. Así mismo, los procesos de urbanización han llevado en forma directa a la destrucción total de la flora autóctona. Hoy en día, la vegetación primaria ha sido talada casi en su totalidad, y reemplazada por cultivos o bosques secundarios en zonas donde el crecimiento urbano e industrial no ha llegado aún, pero por falta de espacio, tienden a desaparecer.

4.1.5 Clima

4.1.5.1 Temperaturas y Lluvias.

El clima de la cuenca hidrográfica del Río Medellín, está comprendido dentro de los climas de régimen tropical o ecuatorial de montaña, y se caracteriza principalmente por dos fenómenos a saber:

- a.** Pequeña variación en las temperaturas medias en el transcurso del año. La posición geográfica de Colombia, dentro de la región latitudinal tropical, determina que en el país, la temperatura está definida por las alturas sobre el nivel del mar. En Medellín, la temperatura media anual es de 22°C, con medias máxima y mínima de 29 y 16 °C, respectivamente. Lo normal es que oscile entre 18 y 26 °C.
- b.** Presencia de dos épocas de máximas precipitaciones pluviales, con dos épocas intermedias de menor precipitación: para Medellín las épocas de invierno y verano, están delimitadas de la siguiente manera.

Épocas de invierno (precipitaciones máximas):

Una de Abril a Junio y otra de Septiembre a Noviembre, siendo Mayo y Octubre generalmente, los meses más lluviosos. Medellín presenta una precipitación media anual de 1500 mm.

Epocas secas: una de Diciembre a Marzo y la otra de Julio a Agosto se considera el mes de Enero como el más seco del año.

4.1.5.2 Vientos

Los vientos en la Cuenca Hidrográfica del Río Medellín, soplan predominantemente de norte a sur (alisios del Noreste) en casi todos los meses del año, con registros máximos de velocidad de 50 km/hora. La velocidad promedio es de 5 km/hora.

Los vientos arrastran las nubes hacia la parte sur de la Cuenca Hidrográfica del Río Medellín y se encañonan de tal forma que las montañas que se encuentran a su paso hacen que las nubes cálidas y húmedas asciendan hasta el punto de condensación y se precipiten. Este fenómeno es el que explica el porque en los municipios del sur, especialmente en Caldas, y en las cabeceras del Río, se presentan mayores precipitaciones que en Medellín y el resto del Area metropolitana.

4.1.5.3 Humedad Relativa

Las variaciones de humedad relativa durante el día son regulares y típicas de un clima tropical, donde no hay estaciones. La humedad se hace mínima en las horas del medio día, por que en la atmósfera hay más calor y energía acumulada que aumenta la capacidad del aire para contener vapor de agua.

En el Valle de Aburrá la humedad relativa promedio es de 70% llegando a valores extremos como de un 40% en verano y 85% en invierno.

4.1.5.4 Presión Barométrica.

La presión barométrica normal en Medellín es de 635 mm de Hg.

5 OBJETIVOS DEL PROYECTO

5.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y poner en marcha la Red de Monitoreo Ambiental en la cuenca hidrográfica del río Medellín en jurisdicción del Area Metropolitana, lo cual incluye los diseños de los medios e instrumentos para su operación y mantenimiento; concibiéndose de esta manera como un herramienta de gestión para la planificación ambiental integral del recurso hídrico.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

FASE 1: PREDISEÑO DE LA RED DE MONITOREO DE LA CALIDAD Y CANTIDAD DEL AGUA Y DE UN PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL

- Diseñar una Red preliminar de Monitoreo de la Calidad y Cantidad de las aguas del río Medellín y sus afluentes principales, lo cual aportará información para su diseño detallado.
- Localizar geográficamente de manera preliminar las estaciones de monitoreo de la Calidad y Cantidad del agua del río Medellín y sus afluentes principales.
- Determinar para las campañas de medición los principales parámetros hidráulicos, físicos, químicos, microbiológicos y biológicos, la metodología, los equipos y los mecanismos para el monitoreo.
- Realizar diez (10) campañas de mediciones de cantidad y calidad de aguas en el área de estudio dentro del Valle de Aburrá, en diferentes estaciones y épocas del año de manera que se pueda hacer un diagnóstico preliminar al respecto y acopiar los elementos que permitan proponer el diseño de una red permanente.
- Analizar los resultados de los ensayos de laboratorio e interpretar, para estos muestreos, las condiciones cualitativas y cuantitativas de calidad y cantidad del recurso hídrico superficial en las cuencas del río Medellín y afluentes principales si así se establece.

6 COMPONENTE CALIDAD DE AGUAS

INTRODUCCION

Las aguas superficiales intervenidas, requieren de acciones planificadas que permitan mejorar su calidad; igualmente para controlar su deterioro, se necesita conocer los contaminantes asociándolos a los cambios que se presentan en estas tanto en el espacio como en el tiempo.

Los estudios realizados sobre la calidad del agua del río, evidencian la necesidad de sistematizar la información obtenida sobre la calidad del agua, con el propósito de evaluar las necesidades actuales y pertinentes en materia ambiental y proponer marcos de actuación para el futuro en función de la formulación de un Plan de Acción que le permita al Área Metropolitana del Valle de Aburrá orientar sus acciones.

Es por ello que se propuso avanzar en el trabajo interinstitucional e interdisciplinario a través del proyecto “DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DE LA RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO MEDELLÍN EN JURISDICCION DEL AREA METROPOLITANA” con el fin de conocer el comportamiento de los principales contaminantes para una evaluación integral de la calidad del agua.

Por lo tanto y como función esencial en este proyecto, se desarrollaron muestreos que asociados al conocimiento de la dinámica de los procesos más importantes en el cuerpo de agua, ofrecen una descripción cualitativa y cuantitativa de las variables fisicobióticas y ambientales asociadas al problema de contaminación.

A continuación se presenta en forma resumida los objetivos del proyecto en todas sus etapas, las estrategias para la selección de estaciones, el programa de monitoreo donde se especifica el tipo de muestra, la forma de muestreo, el programa de monitoreo, aforos y muestreo de calidad; mostrándose finalmente una síntesis de cada uno de los componentes del proyecto en esta primera fase.

6.1 HIPÓTESIS DE TRABAJO

El régimen hidrológico de la cuenca del río Medellín influye sobre las condiciones de calidad del agua del río, de igual manera estas condiciones también se encuentran asociadas a la contaminación producida como consecuencia de la actividad antrópica en un tramo significativo de la cuenca.

6.2 PREGUNTA DE INVESTIGACION

¿Los cambios en las condiciones ambientales del Río Medellín están asociados a las variaciones en los regímenes hidrológicos de la cuenca y a las características fisicobióticas del cauce principal del Río?

6.3 SELECCIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO

Para la localización preliminar de las 10 estaciones se consideraron los procesos climáticos e hidrológicos que regulan los caudales en el río, los aportes de los principales contaminantes, los procesos de arrastre que se derivan de las actividades de explotación de material aluvial, además de la información histórica existente de calidad y cantidad de agua, recopilada por las estaciones físicas y virtuales concebidas por diferentes entidades como EEPPMM, el Instituto Mi Río entre otras. Aunque la red se concentrará en el cauce del río Medellín, se consideraron también en este primer acercamiento, las contribuciones de los principales afluentes (quebradas que aportan ya sea altos caudales o altas carga contaminantes).

En la etapa de diseño y planeamiento de la red de monitoreo se considero:

- La metodología para la recolección de las muestras en campo
- Las determinaciones analíticas efectuadas in situ y en el laboratorio
- La determinación de la cantidad de parámetros a medir
- Los requerimientos estadísticos para determinar el número de datos y frecuencia de monitoreo, que deben satisfacer las expectativas de confiabilidad y precisión del estudio en cuestión acorde a los objetivos del programa.

6.3.1 Metodología De Selección De Los Puntos Y Criterios De Selección

Para la selección de los puntos se identifican varias fases:

- Fase I: se localizó de manera macro unos puntos que luego habrá que refinar y reevaluar en la fase siguiente.
- Fase II: se procede a la localización de estaciones representativas en cada uno de los tramos, además se debe seleccionar puntos específicos para la localización de estas estaciones.

Fase III: se debe definir la metodología, forma y frecuencia de medición en el transepto seleccionado.

En la Primera Fase, apoyados en un conocimiento general de la cuenca y en los resultados de estudios anteriores sobre la misma, se definieron 20 puntos para realizar mediciones. Dicha selección se realizó después de un refinamiento de un número mayor de posibles puntos.

Entre los criterios de selección se encuentran los que se relacionan a continuación, los cuales fueron agrupados y sintetizados en la Tabla 1.

- La hidrología del río Medellín en la zona de estudio.
- Las características hidráulicas del río y sus afluentes.
- La información histórica de calidad de aguas recolectada hasta el momento.
- La longitud y el área del territorio
- Los actores territoriales como Empresas Públicas, Corantioquia, Área Metropolitana, sector privado con diferentes sistemas productivos, entre otros.
- Los asentamientos poblacionales, traducidos en los entes territoriales que hacen parte del Área Metropolitana como hecho territorial.
- Los afluentes como descargas o como factores de dilución, el transporte de carga orgánica y de aguas residuales en general.
- Las descargas puntuales estudiadas desde la memoria existente de ellas, valga decir ejemplos: Fábrica de licores de Antioquia, tintorerías, curtimbres, etc.
- Geología y geomorfología
- La infraestructura física de la ciudad.
- Tecnología para la instrumentación de las estaciones, análisis de instrumentos, formas de captura y lectura de la información, transmisión de la misma, elementos de seguridad, acceso, Topografía del cauce y la cuenca
- Facilidad de acceso y seguridad de las estaciones.
- Hechos territoriales que denoten cambios sobre el cauce, tales como: la canalización del río, la invasión de cauces realizada por el Metro de Medellín, las descargas areales, el plan de saneamiento del río, la descarga de aguas de la Planta de San Fernando, la descarga de Tasajeras, los usos del suelo a lo largo de la cuenca.
- Desarrollos futuros de la ciudad.
- Puntos estratégicos para Área Metropolitana u otras entidades ambientales.

Tabla 1. Criterios para la selección de los sitios de monitoreo

Tipo	Criterio
Hidráulico	Estabilidad morfológica de la sección. Existencia de una sección de control aguas abajo de la estación. Tramo recto lo suficientemente antes y después de la sección.
Hidrológico	Registros históricos de caudales Descargas de caudal.
Calidad	Registros históricos de variables de calidad Descargas
Biológico	

**DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DE LA RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA
DEL RÍO MEDELLÍN EN JURISDICCION DEL AREA METROPOLITANA**
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA - UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA – UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN – UNIVERSIDAD
NACIONAL

Tipo	Criterio
Político	Ubicación en la jurisdicción geográfica de la entidad
Operación y Mantenimiento	Fácil acceso a la estación. Disponibilidad de servicios básicos en la estación (energía) Posible vigilancia en la estación. Seguridad en la zona en que se ubica la estación Protección de la estación frente a crecientes del río.

Los tramos que se relacionan en la Tabla 2 son representativos en el río y constituyen la base para la definición de los sitios de monitoreo.

Tabla 2 Tramos del río

Tramo 1. Parte Alta de la Cuenca	
Localización	Desde el nacimiento hasta antes de Caldas – Estación Primavera. Estación Primavera hasta Ancon sur (con la intervención de Caldas).
Tramo 2. Zona canalizada con colectores	
Localización	Desde Ancon sur hasta la descarga de los interceptores centrales oriental y occidental.
Tramo 3. Zona urbana después de la descarga de colectores	
Localización	Desde la descarga de los interceptores centrales oriental y occidental hasta antes de la descarga de Tasajera.
Tramo 4. Parte baja de la cuenca.	
Localización	Desde la descarga de Tasajera (estación Hatillo) hasta Puente Gabino.

6.3.2 Ubicación de las estaciones

Para esta primera fase, además de las muestras definidas contractualmente, se tomaron muestras en puntos intermedios entre las diferentes estaciones, lo cual permitió disponer de mayor cantidad de información sobre la calidad del agua del río y ayudó a definir y precisar la ubicación definitiva de las 10 estaciones. Si bien es cierto que se dispone de información histórica del río, las condiciones y características son cambiantes en el tiempo. A continuación se describen los lugares donde se ubicarían preliminarmente las diferentes estaciones, los llamados sitios base y los puntos intermedios.

1. Alto de San Miguel Km 2 municipio de Caldas, área de nacimiento, no ha recibido ningún tipo de contaminación considerable.

a. Punto Intermedio. Sector Primavera

2. Ancon sur Km. 22, municipio de Sabaneta, donde se han recibido las aguas residuales de los municipios de Caldas y la Estrella.

b. Punto intermedio. Quebrada Doña Maria. Punto intermedio, la entrega de la Quebrada Doña Maria al río Medellín.

3. San Fernando km 27 municipio de Itagui, medición antes y después de la descarga al río de las aguas residuales tratadas en la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando

c. Punto intermedio. Puente Guayaquil

4. **Universidad de Antioquia Km. 36**, municipio de Medellín. Sitio Aula Ambiental

5. **Puente de Acevedo Km. 41**, municipio de Medellín, medición en el sitio donde se han presentado los mas altos índices de contaminación.

d. Punto intermedio, la entrega de la Quebrada La García al río Medellín. Zona de alta intervención.

e. Punto intermedio, puente Machado. Zona de alta intervención.

6. **Municipio de Copacabana, Km. 55**. Sitio Metromezclas, donde ya se ha recibido la contaminación del municipio de Copacabana.

7. **Municipio de Girardota Km 58**, medición en el sector de acceso a este municipio, donde se han recibido las aguas residuales de los municipios de Copacabana y Girardota, antes de recibir las aguas de dilución de la central hidroeléctrica la Tasajera.

f. Punto intermedio, Parque de las Aguas. Ubicado antes del sitio de entrega de las aguas de la central hidroeléctrica la Tasajera. Altura sobre el nivel del mar:655 m.

8. **Hatillo Km 70**, puente de acceso al municipio de Barbosa, sitio donde las aguas de dilución de Tasajera han mejorado la calidad del río.

g. Punto intermedio, Sector industria Papelsa.

9. **Popalito Km 83**, en el municipio de Barbosa.

h. Punto intermedio, Sector Parque Ambiental la Pradera.

10. **Porce Km 100**, Municipio de Santo Domingo, antes de la desembocadura al río Grande- Puente Gabino (Estación de EEPPM). Sector bajo la influencia de explotación aurífera.

i. Punto intermedio, Sector EADE.

6.4 PROGRAMA DE MONITOREO

6.4.1 Tipo de muestras

De acuerdo a las características de cada estación y a las variables a evaluar, para los monitoreos realizados se definieron tres tipos de muestra a tomar: puntuales, integradas y compuestas. La selección de los lugares donde se realizaron campañas de muestreo de 24 horas, tuvo como soporte aquellos sitios donde confluyen corrientes que por su importancia y por las actividades que se desarrollan entorno de estas, era necesario conocer el comportamiento del agua durante las 24 horas.

6.4.2 Forma de muestreo

Se realizó el aforo y la caracterización de la corriente en las 10 estaciones referenciadas, mientras que en los puntos intermedios solamente se realizaron muestreos para determinar la calidad de agua.

6.4.3 Programa de monitoreo

La Tabla 3 presenta la relación de la ubicación de las diferentes estaciones; así como la ubicación de los puntos intermedios, el tipo de muestra a tomar y la comisión de toma de muestra a la cual pertenece.

6.4.4 Aforos y muestreos de calidad

En general, los aforos se realizaron con correntómetro en los mismos sitios de toma de muestras de agua para la caracterización de la calidad. Los aforos buscaban realizarse en puntos que se puedan convertir a futuro en estaciones limnigráficas.

Tabla 3. Descripción de las estaciones y el tipo de análisis que se realizan en las mismas

No	COMISIÓN	ESTACIÓN	TIPO DE ANÁLISIS				OBSERVACIONES
			FISICOQUÍMICO	BIOLÓGICO	AFORO	SEDIMENTOS	
1	C1	San Miguel. E1	Puntual Integrado	- X	1	X	
2	C1	La Primavera. E2	Puntual Integrado	- X	1	X	
3	C1	Ancon sur. E3	24 Horas	X	1	X	
4	C1	Quebrada Doña María. E4	Puntual Integrado	- X	1	X	
5	C1	Antes de la Planta San Fernando. E5	24 Horas	X	1	X	Después de la Quebrada Doña Maria.
6	C1	Después de la Planta San Fernando. E6	Puntual Integrado	- X	1	X	Puente viejo de la Guacatala
7	C2	Puente de Guayaquil. E7	Puntual Integrado	- X	1	X	
8	C2	U. de A. (Aula Ambiental). E8	24 Horas	X	1	X	
9	C2	Puente peatonal de Acevedo. E9	Puntual Integrado	- X	1	X	
10	C2	Quebrada la García. E10	Puntual Integrado	- X	1	X	
11	C2	Puente de Machado. E11	Puntual Integrado	- X	-	X	
12	C2	Metromezclas. E12	Puntual Integrado	- X	1	X	

Continuación Tabla 3. Descripción de las estaciones y el tipo de análisis que se realizan en las mismas

No	COMISIÓN	ESTACIÓN	TIPO DE ANÁLISIS				OBSERVACIONES
			FISICOQUÍMICO	BIOLÓGICO	AFORO	SEDIMENTOS	
13	C2	Puente de Girardota E13	Puntual Integrado	- X	-	X	
14	C3	Parque de las Aguas. E14	24 Horas	X	-	X	
15	C3	Hatillo. E15	24 Horas	X	-	X	Se hizo la lectura del limnómetro.
16	C3	Papelsa. E16	Puntual Integrado	- X	1	X	
17	C3	Popalito. E17	Puntual Integrado	- X	-	X	
18	C3	La Pradera. E18	Puntual Integrado	- X	-	X	
19	C3	Eade. E19	Puntual Integrado	- X	1	X	La muestra se tomó en EADE y el caudal en Río Grande (por balance de masas se obtiene el caudal del río).
20	C3	Puente Gabino. E20	Puntual Integrado	- X	-	X	Se hizo la lectura del limnómetro

6.5 RESULTADOS COMPONENTE CALIDAD DEL AGUA.

La Fase 1 del proyecto corresponde a un primer acercamiento que conduce a comprender la dinámica del río. Es menester resaltar que gran parte de los monitoreos se realizaron en unas condiciones climáticas correspondientes a lluvias, lo cual no permite tener una observación detallada de las condiciones del río durante periodos prolongados de tiempo seco. Igualmente es importante relevar que estas condiciones climáticas favorecen el incremento en la dispersión de los datos en el tiempo (entre muestreos) para algunas variables dependiendo de la intensidad de las lluvias.

Dado lo anterior, se hace necesario intensificar las actividades de monitoreo en cantidad y calidad de agua sobre el río Medellín y sus afluentes, lo cual podrá lograrse en una segunda Fase del proyecto con la consecución de equipos que midan parámetros específicos en las estaciones globales propuestas en esta primera Fase. Lo anterior es con el fin de tener mediciones en tiempo real con periodos de frecuencia muy bajos que puedan dar una idea cierta sobre la calidad y cantidad de agua, permitiendo replicar así la información en series de estaciones, en la medida que los equipos estén disponibles, logrando enriquecer el análisis estadístico global y aun el específico en las diferentes estaciones ya mencionadas.

Con relación a los muestreos generales, se observó que existen diferencias considerables, tanto entre las estaciones ubicadas a lo largo del cauce del río como en entre los días de muestreo, en las concentraciones encontradas para las variables oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, todos los sólidos, los nutrientes, la DQO, la DBO₅, algunos metales pesados, el perifiton y los macroinvertebrados acuáticos. No obstante, es necesario continuar evaluando las demás variables, que aunque no evidencian un cambio importante en el espacio y en el tiempo, como es el caso de los coliformes, permiten obtener información sobre el estado de calidad del agua. Adicionalmente, se resalta la importancia de incorporar otras variables, que aporten mas criterios de evaluación y modelación para la calidad del agua del río, siendo importante resaltar entre estas los detergentes, el nitrógeno y el fósforo en todas sus formas, ya que estos presentan una importancia sanitaria considerable para el estudio.

En general, no se observaron diferencias importantes para la mayoría de las variables analizadas respecto a las mediciones efectuadas en las márgenes izquierda, derecha y centro del cauce, a excepción de lo registrado en las estaciones Antes y Después de San Fernando (E5 y E6 respectivamente), cuyo comportamiento se muestra en la Figura 1. En estas estaciones se presentaron variaciones importantes en las características organolépticas y fisicoquímicas del agua, mostrando esto el impacto tan importante que generan algunas descargas puntuales sobre la calidad del río.

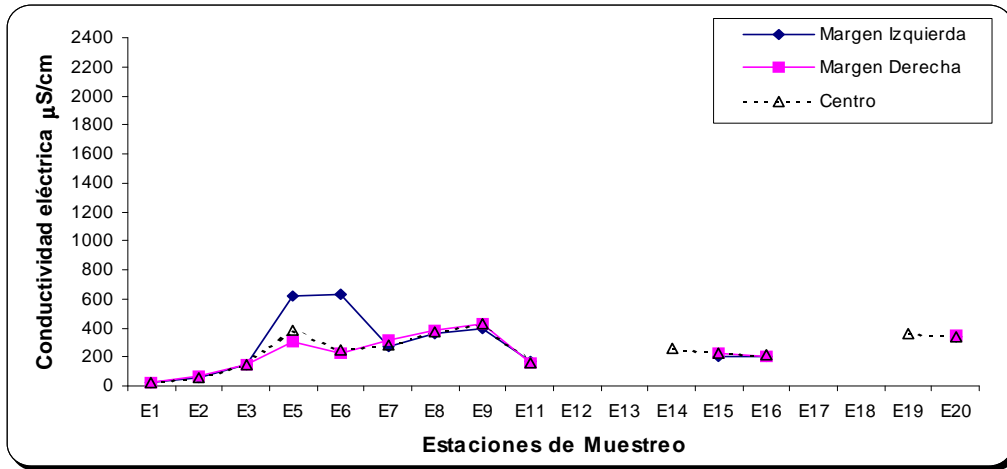


Figura 1 Conductividad Eléctrica Abril 14 y 15 de 2004.

Con respecto a la variación nictemeral, se presentaron cambios importantes en los valores obtenidos para algunas variables como la conductividad eléctrica, la DQO, la DBO₅ y los sólidos suspendidos (observar Figura 2, Figura 3 y Figura 4), permitiendo comprender los efectos de distribución y transporte de las cargas contaminantes al interior del cauce del río. Cabe resaltar que las mayores variaciones registradas en las concentraciones obtenidas para los diferentes parámetros analizados se dieron en las horas de la noche en la estación Antes de San Fernando (E5), para los niveles de la DQO y la DBO₅, situación que se ve influenciada por vertimientos directos aparentemente no incorporados al sistema de colectores e interceptores.

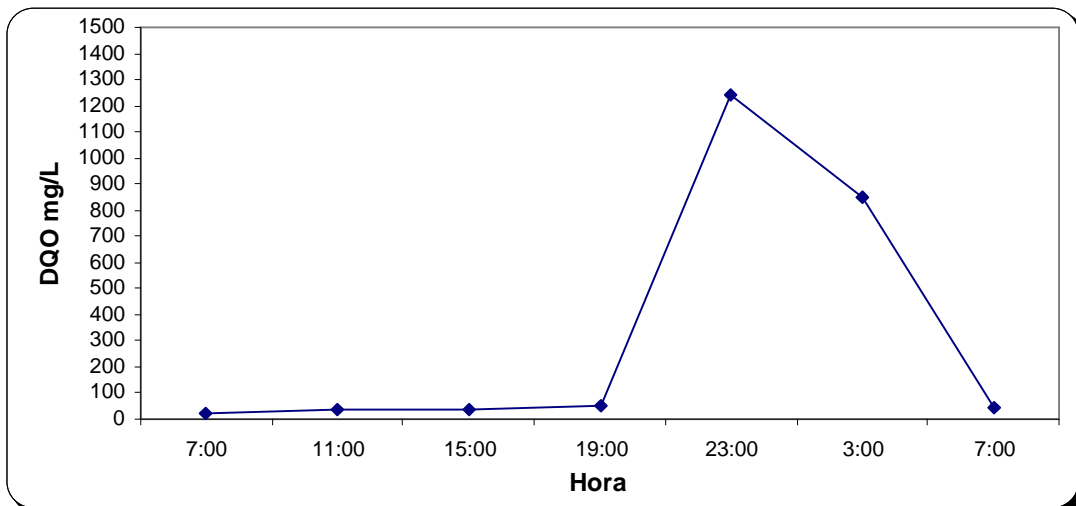


Figura 2 Variación Nictemeral de la DQO en la estación Antes de San Fernando los días Julio 27 y 28 de 2004

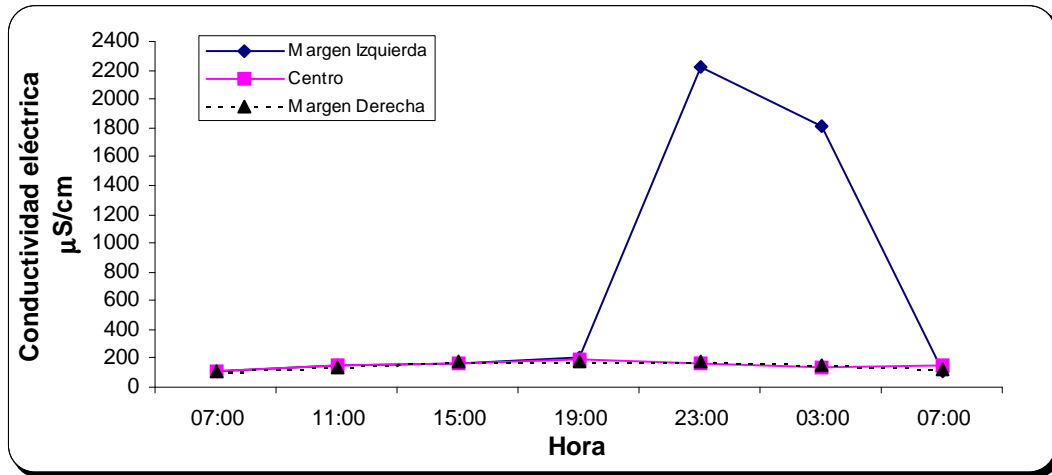


Figura 3 Variación Nictemeral de la Conductividad Eléctrica en la estación Antes de San Fernando los días Agosto 18 y 19 de 2004.

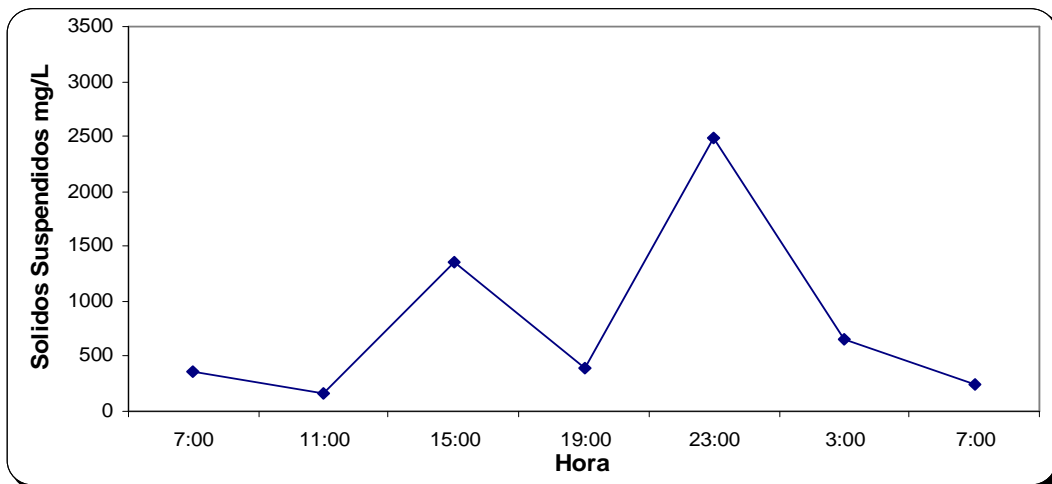


Figura 4 Variación Nictemeral de los Sólidos Suspendidos en la estación Aula Ambiental los días Abril 14 y 15 DE 2004.

En el Río Medellín se lograron detectar algunos pulsos de contaminación que son generados por aportes puntuales, pero dados los tiempos de viaje de los contaminantes y la diferencia en las horas de toma de muestras entre las estaciones, solo se pudieron registrar los efectos de estos en algunos puntos de monitoreo (ver Figura 4).

Los sitios identificados como los más críticos, debido a los bajos niveles de calidad encontrados en sus aguas, corresponden a las estaciones: Antes (E5) y Después (E6)

de San Fernando, Puente Acevedo (E9), Parque de las Aguas (E14) y Papelsa (E16). Por lo tanto, en estas estaciones es necesario hacer una evaluación mas completa de las descargas industriales o de otro tipo que aún vierten sus aguas al cauce del río, lo mismo que las cuencas aportantes cercanas a estos lugares.

En general, a medida que se avanza en el sentido de la corriente del río, se presentaron, hacia la parte central, incrementos significativos en las concentraciones de variables como: nitrógeno total, fósforo total, turbiedad, DBO₅, DQO, cloruros, hierro total, sólidos totales, sulfatos y conductividad eléctrica, (ver Figura 5), mientras que, para este mismo sector, el oxígeno disuelto disminuyo notoriamente (ver Figura 6). Se debe destacar que los máximos valores reportados para las variables antes mencionadas se presentaron en la estación Puente Acevedo (E9), estación en la cual también se presentaron las mayores variaciones en las concentraciones de los parámetros analizados respecto a los diferentes días de monitoreo (ver Figura 5, Figura 6). Esta situación se debe principalmente a que en esta parte del río ya se han realizado las descargas de las aguas residuales, principalmente industriales, de la zona Sur y Centro, adicionalmente en el sector de Moravia, ubicado aguas arriba, se ubican las descargas de los interceptores centrales oriental y occidental de Empresas Públicas de Medellín (ver Foto 1), los cuales alteran significativamente las condiciones de calidad de las aguas de dicha estación. Adicionalmente esta estación se encuentra afectada por el vertimiento de varias quebradas ubicadas en las zonas nororiental y noroccidental del municipio de Medellín, las cuales operan como colectores naturales de las aguas residuales domésticas generadas en dichas zonas y de las aguas lluvias (ver Foto 2).

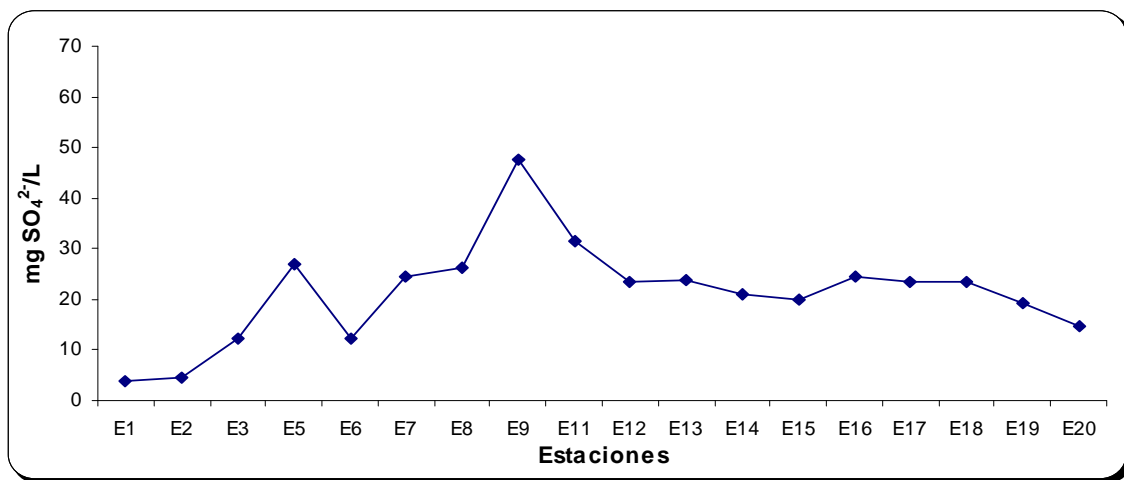


Figura 5 Sulfatos en el perfil del río durante el día Septiembre 8 DE 2004.



Figura 6 Oxígeno disuelto en el perfil del río durante el día 8 de septiembre de 2004.



Foto 1. Descarga de interceptores centrales oriental y occidental a la altura de Moravia



Foto 2. Descarga de aguas residuales sobre la quebrada La Herrera ubicada en la Zona Nororiental.

Contrario a lo que se esperaba, en el tramo EADE (E19) – Puente Gabino (E20) no se observó una recuperación de la calidad de las aguas del río Medellín, marcada por la entrega de las aguas de río Grande, sino que por el contrario algunas variables como: el fósforo total, los fosfatos, el hierro total, los nitratos, sólidos totales y los cloruros registraron aumentos considerables (ver Figura 7), exceptuando el día domingo 29 de Agosto del 2004.

Es necesario precisar que rutinariamente los caudales en términos de m^3/s , presentan altas fluctuaciones, oscilando entre 1 y 50 unidades de caudal; así mismo, no puede decirse con seguridad que esta descarga sea precisamente de aguas limpias (ver Foto 3), dado que pueden provenir de aguas decantadas o pueden ser aguas con altos grados de intervención, tales como purgas de sistemas e incluso el hecho de que hayan fluctuaciones de caudal genera arrastres de sólidos y de carga que eventualmente se puede reflejar en los monitoreos sin dejar de desconocer que estos muestreos son muy puntuales en el tiempo y pueden no reflejar el fenómeno en su real magnitud.



Foto 3. Descarga de Río Grande al río Medellín

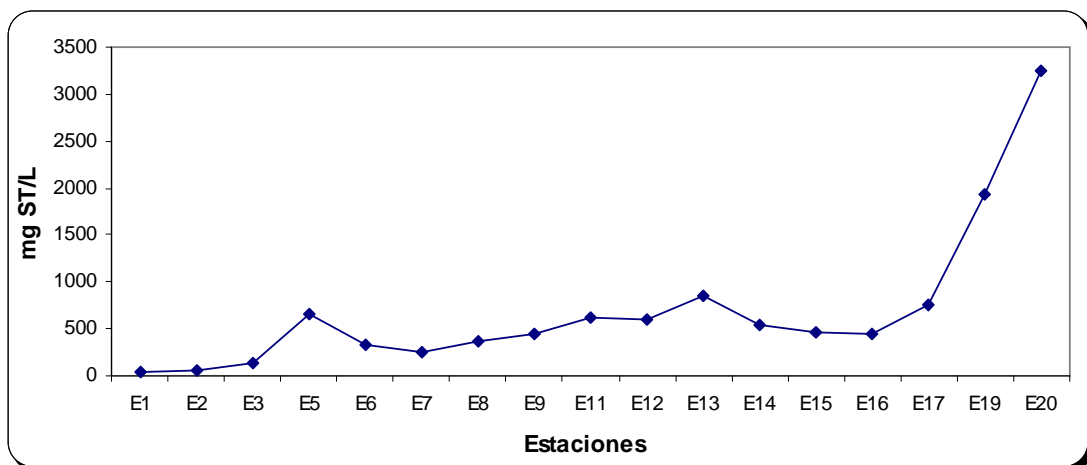


Figura 7 Sólidos Totales en el perfil del río durante la campaña del 18 de Agosto.

La irregularidad observada en el comportamiento de la mayoría de las variables medidas el 14 de Abril es ocasionada por condiciones de lluvia intensa e intermitente que se presentó la noche del 13 de Abril y el mismo día del monitoreo, estas condiciones generaron diferentes efectos según la hora de toma de muestra en cada estación. Cabe resaltar que esta fecha de monitoreo corresponde a un periodo de transición de tiempo seco a tiempo lluvioso, lo que produce un mayor efecto en la variación de la calidad del agua.

Los sólidos en el río mostraron altas concentraciones, principalmente en los monitoreos donde hubo presencia de lluvias, ya sea en la noche anterior o durante la campaña de muestreo, consecuencia del arrastre de material por aguas de escorrentía y a las crecientes en las diferentes quebradas, lo que hace que se presente resuspensión y transporte de material sedimentado; por lo tanto las concentraciones de los sólidos totales fijos en la mayoría de los casos fue superior al contenido de material orgánico o sólido volátil, debido a la alta cantidad de material inerte y arenas presentes en el cuerpo de agua.

Para el análisis de cargas y vertimientos, se dificultó distinguir claramente la época lluviosa de la época seca debido a los regímenes de lluvia que se presentaron durante el año, por lo tanto para la selección de los escenarios correspondientes a tiempo seco, tiempo lluvioso y tiempo de transición, entre tiempo seco y tiempo lluvioso, se tomó como variable de análisis, los **caudales medidos o calculados** para las diferentes estaciones.

Como resultado se obtuvo que el muestreo correspondiente al 29 de Agosto de 2004 fue el más representativo del tiempo seco, debido a que en esta fecha se presentaron los caudales más bajos para la mayoría de las estaciones. Para el análisis en el período de lluvia se seleccionó el muestreo del 18 de Agosto de 2004 en el cual se reportaron los máximos caudales; mientras que para el periodo de transición se tomó como muestreo representativo el realizado el día 14 de Julio de 2004, donde se obtuvieron caudales medios.

En los tres escenarios analizados (lluvias, tiempo seco y transición) se resalta que en todas las estaciones los valores de DQO sobrepasan considerablemente los obtenidos para la DBO_5 (ver Figura 8 y Figura 9), lo que indica que la materia orgánica presente en el Río, no es fácilmente oxidable por sistemas biológicos.

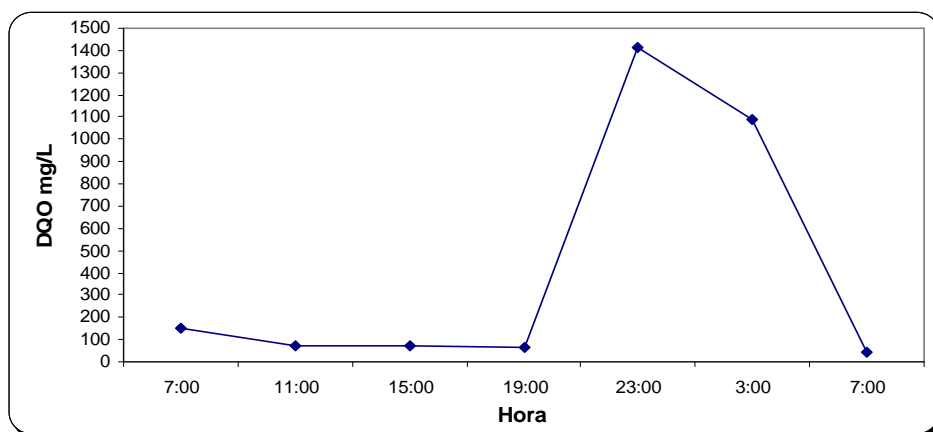


Figura 8 Variación Nictemeral de la DQO en la estación Antes de San Fernando (E5) los días 18 y 19 de Agosto de 2004.

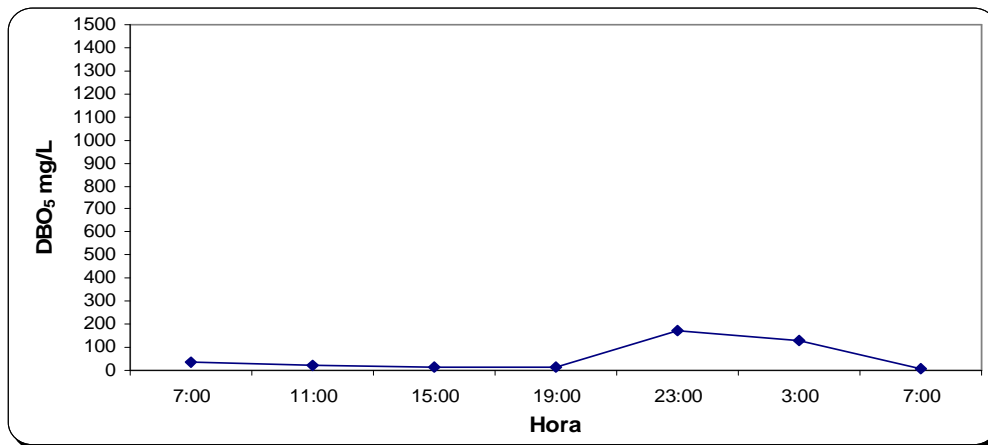


Figura 9 Variación Nictemeral de la DBO₅ en la estación Antes de San Fernando (E5) los días 18 y 19 de Agosto de 2004.

Las diferencias más evidentes en el comportamiento de las cargas de las variables analizadas en los muestreos realizados en tiempo seco, lluvioso y de transición fueron más evidentes en el último tramo (ver Figura 10), donde los caudales son mayores, al igual que sus variaciones.

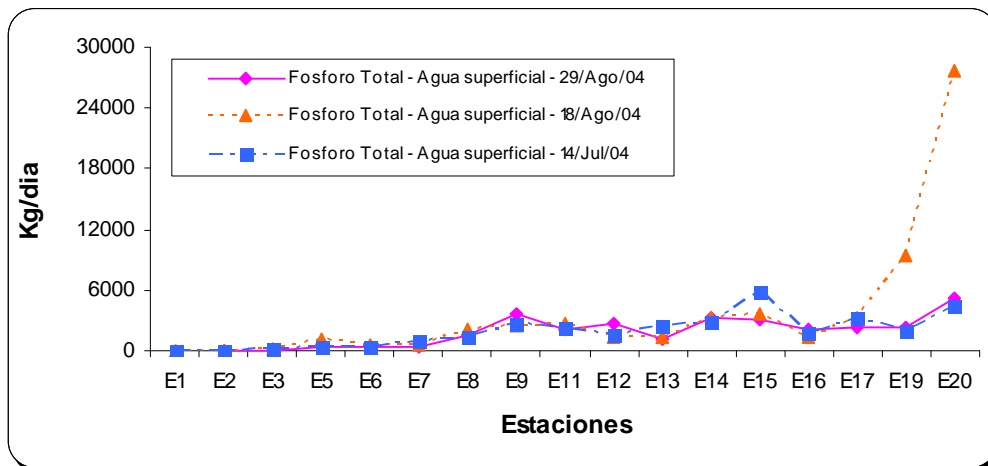


Figura 10 Carga de Fósforo durante los muestreos de tiempo seco, lluvioso y de transición.

La tendencia de la conductividad eléctrica fue creciente a lo largo del río como consecuencia de las diferentes descargas, lo que se destacó para todos los muestreos realizados. La variación más amplia de los datos entre muestreos (dispersión de resultados), se presentó en la estación Hatillo (E15), la cual esta influida por la descarga de la quebrada El Chocho (ver Foto 4), que de acuerdo a los comentarios realizados por la comunidad y las observaciones de las características organolépticas

hechas en campo, recibe en forma intermitente la descarga de avícolas ubicadas en la zona. Igualmente la calidad del agua en esta estación se ve influenciada por la descarga, también intermitente, de la Central Hidroeléctrica Tasajera, la cual es, finalmente, la que genera mayores cambios en la conductividad eléctrica registrada para el río Medellín (ver Figura 11).

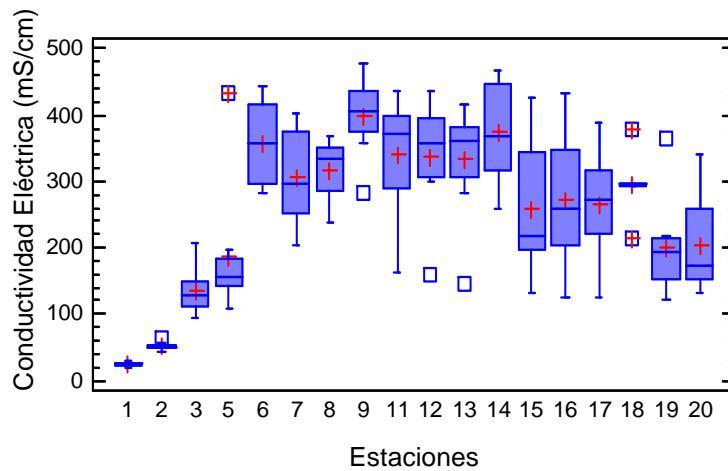


Figura 11 Diagrama de cajas esquemáticas de la variable conductividad eléctrica en las estaciones de muestreo en el río Medellín.



Foto 4. Quebrada El Chocho a su llegada al río Medellín, ubicada en el corregimiento de Hatillo.

Las variables que presentaron una mayor variación, tanto a lo largo del río como en el tiempo (entre días de muestreos) fueron el oxígeno disuelto y la conductividad eléctrica. Como se mencionó anteriormente, esta situación obedece a que el río presenta una gran intervención antrópica en la mayoría de su cuenca, recibiendo numerosas descargas, de las cuales algunas incrementan los niveles de los parámetros analizados, mientras que otras favorecen la dilución de estos. Igualmente, se deben considerar los cambios en las condiciones climáticas, presentes en la cuenca del río, como un factor modificador de las concentraciones de dichos parámetros, dado que esta posee varios microclimas que afectan de distinta manera los tramos del río.

De acuerdo a los resultados del análisis de componentes de varianza (ver Tabla 4), para gran parte de las cargas estudiadas, el factor que tiene mayor influencia en la variabilidad de los datos es el tiempo (cambio en la fecha de toma de muestra), lo cual indica que las condiciones del río, en cuanto a las concentraciones de los parámetros en estudio, varían considerablemente para cada día de monitoreo. Cabe anotar, como se ha mencionado anteriormente, que a parte de las descargas, los cambios en las condiciones climáticas afectan las características fisicoquímicas del río, reflejándose principalmente en las cargas de: DBO₅, DQO, nutrientes y sólidos en general.

Tabla 4. Análisis de componentes de varianza.

VARIABLE	INFLUENCIA DE FACTORES (%)	
	ESTACIÓN	MUESTREO
Oxígeno disuelto	53.21	46.79
Conductividad eléctrica	66.36	33.64
Carga de Nitrógeno total	8.62	91.38
Carga de Fósforo total	37.96	62.05
Carga de Hierro total	12.34	87.66
Carga de Sólidos totales	11.38	88.62
Carga de Sólidos Suspendidos Totales	9.75	90.25
Carga de Sólidos Disueltos Totales	11.08	88.92
Carga de Sólidos Suspendidos Volátiles	21.37	78.63
Carga de DQO	11.12	88.88
Carga de DBO ₅	30.63	69.37

En el muestreo nictemeral, para las variables conductividad eléctrica, carga DBO₅, DQO y SST, el factor que influye con más peso en la variabilidad de los datos (ver Tabla 5) corresponde al periodo de tiempo que dura el muestreo (24 horas), lo que indica que estas cargas cambian de acuerdo a los impulsos generados por los vertimientos derivados de las diferentes actividades desarrolladas en la cuenca del río, es decir, la calidad del río alcanza a ser afectada por las descargas intermitentes y por la interacción que se dan entre ellas, además de la influencia generada por los procesos de remoción y autorecuperación presentados en el cauce del río, los cuales dependen de algunas variables ambientales que cambian durante el día (temperatura, precipitación, etc.).

Tabla 5. Análisis de varianza en el diseño anidado² para el estudio del nictemeral del río.

VARIABLE	INFLUENCIA DE FACTORES (%)		
	ESTACIÓN	MUESTREO	HORA
Oxígeno disuelto	74.49	3.60	21.91
Conductividad eléctrica	26.60	16.11	57.30
SST	8.90	16.43	74.67
DQO	5.49	3.85	90.66
DBO ₅	0.00	32.39	67.61

Cabe destacar que contrario a lo que se pensaba por la supuesta disminución de la actividad industrial y los ritmos de vida de la población en los días festivos, las características fisicoquímicas del río durante el muestreo realizado el domingo 29 de agosto del 2004 no mejoraron notoriamente, lo cual indica que gran parte de la contaminación en el río es aportada por el vertimiento de las aguas residuales domésticas, ya sea en forma directa o a través de sus afluentes, hecho se vio reflejado en los incrementos de las concentraciones de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo los cuales son característicos de este tipo de descargas.

Según la información suministrada por el Área Metropolitana sobre los vertimientos de aguas residuales industriales en el Valle de Aburrá, son pocos los vertedores que aportan cargas contaminantes considerables por parte del sector industrial. Las cargas aportadas por el sector residencial, se ven reflejadas en aquellas quebradas que funcionan como sistemas de recolección y transporte de aguas residuales para los barrios y/o empresas ubicados en los sectores centro-oriental, centro-occidental, nor-oriental y nor-occidental de Medellín, principalmente, además de las quebradas del municipio de Bello, las cuales presentan características similares.(ver Foto 5 y Foto 7)

Se resalta la necesidad de ejercer un control más estricto, por parte del Área Metropolitana, sobre los vertimientos generados por pequeñas, medianas y grandes industrias (ver Foto 6). Se llama la atención igualmente en el control que se debe hacer sobre Empresas Públicas de Medellín en sus diferentes descargas o vertimientos entre los que se encuentran: rebose y efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales, Central hidroeléctrica Tasajera, Aguas de lavado de las plantas de potabilización, Río Grande y la descarga de colectores e interceptores centrales de aguas residuales oriental y occidental. Es por ello entonces, que una prioridad dentro de la propuesta de Gestión Ambiental de la Red es un programa de control y vigilancia de vertimientos.

² Entiendase por diseño anidado o jerarquico si para un experimento con factores multiples, los niveles de uno de los factores (por ejemplo el factor B), son similares pero no identicos a los diferentes niveles de otro factor (por ejemplo A), en este caso los niveles del factor B estan anidados bajo los niveles del factor A



Foto 5. Descarga Industrial con alto contenido de color verdadero en la quebrada El Hato en el municipio de Bello



Foto 6. Descarga ubicada aproximadamente 100 metros margen izquierdo aguas arriba de la estación puente de Guayaquil (E7)



Foto 7. Descarga de un colector de aguas residuales sobre la quebrada La Madera en el municipio de Bello

Las condiciones naturales del cauce, a partir de la estación Metromezclas (E12), la disminución de los aportes de aguas residuales al cauce del río y los efectos de dilución que causan las quebradas que descargan sus aguas en este tramo del río, las cuales presentan, en general, aguas de buena calidad fisicoquímica, favorecen las reducciones de carga de la mayoría de los parámetros analizados, dicha situación se presenta generalmente hasta la estación Papelsa (E16), a partir de la cual se incrementan nuevamente las concentraciones de algunos parámetros, debido, entre otros factores, al encañonamiento del Río (ver Foto 8), el cual genera grandes velocidades y turbulencia en la corriente, aumentando así la resuspensión y la socavación del cauce. Además se debe considerar que el aporte de Río Grande ocasiona que los valores de carga se eleven considerablemente en la estación Puente Gabino (E20), principalmente en el periodo de lluvias.



Foto 8. Encañonamiento del cauce del Río a la altura de la estación Popalito (E17)

En general, las concentraciones de coliformes fecales y totales a través del cauce del río Medellín son extremadamente altas, esto es atribuido a que en su cauce se dan innumerables descargas domésticas, siendo la parte alta de la cuenca (estaciones de monitoreo San Miguel. E1, Primavera. E2) las menos afectadas por este tipo de descargas.

De todos los organismos colectados en el proyecto, los oligoquetos (Foto 9) sobresalen por el mayor número de individuos y por ser los invertebrados de más amplia distribución espacial y temporal. Cabe resaltar que la contaminación del agua produce un descenso de la densidad de organismos, tanto por establecer condiciones rigurosas que pocas especies pueden resistir, como estimular el fuerte desarrollo de unas pocas especies en unos ambientes altamente fluctuantes e inestables.



Foto 9. Clase Oligochaeta encontrada en el río Medellín

La estructura de las comunidades biológicas es la interacción de las características químicas e hidráulicas que confluyen en un punto determinado, es aquí donde es importante resaltar que la canalización del río en buena parte de su recorrido influye notoriamente en la posibilidad de asentamientos de comunidades biológicas por la falta de un sustrato adecuado para su colonización y por las condiciones de arrastre que se favorecen con la canalización.

La comunidad de algas perifíticas encontrada en el río Medellín (ver Foto 10), es una comunidad pobre en riqueza de especies, factor esperado debido a las condiciones de estrés ambiental al que esta sometido este sistema, lo que fue evidenciado por las diferencias del número de organismos registrados en la estación San Miguel y relativamente mostrado también por la estación Primavera, con respecto a las demás estaciones.



Foto 10. *Melosira* sp. (Aumento 400 X).

El Río Medellín visto desde el estudio de las algas perifíticas es un ambiente como cualquier otro ambiente lótico, muy dinámico, sumado a ello se encuentra el gradiente de contaminación existente y la compleja dinámica de sedimentos que presenta este sistema; es excepcional observar como responde en medio de la inestabilidad física y química la microbiota algal a los factores que influyen el río en general, las evidencias a grandes rasgos más claramente discernibles que se encontraron estuvieron relacionadas con las diferencias entre el número de taxa registrados, con los cambios en densidad cualitativa y asentamiento de otras formas después de la época lluviosa y con la respuesta de los organismos al tipo de sustrato disponible para la colonización. Esto demostró que la comunidad de algas perifíticas respondió de una manera rápida a los cambios a los que permanentemente esta sometido el río Medellín y que bajo ese contexto fue una comunidad de estudio pertinente en el monitoreo espacial y temporal del río.

Un factor importante que afecta la calidad fisicoquímica y las características organolépticas de las quebradas, es el desarrollo urbanístico desordenado que se lleva a cabo en los municipios de Bello y Medellín (ver Foto 11), principalmente en las partes altas y medias de las quebradas y que genera cantidades considerables de aguas residuales que son difíciles de captar en sistema de colectores. En contraste, las quebradas ubicadas en el municipio de Barbosa y parte de Girardota, favorecen los procesos de dilución y autorecuperación debido a que en general poseen buena calidad fisicoquímica; (ver Foto 12) aunque los caudales que ellas aportan son bajos comparados con el del río en el sector donde estas desembocan.



Foto 11. Quebrada La Malpaso.



Foto 12. Quebrada Piedra Gorda.

Aunque durante el proyecto en total se monitorearon 37 quebradas, es menester llamar la atención en la importancia que tiene ampliar este monitoreo a las demás quebradas y vertimientos importantes, tales como Río Grande, Tasajera e Interceptores centrales oriental y occidental, entre otros; no solo de una forma puntual sino evaluarlas de una manera continua permitiendo de esta manera obtener unos datos mas reales del comportamiento y la influencia de estos vertimientos y descargas sobre la calidad del río. Igualmente se resalta nuevamente la importancia de ampliar las variables medidas durante esta primera fase.

Como característica común en la mayoría de las quebradas, se evidencio la presencia de residuos sólidos (ver Foto 13 y Foto 14), lo que muestra una ausencia de compromiso por parte de la comunidad con las fuentes de agua y falta de conciencia ciudadana.

Llama la atención que en algunas quebradas se han tratado de recuperar las características fisicoquímicas y organolépticas con la construcción de los colectores, sin embargo, este trabajo se debe complementar tratando de cambiar la actitud de la comunidad en cuanto al manejo de los residuos sólidos. Frente a esta situación la Autoridad Ambiental debe tomar las medidas necesarias para minimizar el impacto que se esta generando en las fuentes de agua por el vertimiento de residuos sólidos, como por ejemplo el desarrollo de campañas intensivas de educación ambiental.



Foto 13. Residuos sólidos acumulados en el cauce de la quebrada La Herrera



Foto 14. Residuos sólidos acumulados en el cauce de la quebrada La Bermejala.

Gran parte de la información de calidad de agua obtenida durante el proyecto se resume en la elaboración de un Índice de Calidad. A continuación se presentan las pautas para el desarrollo de la metodología con la que se realizó el cálculo del índice de Calidad (**ICA-RED RÍO**), obtenido a partir de la información generada en la primera fase del proyecto: *“Diseño y Puesta en Marcha de la Red de Monitoreo Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del Río Medellín en Jurisdicción del Área Metropolitana”*. Este índice se adaptó a las condiciones propias del río Medellín. Por ello se tomo como referencia la estación San Miguel (E1), que presenta una intervención antrópica baja, comparada con el resto de la cuenca, lo que permite realizar comparaciones con las condiciones del Río en sus diferentes transectos y evaluar de ésta forma, el grado de contaminación que puede alcanzar de acuerdo con la intervención que recibe a lo largo de su cuenca.

- **Selección de Variables respuesta**

Cabe destacar que todas las variables medidas son importantes, no obstante, de acuerdo con los resultados obtenidos en los diferentes muestreos realizados durante éste proyecto, se seleccionaron algunas de ellas por considerarse hasta el momento las más representativas y las de mayor importancia sanitaria, ya que reflejan el comportamiento del río en la medida en que en su recorrido se manifiesta en ellas el grado de alteración de la corriente. Estas variables son: DQO, DBO₅, Sólidos Totales, Sólidos Totales Fijos, Sólidos Suspendidos Totales, Conductividad Eléctrica, Nitrógeno Total, Fósforo Total y Macroinvertebrados Acuáticos.

- **Selección de Rangos**

Se realizó el cálculo de la Media Aritmética de las variables en cada estación, definiéndose los valores máximos y mínimos, a partir de los cuales se seleccionaron los rangos de variación.

El procedimiento para cuantificar la calidad del río con base en los Macroinvertebrados Acuáticos, se llevó a cabo agrupando en cuatro categorías las estaciones de muestreo del proyecto Red Río, de acuerdo con el número de taxa y la caracterización ambiental de los macroinvertebrados acuáticos según el grado de saprobiedad del ambiente.

- **Valor**

Este correspondió a una calificación entre cero y uno (0 - 1), para cada variable y de acuerdo con el rango de concentración en que se encuentra. Uno correspondió a la menos contaminada y cero a la de mayor contaminación. Para asignar la calificación de una **concentración** determinada, se aplicó interpolación lineal teniendo en cuenta las concentraciones extremas de cada **rango** en el que se ubicó el parámetro respectivo y los rangos asumidos para la asignación del **valor** (Tabla 6)

Tabla 6. Índice de calidad de la Red de Calidad del Río Medellín (ICA) adaptado para el proyecto RED RÍO.

ICA-RED RIO							
DBO		DQO		Nitrógeno Total		Fósforo Total	
Rango	Valor	Rango	Valor	Rango	Valor	Rango	Valor
≤2	1	≤12	1	≤0,8	1	≤0,05	1
2 - 29	1,0-0,8	12 - 92	1,0-0,8	0,8 - 5,8	1,0-0,8	0,05 - 0,75	1,0-0,8
29 - 56	0,8-0,5	92 - 172	0,8-0,5	5,8 - 10,8	0,8-0,5	0,75 - 1,45	0,8-0,5
56 - 83	0,5-0,2	172 - 252	0,5-0,2	10,8 - 15,8	0,5-0,2	1,45 - 2,15	0,5-0,2
>83	0,2-0,0	>252	0,2-0,0	>15,8	0,2-0,0	>2,15	0,2-0,0

ICA-RED RIO							
ST		STF		SST		Conductividad Eléctrica	
Rango	Valor	Rango	Valor	Rango	Valor	Rango	Valor
≤40	1	≤30	1	≤9	1	≤25	1
40 - 320	1,0-0,8	30 - 260	1,0-0,8	9 - 207	1,0-0,8	25 - 150	1,0-0,8
320 - 600	0,8-0,6	260 - 490	0,8-0,6	207 - 405	0,8-0,6	150 - 275	0,8-0,5
600 - 880	0,6-0,3	490 - 720	0,6-0,3	405 - 603	0,6-0,3	275 - 400	0,5-0,2
>880	0,3-0,0	>720	0,3-0,0	>603	0,3-0,0	>400	0,2-0,0

Para los Macroinvertebrados Acuáticos, se le asignó un **valor fijo** a cada una de las cuatro clases en las que se agruparon las estaciones de 1.0 en la primera, 0.7 la segunda, 0.45 la tercera y 0.15 para la cuarta categoría.

La primera categoría está constituida por aquellas estaciones que presenten **las mejores condiciones de calidad de agua**.

La segunda categoría se agruparon las estaciones con **aguas de buena calidad a medianamente contaminadas**.

La tercera categoría corresponde a **aguas medianamente contaminadas a muy contaminadas**.

Y por último la cuarta categoría representa **aguas muy contaminadas**.

Macroinvertebrados		Valor
1	Aguas de Buena Calidad	1
2	Aguas de buena calidad a medianamente contaminadas	0,7
3	Aguas medianamente contaminadas a muy contaminadas	0,45
4	Aguas muy contaminadas	0,15

- **Factor de Ponderación**

Se seleccionaron factores de ponderación, en el que se asignó el mayor factor de ponderación a la variable de mayor influencia en todo el trayecto analizado del río. La

suma de los factores de ponderación fue Diez (10), siendo ésta, la máxima calificación del índice, e indica la mejor calidad de agua en el cauce.

Las variables que permitieron evaluar la calidad del río, se agruparon de acuerdo con su naturaleza, de la siguiente forma:

1. *DQO y DBO₅*
2. *Nitrógeno Total y Fósforo Total*
3. *Conductividad Eléctrica*
4. *Sólidos Totales, Sólidos Totales Fijos y Sólidos Suspendidos Totales*
5. *Macroinvertebrados Acuáticos.*

De ésta forma, **se asignaron cinco factores de ponderación representados por las letras A, B, C, D y E, que tienen unos valores de 3.0, 2.0, 2.0, 1.5 y 1.5** respectivamente, en relación con la calidad del Río.

El Índice de Calidad del Río Medellín o ICA-RED RÍO corresponde al resultado de la multiplicación de los valores de cada grupo de variables entre sí y por su respectivo factor de ponderación, acto seguido, se suman cada una de estos productos parciales, lo que dará como resultado la calificación **ICA-RED RÍO** obtenida para cada estación, así:

$$ICA_REDRIO = A \times (DQO \times DBO_5) + B \times (NT \times P) + C \times (Cond.) + D \times (ST \times STF \times SST) + E \times (Macro)$$

Con base en el cálculo del índice de calidad se establecieron cinco categorías de criticidad para la calidad del agua donde la Criticidad muy baja o poco relevante corresponde a una buena calidad del agua y la Criticidad muy alta se relaciona con una mala calidad del agua o agua muy contaminada.

Denominación	Código	ICA RED RIO
Criticidad Muy Baja o poco relevante	Verde	8 - 10
Criticidad Baja	Verde vivo	6 - 8
Criticidad Media	Amarillo	4 - 6
Criticidad Alta	Naranja	2 - 4
Criticidad Muy Alta	Rojo	0 - 2

Llevando a un plano los resultados de esta categorización se obtuvo la Figura 12, en la cual se observa que el sector más crítico en cuanto a calidad del agua comprende el

tramo aguas abajo de la estación Aula Ambiental (E8) hasta antes de la estación Puente Girardota (E13); además de otro pequeño tramo en el sector de la estación Parque de las Aguas (E14). La calidad del agua en estos sectores esta influenciada por la descarga de los interceptores centrales oriental y occidental de Empresas Publicas de Medellín los cuales vierten sus aguas al río Medellín en el sector de Moravia, algunas quebradas del centro y norte de Medellín y del municipio de Bello así como los vertimientos de aguas residuales generadas en los municipios del norte del Valle de Aburrá, además de otros factores que ya fueron mencionados a lo largo del informe.

La zona menos crítica corresponde al tramo entre la estación San Miguel (E1) y un sector intermedio comprendido entre las estaciones Primavera (E2) y Ancón Sur (E3), debido a que se parte del hecho que la estación San Miguel (E1) es la que menos intervención antrópica presenta y es la referencia para el cálculo del ICA en todas las estaciones.

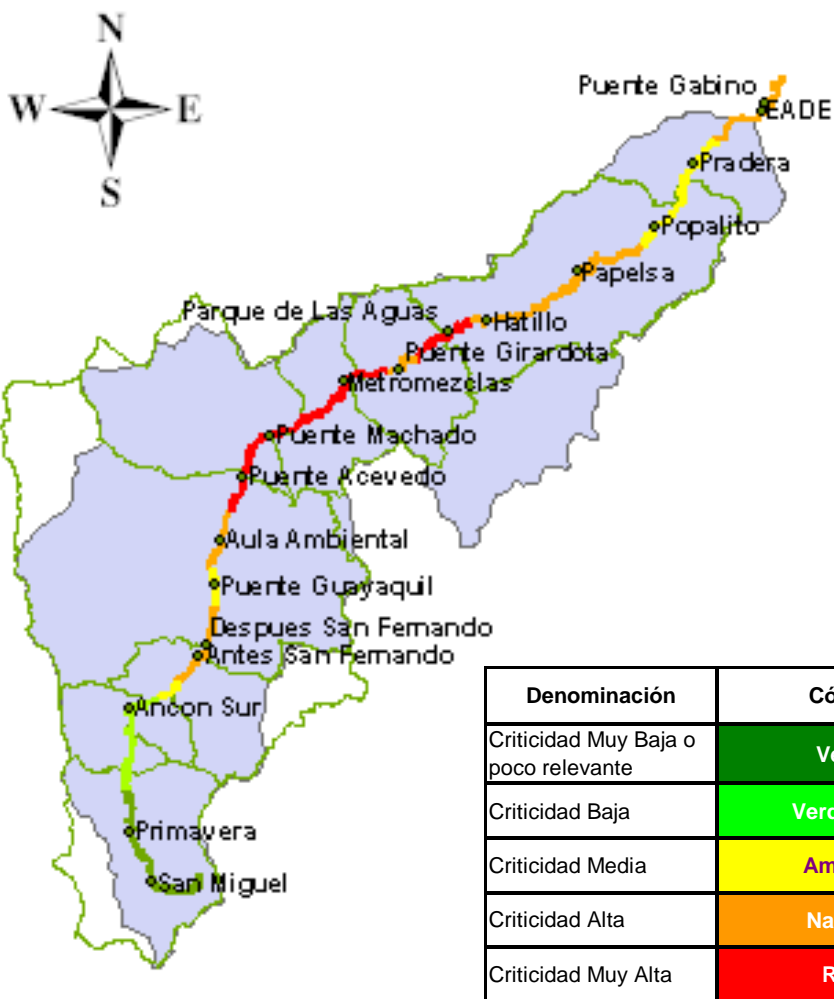


Figura 12. ICA Red Río

El ICA Red Río presentado corresponde a condiciones propias del río para los muestreos realizados el año 2004, donde las variables seleccionadas fueron las mas representativas para este año de monitoreo, por lo cual nuevos estudios deberán seleccionar las variables mas representativas de estos, lo mismo sucede con los factores de ponderación ya que estos hablan del peso relativo de cada grupo de variables en cuanto a su significado en términos de calidad y cada estudio deberá determinar cuales son las variables que mas significado tienen en este sentido. Además la calidad del agua del Río Medellín varía según las condiciones climáticas (tiempo seco, tiempo lluvioso y transición), por lo tanto se debe calcular el ICA para cada una de estas condiciones climáticas, indicando que se requiere dar continuidad a los monitoreos para obtener información característica de cada condición.

Se enfatiza que el ICA Red Río incluye la variable biológica macroinvertebrados acuáticos como indicadora de calidad del agua, esto es significativo ya que en el análisis de un ecosistema acuático es importante tener en cuenta no solo las características físicas y químicas, sino también las biológicas, debido a que todo ecosistema esta afectado por interacción entre los factores físicos, químicos y biológicos.

6.6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Por las condiciones cambiantes de la dinámica del río Medellín, se recomienda que la red de monitoreo sea lo mas flexible posible, se deben conservar algunas estaciones de referencia, pero otras deben ser móviles para adecuarse a los cambios en la configuración del sistema hídrico y de descargas al río Medellín.

Se recomienda que las estaciones pivote sean las identificadas como Metromezclas, Puente Barranquilla (Aula Ambiental) y Ancón Sur. La estación Puente Acevedo.

Aunque los procesos de medición continua y automática pueden ser deseables, requieren de una infraestructura compleja y pone en riesgo los equipos, por posible vandalismo o por inundaciones del río. Por esto, se recomienda que en la estación Puente Barranquilla se ubiquen equipos de medición automáticos, pues esta estación es de fácil acceso y cuenta con vigilancia; en las otras estaciones los equipos de medición deben ser relevados del lugar, en el caso de mediciones continuas se debe proveer de seguridad, mas allá de la propia concebida en el diseño, es decir, además de las casetas y puentes resguardados, se debe proveer de vigilancia privada.

Las autoridades ambientales administradoras de la red, deben fijar políticas y metas anuales, estas serán las directrices para los procesos de medición en la red.

Se deben tener algunas estaciones móviles, que complementen la información de las estaciones pivote. Entre estas estaciones móviles se encuentran en el Sur del Valle de Aburrá, las estaciones Antes y Después de la descarga de la Planta de San Fernando, las estaciones aguas debajo de las descargas de Tasajeras y Riogrande entre otras.

Es evidente la necesidad de instrumentar el río. En la actualidad es clara la carencia de información hidrológica en el Valle de Aburrá. Dicha instrumentación debe llevar a avanzar desde un conocimiento inicial de las tendencias del río y la evolución del mismo, hasta su vigilancia y control, desarrollándose esta como objeto final de una red de medición, después de varias fases previas en las que se acumule el conocimiento necesario para dicha implementación.

Para la definición de la red de monitoreo, las autoridades ambientales deberán enunciar políticas y metas sobre la calidad del río. Dichas políticas se verán reflejadas en programas en la red. Puesto que las políticas y metas pueden variar con el tiempo, la red debe ser lo suficientemente flexible para responder a dichos cambios, sin embargo se deben conservar estaciones fijas que guarden un registro del comportamiento histórico del río.

Una red hidrométrica mínima básica, debe permitir acceder a información eficaz, que articulada a métodos de estimación basados en balances hídricos y modelos de escorrentía en cuencas, permita trazar un perfil adecuado de los caudales (y las variables hidráulicas pertinentes como niveles y velocidades) en los sectores de interés. Cuando su función es apoyar la indagación del estado de calidad, permitirá configurar balances de masas y evaluar procesos de transporte en el sistema, para las sustancias o contaminantes de interés. Desde el punto de vista técnico y económico, la observación directa de la red estará también íntimamente acoplada con instrumentos de predicción y simulación.

Además de las estaciones sobre el propio río, son necesarias estaciones para estimar los flujos asociados a las estructuras de recolección y transporte de residuos domésticos e industriales, dicha información debe ser suministrada por las entidades vertedoras y deben complementar la información de la red.

Las condiciones hidrológicas, morfológicas y las tasas de transporte de materiales gruesos, generan un régimen hidráulico y una geometría altamente cambiante en el río.

7 COMPONENTE DE GESTIÓN RED DEL RÍO MEDELLÍN.

Con el fin de dar cumplimiento a lo establecido en el convenio 366 de 2003 “Diseño y puesta en marcha de la Red de Monitoreo Ambiental de la cuenca hidrográfica del Río Medellín en jurisdicción del Área Metropolitana” en lo que respecta a la gestión ambiental del proyecto, el componente de Gestión del mismo ha formulado las bases para un Plan Estratégico Integral de Acción para la Gestión Ambiental de la Red de Monitoreo contextualizado sobre la Cuenca del Río Medellín. Este trabajo se constituye en la base para abordar un proceso de discusión y concertación con los diferentes actores que tienen injerencia sobre el Río Medellín, como premisa fundamental para garantizar su legitimidad y viabilidad con miras a la posterior implementación de un plan de ordenamiento de la cuenca.

En este documento se presenta el marco conceptual a partir del cual se desarrollaron las siete etapas del componente de Gestión del proyecto, se refiere la metodología con la que se trabajó en cada etapa para con base en ello proponer un cuerpo de principios, objetivos, estrategias, acciones e instrumentos para orientar trabajos posteriores de este u otros proyectos. Con los presentes lineamientos se pretende sentar las bases para adelantar un proceso de gestión ambiental de la cuenca del Río Medellín, a partir de la creación de unos espacios de discusión y concertación en los diferentes niveles territoriales con la participación de los diversos actores con incidencia en la configuración de la cuenca y la red de monitoreo. Este documento denominado “Resumen” no debe entenderse como un elemento que condense todas las etapas vividas por el componente de Gestión sino como un documento guía que busca presentar los productos obtenidos en cada una de las etapas y no extenderse en la forma en que se lograron ni los análisis de los mismos pues se considera que en los informes correspondientes se profundiza suficientemente.

7.1 PRECISIONES

En función de los objetivos del proyecto, se formuló un marco teórico de referencia, que permite establecer el contexto en el cual se desarrolló el componente de Gestión, para facilitar la comprensión de sus productos, establecer su sentido y su alcance, así como su impacto, especialmente en términos de las obligaciones contractuales. Para tal fin, inicialmente se efectúa una breve descripción del concepto de gestión ambiental conducente a establecer unidad en un criterio que puede tener múltiples interpretaciones; luego se presenta la delimitación del área de estudio visto desde la perspectiva territorial y finalmente se presentan las dificultades que se dieron con la información a partir de la cual se elaboraron todos los productos.

7.1.1 El Concepto De Gestión Ambiental

La gestión ambiental puede ser entendida como una herramienta para la planificación que permite pasar de una situación actual a una situación deseable. Ésta permite fijar

criterios, establecer disposiciones, proponer marcos de actuación y establecer mecanismos de seguimiento, convirtiéndose en un soporte para alcanzar los objetivos propuestos. Para el caso concreto del proyecto de la red de monitoreo del Río Medellín, la situación actual es el diagnóstico del Río desde los diferentes componentes y dimensiones, mientras que la situación deseada corresponde al diseño y puesta en marcha de la red propiamente dicha, la cual será llevada a cabo mediante la articulación de las políticas, intereses de los actores de la cuenca con las interrelaciones de los subsistemas físico bióticos, sociales y económicos, así como la implementación de la red física del monitoreo de la calidad y cantidad de las aguas.

La gestión ambiental, también puede ser entendida como el establecimiento de las relaciones entre lo ambiental y su vinculación en los procesos de planificación urbano y rural, debe estar direccionada bajo capacidades políticas y técnicas. La capacidad política involucra la interpretación de los requerimientos de los diversos sectores de la comunidad y articulación de actores y sectores sociales para aunar esfuerzos en la solución de problemas, mediante capacidades técnicas (de conocimiento e investigación), dichas relaciones requieren de procesos interdisciplinarios que permitan convertir los perfiles ambientales urbanos y rurales en instrumentos válidos para el conocimiento, transformación y ordenación del entorno. Pero, no se puede dejar a un lado que el ambiente es el conjunto de factores físico - naturales, estéticos, culturales, sociales, políticos y económicos que interactúan con los individuos y la comunidad en que viven. En este sentido, “la gestión ambiental involucra el desarrollo de un correcto diagnóstico de la situación, la elaboración de un pronóstico, la fijación de metas globales y particulares, el diseño de estrategias a aplicar en forma eficiente” (Universidad Blas Pascal, 2004). De esta manera, la gestión ambiental permitirá la articulación de los hechos naturales inherentes al Río Medellín (i.e. contaminación, usos del suelo, densidad poblacional, calidad de vida, entres otras variables) con las diferentes políticas de manejo establecidas en cada uno de los municipios mediante los POTs, planes de desarrollo, estado de los recursos naturales y otros marcos regulatorios que permiten tener un conocimiento aproximado de la realidad del Río y poder definir el estado de criticidad para proporcionar a las autoridades ambientales competentes una herramienta para la toma de decisiones.

7.1.2 Área De Estudio

El análisis desarrollado por el componente de Gestión, se realizó en una gran parte de la cuenca del Río Medellín, en la jurisdicción de los municipios que conforman el área Metropolitana del Valle de Aburrá en el departamento de Antioquia. El área de estudio abarca aproximadamente 89.000ha y corresponde al territorio de las autoridades ambientales de CORANTIOQUIA con 72.922ha y al Área Metropolitana con 16.164ha Figura 13 Área de estudio y su zonificación. El área de estudio se dividió en quince zonas para facilitar el análisis (para mayor explicación véase el informe de las Etapas II y III) las cuales corresponden a los municipios del área metropolitana y a seis zonas del municipio de Medellín sin incluir sus corregimientos.

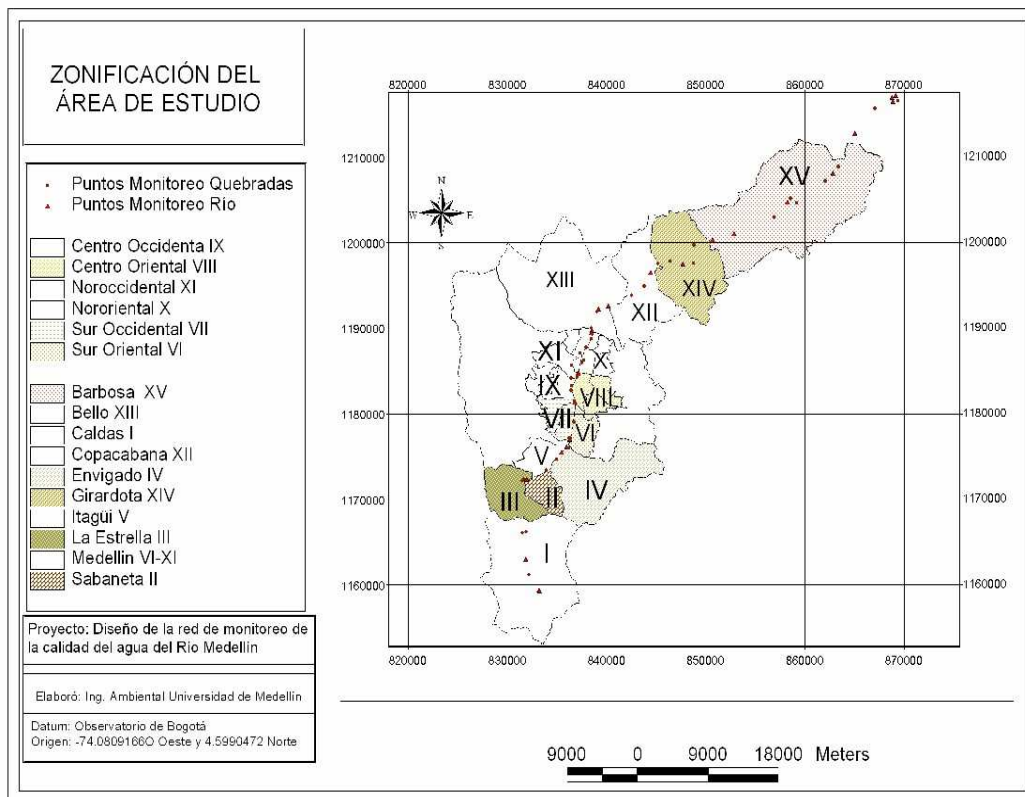


Figura 13 Área de estudio y su zonificación

7.1.3 Manejo De La Información

La información es la base fundamental de soporte en las diferentes fases de los proyectos. Si ésta no se puede utilizar de forma fácil y accesible, no se conoce de manera total la estructura y funcionamiento del sistema de estudio, dificultando tomar decisiones con pleno conocimiento de causa. A fin de explicar algunos fenómenos que se presentan en la cuenca del Río Medellín, fue necesario recopilar y procesar información proveniente de varias fuentes con la finalidad de argumentar situaciones detectadas desde los componentes de Calidad, Hidrología e Hidráulica y de Gestión. Se encontró que a menudo, la información pública de entidades como CORANTIOQUIA, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, contralorías y municipios se halla fragmentada y dispersa. “Esta situación se debe principalmente a legislaciones nacionales diversas sobre la manera de acceder a la información y de utilizarla, y a prácticas de procesamiento de datos que perjudican la disponibilidad de los mismos” (Pérez, 2004). Por su parte, la búsqueda y obtención de información requirió desplazamientos innecesarios en otras circunstancias hacia las diferentes entidades debido a la carencia de un sistema integrado de información que permitiera a las instituciones mantenerla en formatos análogos y digitales, pues bien se sabe que la

utilización de medios electrónicos para almacenarla y difundirla condiciona que ésta sea oportuna y eficiente en el sentido que se ahorra recursos, tiempo y esfuerzos.

En algunas ocasiones, la información se encontró desactualizada y poco específica, por ejemplo el caso presentado en la dimensión social, donde los valores de variables relacionadas con población corresponden a datos históricos del Anuario Estadístico de Antioquia, en el cual, los registros son publicados en forma general para el total de los municipios, dificultando la desagregación por unidades territoriales menores (i.e. comunas, veredas o centros poblados). Otra de las dificultades se dió en la accesibilidad a la mayoría de las fuentes o, en la compatibilidad de las bases informáticas que las almacenan. Un ejemplo concreto se da en los sistemas de información geográfica de los municipios, los cuales poseen diferentes plataformas de software (i.e. ArcView, ArcGis, ArcInfo, entre otros) que generan productos (mapas, planos, y en general la cartografía) en escalas, resoluciones y niveles de detalle diferentes, dificultando la superposición de éstos para análisis integrados y generación de nuevo material.

Se tiene además que la información se encontró dispersa, que se utiliza términos distintos para referirse a lo mismo, términos iguales para denominar diferentes cosas, o sencillamente no se especifica algunos aspectos que requieren de una sustentación a fin de evitar asumir situaciones o crear expectativas frente a determinados hechos; tal es el caso de la Contraloría de Itagüí en su Informe del Estado de los Recursos Naturales, en el cual se desagregan las inversiones en proyectos ambientales y no ambientales, dificultando visualizar la asignación de estos y la cuantificación en los diferentes rubros. Otro de los problemas que no permitió la obtención de la información de manera oportuna fue la negligencia de algunos funcionarios de las entidades, debido a que no tenían pleno conocimiento de algunas situaciones o el encargado de turno estaba ausente u ocupado, y por lo tanto, se daba la necesidad de hablar con mas de una persona, que en ocasiones no entregaba datos concisos, claros ni verídicos.

Por su parte, la realización de comparaciones entre municipios (i.e. análisis financieros, sociales, gestión) se vio dificultada debido a que las metodologías de realización de informes son variables, reflejando la falta de articulación de las entidades territoriales para el desarrollo de planes de desarrollo, POTs y otros informes, hecho que se evidencia en la adopción que cada municipio realiza de algunas connotaciones que deben ser de carácter unificado. Dicha problemática es evidente en la definición de usos del suelo, en donde se maneja categorías diferentes y no se especifica los factores que incluye una denominación particular. De otro lado se tiene que la carencia de series históricas de caudales, así como información detallada del recurso suelo, dificultó desarrollar análisis que dieran explicación a los diferentes fenómenos por ejemplo los hidrológicos e hidráulicos de la cuenca del Río Medellín y sus quebradas afluentes.

En general, cada componente del proyecto se vio en la necesidad de abordar diferentes análisis a partir de información secundaria la cual en muchos casos no era pertinente, oportuna, disponible o se encontraba difusa dificultando la posibilidad de justificar con bases sólidas los fenómenos, a excepción de los componentes de calidad e hidrología, que tuvieron la oportunidad de generar, procesar y analizar información primaria relacionada con la calidad y cantidad del agua respectivamente. Por todo lo anterior, se puede concluir que las dificultades en la disponibilidad, accesibilidad y claridad en la información repercutieron en el rápido y efectivo procesamiento de los

datos para la construcción de los productos limitando las posibilidades de aportar valor agregado a nueva información.

Para efectos prácticos, cada uno de los productos referencia las fuentes a partir de las cuales generaron su análisis, haciendo la salvedad de la forma y cantidad de información con la cual se trabajó. Se hace hincapié en que dadas las condiciones contractuales y el alcance del componente, la mayoría de la información provino de fuentes secundarias, salvo algunos casos en los que se requirió levantar información empleando entrevistas, talleres, recorridos en campo etc.

7.2 MARCO NORMATIVO DE ORDENACIÓN DE MICROCUENCAS

La ordenación y manejo de microcuencas es uno de los lineamientos sobre los cuales la legislación colombiana comienza a hacer hincapié mediante la reglamentación del Código Nacional de Recursos Naturales (Decreto Ley 2811 de 1974), específicamente en la Parte III Título II Capítulo III que establece que los recursos naturales pueden ser declarados bajo protección o en ordenación, pero esta medida no fue efectiva debido a que en dicho decreto no se le da competencias a ningún ente territorial, persona natural o jurídica para llevar a cabo este ordenamiento.

Sin embargo, para el año 1981 surge el Decreto 2857 de 1981, mediante el cual se reglamenta el decreto en mención que establece las bases para llevar a cabo el ordenamiento de cuencas hidrográficas con la finalidad de planear el desarrollo integral de las cuencas y programar la ejecución de proyectos específicos de aprovechamientos hidráulicos (Artículo 4). En él las prioridades de ordenación se centran teniendo en cuenta los problemas físicos que las afectan y en particular, aquellos que deterioran los recursos naturales renovables, especialmente los hídricos, destinados a atender las necesidades de abastecimiento humano, producción agrícola, y los usos energético, industrial y minero (Artículo 5). Además, se dan competencias de declarar en ordenación una cuenca a las entidades administradoras de los recursos naturales renovables como el Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente, INDERENA y las corporaciones regionales de desarrollo, dentro de los territorios de sus respectivas jurisdicciones (Artículo 9).

En 1991 con la Constitución Política de Colombia mediante la descentralización de las entidades territoriales (Artículo 1) da algunas atribuciones a éstas dentro de las cuales se dio la asignación del manejo de los recursos naturales. El artículo 80 de la Constitución exige la planificación, manejo y aprovechamiento, garantizando su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución, condicionado de una forma implícita las actividades productivas para el manejo de los recursos naturales. La importancia de crear mecanismos para declarar las microcuencas en ordenamiento se ve reflejada también en el artículo 331 mediante el cual se crea la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena encargada de la recuperación de la navegación, de la actividad portuaria, la adecuación y la conservación de tierras, la generación y distribución de energía y el aprovechamiento y preservación del ambiente, los recursos ictiológicos y demás recursos naturales renovables.

Por su parte, la Ley 99 de 1993 asigna a las Corporaciones Autónomas Regionales (CARs) y Áreas Metropolitanas (Artículo 31 numeral 18) ordenar y establecer las normas y directrices para el manejo de las cuencas hidrográficas ubicadas dentro del área de su jurisdicción, conforme a las disposiciones superiores y a las políticas

nacionales, además por medio del Artículo 33 Parágrafo 3 plantea la creación de comisiones conjuntas encargadas de concertar, armonizar y definir políticas para el manejo ambiental de cuencas hidrográficas comunes a dos o más CARs que tengan jurisdicción sobre ésta.

A partir del año 2002, se expide el Decreto 1729 por medio del cual se establece además del manejo y ordenamiento de las microcuencas, la necesidad de priorización regional de éstas para determinar el orden de ejecución de los planes de ordenación (Artículo 20), y le da responsabilidad a las autoridades ambientales para la elaboración del plan de ordenación (Artículo 19) y determinar la financiación de dichos planes (Artículo 23). Mediante la Ley 812 de 2003 que aprueba el Plan Nacional de Desarrollo 2003 - 2006 “Hacia un Estado Comunitario” que define la implementación de planes de ordenamiento y manejo integral de microcuencas en cerca de 500.000 hectáreas, incluida la reconversión hacia sistemas productivos sostenibles y el establecimiento de cerca de 120.000 hectáreas de plantaciones protectoras, especialmente áreas abastecedoras de agua (Artículo 8, numeral 8).

Al nivel de la ciudad, la importancia de la ordenación de las cuencas hidrográficas se ve reflejada en el Plan Estratégico Ambiental Metropolitano -PEAM- mediante uno de los principios rectores consagrados en la constitución y legislación que rigen la gestión urbano regional y hace alusión a que “el recurso hídrico es estratégico para el país y su disponibilidad para el consumo humano tiene prioridad sobre cualquier otro uso” (PEAM, 2002), sin embargo, no se hace una mención directa del manejo de las cuencas hidrográficas, pero bajo éste principio queda comprendido tácitamente. De otro lado, en el Sistema de Gestión Ambiental Municipal -SIGAM- ocurre una situación similar, en el cual los aspectos relacionados con la ordenación de las cuencas hidrográficas aparecen descritos dentro de las funciones de la Secretaría del Medio Ambiente y de las Autoridades Ambientales como parte los lineamientos para llevar a cabo la gestión ambiental municipal.

Los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas (POM) se suelen llamar, en ocasiones, planes maestros o directores, lo que evidencia su importancia. De hecho, la normatividad al respecto (Decreto 1729 de 2002) lo constituye en norma superior jerárquica y determinante respecto de los planes de ordenamiento territorial. Es claro, pues, que los POM deben formularse teniendo en cuenta los marcos regulatorios superiores, y deben generar, a su vez, marcos regulatorios específicos que permitan su aplicación.

7.3 OBJETIVOS

7.3.1 Objetivo General

Establecer las bases para un Plan Estratégico Integral de Acción para la Gestión Ambiental de la Red de Monitoreo contextualizado sobre la Cuenca del Río Medellín, en el marco del convenio 366/2003 del proyecto “Diseño y puesta en marcha de la Red de Monitoreo Ambiental de la cuenca hidrográfica del Río Medellín en jurisdicción del Área Metropolitana”.

7.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar la identificación de los actores institucionales que en razón de sus objetivos, actividades, responsabilidades o similares puedan o deban estar interesados en trabajar en una red de monitoreo sobre el Río Medellín y sus quebradas afluentes.
- Realizar un informe de diagnóstico ambiental que presente el estado actual del Río Medellín a partir de información secundaria en un análisis dimensional, identificando las variables claves que afectan su dinámica y el funcionamiento de la red de monitoreo.
- Desarrollar un mapa síntesis de criticidad ambiental que represente la conjunción de las variables más relevantes que afectan la dinámica de la cuenca del Río Medellín y que ayude a sentar las bases para un Plan Estratégico Integral de Acción.
- Realizar un ejercicio inicial de prospectiva territorial que permita analizar los objetivos, métodos y acciones de los actores que hacen apropiación territorial y establecen relaciones con el Río Medellín y la red de monitoreo.
- Identificar los escenarios posibles, los estudios, acciones y proyectos que puedan dar solución a la problemática del Río Medellín, así como las instituciones responsables y los vacíos de información a partir de la revisión de experiencias exitosas en otros lugares y de la base de datos bibliográfica del proyecto.
- Establecer los requerimientos para el diseño, la calibración y la implementación de la red de monitoreo así como la identificación de mecanismos de instrumentación y seguimiento para su efectiva puesta en marcha.

7.4 METODOLOGÍA

El proceso de construcción de las bases del Plan Estratégico Integral de Acción comenzó con la búsqueda del consenso en torno al alcance de la Fase I del proyecto. Inicialmente el equipo de Gestión se propuso plasmar de forma concreta la metodología presentada en la propuesta del convenio teniendo la cuenca del Río Medellín como componente fundamental y la red de monitoreo como un elemento de gestión resultado de las relaciones existentes en su entorno. Sin embargo, pronto se concluyó que desde esta perspectiva la gestión integral de la cuenca se constituiría en el objeto de estudio, lo que originó un amplio debate entre el ejecutor del proyecto, la interventoría y el contratante del mismo que llevó al equipo de Gestión a optar por realizar un análisis dimensional de la cuenca que cumpliera con todas las etapas de la Fase I (y considerando los recursos con los que se contaba) pero acotando su alcance a la contribución del diseño de una red de monitoreo y la formulación de unas bases para un plan de ordenamiento de la cuenca.

Esta decisión condujo a la construcción de los objetivos de cada una de las etapas, el desarrollo de la metodología y la definición de los productos Tabla 7 Productos de las etapas del componente de Gestión. Bajo esta propuesta, el trabajo correspondió a un trabajo de revisión de fuentes secundarias complementadas por la información de los monitoreos realizados sobre el Río para la elaboración de un diagnóstico general de toda el área de estudio identificando los actores que interactúan en ella y las zonas de criticidad ambiental. En razón a lo anterior, se procedió a realizar una revisión de otras experiencias en cuencas urbanizadas para elaborar unos escenarios de futuro de la cuenca, finalizando con la formulación de algunas recomendaciones para la red de monitoreo y las recomendaciones para un futuro plan de ordenamiento de la cuenca que considere la inclusión de varios proyectos claves identificados o planteados.

Etapa	Denominación	Productos
I	Momento del "Antes"	Base de datos bibliográfica.
		Socialización de las actividades del proyecto.
		Valoración del recurso hídrico.
II	Situación Actual	Diagnóstico de la situación actual del Río Medellín.
III	Identificación de variables claves	Mapa síntesis de criticidad ambiental.
IV	El papel del los actores	Identificación de instituciones con injerencia sobre el Río Medellín.
V	Los escenarios posibles	Recomendaciones para coordinar acciones de gestión ambiental sobre la cuenca del Río Medellín y a la operación de la red de monitoreo.
VI	Elección de opciones estratégicas	Identificació de escenarios posibles, los estudios, acciones y proyectos que pueden dar solución a la problemática identificada.
VII	Puesta en marcha	Requerimientos de diseño, la calibración y la implementación de la red de monitoreo e identificación de mecanismos para su efectiva puesta en marcha.

Tabla 7 Productos de las etapas del componente de Gestión³

En concordancia con la redefinición del alcance del componente, se procuró adecuar el tratamiento de los referentes teóricos a un nivel coherente con los objetivos parciales de la fase I y el grado de consolidación y calidad de la información que se logro obtener. En estas condiciones, la consideración más importante con relación a los productos del componente, es que éstos tienen como fin aportar elementos para una gestión integral de la cuenca y la operación de la red de monitoreo por lo que en muchos casos no se ahonda en análisis más profundos y complejos.

7.5 ETAPAS DEL COMPONENTE DE GESTIÓN

7.5.1 Etapa I - momento del “antes”

Esta etapa se abordó en tres momentos: el primero denominado de socialización anticipatorio donde se realizó la búsqueda de información y la construcción de una base de datos a partir de información secundaria principalmente. La segunda donde se desarrollaron algunos talleres y espacios de discusión al interior del proyecto participando todos su componentes y la tercera a empleando un espacio de socialización al exterior del proyecto en el que se aprovecho para realizar una encuesta para identificar la percepción de la comunidad frente al recurso hídrico.

7.5.2 Etapas II Y III - Situación actual e Identificación de variables claves

En estas etapas se realizó un diagnóstico de la situación actual de la cuenca Río Medellín con el fin de sentar las bases de un Plan Estratégico Integral de Acción para la Gestión Ambiental de la Red de Monitoreo. Para ello se realizó un análisis

³ Aquí se presenta un resumen de la metodología de cada una de las etapas seguidas por el componente de Gestión. La ampliación de los elementos conceptuales y la forma en que se abordó cada etapa se presenta en los informes anexados como productos.

dimensional buscando determinar los factores de afectación del recurso hídrico. A partir de un análisis dimensional, el documento se desarrolló en tres grandes módulos: el primero consideró las diferentes zonas geográficas del área de estudio y se hizo el diagnóstico desde las dimensiones biofísica, urbanística y social. El segundo que tomó la dimensión político - administrativa y algunas variables que se tuvieron que analizar considerando toda la cuenca y no de forma sectorizada debido principalmente a las dificultades con la información. Las dimensiones en cada caso comprenden sus respectivas variables de estudio aunque este tratamiento varía en algunos casos, ya que dada la naturaleza y cantidad de la información se facilita presentarla en el primer ámbito de lectura, es decir, en forma general para toda el área de estudio más que por zonas con la posibilidad de referenciar diferencias importantes. Finalmente, un tercer módulo que integró las conclusiones del diagnóstico en un mapa de criticidad que comprende toda la cuenca.

7.5.3 Etapa IV - el papel de los actores

El papel de los actores se determinó a partir de un taller en el que participaron todos los componentes del proyecto después de una revisión de información secundaria para así determinar una clasificación de los actores en técnico, políticos y de control. Se realizó un análisis sobre las características de los actores donde se tuvo en cuenta en primer lugar las definiciones de cada uno de ellos. De esta forma se entienden los actores denominados como técnicos aquellas entidades y organizaciones encargadas de elaborar y proporcionar conocimientos y herramientas sobre el sistema ambiental, los actores denominados como políticos y de control son aquellas entidades y organizaciones que determinan acciones, regulaciones y políticas que se aplican a las diferentes componentes medioambientales, y por último los actores denominados como comunidad se entienden como las diferentes formas organizacionales que representan a la población para la toma de decisiones. Posteriormente, se describieron las características de los diferentes actores, considerando sus objetivos, motivaciones, estrategias y medios de acción, limitaciones, problemas y puntos vulnerables y finalmente analizar sus expectativas futuras.

7.5.4 Etapas V y VI - los escenarios posibles y elección de opciones estratégicas

Inicialmente se realizó una identificación de estudios, acciones y proyectos a partir de la base de datos bibliográfica construida en la Etapa I del proyecto y de las recopilaciones hechas en las discusiones con todos los componentes del proyecto. Además, se realizó una revisión de experiencias internacionales sobre el manejo de cuencas hidrográficas para a partir de allí y de las discusiones de los profesionales de gestión elaborar unos escenarios generales que se podrían dar en la cuenca.

7.5.5 Etapa VII - puesta en marcha

A partir de las discusiones con los demás componentes del proyectos y una vez estuvieron definidas las estaciones que se podrán en marcha se han definido algunas recomendaciones encaminadas a que las instalaciones e inversiones hechas se conviertan en una verdadera herramienta de gestión. Esta etapa se realizó a partir de consultas a los directores de cada componente y a partir de las recomendaciones hechas por las comisiones de equipos y estaciones que desde mediados del segundo semestre conformó la dirección del proyecto.

8 COMPONENTE SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA

8.1 APLICACIÓN DE UN SIG AL RIO MEDELLÍN

El río Medellín a lo largo de su recorrido, avanza experimentando una serie de transformaciones, producto de los cambios en el uso del suelo, urbanización e industrialización, desde su nacimiento en el Municipio de Caldas hasta su confluencia en el Municipio de Barbosa con el Río Porce. Dichas transformaciones son producto de un proceso de urbanización e industrialización sufrido a lo largo de varios años.

El río Medellín, al ser el eje articulador de planificación con una gran variabilidad en el espacio y el tiempo, requiere de un análisis constante de sus componentes: físico, químico y biológico dentro del contexto ambiental, es decir, de su relación con la actividad humana.

Integrar toda esta información es un requerimiento esencial en el proceso de toma de decisiones por parte de las entidades a cargo de esta función. Desde este punto de vista los Sistemas de Información Geográfica (SIG) toma gran fuerza ya que son una herramienta que facilita la toma de decisiones al integrar información básica (red hídrica, curvas de nivel, infraestructura) con información temática (usos del suelo, morfometría, geología, etc).

Un SIG puede ser considerado como un sistema de apoyo eficiente para el monitoreo de la calidad de las aguas, la medición y control de la toxicidad de los efluentes, el estudio de la dispersión espacial de contaminantes, o la estimación del impacto que dicha contaminación tiene sobre los distintos ecosistemas como lo demuestran diferente trabajos desarrollados por organismos internacionales como la FAO.

Además de esto, los SIG también pueden ser empleados para la identificación y evaluación de procesos de contaminación de origen difuso o no puntual (Scarborough, 1999), permitiendo la evaluación de variables como los usos del suelo. Por ejemplo, pueden describirse los procesos de precipitación y escorrentía en relación con aporte de sedimentos; zonas donde las precipitaciones son intensas y el suelo se encuentra desprovisto de una cubierta protectora son más susceptibles de actuar como fuente no puntual de contaminación de las aguas.

8.2 OBJETIVOS

8.2.1 Objetivos Generales

- Recopilar, estructurar y documentar información espacial y descriptiva. La información se encuentra principalmente en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, la Secretaría del Medio Ambiente, las oficinas de planeación, los Planes de Ordenamiento Territorial, estudios previos de la calidad del agua del Río Medellín y la información ráster en Internet de dominio público.
- Apoyar las áreas temáticas en el desarrollo de actividades que requieran información espacialmente georreferenciada (Hidrología, Gestión y Calidad). Se evaluarán los requerimientos e inquietudes sobre fenómenos que puedan ser llevados a mapas y susceptibles al análisis espacial, entre otros la estimación de caudales, el comportamiento espacial de la calidad del agua y la implementación de índices de carácter socio – económico.
- Permitir el análisis de la calidad del agua del Río Medellín a partir del contexto en el cual se encuentra. El contexto se fundamentará principalmente en las descargas puntuales existentes en formato digital y la infraestructura para el transporte de aguas contaminadas. Se utilizarán imágenes de satélite para actualizar el curso principal de la red hídrica y ubicar los accidentes geográficos más relevantes.

8.2.2 Objetivos Específicos

- Adquirir información de dominio público que apoye a los diferentes componentes del proyecto, dentro de la información espacial se utilizarán imágenes de satélite Landsat y un modelo digital de elevación del programa SRTM.
- Utilizar los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) para determinar la posición de los diferentes sitios de muestreo.
- Brindar un contexto espacial para la determinación de la ubicación de las estaciones de monitoreo.
- Definir la estructura y el modelo de datos para almacenar, acceder, transformar y desplegar la información espacial y de atributos resultado del proceso de monitoreo.
- Hacer el uso de metadatos para la documentación de la información.
- Obtener mapas análogos a partir de la información recolectada que sirvan de apoyo al trabajo de campo
- Realizar análisis espacial, especialmente en álgebra de mapas, para la creación de índices en el componente de gestión

- Asociar la información descriptiva de los monitoreos a la información espacial en SIG.
- Elaborar una estructura que describa cada una de las capas temáticas de la geodatabase (metadatos).
-

8.3 METODOLOGIA

8.3.1 Estructura metodológica para el desarrollo de actividades del componente de SIG

Para esto se definieron pautas de trabajo como son:

- Consulta vía correo electrónico de requerimientos de información por parte de los temáticos.
-
- Gestión de la información con Área Metropolitana, Corantioquia y municipios con carta formal.
- Obtención de imágenes de satélite y modelos digitales de elevación en Internet.
- Definición del Modelo de la tierra (Datum) y Sistema de Coordenadas a utilizar.
- Edición para generación de características topológicas de la información existente.
- Selección y adquisición de Software según requerimientos de Área Metropolitana.
- Definirla escala de trabajo a partir de la información existente (posiblemente entre 1:5000 y 1:25000).
- Consolidar la información según las diferentes estructuras de datos y modelos de datos según los requerimientos de Área Metropolitana.
- Definir modelos de datos, Diccionario de Datos y Metadatos.
- Composición de mapas para salidas gráficas en ploter.
- Georreferenciación de sitios de muestreo con GPS.
- Georreferenciación y ortorectificación de imágenes satelitales.
- Análisis, modelamiento y predicción: generar modelos digitales de elevación, modelos digitales de temperatura, estimación de caudales, estudio de secciones transversales niveles del río.
- Consolidación de la información y transferencia al Área Metropolitana.

La metodología aplicada para la consecución de la información fue:

- Elaboración de cartas para solicitud de información espacial y alfanumérica requerida para el proyecto.
- Reuniones con personal técnico responsable del SIG del AMVA.
- Reuniones con personal técnico del SIG de la Secretaria del Medio Ambiente.

- Reuniones con personal técnico responsable del componente SIG por parte de la Interventoría.
- Visita Instalaciones de EEPPM (Oficina SIGMA).
- Revisión del Sistema de Información ARECNAVA del AMVA.
- Revisión de información cartográfica digital suministrada por el AMVA
- Estudio del documento Metadatos Norma NTC 4611 ICONTEC
- Revisión de documentos de diferentes estudios que reposan en la Secretaria de Medio Ambiente del Municipio de Medellín tales como:
- Diseño de la metodología para la formulación de Planes Integrales de Ordenamiento y manejo de microcuencas (Piom Iguana)
- Evaluación de cauces y coberturas con poco o ningún caudal base en áreas urbanizadas de la zona Centro Oriental, Nororiental, Noroccidental, de la ciudad de Medellín.
- Diseño de la estructura de decisiones a nivel Inter. e intracuenca según la problemática ambiental en los tramos de las quebradas de las cuencas del Río Medellín, Chorro Hondo, La Cangreja, La Pastora, y la India.
- Fases 1 y 2 del SIGAM. Diagnóstico. (GAIA)
- Fases 3 y 4 del SIGAM. Geotadabase. (Universidad Nacional)
- Segunda evaluación físico química con medición de caudal. (COLNET)
- Documento base para el ordenamiento de la cuenca del Río Medellín (INGTAL)

De los estudios anteriores se extrajeron los temas con información espacial de pertinencia para el proyecto, a saber:

- Carpeta de Diagramas Entidad Relación de la Geotadabase ambiental.
- Carpeta documentos html de la geotadabase ambiental.
- Carpeta documentos que contiene informe final, diccionario de datos, objetos cargados, listado de diagramas entidad relación de la geotadabas ambiental.
- Carpeta metadatos con norma NTC 4611 y ejemplos.
- Carpeta PIOM con tema EACEIND25000
- Temas de geotadabase ambiental, así:

Construido_estructurantes_colectores
Interceptores.shp, MuestreosAgua.dbf,
Natural_agua_amenzainundacion.shp,
Natural_agua_estacioneshidrometeorologicas.shp,
Natural_agua_quebradas.shp, natural_agua_rio.shp,
Natural_agua_sitiosmuestreoagua.shp.

8.3.2 Procesamiento de información espacial

Las actividades desarrolladas en cuanto a procesamiento de información espacial se describen a continuación:

- Se revisó la información existente de POTs en los municipios inmersos en el área de estudio, principalmente se buscó información sobre la ubicación de zonas industriales como un tipo de uso del suelo urbano. En este sentido solo se encontró información útil para los municipios de Medellín e Itagüí.
- Se depuró la información de infraestructura urbana existente en los distintos municipios, lo cual incluyó eliminar las capas de Autocad “inservibles”, cambiar de formato y cambiar sistema de coordenadas cuando se hace necesario.
- Se generó el mapa de subcuencas con base en las curvas de nivel y la red hídrica existente.
- Se adelantó el intercambio de información entre la Facultad de Minas de la Universidad Nacional y la información de SIG levantada a lo largo del proyecto. Específicamente se entregaron los siguientes temas: MDT, red hídrica, subcuencas, cuenca y usos del suelo.
- Se georeferenció imagen “escaneada” del mapa de colectores e interceptores desarrollado por EPM en 1998.
- Se creó un mosaico pancromático compuesto por las imágenes p009r055 y p009r0556 de agosto 21 de 2000. Este mosaico era necesario ya que el Norte de la cuenca no quedaba incluido en la imagen utilizada anteriormente.
- Se evaluó la propuesta de metadatos del PIOM de la Iguañá, la geodatabase y el trabajo desarrollado para el AMVA por Integral.
- Se generó los atributos x, y, z y distancias desde el punto cero del río Medellín para los temáticos: Estaciones de Muestreo, Puntos de Muestreo en Quebradas.
- Se localizaron algunos de los puntos de descarga al río Medellín de acuerdo a listado suministrado por AMVA.
- Se integró información geológica y geomorfológica del Área Metropolitana del Valle de Aburra (AMVA) de acuerdo a las necesidades del grupo encargado de la modelación hidrológica de la cuenca en una cobertura de polígonos.
- Se integró la información de usos del suelo urbano plasmados en los POTs de cada uno de los municipios que conforman el AMVA, dando origen a una cobertura con 12 tipos de usos del suelo alrededor de toda la cuenca hidrográfica; así:
 - Comercial
 - Residencial comercial
 - Servicios
 - Residencial
 - Minero
 - Institucional
 - Expansión
 - Recreación

- Protección
- Protección producción
- Producción agropecuaria
- Industrial

Para dicha actividad se editó una cobertura de polígonos a los que se le realizaron los cálculos pertinentes de área y perímetro.

- El grupo de Gestión solicitó la división de la zona de estudio en 15 polígonos. En dicho trabajo, todos los municipios exceptuando Medellín conformaron una zona identificada con el límite municipal, y para el caso del municipio de Medellín se dividió en 6 zonas (limitadas de acuerdo a la división política por comunas). A dichas zonas se les calculó el área y perímetro.
- Mediante las extensiones Merge themes together, dissolve feature based on an attribute y clip on theme based on another de ArcView 3.1 se identificaron los usos del suelo en cada zona y se realizaron los cálculos de representatividad de cada uno de los usos del suelo urbano dentro de las 15 zonas en que se dividió el área de estudio.
- Se georreferenciaron 37 puntos con Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) que identifican la ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo sobre las quebradas caracterizadas dentro del proyecto de la red del río Medellín. Se asignaron atributos espaciales como son las coordenadas x,y,z amarradas en el eje horizontal al origen Observatorio de Bogotá, distancia del nacimiento a la descarga de la quebrada monitoreada e identificada con el punto georreferenciado, distancia entre el punto de descarga de la quebrada al río y la ubicación de la estación de monitoreo. La exactitud horizontal lograda en la georreferenciación de dichos puntos fue menor de 15 m.
- Se desarrolló una red hídrica bastante densa mediante la integración de diferentes fuentes de información a una red hídrica existente en el AMVA. Además se corrigieron las direcciones de drenaje de la red hídrica y se aseguró la continuidad de los nodos; con lo cual se busca lograr operaciones futuras de rastreo y acumulación.
- Se realizó una cobertura de puntos con la segmentación del eje principal del río a partir del nacimiento (alto de San Miguel) cada 1000m. al cual se le adicionaron las coordenadas planas x,y,z, este es un requerimiento del Grupo de Calidad para análisis con el modelo Qual2k
- Se determinó el código de cada una de las estaciones sobre el río. El cual consta de la distancia al nacimiento (alto de San Miguel) de los puntos de monitoreo y el margen sobre el río al que pertenece el punto de monitoreo.
- Se realizaron nuevas coberturas de precipitación, climatología y caudales con información hidrológica entregada por el componente de Hidrología e Hidráulica.
- Se realizaron reuniones con el grupo del componente de gestión para determinar las coberturas generadas y que servirán de soporte técnico para el desarrollo de dicho componente.

- Se depuró la cobertura con el límite de la cuenca y las subcuencas, con el fin de mejorar el detalle en la edición, para lo cual se generó un TIN del área de estudio a partir del DEM (modelo digital de elevación).
- A partir del mapa del “Plan aguas 2000-2005” de Empresas Públicas de Medellín E.S.P. tomado como fuente de información principal, se editó un nuevo tema de colectores e interceptores. Para la generación de este mapa se tuvo en cuenta la continuidad de las estructuras, tipo de estructura y si era proyectada o construida.
- Se generó una nueva cobertura de puntos llamado “intersecciones”, el cual tiene como fin básico la ubicación espacial del cruce o congruencia entre las quebradas monitoreadas y el río Medellín. Los atributos asociados al tema son coordenadas x,y (con origen Observatorio de Bogotá) y nombre de la quebrada que converge al río.
- La información de caudales de campaña y los estimados para el proyecto por parte de la Universidad Nacional (encargada del componente de hidrología e hidráulica) fueron integrados al SIG. Dicha información esta representada gráficamente por una secuencia de puntos y sus atributos asociados; son datos de caudales máximos, caudales mínimos y caudales medios.
- Se realizó una versión de metadatos mediante la integración de estructura de datos de SMA y AMVA basada en información disponible.

8.4 ESTADÍSTICAS DE LA PRODUCCIÓN DEL COMPONENTE DE SIG

El componente de Sistemas de Información Geográfica desarrolló funciones de recopilación, evaluación y edición de la información geográfica; buscando homogenizar la información en escala, calidad, existencia etc, dentro de la cuenca hidrográfica del río Medellín. En su fase inicial, se consultaron las siguientes fuentes:

- Planes de ordenamiento territorial (Municipios de la cuenca del río Medellín)
- Área Metropolitana del Valle de Aburra (AMVA)
- Trabajos al interior de las Universidades
- Secretaria del Medio Ambiente (SMA)
- Programas SRTM y ESDI

De todas estas fuentes de información se realizó una revisión de contenido y calidad de datos geográficos. Dando como resultado una evaluación cualitativa aproximada, a saber:

330 temas provenientes de POTs
420 temas provenientes del AMVA
10 Temas provenientes de SMA
100 temas de otras fuentes

Como producto de éste proceso se generaron:

8.4.1 Estructura de la geodatabase red río

La geodatabase RedRio.mdb se realizó en ArcGis, con una extensión geográfica correspondiente a la divisoria de aguas de la cuenca hidrográfica del río Medellín; y con un punto de cierre en la confluencia con la cuenca del río Grande.

La información espacial dentro de la geodatabase se estructuró en cinco feature dataset, a saber:

- Natural Agua
- Natural suelo
- Natural fauna y Flora
- Social Demografica
- Construido Estructurante

Donde los feature class se distribuyeron en cada feature dataset por afinidad temática. La metodología adoptada para organizar y nombrar la información espacial (modelo de datos y catálogo de objetos) fue obtenida a partir del informe realizado por la Universidad Nacional para la Secretaria del Medio Ambiente (SMA). El modelo de datos y el catálogo de objetos se ajusta al software ArcGis; utilizado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), caracterizándose por ser intuitivo y de fácil comprensión por parte de los usuarios. Por otro lado, dada la complejidad de las relaciones entre las tablas generadas por las campañas de muestreo se generó la base de datos Monitoreo_BD.mdb, las relaciones entre las dos bases de datos se explican en un numeral posterior.

DatabaseRedRío	(Red_rio.mdb) (Monitoreo_BD.mdb)	2
Feature Dataset	Natural_agua Natural_suelo Natural_fauna_flora Construido_estructurante Socia_demografica	5
Feature Class		31
-	27 Temas Vector CaucePrincipal CaudalEstimadoRedRio CaudalEstimadoCampaña CuencaHidrografica EstacionesCaudal EstacionesClimaticas EstacionesIntencidad EstacionesPrecipitacion EstacionesPrecipitacionMedia Intersecciones	

NombreCuencas
PuntosMonitoreoQuebrada
PuntosMonitoreoRio
RecargaAcuifero
Rio
SegmentacionRio1000m
SubcuencasHidrograficas
VertimientoIndustrial
CurvasNivel
UnidadesGeologicas
BarriosMedellin
CentralidadesUrbanas
LimiteMunicipio
ZonificacionRedRio
ColectoresInterceptores
UsosActualesSuelo
CoberturaVegetal

- 4 Temas Raster
 - ModeloDigElev
 - Anaya009_055-056.bil
 - Colectores interceptores
 - IceRedRio

8.5 CONCLUSIONES COMPONENTE SIG

En esta primera fase del desarrollo del proyecto se ha recolectado, estructurado y documentado la información espacial y descriptiva disponible para el proyecto, incluyendo aquella información generada durante los muestreos de calidad de agua en las distintas estaciones. La expresión espacial de la Red de Monitoreo es representada por puntos, asociando un punto a cada estación, lo cual desde el punto de vista espacial es sumamente sencilla contrastando con la complejidad del modelo entidad relación que tiene asociado. De la misma forma las actividades que afectan la calidad de agua son en extremo diversas y de alta complejidad descriptiva y espacial, esta última no solo en cuanto a la extensión geográfica si no también en los diversos niveles de detalle.

La estructura para el almacenamiento y consulta de la información generada hasta ahora y hacia el futuro por la Red de Monitoreo ya ha sido realizada, pero mucho más complejo desde el punto de vista espacial y temporal es identificar las variables que explican los valores arrojados por las estaciones de monitoreo. Los SIG deben ser utilizados como herramienta para comprender las actividades desarrolladas que afectan la calidad del agua del Río Medellín, apoyar la toma de decisiones y permitir el monitoreo y seguimiento de las acciones emprendidas.

En esta fase se identificaron entidades que son de gran importancia en la explicación de la calidad del agua del Río: la extensión geográfica de la red de colectores e interceptores, la ubicación de 169 vertimientos industriales y un ejercicio preliminar de Zonificación de densidad poblacional.

A la fecha se demostró la capacidad del SIG como punto de confluencia de las diferentes áreas temáticas y su capacidad de apoyar a los componentes en hidrología, gestión y calidad del agua, en la medida en que estos grupos continúen su labor debe haber un acompañamiento para actividades de geoprocésamiento y análisis espacial.

Desde el punto de vista de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los Sensores Remotos (SR) es importante a futuro contar en el proyecto con una imagen satelital de mejor resolución que la contemplada hasta ahora; ya que favorece trabajos de modelamiento a nivel hídrico, calidad, y de usos del suelo. Este último es fundamental como aproximación a las descargas no puntuales, en la primera fase se sugirió la adquisición de imágenes SPOT 10m pancromática y 20m multiespectral (acta_Mayo_12_2004_01), en caso de no encontrar recursos para este producto se puede considerar el uso de imágenes gratuitas Landsat de 30m multiespectral.

Cada una de estas actividades requiere continuidad no solo en actualización, si no en la definición de relaciones topológicas entre mapas con afinidad temática o de comportamiento.

8.6 PROSPECCIÓN COMPONENTE SIG

Se sugiere realizar una clasificación multispectral de coberturas vegetales que pueda ser asociada al uso del suelo y este a su vez con descargas no puntuales provenientes de actividades agrícolas o agronómicas que afecten la calidad del agua del Río Medellín.

Identificar y modelar las principales fuentes de contaminación del Río, lo cual desde el punto de vista de los SIG implicaría una georreferenciación y descripción de las fuentes de contaminación, este ejercicio daría continuación a la ubicación de vertimientos industriales

Georreferenciar con GPS eventos a lo largo de la red hídrica bajo el concepto de Segmentación Dinámica. Esta técnica permite de forma eficiente describir y ubicar fenómenos puntuales que se presentan a lo largo de una red, por ejemplo: saltos hidráulicos, descargas, tratamientos, focos de contaminación, etc.

En la actualidad se encuentra un gran número de sitios en Internet que permiten la consulta de información espacial y descriptiva. Sería un gran paso hacia la socialización de la información poner disponible al público los mapas generados en este proyecto a través de un servidor y una interfase como ArcIms.

8.7 SUB-COMPONENTE BASES DE DATOS.

El grupo Bases de Datos fue el responsable de el diseño y desarrollo de bases de datos que agilizaron la captura, almacenamiento, manipulación, y generación de informes (especialmente estadísticos) de la información generada en cada uno de los monitoreos realizados por las Universidades, entre otros desarrollos que facilitaron el manejo de la información como fueron la base de datos para el manejo de ficha bibliográficas y una base de datos específica para el manejo de encuestas realizadas por el grupo de gestión.

A continuación se relacionan las principales actividades y productos realizados y generados por este componente:

8.7.1 Diseño y desarrollo de bases de datos

Se diseñaron y desarrollaron las siguientes bases de datos

8.7.1.1 Base de Datos Información Bibliográfica del Río Medellín

Esta base de datos permite el almacenamiento y manipulación de información de las fichas bibliográficas de todos los estudios que están disponibles en diferentes

instituciones (bibliotecas, oficinas) de los municipios del área metropolitana y que tengan que ver con información de la cuenca del Río Medellín, permite clasificar información por temática, zonas de ubicación de los estudios, autores, sitios de localización y así mismo su fácil ubicación.

Esta base de datos fue un insumo fundamental para el análisis de información del grupo del componente de gestión.

8.7.1.2 Base de Datos Descriptiva Monitoreo Río Medellín.

La Base de Datos de Monitoreo fue concebido, diseñada y desarrollada para almacenar toda la información que arrojan los muestreos, además de que permite manipular la información y generar informes y gráficos específicos a partir de cruces de variables seleccionados por el usuario. Este ha sido una herramienta básica para agilizar las actividades de análisis y procesamiento de información del grupo encargado del componente Calidad del proyecto.

8.7.2 Desarrollo de actividades complementarias.

- Generación de informes para construcción del modelo QUAL2K; Se revisó qué información podría ser generada directamente desde la base de datos, para la modelación con Qual2k, y efectivamente fue suministrada al personal del componente de calidad.
- Propuesta de codificación de las estaciones, se elaboró una propuesta de codificación para las estaciones y puntos de muestreo, que facilitara en cualquier momento el intercambio de información entre la base de datos geográfica y la base de datos alfanumérica.
- Diseño y desarrollo de base de datos para manejo de encuestas por el grupo de Gestión, en Ms-Access se diseño y desarrollo una base de datos que permitió el manejo de encuestas por el grupo de gestión.

8.7.3 Documentos y productos entregados por el componente.

- Archivo ejecutable Base de Datos Información Bibliográfica del Río Medellín (\\:Informes SIG y BD\RESPALDO BD\FICHAS BIBLIOGRAFICAS\Fichas_Bibliograficas.mdb)
- Respaldo digital Base de Datos Información Bibliográfica del Río Medellín (\\:Informes SIG y BD\INFORME BD\RESPALDO BD\FICHAS BIBLIOGRAFICAS\Fichas_Bibliograficas_BD.mdb)
- Manual de Usuario Base de Datos Información Bibliográfica del Río Medellín: el cual contiene Generalidades, Modelo entidad relación, Modulo administrativo, Modulo Operativo, Modulo de Informes, Diccionario de Datos. (Anexo 1.)

- Archivo ejecutable Base de Datos Descriptiva Monitoreo Río Medellín. - (\\:Informes SIG y BD\INFORME BD\RESPALDO BD\MONITOREO\Monitoreo.mdb)
- Respaldo digital Base de Datos Descriptiva Monitoreo Río Medellín. (\\:Informes SIG y BD\RESPALDO BD\MONITOREO\Monitoreo_BD.mdb)
- Manual de Usuario Base de Datos Descriptiva Monitoreo Río Medellín el cual contiene Generalidades, Modelo entidad relación, Modulo administrativo, Modulo Operativo, Modulo de Informes, Diccionario de Datos. (Anexo 2.)
- Diccionario de Datos Y Modelo Entidad Relación Modulo de Aguas ARECNAVA (Anexo 3)
- Archivos Ejecutables del programa para migración automática de Access a ORACLE. (\\:Informes SIG y BD\INFORME BD\MIGRACION ACCESS_ORACLE\)
- Manual de usuario del proceso de migración de datos de Access a ORACLE. (\\:Informes SIG y BD\INFORME BD\MIGRACION ACCESS_ORACLE\Manual_Migracion.doc)
- Propuesta de codificación de las estaciones. (Anexo 4.) Esta propuesta fue utilizada para la construcción del modelo de datos y los respectivos desarrollos realizados por las Universidades, pero para la Migración de la Información a ORACLE y específicamente al Sistema de Información ARECNAVA, se propuso una nueva codificación por el AMVA la cual fue acogida por LAS UNIVERSIDADES, para lo cual se ajustó la información previo a la migración.
- Base de datos para manejo de encuestas por el grupo de Gestión. (\\:Informes SIG y BD\INFORME BD\RESPALDO BD\ENCUESTAS\Encuestas.mdb)

8.7.4 Conclusiones

- Lo generado en esta fase del proyecto en cuanto a estructuración de información cartográfica digital es sólo el principio del SIG para el Monitoreo del Río Medellín, continua el desarrollo global del proyecto que garantice una construcción e implementación total de la red de monitoreo para lo cual el SIG será el eje principal que facilitará la operación y gestión de la red.
- Queda en manos de las administraciones presentes y futuras el vincular a los desarrollos informáticos futuros, las herramientas técnicas desarrolladas desde las bases de datos para garantizar el flujo de información generada en este proceso.

9 COMPONENTE MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

9.1 GENERALIDADES

La complejidad de los escenarios en el estudio de la calidad del recurso hídrico (gran cantidad de variables hidrológicas, fisicoquímicas, microbiológicas y bacteriológicas, así como su variación espacial y temporal) requiere de herramientas computacionales para el estudio de los procesos físicos y químicos involucrados, que ayuden a la planificación, evaluación y control de la calidad del agua. Por tal razón han proliferado numerosos modelos de diverso estado de desarrollo, alcance y complejidad que abarcan toda la gama de necesidades generales desde el mero balance de masas hasta modelos tridimensionales complejos. Estas herramientas se ven a su vez favorecidas por el notable avance de la informática, lo cual posibilita la resolución más rápida de algoritmos muy elaborados y las hace más accesibles a cualquier nivel de usuario, gracias a la mejora de las interfases gráficas.

El estudio de la calidad del agua en ríos y corrientes por medio de la modelación computacional es incipiente en nuestro medio pero ha venido ganando importancia, algunos ejemplos locales son: la simulación de la calidad del agua del río Negro y sus principales afluentes, por parte del Centro de Investigaciones Ambientales y de Ingeniería de la Universidad de Antioquia (CIA, 1994 y CIA, 1998) y los estudios de simulación computacional del río Medellín y algunos de sus afluentes, realizados por Empresas Públicas de Medellín (EPPM, 1983). Existen además experiencias relevantes sobre otras corrientes del país con resultados estimulantes respecto a la inclusión de los modelos en el proceso de decisión en el contexto de aplicación de los instrumentos económicos de gestión de calidad de agua (tasas retributivas por contaminación acuática). Entre estas aplicaciones se destacan los abordajes de modelación con QUAL2K al río Bogotá (Camacho et al, 2002), modelación con Qual2e al río Chicamocha (CIA-UdeA, 2002) y las aplicaciones desarrolladas por la Universidad del Valle al río Cauca empleando los programas MIKE-II.

9.2 MODELO QUAL2

En este trabajo se representa sólo una porción particular de los procesos que gobiernan la calidad de agua en los sistemas de corrientes. No se afrontan los problemas de determinación de cargas distribuidas generadas en la cuenca (rural y urbana) asociados a los diferentes usos del suelo. Tampoco se evalúa la respuesta dinámica asociada a la variación temporal de las descargas contaminantes y al régimen hidrológico natural o regulado. Bajo estas premisas, y dada la experiencia parcial y simplicidad operativa, se ha seleccionado un modelo unidimensional, en estado permanente, para el cual existe un conjunto de programas de uso libre, generado y soportado por la EPA de estados Unidos. Estos son los modelos QUAL, en diferentes versiones (QUAL2EU y QUAL2K). La aplicación es básicamente preliminar, con una función esencial de apoyo a la interpretación y depuración de la información

de campo, tendiente a articular y validar las relaciones entre las funciones de estímulo (cargas contaminantes) y las variables de estado que representan la respuesta del sistema (concentraciones y cargas en la corriente). El modelo ayuda a la determinación de sectores de respuesta crítica y proporciona elementos para establecer la distribución espacial óptima de las estaciones que conformarán la red de monitoreo.

El modelo QUAL2 es un modelo unidimensional para la modelación de la calidad del agua en ríos y corrientes. Fue desarrollado por la agencia de protección ambiental americana (EPA) en los inicios de los años 70. Simula las principales reacciones de los ciclos de los nutrientes, producción algal y béntica, demanda bioquímica de oxígeno, reaireación atmosférica y sus efectos sobre el balance de oxígeno disuelto. Puede simular hasta 15 concentraciones de parámetros de calidad de aguas. Para proceder a la modelación dinámicamente, el usuario puede estudiar variaciones diurnas del oxígeno disuelto y el crecimiento algal, entre otras. No obstante, los efectos de variables dinámicas, tales como cambios en el nivel del flujo, y cambios en las cargas de fuentes puntuales, no pueden ser modelados. El modelo sólo simula flujos no variables y condiciones permanentes de cargas contaminantes (http://www.ifh.uni-karlsruhe.de/ifh/stud/StoTra/ws/vl_stotra1.html).

9.2.1 Representación conceptual

Esta consiste en una idealización gráfica del prototipo o sistema real, la cual describe los atributos topológicos y geométricos que deben ser preservados en el modelado y que identifican el dominio espacial, las condiciones de frontera y las interacciones entre las diferentes partes del prototipo. El modelo QUAL representa el sistema de corrientes como una red ramificada, conformada por elementos llamados tramos o elementos computacionales, cada uno con longitud definida por el modelador. El modelo asume valores constantes de hasta 26 parámetros físicos, químicos y biológicos en cada tramo. El modelo considera los tramos como zonas homogéneas y la variación espacial estará representada por los cambios en las propiedades de un tramo al siguiente.

La degradación de la materia orgánica por microorganismos, y el consumo asociado de oxígeno, es el proceso de mayor importancia ecológica y ambiental en la cuenca del río Medellín, sin desconocer la importancia de los procesos asociados a la presencia de sedimentos, metales pesados y tóxicos de diverso origen

Los balances de masas determinan las concentraciones de los minerales conservativos, las bacterias coliformes y los constituyentes no conservativos en cada elemento. Los principales procesos de transformación al interior de los elementos incluyen transformación de nutrientes, producción de algas, demanda béntica y demanda carbonácea, reaireación atmosférica. El módulo principal estima el efecto de todos esos procesos en el balance de oxígeno disuelto. El balance de oxígeno está controlado por un conjunto de variables y procesos, que están representados matemáticamente por una ecuación.

Las variables de estado fundamentales son:

Concentración de oxígeno disuelto (mg/l)
Concentración de saturación de oxígeno disuelto bajo las condiciones locales.
Concentración de DBO (demanda bioquímica de oxígeno) carbonácea. (mg/l).
Concentración de biomasa algal como Clorofila A (mg-A/l)
Profundidad media de la corriente (m).
Concentración de nitrógeno amoniacal (mg/l)
Concentración de nitritos (mg/l)

Los principales procesos que intervienen en este balance y los parámetros que definen sus tasas son:

- Reaireación atmosférica
- Fotosíntesis
- Demanda bioquímica carbonácea
- Demanda bioquímica nitrogenada
- Demanda béntica
- Respiración animal y vegetal
- Temperatura: afecta las tasas y la concentración de saturación de oxígeno.
- Nitrificación:
- Crecimiento de algas
- Respiración de algas.

El principal proceso de consumo, o sumidero del oxígeno, corresponde al proceso de degradación de materia orgánica, representado por la DBO5 (demanda bioquímica de oxígeno). Las fuentes principales que aportan oxígeno son la fotosíntesis y la reaireación atmosférica.

9.3 APLICACION DEL MODELO QUAL2 PARA LA ZONA DE ESTUDIO DEL RÍO MEDELLÍN

La tarea inicial en la aplicación de este modelo consiste en selección de la escala espacial, el tipo de sistemas considerados y el conjunto de procesos que se pretende representar. Se plantea una aproximación a las condiciones del curso principal del río Medellín, en un tramo longitudinal de aproximadamente 100Km., desde el sector de San Miguel hasta Puente Gabino, en la desembocadura del río Grande. Hasta este punto la cuenca tiene un área aproximada de 1220Km² y corresponde al límite de este estudio. El eje principal del río está vinculado a las acciones desarrolladas en la cuenca a través de cargas puntuales, cuencas tributarias y aportes de cabecera. Los afluentes mayores y los vertimientos domésticos e industriales entran en esta categoría. La atención se centra en la dinámica de la descomposición de materia orgánica y el conjunto de mecanismos físicos y biológicos que controlan los balances de oxígeno.

Como el proyecto está planeado para tres fases, y en la primera sólo se busca ver la sensibilidad del modelo, de manera muy general, a algunos parámetros representativos

de la calidad del agua del río Medellín, con la información hidrogeométrica y de calidad del agua que se tiene hasta el momento, se consideró el número de tramos en que se subdivide la longitud en estudio del río basados en el número de estaciones de monitoreo y no en la homogeneidad de las características hidrogeométricas como debe hacerse en una fase posterior de este proyecto. En cada tramo se localizaron los puntos de carga y descarga de contaminantes (quebradas, descargas puntuales significativas) así como también aquellos en los cuales hay cambios en las condiciones químicas (remoción de la CBOD, etc. En la Tabla 8 se presenta los tramos seleccionados. La localización de cada tramo esta referenciada a un abscisado por el eje del río con cero en el Alto de San Miguel.

Tabla 8: Localización de los tramos en el eje del río

Tramo	Nombre	Localización (km)	Longitud (km)
		Inicio - Fin	
Tramo 1	San Miguel-Primavera	5.814-10.563	4.749
Tramo 2	Primavera-Ancon Sur	10.563-21.475	10.912
Tramo 3	Ancon Sur-Antes San Fernando	21.475-27.937	6.462
Tramo 4	Antes San Fernando-Despues San Fernando	27.937-29.016	1.079
Tramo 5	Despues San Fernando-Puente Guayaquil	29.016-33.442	4.426
Tramo 6	Puente Guayaquil-Aula Ambiental	33.442-37.143	3.701
Tramo 7	Aula Ambiental-Puente Acevedo	37.143-42.361	5.218
Tramo 8	Puente Acevedo-Puente Machado	42.361-46.66	4.299
Tramo 9	Puente Machado-Metromezclas	46.66-54.377	7.717
Tramo 10	Metromezclas-Puente Girardota	54.377-59.223	4.846
Tramo 11	Puente Girardota-Parque de Las Aguas	59.223-65.01	5.787
Tramo 12	Parque de Las Aguas -Hatillo	65.01-70.726	5.716
Tramo 13	Hatillo-Papelsa	70.726-80.9	10.174
Tramo 14	Papelsa-Popalito	80.9-89.781	8.881
Tramo 15	Popalito-Pradera	89.781-96.248	6.467
Tramo 16	Pradera-EADE	96.248-104.114	7.866
Tramo 17	EADE-Puente Gabino	104.114-105	0.886

La estimación de caudales en los diferentes sectores de la corriente principal y de los principales tributarios se presenta en detalle en otro informe de este trabajo

9.3.1 Régimen hidráulico del sistema de corrientes

Con base en la información de campo se obtuvieron, de forma preliminar, las características hidráulicas del curso principal del río Medellín. Uno de los aspectos principales considerado preliminarmente se relaciona con el patrón de variación longitudinal de velocidad media en las corrientes, esencial para estimar tiempos de

viaje de los flujos entre los diferentes tramos de la corriente principal. El río presenta un régimen hidráulico complejo, aun en las secciones trapezoidales artificiales, asociado a su alta pendiente, la relación ancho-profundidad y la granulometría del fondo de la corriente.

El modelo presenta tres opciones para la descripción hidráulica del sistema. La primera opción representa la dinámica del flujo a través de la ecuación empírica de Manning asumiendo canal trapezoidal. La segunda opción, se basa en la construcción de relaciones empíricas, válidas para cada tramo, que vinculan las variables geométricas y dinámicas de las secciones transversales a los caudales presentes. Y la tercera opción, calcula el caudal utilizando la ecuación de vertedero de cresta delgada para representar caídas hidráulicas. En este estudio se implementó la primera opción, la ecuación de Manning, para el cálculo de las variables hidráulicas. En la Tabla 9 Coeficientes de Manning promedios para cada uno de los tramos definidos se listan los coeficientes de Manning promedios para cada uno de los tramos definidos.

Tabla 9 Coeficientes de Manning promedios para cada uno de los tramos definidos

Tramo	Nombre	Pendiente promedio del tramo (%)	n de Manning
Tramo 1	San Miguel-Primavera	0.040	0.110
Tramo 2	Primavera-Ancon Sur	0.015	0.100
Tramo 3	Ancon Sur-Antes San Fernando	0.013	0.100
Tramo 4	Antes San Fernando-Despues San Fernando	0.010	0.085
Tramo 5	Despues San Fernando-Puente Guayaquil	0.008	0.080
Tramo 6	Puente Guayaquil-Aula Ambiental	0.008	0.080
Tramo 7	Aula Ambiental-Puente Acevedo	0.007	0.070
Tramo 8	Puente Acevedo-Puente Machado	0.007	0.070
Tramo 9	Puente Machado-Metromezclas	0.003	0.070
Tramo 10	Metromezclas-Puente Girardota	0.002	0.070
Tramo 11	Puente Girardota-Parque de Las Aguas	0.002	0.070
Tramo 12	Puente Girardota-Hatillo	0.002	0.070
Tramo 13	Hatillo-Papelsa	0.005	0.060
Tramo 14	Papelsa-Popalito	0.005	0.050
Tramo 15	Popalito-Pradera	0.005	0.050
Tramo 16	Pradera-EADE	0.005	0.060
Tramo 17	EADE-Puente Gabino	0.005	0.060

9.3.2 Consideraciones para la modelación

- En otros informes de este trabajo se desarrolló una descripción básica de las condiciones climáticas y fisiográficas a escala regional. En particular, se tipificó el

patrón de distribución espacial y estacional de las lluvias, y los patrones asociados de los flujos en las corrientes. En términos de los impactos de la contaminación orgánica dominante, se destacan dos escenarios hidrológicos contrastantes, asociados al régimen pluviométrico bimodal. Se denomina verano, al período extremo de estiaje, y se denomina invierno, al periodo de flujos altos. En esta fase preliminar de modelación de la calidad del agua del río se trata de reproducir con el modelo QUAL2K las condiciones medidas en las diferentes campañas de medición (11 de marzo, 17 de marzo, 14 de abril, 28 de abril, 12 de mayo, 14 de julio, 27 de julio, 18 de agosto, 29 de agosto y 8 de septiembre). Debido a que sólo se realizó una campaña de monitoreo en las principales quebradas tributarias, para la modelación de caudales en los diferentes escenarios se utilizó el principio de conservación de la masa, se asumió que la diferencia entre los valores medidos de caudales en una estación de muestreo en el río y la estación inmediatamente aguas arriba se distribuye entre las diferentes quebradas tributarias que descargan en el tramo considerado. Los valores de carga se consideraron constantes para todos los escenarios e iguales a los valores medidos en la campaña de muestreo.

Calibración del modelo: La calibración de modelo es una de las fases más importantes en el desarrollo de un modelo numérico. El objetivo de la calibración es reproducir el patrón de flujo para la situación existente mediante la variación de los parámetros físicos del modelo dentro de valores físicamente adecuados. Para la calibración del modelo se utilizó la información obtenida en las campañas de monitorio del 11 de marzo, 17 de marzo y 14 de abril

Validación del modelo: La validación de un modelo computacional es el proceso de formular y documentar acerca de la aplicabilidad y precisión de los resultados computacionales del modelo en relación con los propósitos de éste y del sistema natural que representa. La validación del modelo es la última etapa que se debe hacer en su desarrollo antes de su aplicación. Durante este proceso no se pueden alterar los parámetros del modelo obtenidos en la etapa de calibración ya que el objetivo de la validación es verificar la pertinencia de los resultados del modelo para otros conjuntos de datos diferentes a los utilizados en la calibración. Para la validación del modelo se utilizó la información obtenida en las campañas de monitorio del 28 de abril, 12 de mayo, 14 de julio, 27 de julio, 18 de agosto, 29 de agosto y 8 de septiembre.

9.4 RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos para una fecha de la etapa de calibración del modelo. Cabe anotar, que los resultados que arroja el modelo son valores medios para cada tramo (valores promedios en la longitud de cada tramo en que se subdividió la corriente) y considerando régimen permanente (características hidrogeométricas y de calidad del agua constantes en el tiempo). Siendo rigurosos, estos resultados no se deben comparar con resultados puntuales obtenidos en las campañas de medición en un punto fijo y en un único tiempo. Sin embargo, la comparación se hace para evaluar la capacidad del modelo en capturar la tendencia,

tanto en los parámetros hidráulicos como de calidad del agua, de cada tramo estudiado de la corriente.

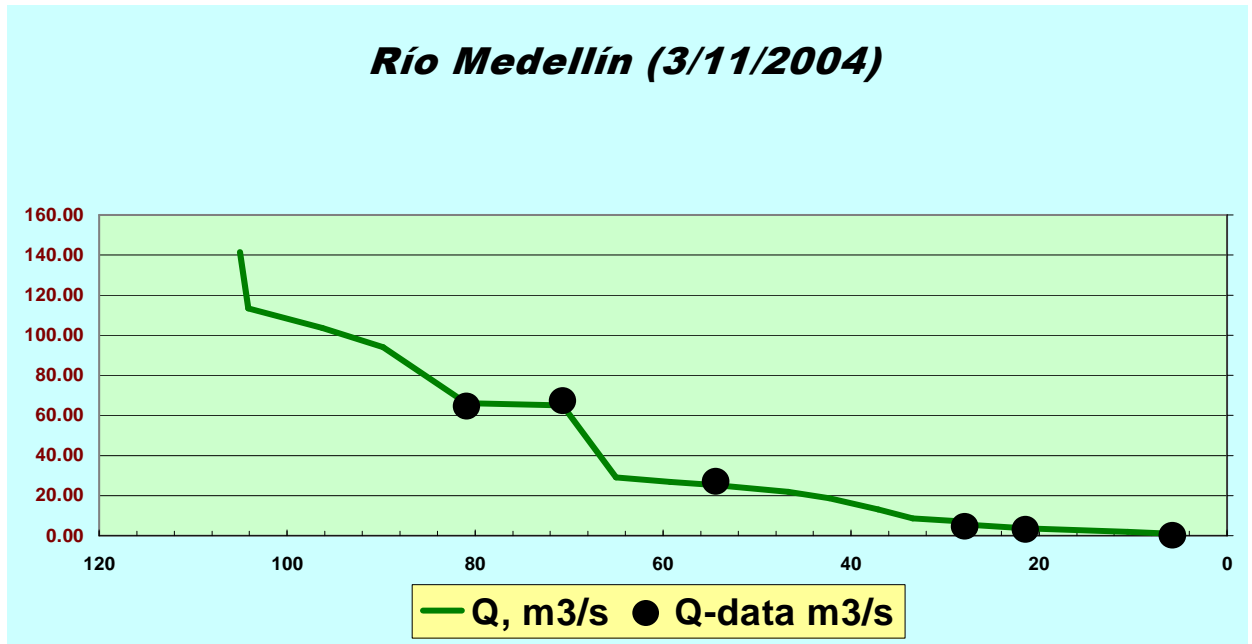
En las siguientes figuras se presentan como ejemplo los resultados obtenidos en la simulación de una fecha en la etapa de calibración, utilizando la siguiente convención:

Símbolo	Descripción
●	Parámetro hidráulico medido en campo
—	Parámetro hidráulico calculado por el modelo
■	Parámetro de calidad promedio medido en campo
—	Parámetro de calidad promedio calculado por el modelo
□	Parámetro de calidad máximo o mínimo medido en campo
.....	Parámetro de calidad máximo o mínimo calculado por el modelo

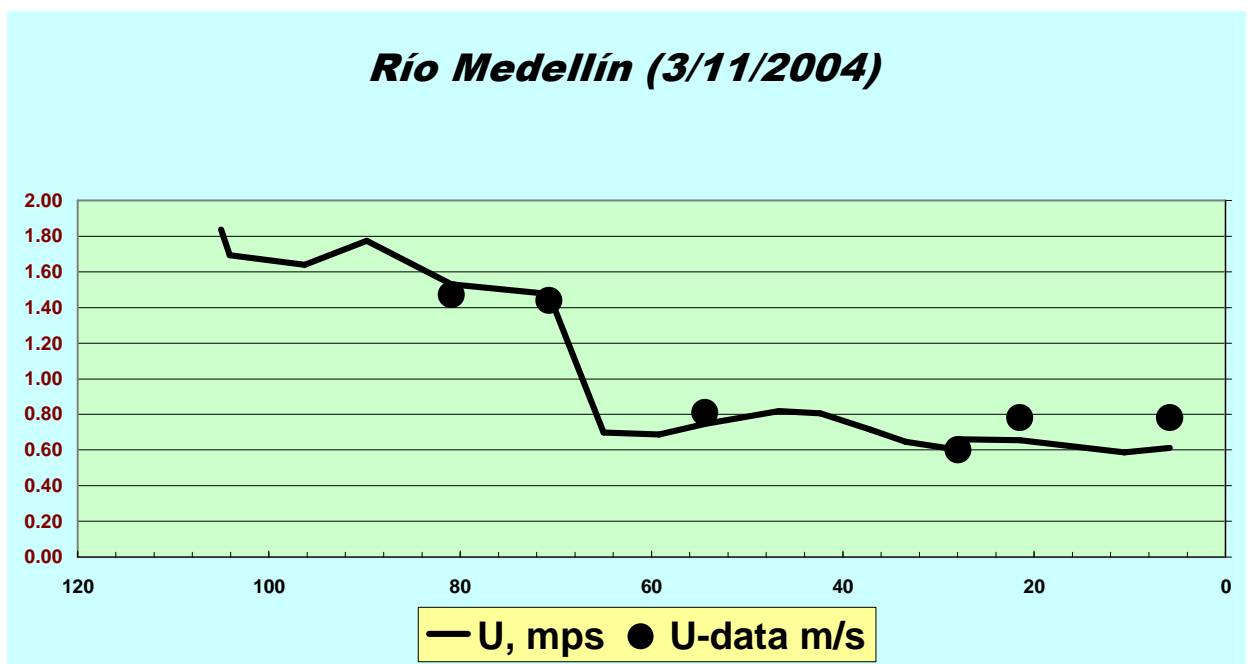
9.4.1 Etapa de calibración del modelo

- Campaña De Monitorio Del 11 De Marzo

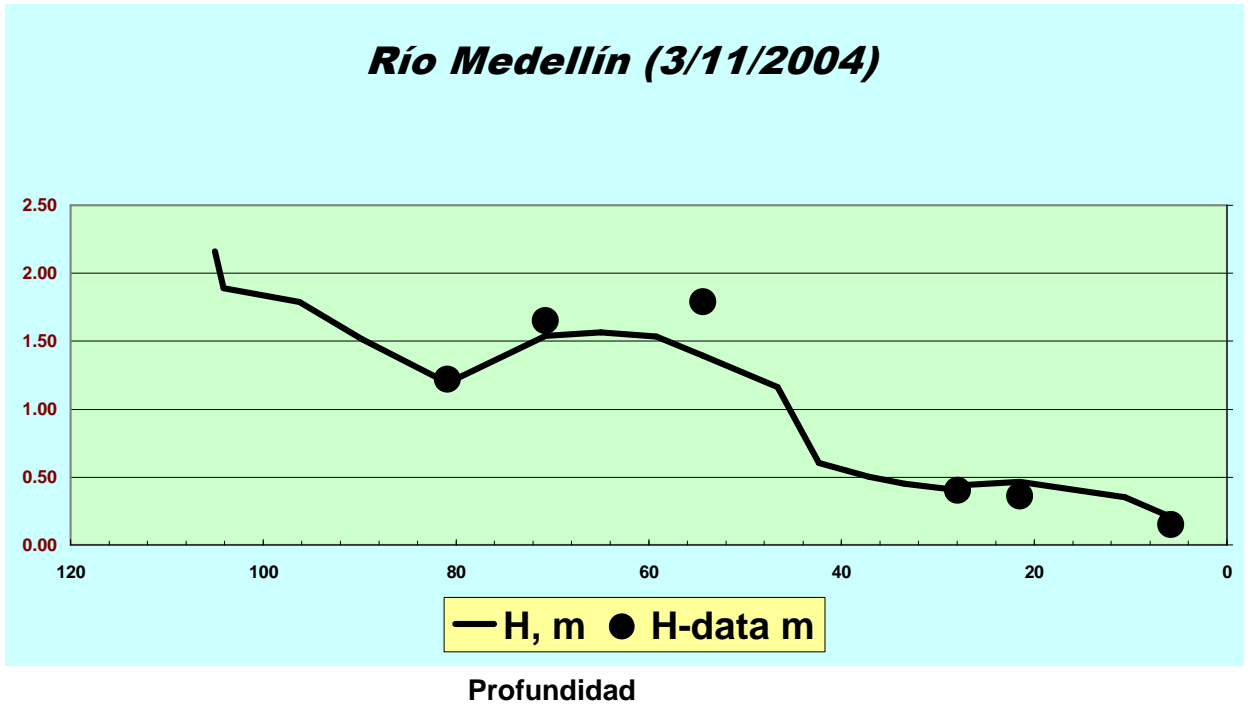
Características Hidráulicas



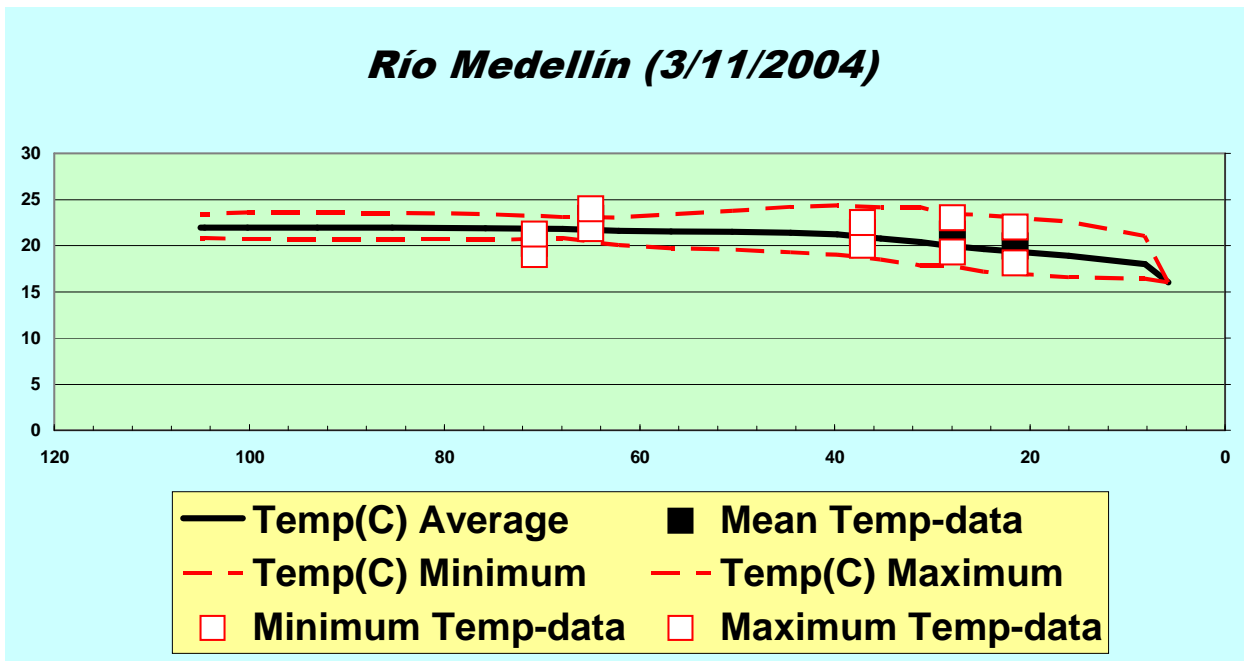
Caudal



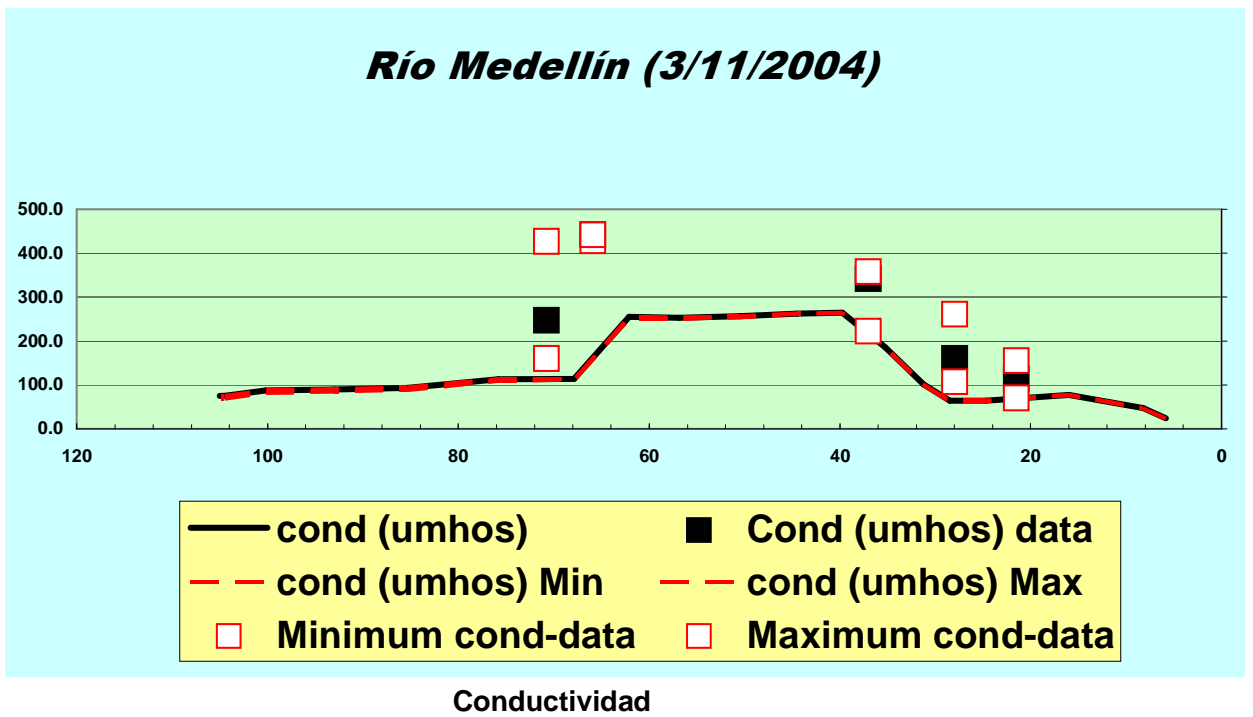
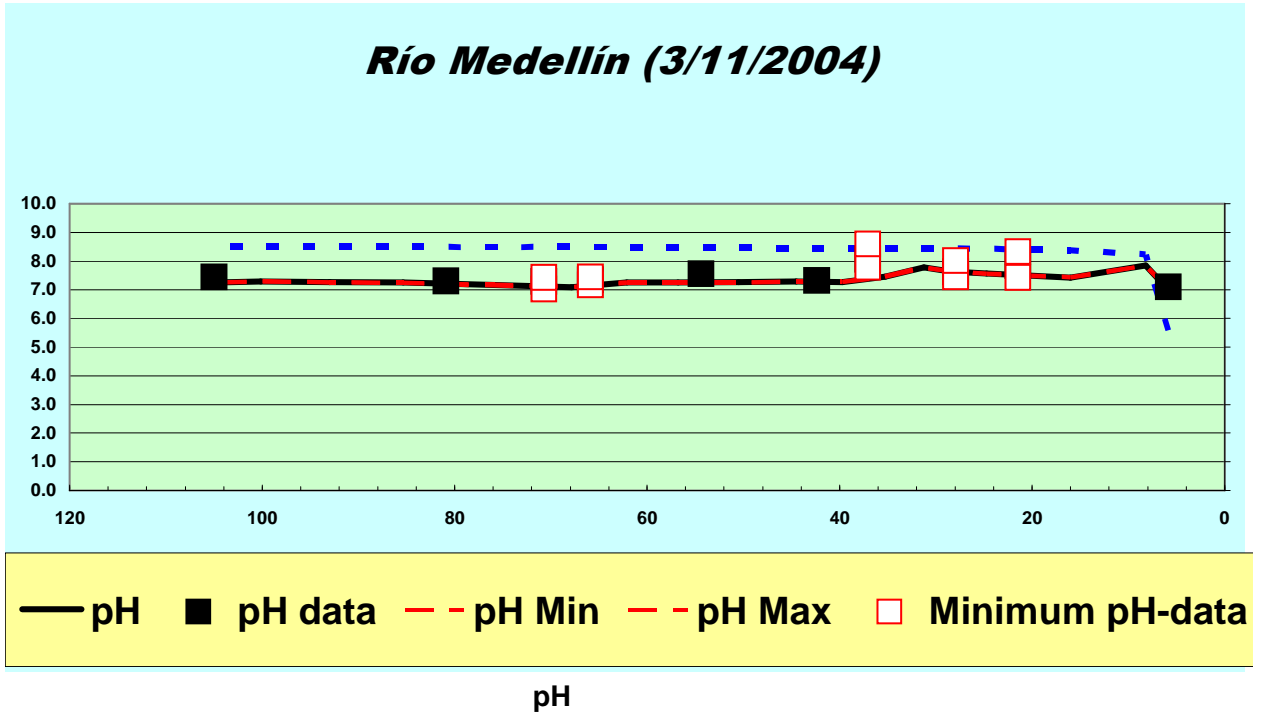
Velocidad

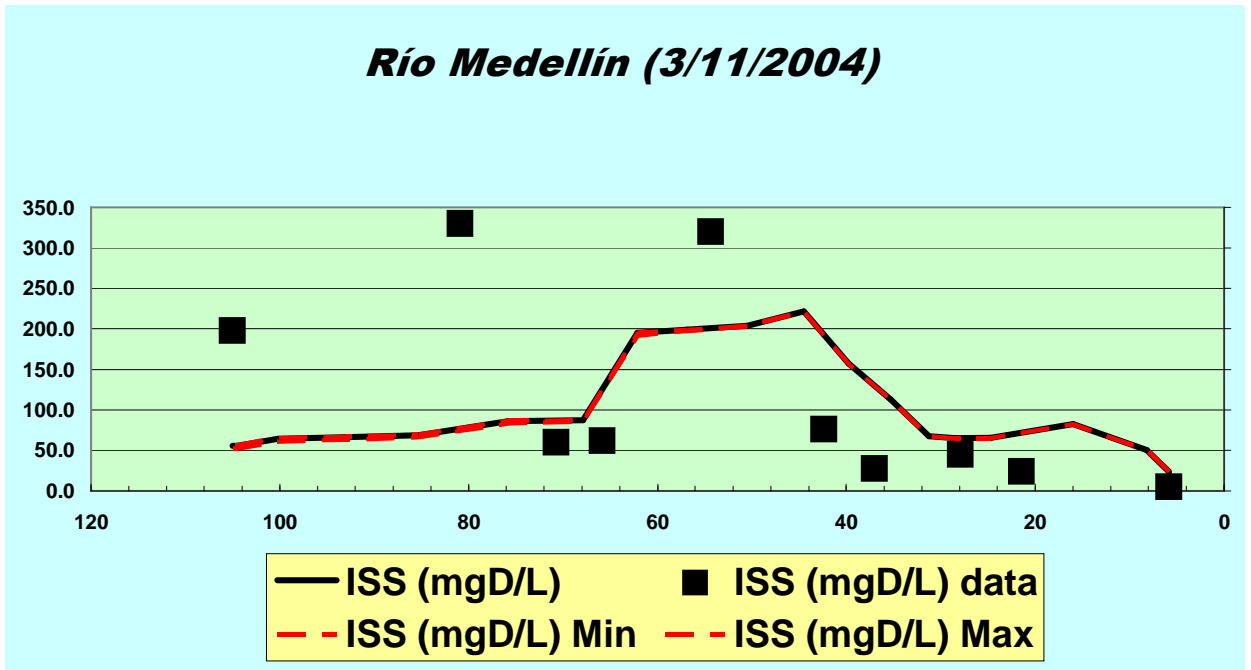


Características De Calidad Del Agua

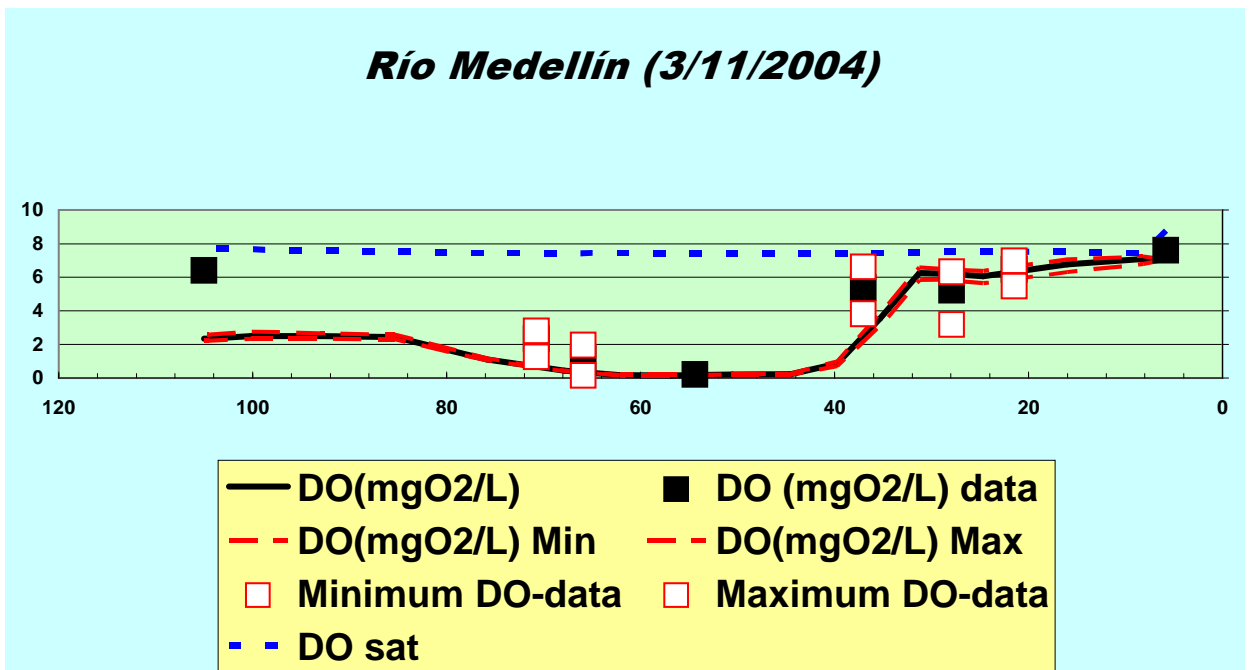


Temperatura



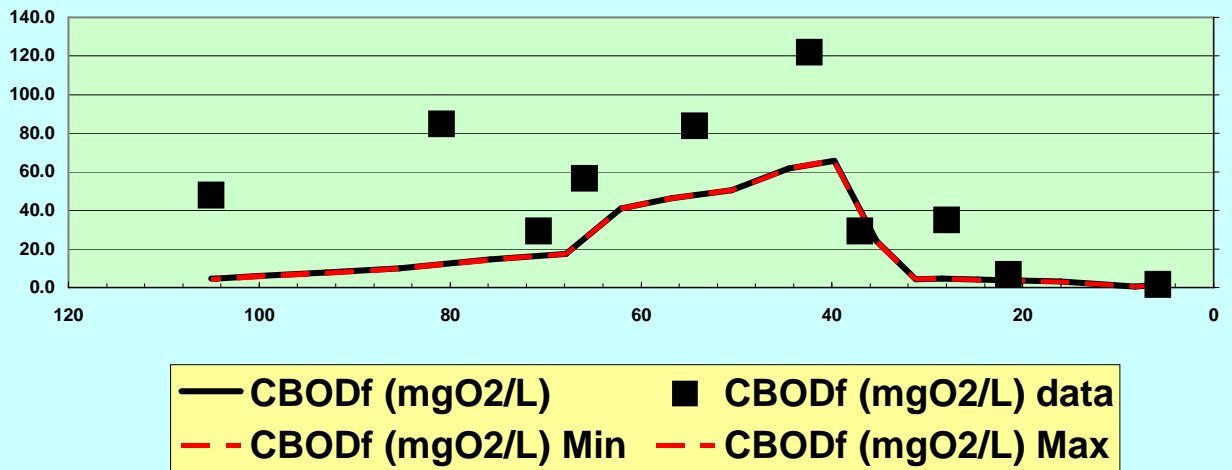


Sólidos Suspendidos Inorgánicos



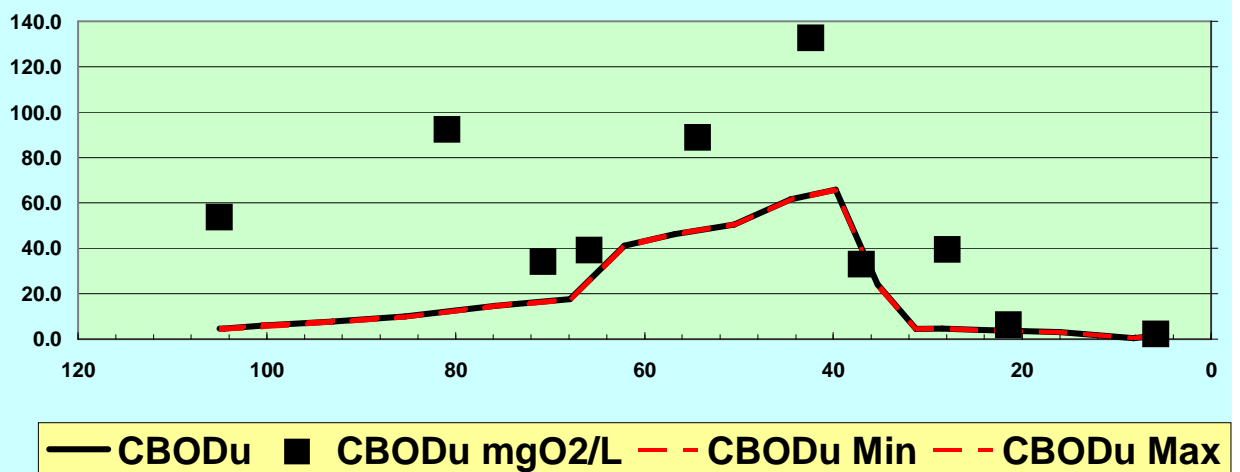
Oxígeno Disuelto

Río Medellín (3/11/2004)



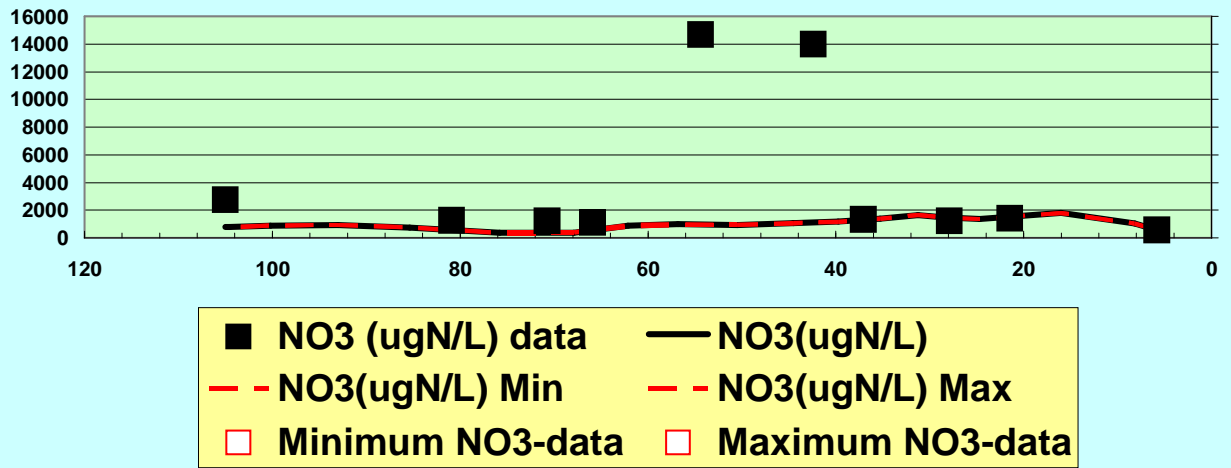
Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonacea

Río Medellín (3/11/2004)



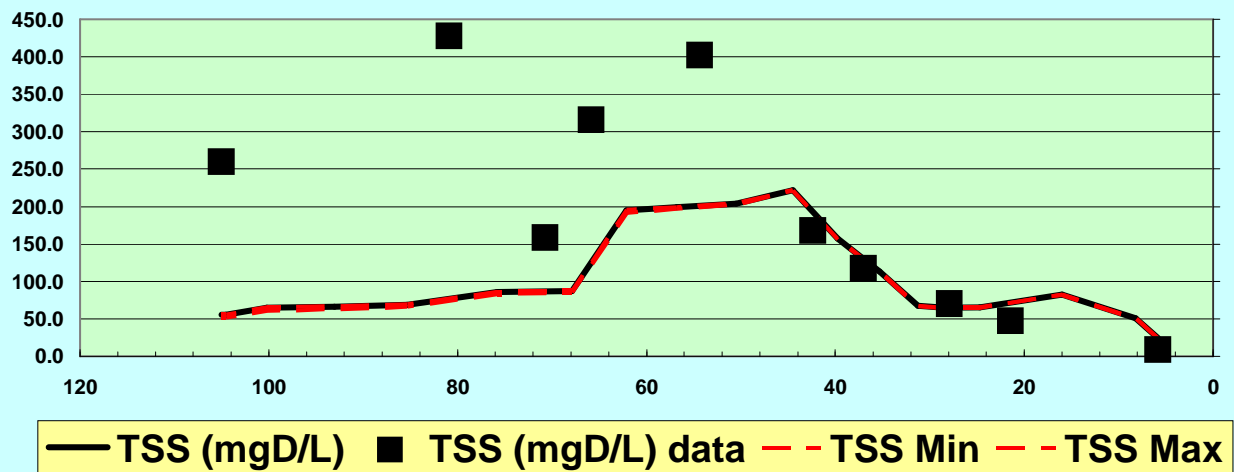
Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonacea Última

Río Medellín (3/11/2004)



NO₃

Río Medellín (3/11/2004)



Sólidos Suspendidos Totales

9.5 RECOMENDACIONES MODELACIÓN

9.5.1 Nitrógeno

La reserva fundamental del nitrógeno es la atmósfera, en donde dicho elemento se encuentra en forma de N_2 , pero esta molécula no puede ser utilizada directamente por la mayoría de los seres vivos (exceptuando algunas bacterias). Esas bacterias y algas cianofíceas que pueden usar el N_2 del aire juegan un papel muy importante en el ciclo de este elemento al hacer la fijación del nitrógeno. De esta forma convierten el N_2 en otras formas químicas (nitratos y amonio) asimilables por las plantas. El amonio (NH_4^+) y el nitrato (NO_3^-) lo pueden tomar las plantas por las raíces y usarlo en su metabolismo. Usan esos átomos de N para la síntesis de las proteínas y ácidos nucleicos. Los animales obtienen su nitrógeno al comer a las plantas o a otros animales. En el metabolismo de los compuestos nitrogenados en los animales acaba formándose ión amonio que es muy tóxico y debe ser eliminado. Esta eliminación se hace en forma de amoniaco (algunos peces y organismos acuáticos), o en forma de urea (el hombre y otros mamíferos) o en forma de ácido úrico (aves y otros animales de zonas secas). Estos compuestos van a la tierra o al agua de donde pueden tomarlos de nuevo las plantas o ser usados por algunas bacterias. Algunas bacterias convierten amoniaco en nitrito y otras transforman este en nitrato. Una de estas bacterias (*Rhizobium*) se aloja en nódulos de las raíces de las leguminosas (alfalfa, alubia, etc.) y por eso esta clase de plantas son tan interesantes para hacer un abonado natural de los suelos. Donde existe un exceso de materia orgánica en el mantillo, en condiciones anaerobias, hay otras bacterias que producen desnitrificación, convirtiendo los compuestos de N en N_2 , lo que hace que se pierda de nuevo nitrógeno del ecosistema a la atmósfera. A pesar de este ciclo, el N suele ser uno de los elementos que escasean y que es factor limitante de la productividad de muchos ecosistemas.

Tradicionalmente se han abonado los suelos con nitratos para mejorar los rendimientos agrícolas. Durante muchos años se usaron productos naturales ricos en nitrógeno como el guano o el nitrato de Chile. Desde que se consiguió la síntesis artificial de amoniaco por el proceso Haber fue posible fabricar abonos nitrogenados que se emplean actualmente en grandes cantidades en la agricultura. Como veremos su mal uso produce, a veces, problemas de contaminación en las aguas: la eutrofización.

El ciclo del nitrógeno está dividido en cuatro compartimientos. El nitrógeno oxidable (nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniaco) puede ser transformado a nitritos y nitratos por las bacterias nitrificantes, utilizando oxígeno disuelto en el proceso. El QUAL2 emplea la clorofila a como el indicador de biomasa de algas planctónicas. Similarmente el ciclo del fósforo se modela usando dos compartimientos que dependen del metabolismo de las algas. **En aguas, las formas más importantes para evaluar en términos de su modelación son el nitrógeno total, amoniaco, ión amonio, nitratos y en sedimento, amoniaco e ión amonio.**

9.5.2 Fósforo y fosfato.

El fósforo es un componente esencial de los organismos. Forma parte de los ácidos nucleicos (ADN y ARN); del ATP y de otras moléculas que tienen PO_4^{3-} y que almacenan la energía química; de los fosfolípidos que forman las membranas celulares; y de los huesos y dientes de los animales. Está en pequeñas cantidades en las plantas, en proporciones de un 0,2%, aproximadamente. En los animales hasta el 1% de su masa puede ser fósforo.

La reserva fundamental de fósforo en la naturaleza es la corteza terrestre. Por meteorización de las rocas o sacado por las cenizas volcánicas, queda disponible para que lo puedan tomar las plantas. Con facilidad es arrastrado por las aguas y llega al mar. Parte del que es arrastrado sedimenta al fondo del mar y forma rocas que tardarán millones de años en volver a emerger y liberar de nuevo las sales de fósforo. Otra parte es absorbido por el plancton que, a su vez, es comido por organismos filtradores de plancton, como algunas especies de peces. Cuando estos peces son comidos por aves que tienen sus nidos en tierra, devuelven parte del fósforo en las heces (guano) a tierra. Es el principal factor limitante en los ecosistemas acuáticos y en los lugares en los que las corrientes marinas suben del fondo, arrastrando fósforo del que se ha ido sedimentando, el plancton prolifera en la superficie. Al haber tanto alimento se multiplican los bancos de peces, formándose las grandes pesquerías del Gran Sol, costas occidentales de África y América del Sur y otras. Con los compuestos de fósforo que se recogen directamente de los grandes depósitos acumulados en algunos lugares de la tierra se abonan los terrenos de cultivo, a veces en cantidades desmesuradas, originándose problemas de eutrofización.

La importancia de la determinación del fosfato ha crecido rápidamente en la práctica de la ingeniería ambiental a medida que los profesionales han descubierto las muchas formas diferentes en que los compuestos del fósforo afectan los fenómenos medioambientales. Los únicos compuestos inorgánicos del fósforo que interesan en la práctica de la ingeniería son los fosfatos en sus formas moleculares deshidratadas, usualmente llamadas polifosfatos o fosfatos condensados. Por lo general, el fósforo unido en forma estructural tiene poca importancia.

Con el propósito de llevar a cabo una simulación precisa desde el punto de vista de ingreso de los datos relacionados con el fósforo, las formas de mayor importancia son: fósforo total, fósforo inorgánico y en el sedimento fósforo total.

Es importante considerar que para próximas campañas tal como se menciona en el ítem anterior, algunas formas de compuestos químicos deben medirse, para asegurar más precisión en los resultados de la modelación. Adicionalmente, vale la pena resaltar que es muy importante simular la calidad de la corriente para condiciones hidrológicas extremas (mínimas y máximas con diferentes períodos de retorno) y medias.

10 COMPONENTE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA

Se presenta a continuación, la descripción de cada una de las actividades realizadas para la elaboración del estudio hidrológico e hidráulico en la determinación de la red de monitoreo de calidad de aguas del río Medellín. Este resumen consta de la descripción de cada uno de los capítulos realizados en la elaboración del estudio, enfatizando en los aspectos más relevantes durante el desarrollo de cada una de las metodologías y los resultados obtenidos a través de la aplicación de las mismas.

10.1 CAMPAÑAS DE AFORO

10.1.1 Metodología

Para estimación de cargas contaminantes y el estudio de su variabilidad espacio – temporal, se llevaron a cabo aforos líquidos en puntos localizados sobre el eje del río Medellín y sobre los afluentes que mayor aporte contaminante introducían al mismo. En los aforos realizados en los puntos de muestreo, definidos de acuerdo con los asentamientos industriales del área metropolitana de la cuenca, fueron tenidos en cuenta los siguientes criterios:

- Accesibilidad al punto
- Condiciones de medición por vadeo o suspensión.
- Condiciones hidráulicas de flujo uniforme, sección estable.
- Puntos que sirvan de control para hacer balances y seguimiento de los caudales a lo largo del río.
- Logística que permita la mayor simultaneidad de la mediciones.

La información de campo obtenida por vadeo o por suspensión (según las características del punto de muestreo en cuanto a accesibilidad), fue posteriormente procesada aplicando el método Área – Velocidad, con el que el caudal a través de una sección puede estimarse empleando el levantamiento batimétrico realizado y el perfil de velocidades medido en una serie de verticales virtuales definidas en cada sección de aforo.

Las estaciones así definidas, las cuales se muestran en la Figura 14, fueron aforadas y/o muestreadas de acuerdo con el itinerario presentado en la Tabla 10 Cronograma de campañas de aforo

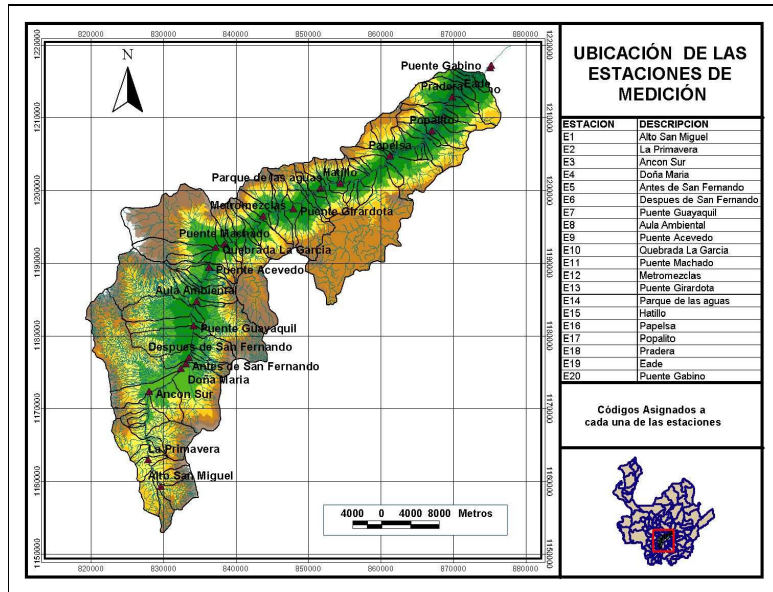


Figura 14 Ubicación de las estaciones de Medición

Tabla 10 Cronograma de campañas de aforo

CAMPAÑA	FECHA
Campaña 1	3/11/2004
Campaña 2	3/17/2004
Campaña 3	4/14/2004
Campaña 4	4/28/2004
Campaña 5	5/12/2004
Campaña 6	7/14/2004
Campaña 7	7/27/2004
Campaña 8	8/18/2004
Campaña 9	8/29/2004
Campaña 10	9/8/2004

10.1.2 Resultados

Los aforos realizados no sólo fueron empleados en la obtención de cargas contaminantes y niveles de polución en el río Medellín y sus afluentes, sino también en la evaluación de la variabilidad espacio – temporal de caudales. Para ello se llevaron a cabo aforos en las 20 estaciones preestablecidas en las campañas de los días 11 de Marzo, 17 de Marzo, 14 de Abril, 28 de Abril y 12 de Mayo que permitieron identificar el aumento de caudales hacia aguas abajo de la cuenca, excepto en aquellos casos en los que la no simultaneidad en los aforos reflejó la influencia de descargas como la de la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando en el sur, la de los interceptores construidos por EPM en la zona centro de la cuenca (sector Moravia) y la proveniente de la central Tasajera en la zona norte, en donde la variabilidad espacial

es más compleja que en los demás sectores dada la magnitud de los caudales descargados.

En las primeras cinco campañas se encontró mayor relevancia en la variabilidad temporal de caudales en la cuenca, lo cual llevó a la definición de una nueva estrategia de aforos en pro de identificar el patrón intra - diario de caudales en el río Medellín. Se redujo el número de estaciones por campaña, conservando sólo aquellas que por su localización sobre el eje del río permitían la obtención de caudales en las restantes estaciones valiéndose de balances de masa. En esta estrategia se aumentó a tres el número de aforos por estación. La aplicación de ésta estrategia permitió identificar la gran sensibilidad a eventos de precipitación y a las descargas de aguas residuales que los caudales poseen en la zona norte, ya que en esta zona de la cuenca los caudales recogidos en los colectores construidos por EPM y los caudales de Tasajera ya han sido descargados; además, en las estaciones de la zona centro también fue posible detectar variabilidad de caudales, aunque es más incierto el origen de ésta y se requiere mayor información.

La incertidumbre encontrada después de aplicar la segunda estrategia de aforo obliga a hacer un llamado a las entidades encargadas del proyecto para que gestionen, en próximas etapas, la adquisición de la información necesaria para analizar detalladamente la dinámica de los caudales recolectados en las redes de colectores e interceptores construidos por EPM en la zona centro de la cuenca de río Medellín, ya que el conocimiento de éstos factores permite aislar los pulsos de caudal no naturales sobre el río Medellín y caracterizar de una manera más aproximada la variabilidad temporal de caudales en el mismo.

Bajo las dos metodologías mencionadas anteriormente fue posible recolectar la información que se presenta en la Tabla 11, la cual no fue levantada totalmente en campo ya que eventualmente se presentaron lluvias y dificultades operativas, y en otros casos la ausencia de datos obedeció al cambio en las estrategias de aforo. Sin embargo, dichos cambios estuvieron acompañados de mecanismos de complementación de información, previamente establecidos, como rendimientos hidrológicos en las zonas sur y centro de la cuenca, y tránsitos hidrológicos simplificados en la zona norte de la misma, que permitieron definir los caudales correspondientes a las diferentes campañas programadas. Estos mecanismos, permitieron hacer una validación indirecta de la información de campo.

Tabla 11 Caudales obtenidos en campañas de aforo

ESTACIÓN	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)
	11/03/2004	17/03/2004	14/04/2004	28/04/2004	12/05/2004	14/07/2004	27/07/2004	18/08/2004	29/08/2004	08/09/2004
San Miguel	0.36	0.41	0.36	0.71	0.91	0.37	0.42	0.46	0.32	0.36
Primavera	1.18	1.12	1.15	2.22	2.05	1.25	1.40	1.55	1.07	1.2
									1.07	
Ancón Sur	3.15	2.98	3.28	4.40	4.79	3.33	3.73	4.13	3.78	3.04
						3.84	4.35	3.63	3.54	
						3.69	3.95			

**DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DE LA RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA
DEL RÍO MEDELLÍN EN JURISDICCION DEL AREA METROPOLITANA**
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA - UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA – UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN – UNIVERSIDAD
NACIONAL

ESTACIÓN	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)
	11/03/2004	17/03/2004	14/04/2004	28/04/2004	12/05/2004	14/07/2004	27/07/2004	18/08/2004	29/08/2004	08/09/2004
Quebrada Doña María	1.06	1.06	1.06	1.90	1.71	1.88	2.10	2.33	2.13	1.72
Antes de San Fernando	4.78	5.27	5.44	7.16	5.76	5.93	6.64	7.35	6.73	4.77
Después de San Fernando	5.52	6.09	6.29	8.27	9.20	6.06	7.01	7.49	5.86	5.51
Puente Guayaquil	6.72	7.41	6.47	9.91	8.30	7.38	8.54	9.12	7.13	7.67
						7.77	10.03	7.4	6.61	
						7.49	9.26			
Aula Ambiental	9.56	10.85	13.53	18.16	13.09	13.56	12.41	26.06	11.12	9.68
						13.91	12.25	12.37		
						14.03	15.46			
Puente Acevedo	12.00	12.91	13.37	23.09	18.78	15.10	13.81	27.67	14.71	13.73
						15.60	14.27	17.11		
						14.77	16.22			
Quebrada La García	1.27	1.27	1.31	2.25	2.49	2.42	3.34	3.66	1.18	2.62
						3.04	2.54	4.11		
						2.52	2.3			
Puente Machado	13.27	14.18	14.68	25.34	22.05	17.52	17.15	31.33	15.89	16.35
Copacabana	14.55	15.55	16.10	35.51	27.75	29.03	30.28	41.62	17.74	19.53
						26.00	34.11	31.88	19.78	
						31.28	32.14			
Metromezclas	27.19	23.02	16.10	35.51	27.75	29.03	30.28	41.62	17.74	19.53
Puente Girardota	28.83	24.41	17.07	35.69	27.81	30.78	32.11	44.13	18.81	20.71
Parque de las Aguas	30.96	26.21	18.33	38.33	29.86	33.05	34.48	47.39	20.20	22.24
Tasajera		28.23	23.39		25.46					
Hatillo	67.36									
Papelsa	64.81	49.29	52.12	38.89	31.71	55.00	68	98.7	22	47.6
Popalito				36.80	25.85	49.10	66.95	124	22.45	48.3
Pradera				36.40	26.60					47.1
Eade			54.70	38.15	27.90	57.50	72.5	197.5	24.6	46.3
Puente Gabino	148.00	66.60	72.70	80.60	60.10	101.00	126	253	73.1	85.05
Río Grande			7.28	16.10	14.17					

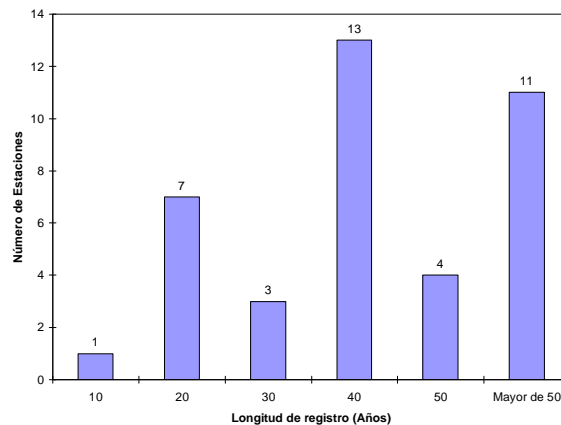
Caudal calculado mediante alguna de las estrategias descritas

Campañas sin toma de muestras

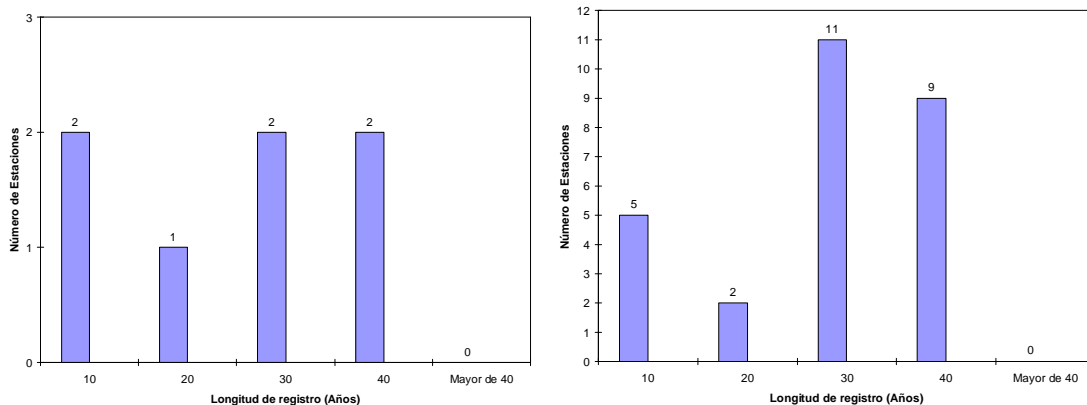
Caudal medido directamente en campo

10.2 RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

Se recopilaron en total 73 estaciones de precipitación al interior de la zona de estudio, de ellas 39 con registros de precipitación diaria, 7 con información mensual y 27 con información de promedios mensuales multianuales. El 87% de las series de precipitación diaria se encuentra en la cuenca del valle del Aburrá (0.05 estaciones / Km²).



Longitud de registros de las estaciones de precipitación diaria en la zona de estudio.



Longitud de registros de las estaciones de precipitación mensual (izquierda) y anual (derecha) en la zona de estudio.

Se seleccionaron 14 estaciones de caudal (13 diario y 1 mensual), asociadas a registros sobre el río Medellín y 3 tributarios como son la quebrada Piedras Blancas, El Hato y La García. Adicionalmente se obtuvo información de la quebrada Chorrillos que drena hacia la quebrada Piedras Blancas. Las estaciones localizadas sobre el río Medellín son de tipo LG. Se encontró que el 31 % de las estaciones tienen menos de 10 años de registros, el 23% de las estaciones presenta una longitud de registros entre 10 y 20 años y el 46%; que en número corresponde a 6 estaciones, poseen longitud de registros de más de 20 años, Figura 15, aunque, en general estas series no son continuas en el tiempo.

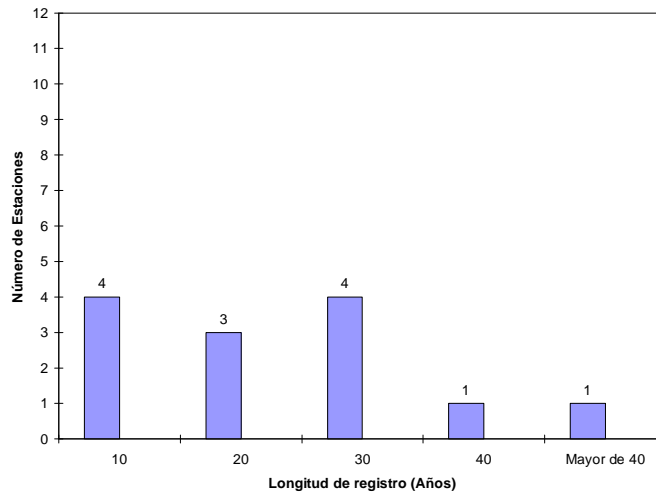


Figura 15 Longitud de registros de las estaciones de caudal diario en la zona de estudio.

10.3 PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD

Las series hidrológicas fueron sometidas a pruebas de homogeneidad e independencia, para detectar problemas de cambio y tendencia en el primer y segundo momento. De acuerdo a los resultados se realiza una descripción de cada una de las series obtenidas y el periodo a utilizar para la determinación de los caudales medios y extremos.

10.3.1 Metodología

- Se realiza un análisis exploratorio, donde se grafican las series con el fin de detectar visualmente el comportamiento de los datos y evaluar si son explicables bajo eventos extremos naturales o de manipulación y procesamiento de la información.
- Luego se procede a la estimación de datos faltantes mediante métodos como la precipitación normal para las series de lluvia y para series de caudales se utilizan regresiones lineales entre estaciones.
- A las series sin datos faltantes o períodos reconstruidos y a las agregadas mensualmente o anualmente, se aplican las pruebas de homogeneidad.
-

Las pruebas utilizadas son:

Cambios en la media

- * Prueba T simple
- * Prueba T modificada
- * Prueba del signo

Cambio en la varianza

- * Prueba F simple
- * Prueba F modificada
- * Ansari-Bradley

Tendencia en la media

- * Prueba T
- * Hotlling-Pabst
- * Mann-Kendall

* Prueba de Mann-Whitney

* Bartleff
* Levene

* Sen

Las pruebas se realizaron a nivel mensual y anual ya que los datos de precipitación y caudal a nivel diario muestran una dependencia muy marcada, es decir no cumplen con la hipótesis de independencia serial. Además las pruebas de tendencias se recomienda habitualmente realizarlas sobre la serie anual. Las pruebas de independencia serial que se aplicaron fueron las siguientes:

- Autocorrelograma de Anderson
- Prueba de Sperman
- Prueba de las corridas

10.4 METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES MEDIOS

Para la estimación de caudales medios en la cuenca del río Medellín, se recurre a la aplicación del método del balance hidrológico a largo plazo, considerando que en la cuenca los caudales medios pueden ser expresados como la diferencia de la lámina de agua precipitada menos la lámina de agua evaporada. Para ello, es necesario la construcción de mapas de precipitación y evaporación que representen la variabilidad espacial de estas variables en la cuenca.

El mapa de precipitación se elabora con la ayuda de herramientas tomadas de la geoestadística, y con base en los valores de la precipitación media multianual de 158 estaciones de precipitación distribuidas al interior y en la periferia de la región de estudio, además se agregaron 21 puntos de control para realizar una interpolación consecuente con los fenómenos físicos y climáticos existentes en la región.

Los mapas de evaporación se construyen a partir de metodologías de carácter experimental, las cuales permiten obtener el valor de esta variable mediante ecuaciones calibradas que dependen, entre otros, de la precipitación media anual, la elevación del terreno y la temperatura media anual, etc. Las metodologías aplicadas, son las propuestas por Turc, Cenicafe-Budyko y por el Método Regional.

El balance a largo plazo se realiza haciendo una integración en el dominio de cada subcuenca, para ello es necesario construir un Modelo Digital del Terreno (MDT), que permite realizar una representación del terreno a partir de celdas de 92.172 m x 92.172 m de resolución espacial, donde cada celda posee un atributo de elevación propio. El MDT es corregido en HydroSIG 3.1 Beta (programa elaborado en el Posgrado de Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional), eliminando sumideros y zonas planas, a partir de una red de drenaje conocida y revisada, que en este caso es la red de drenaje del río Medellín hasta su confluencia con el río Grande. Esta corrección se realiza con el fin de permitir el trazado automático de cuencas, y de garantizar que se permita el drenaje por gravedad al interior de la cuenca.

Con la metodología planteada, se realiza un balance hídrico en las cuencas determinadas por las estaciones de caudal localizadas al interior de la cuenca del río

Medellín, estos caudales medios se comparan con los caudales medios históricos medidos en estas estaciones, presentando notables diferencias entre los estimados y los caudales medidos, esto debido al aporte de aguas residuales de los diferentes municipios del Valle de Aburrá, los cuales son producto, en su mayoría, de trasvases de cuencas vecinas.

El sistema de acueducto del Vallé de Aburrá está alimentado principalmente por tres grandes sistemas de embalses como son: Riogrande II, Piedras Blancas y La Fe, embalses que son alimentados por aguas pertenecientes a cuencas diferentes a la del Río Medellín, razón por la cual se hace necesario la estimación de caudales de aguas negras en puntos estratégicos que aportaran grandes beneficios en los cálculos hidrológicos e hidráulicos que se efectúan en este estudio.

Los puntos estratégicos escogidos son (ordenados de aguas arriba a hacia aguas debajo de la cuenca del río Medellín):

Ancón Sur: Punto en el cual confluyen la mayoría de las aguas residuales de los municipios de La Estrella y Caldas, las cuales son aportadas al río a lo largo de su recorrido por estos municipios y no en un punto fijo.

Se tiene presupuestado construir colectores que lleven las aguas servidas hacia la planta de tratamiento de San Fernando.

Planta San Fernando: Es un punto obligado ya que allí se tratan las aguas negras de los municipios de Itagüí, Sabaneta y Envigado, además del corregimiento de San Antonio de Prado, aguas que son recolectadas en colectores y que vierten las aguas en la planta San Fernando. La descarga de las aguas tratadas se hace puntualmente.

Terminal de transportes: Es el punto de descarga puntual de las aguas servidas del sector occidental de la ciudad de Medellín exceptuando las comunas de Castilla y Doce de Octubre que descargan más adelante. Las aguas negras son recolectadas en colectores que confluyen finalmente sobre el sector de la terminal norte de transportes de Medellín.

Acevedo: Es un punto de descarga puntual de las aguas servidas del sector oriental de Medellín. Al igual que el punto anterior las aguas servidas son transportadas por colectores hacia ese sector de la ciudad.

Barbosa: Es un punto de confluencia de aguas de los municipios de Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa, las cuales son descargadas al río en su trayecto por estos municipios.

Cabe anotar que las aguas aportadas a medida que se avanza en los puntos se van sumando con las aguas de los puntos anteriores.

El cálculo de los caudales en cada punto se hizo con ayuda del censo de la alcaldía de Medellín para el 2002 el cual discretiza la población en comunas y corregimientos para Medellín y para los municipios del Vallé de Aburrá.

Para tener además en cuenta que no toda la población de los municipios aledaños descarga sobre la cuenca del Río Medellín, la población considerada para estos municipios y para los corregimientos de Medellín es de un 90% de la población aportada por el censo, mientras que la población de las comunas de Medellín no se afectó por ningún factor.

Tabla 12 Población estimada para el 2002 descargando al río aplicando coeficientes de aportes.

Punto de Descarga	Tipo de Descarga	Población Descargando (hab)	Población Descargando Actualmente (hab)
Sur	Directa al río	109760	109760
San Fernando	Planta tratamiento	458216	458216
Terminal Transporte	Colectores al río	767084	767084
Acevedo	Colectores al río	1189456	673403
Norte	Directa al río	441994	441994
TOTAL		2966510	2450457

Para el cálculo de los caudales de aguas negras se hizo uso de la siguiente ecuación:

$$Q_{md} = \frac{P d_{bruta} C}{86400000} \quad (1)$$

Donde:

Q_{md} : Caudal medio diario (m^3/s)

d_{bruta} : Dotación bruta asignada (l/hab*día)

P: Población (hab)

C: Coeficiente de retorno

La ecuación anterior sirve para el cálculo del caudal medio diario doméstico.

Asumiendo un coeficiente de retorno de 0.85 y una dotación bruta promedio de 250 l/hab*día se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 13 Caudales estimados de aguas negras aportados al río.

Punto de Descarga	Caudal (Población Descargando) (m^3/s)	Caudal (Descargando Actualmente) (m^3/s)	Caudal total en el Punto (m^3/s)
Ancón Sur	0.270	0.270	0.270
San Fernando	1.127	1.127	1.397
Terminal Transporte	1.887	1.887	3.284
Acevedo	2.925	1.656	6.209
Barbosa	1.087	1.087	7.296
Total	7.296	6.027	7.296

Con base en el aporte de aguas residuales calculado para cada municipio, se estiman los mismos en los puntos donde existen o existieron las estaciones de medición de caudal sobre el río Medellín. Una vez estimados estos caudales y restados al valor del caudal medio histórico en cada una de las estaciones, se compara este resultado con los caudales medios estimados por los diferentes métodos, presentando mejores resultados, debido a la corrección por agua importada de otras cuencas para obtener un régimen natural estimado.

Una vez comprobada la validez de los mapas de evaporación y precipitación elaborados, y presumiendo que los caudales de aguas residuales estimados presentan valores aceptables, se procede a calcular los caudales medios en las estaciones de aforo, como la suma entre el caudal medio estimado y el caudal de aporte de aguas residuales.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Tabla 14 Caudales medios estimados en la estaciones de aforo.

ESTACIÓN	APORTE DE AGUAS RESIDUALES (m ³ /s)	CAUDAL MEDIO RECONSTRUIDOS (m ³ /s)		
		CENICAFE	REGIONAL	TURC
Alto San Miguel	0.000	0.550	0.510	0.620
La Primavera	0.000	1.980	1.870	2.190
Ancón Sur	0.270	5.280	5.050	5.780
Antes de San Fernando	0.270	8.690	8.340	9.520
Después de San Fernando	1.397	10.997	10.587	11.947
Puente Guayaquil	1.397	12.667	12.247	13.757
Aula Ambiental	0.270	15.720	15.140	17.220
Puente Acevedo	4.091	20.271	19.701	21.821
Puente Machado	6.209	25.769	24.939	27.769
Copacabana	6.827	28.137	27.197	30.357
Metromezclas	6.912	28.842	27.902	31.122
Puente Girardota	7.049	30.079	29.119	32.449
Parque de Las Aguas	7.228	31.788	30.798	34.288
Hatillo	7.296	32.466	31.476	35.016
Papelsa	7.296	38.276	37.046	41.396
Popalito	7.296	42.016	40.756	45.336
Pradera	7.296	44.896	43.676	48.336
Eade	7.296	47.116	45.966	50.606
Puente Gabino *	7.296	98.896	94.996	107.596
Doña Maria	0.000	2.530	2.400	2.800
Quebrada La García	0.000	2.330	2.130	2.660

10.5 METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES EXTREMOS (MÍNIMOS)

Para la estimación de caudales mínimos se propone desarrollar tres metodologías a partir de la información hidrológica existente. Las metodologías propuestas son: Regionalización de Características Medias, Modelo de Tanques y Curva de Recesión.

10.5.1 Regionalización de características medias

La Regionalización de Características Medias se realiza con base en los reportes de caudales mínimos instantáneos de las estaciones de caudal localizadas sobre el río Medellín, tales caudales se suponen que son los mínimos “naturales” de la cuenca, basados en la hipótesis de que a primeras horas de la mañana, ya han transitado los caudales producto de las descargas de aguas residuales de los diferentes municipios, y aun no han transitado las descargas del día en cuestión, permitiendo así que el valor del caudal mínimo natural instantáneo, sea leído por los equipos de medición continua localizado sobre el río Medellín.

Bajo estas premisas, se busca una relación única entre los estadísticos de los caudales mínimos instantáneos anuales (media de los caudales mínimos anuales y desviación estándar de los mismos), con variables geomorfológicas (área) y climáticas (precipitación y evaporación), de cada una de las cuencas determinadas por las estaciones de medición de caudal.

Aplicando esta metodología se encuentran las siguientes relaciones:

$$\mu_{\min} = 0.013158A \quad R^2 = 0.979526 \quad (2)$$

$$\sigma_{\min} = 0.003648A \quad R^2 = 0.940843 \quad (3)$$

Donde $\mu_{Q\min}$ es la media estimada de los caudales mínimos instantáneos anuales en m^3/s ; $\sigma_{Q\min}$ es la desviación estándar de los caudales mínimos instantáneos anuales en m^3/s y A es el área de la cuenca en km^2 .

En estas regresiones no se encontró relación entre los estadísticos de los caudales mínimos y las variables climáticas P (precipitación) y E (evaporación).

Una vez determinados los estadísticos de los caudales mínimos instantáneos anuales, se aplica la ecuación de Ven Te Chow para la estimación de caudales mínimos para diferentes periodos de retorno, como se muestra a continuación:

$$Q_{Tr} = \mu_{Q\min} + K \sigma_{Q\min} \quad (4)$$

Donde K es el factor de frecuencia de la distribución Gumbel, el cual depende del periodo de retorno, como se muestra a continuación:

$$K = \frac{-\sqrt{6}}{\pi} \left[0.5772 + \ln \left(-\ln \left(\frac{1}{Tr} \right) \right) \right] \quad (5)$$

Los caudales mínimos para diferentes periodos de retorno en las estaciones de aforo, calculados mediante esta metodología se presentan a continuación.

Tabla 15 Caudales mínimos estimados en la estaciones de aforo, según el método de regionalización de características medias.

ESTACIÓN	CAUDAL MÍNIMO (m ³ /s)								
	ÁREA (km ²)	μ _{min}	σ _{min}	PERIODO DE RETORNO (Años)					
				2.33	5	10	25	50	100
Alto San Miguel	14.91	0.20	0.05	0.179	0.152	0.136	0.122	0.114	0.107
La Primavera	49.88	0.66	0.18	0.598	0.507	0.456	0.409	0.381	0.358
Ancón Sur	133.20	1.75	0.49	1.597	1.354	1.218	1.091	1.017	0.955
Antes de San Fernando	237.08	3.12	0.86	2.843	2.409	2.168	1.942	1.810	1.700
Después de San Fernando	273.94	3.60	1.00	3.285	2.784	2.505	2.244	2.092	1.965
Puente Guayaquil	333.54	4.39	1.22	4.000	3.390	3.050	2.732	2.547	2.392
Aula Ambiental	474.38	6.24	1.73	5.689	4.821	4.338	3.886	3.623	3.402
Puente Acevedo	510.91	6.72	1.86	6.127	5.192	4.672	4.185	3.902	3.664
Puente Machado	639.35	8.41	2.33	7.667	6.498	5.846	5.237	4.882	4.586
Copacabana	710.85	9.35	2.59	8.525	7.224	6.500	5.823	5.428	5.099
Metromezclas	738.43	9.72	2.69	8.856	7.504	6.752	6.049	5.639	5.296
Puente Girardota	782.96	10.30	2.86	9.390	7.957	7.159	6.413	5.979	5.616
Parque de Las Aguas	840.77	11.06	3.07	10.083	8.544	7.688	6.887	6.420	6.030
Hatillo	862.79	11.35	3.15	10.347	8.768	7.889	7.067	6.589	6.188
Papelsa	1030.37	13.56	3.76	12.357	10.471	9.422	8.440	7.868	7.390
Popalito	1110.18	14.61	4.05	13.314	11.282	10.151	9.094	8.478	7.963
Pradera	1167.36	15.36	4.26	13.999	11.863	10.674	9.562	8.914	8.373
Eade	1208.27	15.90	4.41	14.490	12.279	11.048	9.897	9.227	8.666
Puente Gabino	2541.40	33.44	9.27	30.477	25.827	23.239	20.817	19.407	18.228
Quebrada Doña María	75.17	0.99	0.27	0.901	0.764	0.687	0.616	0.574	0.539
Quebrada La García	82.47	1.09	0.30	0.989	0.838	0.754	0.676	0.630	0.592

10.5.2 Modelo de tanques

El método del Modelo de Tanques, consiste en la aplicación de un modelo de lluvia escorrentía que supone que los procesos de producción de escorrentia superficial en una cuenca pueden ser representados mediante cuatro tanques interconectados entre sí. El modelo como tal, reproduce caudales a la salida de una cuenca de área determinada, dada una lluvia de entrada y los parámetros del suelo y tiempos de residencia del agua en el mismo, entre otros.

En primera instancia se realiza una calibración del modelo, es decir, se hallan los parámetros del suelo y los tiempos de residencia del agua en el mismo, a partir de la

comparación de caudales simulados y caudales reales en cuencas instrumentadas. Luego se suponen tales parámetros con base en las calibraciones en las estaciones de aforo sobre el río Medellín, este proceso es de simulación y permite reproducir una serie de caudales de longitud determinada en función de la longitud de las series de lluvia en cada cuenca.

Se implementó en este trabajo, el análisis de cada cuenca (determinada por cada una de las estaciones de aforo) separando la componente urbana de la rural, esto se hace, sumando caudales simulados para la componente urbana con caudales simulados para la componente rural de cada cuenca, empleando el modelo de tanques. A partir de esta serie de caudales simulada (producto de la suma de los caudales de la componente urbano y rural de cada cuenca), se buscan los caudales mínimos anuales y se calcula la media y desviación estándar de los caudales mínimos en cada cuenca.

Una vez determinados los estadísticos de los caudales mínimos instantáneos anuales, se aplica la ecuación de Ven Te Chow para la estimación de caudales mínimos para diferentes periodos de retorno, como se muestra a continuación:

$$Q_{Tr} = \mu_{Q_{\min}} + K \sigma_{Q_{\min}} \quad (6)$$

Donde K es el factor de frecuencia de la distribución Gumbel, el cual depende del periodo de retorno, como se muestra a continuación:

$$K = \frac{-\sqrt{6}}{\pi} \left[0.5772 + \ln \left(-\ln \left(\frac{1}{Tr} \right) \right) \right] \quad (7)$$

Los caudales mínimos para diferentes periodos de retorno en las estaciones de aforo, calculados mediante esta metodología se presentan a continuación.

Tabla 16 Caudales mínimos estimados en la estaciones de aforo, a partir de series simuladas en el modelo de tanques.

ESTACIÓN	CAUDAL MÍNIMO (m ³ /s)								
	ÁREA (km ²)	μ _{min}	σ _{min}	PERIODO DE RETORNO (Años)					
				2.33	5	10	25	50	100
Alto San Miguel	14.91	0.273	0.072	0.250	0.214	0.194	0.175	0.164	0.155
La Primavera	49.88	0.945	0.243	0.868	0.746	0.678	0.615	0.578	0.547
Ancón Sur	133.20	2.469	0.647	2.263	1.938	1.758	1.589	1.491	1.408
Antes de San Fernando	237.08	4.028	1.078	3.683	3.143	2.841	2.560	2.396	2.259
Después de San Fernando	273.94	4.645	1.236	4.250	3.630	3.285	2.962	2.774	2.617
Puente Guayaquil	333.54	5.411	1.413	4.959	4.250	3.855	3.486	3.271	3.092
Aula Ambiental	474.38	7.389	1.943	6.769	5.794	5.252	4.744	4.449	4.201
Puente Acevedo	510.91	7.800	2.347	7.050	5.873	5.217	4.604	4.247	3.949
Puente Machado	639.35	9.504	2.958	8.559	7.076	6.250	5.477	5.027	4.651
Copacabana	710.85	10.504	3.298	9.451	7.797	6.876	6.015	5.513	5.094
Metromezclas	738.43	10.876	3.425	9.782	8.065	7.108	6.214	5.693	5.257

CAUDAL MÍNIMO (m³/s)									
ESTACIÓN	ÁREA (km²)	μ_{min}	σ_{min}	PERIODO DE RETORNO (Años)					
				2.33	5	10	25	50	100
Puente Girardota	782.96	11.584	3.765	10.381	8.493	7.441	6.458	5.885	5.406
Parque de Las Aguas	840.77	12.432	4.071	11.131	9.090	7.953	6.890	6.271	5.753
Hatillo	862.79	12.783	4.188	11.445	9.345	8.175	7.082	6.445	5.912
Papelsa	1030.37	15.432	4.771	13.908	11.515	10.183	8.937	8.212	7.605
Popalito	1110.18	17.327	5.317	15.628	12.961	11.477	10.088	9.279	8.603
Pradera	1167.36	18.734	5.715	16.907	14.041	12.445	10.953	10.084	9.357
Eade	1208.27	19.822	6.013	17.901	14.885	13.206	11.635	10.721	9.956
Puente Gabino	2541.40	31.856	10.199	28.597	23.482	20.634	17.970	16.419	15.122
Quebrada Doña Maria	75.17	0.9473	0.329	0.842	0.677	0.585	0.499	0.449	0.407
Quebrada La Garcia	82.47	0.884	0.301	0.788	0.637	0.553	0.475	0.429	0.391

10.5.3 Curva de recesión

Como última metodología para la estimación de caudales mínimos para diferentes períodos de retorno en la cuenca, fue implementado el método de la curva de recesión que se apoya en las tendencias que los hidrogramas de caudal exhiben una vez la escorrentía superficial, producto de eventos de precipitación, en nula y son básicamente los flujos subterráneos los que alimentan los caudales de una corriente. Para determinar los parámetros de la expresión general del método (ecuación 8) fue empleada la información de caudales y de precipitación a nivel diario disponible en toda la cuenca.

$$Q(t) = Q_0 e^{-kt} \quad (8)$$

Los parámetros Q_0 (m³/s) y k (d⁻¹) fueron estimados a partir de dos metodologías diferentes. La primera de ellas apoyada en los caudales simulados a partir de un modelo agregado lluvia - escorrentía y que permite definir con mayor certeza los períodos que definen las rachas de caudal (tramos de una serie de caudal en los que los caudales disminuye siguiendo aproximadamente una ley exponencial). Esta metodología ofrece grandes ventajas sobre todo en la estimación del parámetro Q_0 , ya que permite detectar, numéricamente, en que momento es sólo el aporte subsuperficial el que alimenta el caudal de la corriente bajo estudio. La segunda metodología, denominada “envolvente mínima de caudales”, se aplica directamente sobre las series observadas de caudal, y a diferencia de la primera no se apoya más que en la apreciación de quien este extrayendo las rachas de la serie y en la reducción del efecto de eventuales lluvias en períodos de sequía que facilitan la identificación de las rachas. Los parámetros obtenidos aplicando ambas metodologías se presentan en la Tabla 17 y la Tabla 18, respectivamente

Tabla 17 Parámetros de Recesión de Cuencas Instrumentadas (envolvente mínima de caudales)

ESTACIÓN	Q _{medio histórico} (m ³ /s)	Q ₀ (m ³ /s)	k (d ⁻¹)	1/k (días)
SALADA_LA_RMS_11	1.632	1.073	0.0075	133
CALDAS_RM_16	5.591	3.930	0.0111	90
ANCON_SUR_RMS_17	4.917	3.722	0.0066	152
MACHADO_RMS.12	24.637	17.187	0.0068	147
ANCON_NORTE_RMS_20	28.699	20.327	0.0063	159
HATILLO_EL_RMS.13	42.045	20.628	0.0052	192
YARUMITO_RMS_14	52.169	33.403	0.0075	133
HATO_RM_9	1.064	0.694	0.0083	120

Tabla 18 Parámetros de recesión en estaciones de monitoreo (Modelo de tanques)

ESTACIÓN	Q _{medio estimado} (m ³ /s)	Q ₀ (m ³ /s)	k (d ⁻¹)	1/k (días)
Alto San Miguel	0.67	0.393	0.0101	99
La Primavera	2.24	1.359	0.0101	99
Ancón Sur	5.29	3.563	0.0101	99
Antes San Fernando	8.7	5.780	0.0101	99
Después San Fernando	9.88	6.315	0.0102	98
Puente Guayaquil	11.55	7.494	0.0102	98
Aula Ambiental	15.73	10.735	0.0103	97
Puente Acevedo	16.46	10.904	0.0103	97
Puente Machado	19.84	14.105	0.0103	97
Copacabana	22	15.645	0.0103	97
Metromezclas	22.21	16.228	0.0103	97
Puente Girardota	23.3	18.018	0.0103	98
Parque de Las Aguas	25	19.438	0.0102	98
Hatillo	25.45	19.998	0.0102	98
Papelsa	31.25	23.002	0.0102	98
Popalito	34.99	25.687	0.0102	98
Pradera	37.88	27.708	0.0102	98
Eade	40.1	29.225	0.0102	98
Puente Gabino	91.94	54.782	0.0101	99
Doña María	2.53	1.269	0.0101	99
Quebrada La García	2.33	1.324	0.0101	99

Como parámetro adicional, fue determinado el parámetro t (número de días sin lluvia) para diferentes períodos de retorno, a partir de registros diarios de precipitación que permiten estimar la media, $\mu_{NO-LLUVIA}$, y la desviación estándar, $\sigma_{NO-LLUVIA}$, en cada estación de precipitación utilizada. De esta forma fue posible extrapolar la información a cuencas de interés empleando la ecuación 9.

$$t_{Tr} = \mu_{NO-LLUVIA} + K(Tr) \times \sigma_{NO-LLUVIA} \quad (9)$$

donde $K (T_r)$ representa el factor de frecuencia que permite determinar t_{Tr} para diferentes períodos de retorno.

Los resultados obtenidos después de aplicar el método de la curva de recesión en la cuenca del río Medellín se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19 Caudales mínimos estimados en las estaciones de aforo, a partir del método de la curva de recesión.

ESTACIÓN	Caudal mínimo (m ³ /s)					
	Período de retorno (años)					
	2.33	5	10	25	50	100
Alto San Miguel	0.297	0.270	0.250	0.227	0.212	0.197
La Primavera	1.026	0.934	0.865	0.786	0.731	0.681
Ancón Sur	2.771	2.559	2.399	2.211	2.081	1.959
Antes San Fernando	4.439	4.097	3.838	3.534	3.324	3.128
Después San Fernando	4.848	4.474	4.191	3.858	3.629	3.415
Puente Guayaquil	5.744	5.298	4.960	4.565	4.291	4.037
Aula Ambiental	8.219	7.579	7.094	6.526	6.134	5.768
Puente Acevedo	8.338	7.685	7.192	6.613	6.214	5.842
Puente Machado	10.793	9.950	9.312	8.565	8.049	7.568
Copacabana	11.976	11.124	10.475	9.709	9.177	8.678
Metromezclas	12.424	11.540	10.867	10.073	9.521	9.004
Puente Girardota	13.942	12.951	12.197	11.307	10.688	10.108
Parque de Las Aguas	15.045	13.978	13.165	12.205	11.539	10.913
Hatillo	15.481	14.383	13.547	12.560	11.874	11.231
Papelsa	17.817	16.557	15.597	14.463	13.675	12.936
Popalito	19.904	18.498	17.427	16.161	15.282	14.457
Pradera	21.475	19.959	18.804	17.439	16.492	15.602
Eade	22.654	21.056	19.838	18.399	17.400	16.462
Puente Gabino	42.605	39.638	37.374	34.698	32.837	31.088
Quebrada Doña María	0.997	0.928	0.875	0.812	0.769	0.728
Quebrada La García	0.999	0.936	0.888	0.831	0.791	0.753

10.6 METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES EXTREMOS (MÁXIMOS)

Para la estimación de caudales máximos se propone desarrollar tres metodologías a partir de la información hidrológica existente. Las metodologías propuestas son: Método Gradex, Regionalización de Características Medias y Transito Hidráulico.

10.6.1 Método gradex

El método GRADEX (gradiente de valores extremos) se emplea para determinar los caudales máximos asociados a determinado período de retorno, T_r , a partir de la distribución de frecuencias de los valores máximos anuales de precipitación. El método supone que en condiciones de saturación de una cuenca, la distribución de probabilidad de la precipitación máxima anual es paralela a la distribución de

probabilidad del caudal máximo. Bajo éstas hipótesis y empleando los registros de precipitación diaria disponibles en la cuenca del río Medellín, fueron estimados los parámetros α_p (Gradex de precipitación, mm) y α_q (Gradex de caudal, m³/s) en las subcuencas definidas por las estaciones de monitoreo establecidas. Estos parámetros definen la pendiente de la distribución de probabilidad de la precipitación y de los caudales máximos, respectivamente.

Adicionalmente, a partir de los registros de caudal en la cuenca, fue definido regionalmente el parámetro Q_{T_0} (m³/s), el cual representa el caudal de saturación de la cuenca, y a partir del cual se supone que cualquier exceso de lluvia pasa a ser un incremento de éste. Las ecuaciones que aparecen a continuación corresponden a la regionalización del parámetro Q_{T_0} y a aquella que permite extrapolar caudales para diferentes períodos de retorno en las diferentes subcuencas estudiadas.

$$Q_{2.33} = 0.1308A^{1.005} \quad (10)$$

$$Q_{tc}(T) = Q_{tc}(T_0) + \alpha_q \times Ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (11)$$

Los resultados obtenidos después de aplicar esta metodología se presentan a continuación. Es importante agregar que el método posee en su esencia hipótesis que aún son cuestionables por investigadores del área y que hacen del método sólo una alternativa que permite validar o calibrar otras metodologías aplicadas como Regionalización de características medias o Tránsito Hidráulico (HEC – HMS).

Tabla 20 Caudales máximos para diferentes períodos de retorno

ESTACIÓN	Caudal máximo (m ³ /s)					
	Período de retorno (años)					
	2.33	5	10	25	50	100
Alto San Miguel	5.39	7.53	9.47	12.04	13.98	15.92
La Primavera	17.54	24.47	30.77	39.09	45.38	51.68
Ancón Sur	45.77	59.58	72.11	88.68	101.22	113.75
Antes San Fernando	80.36	104.61	126.61	155.70	177.71	199.71
Después San Fernando	92.54	119.68	144.32	176.89	201.52	226.16
Puente Guayaquil	112.16	144.58	174.02	212.93	242.36	271.80
Aula Ambiental	158.20	206.12	249.62	307.13	350.62	394.12
Puente Acevedo	170.09	220.98	267.17	328.23	374.43	420.62
Puente Machado	211.73	280.16	342.27	424.38	486.50	548.61
Copacabana	234.82	309.77	377.80	467.74	535.78	603.81
Metromezclas	243.72	321.05	391.25	484.05	554.25	624.45
Puente Girardota	258.06	339.15	412.77	510.09	583.70	657.32
Parque de Las Aguas	276.65	362.54	440.52	543.59	621.57	699.54
Hatillo	283.72	371.71	451.59	557.18	637.06	716.94
Papelsa	337.42	443.05	538.93	665.69	761.58	857.47

ESTACIÓN	Caudal máximo (m ³ /s)					
	Período de retorno (años)					
	2.33	5	10	25	50	100
Popalito	362.92	478.59	583.60	722.41	827.42	932.42
Pradera	381.16	503.93	615.37	762.70	874.14	985.59
Eade	394.20	522.12	638.25	791.76	907.89	1024.01
Puente Gabino	643.85	855.28	1047.21	1300.92	1492.85	1684.78
Doña María	26.18	34.40	41.86	51.72	59.18	66.64
Quebrada La García	28.66	39.90	50.10	63.59	73.79	83.99

10.6.2 Regionalización de características medias

La Regionalización de Características Medias se realiza con base en los reportes de caudales máximos instantáneos de las estaciones de caudal localizadas sobre el río Medellín.

Bajo estas premisas, se busca una relación única entre los estadísticos de los caudales mínimos instantáneos anuales (media de los caudales máximos anuales y desviación estándar de los mismos), con variables geomorfológicas (área) y climáticas (precipitación y evaporación), de cada una de las cuencas determinadas por las estaciones de medición de caudal.

Aplicando esta metodología se encuentran las siguientes relaciones:

$$\mu_{\max} = 0.38546A^{0.97650} \quad R = 0.946395 \quad (12)$$

$$\sigma_{\max} = 0.64579A^{0.70852} \quad R = 0.880422 \quad (13)$$

Donde $\hat{\mu}_{Q_{\min}}$ es la media estimada de los caudales máximos instantáneos anuales en m³/s ; $\hat{\sigma}_{Q_{\min}}$ es la desviación estándar de los caudales máximos instantáneos anuales en m³/s y A es el área de la cuenca en km².

En estas regresiones no se encontró relación entre los estadísticos de los caudales máximos y las variables climáticas P (precipitación) y E (evaporación).

Una vez determinados los estadísticos de los caudales máximos instantáneos anuales, se aplica la ecuación de Ven Te Chow para la estimación de caudales máximos para diferentes periodos de retorno, como se muestra a continuación:

$$Q_{Tr} = \hat{\mu}_{Q_{\min}} + K \hat{\sigma}_{Q_{\min}} \quad (14)$$

Donde K es el factor de frecuencia de la distribución Gumbel, el cual depende del periodo de retorno, como se muestra a continuación:

$$K = \frac{-\sqrt{6}}{\pi} \left[0.5772 + \ln \left(\ln \left(\frac{Tr}{Tr-1} \right) \right) \right] \quad (15)$$

Los caudales máximos para diferentes periodos de retorno en las estaciones de aforo, calculados mediante esta metodología se presentan a continuación.

Tabla 21 Caudales máximos estimados en la estaciones de aforo, según el método de regionalización de características medias.

ESTACIÓN	AREA (km ²)	μ _{max}	σ _{max}	CAUDAL MÁXIMO (m ³ /s)					
				PERIODO DE RETORNO (Años)					
				2.33	5	10	25	50	100
Alto San Miguel	14.91	5.39	4.38	5.4	8.5	11.1	14.3	16.7	19.1
La Primavera	49.88	17.54	10.31	17.6	25.0	31.0	38.6	44.3	49.9
Ancón Sur	133.20	45.77	20.67	45.8	60.6	72.7	88.0	99.4	110.6
Antes de San Fernando	237.08	80.36	31.10	80.4	102.7	120.9	143.9	161.0	177.9
Después de San Fernando	273.94	92.54	34.45	92.6	117.3	137.5	163.0	181.9	200.6
Puente Guayaquil	333.54	112.16	39.61	112.2	140.7	163.8	193.1	214.8	236.4
Aula Ambiental	474.38	158.20	50.84	158.3	194.8	224.5	262.1	290.0	317.7
Puente Acevedo	510.91	170.09	53.58	170.1	208.6	240.0	279.6	309.0	338.2
Puente Machado	639.35	211.73	62.81	211.8	256.9	293.7	340.1	374.5	408.7
Copacabana	710.85	234.82	67.71	234.9	283.5	323.2	373.2	410.3	447.2
Metromezclas	738.43	243.72	69.56	243.8	293.8	334.5	385.9	424.0	461.9
Puente Girardota	782.96	258.06	72.50	258.1	310.2	352.6	406.2	446.0	485.5
Parque de Las Aguas	840.77	276.65	76.26	276.7	331.5	376.1	432.5	474.3	515.8
Hatillo	862.79	283.72	77.67	283.8	339.6	385.0	442.5	485.1	527.3
Papelsa	1030.37	337.42	88.08	337.5	400.8	452.3	517.4	565.7	613.7
Popalito	1110.18	362.92	92.86	363.0	429.7	484.1	552.7	603.6	654.2
Pradera	1167.36	381.16	96.22	381.3	450.4	506.7	577.8	630.6	683.0
Eade	1208.27	394.20	98.60	394.3	465.1	522.8	595.7	649.8	703.5
Puente Gabino	2541.40	814.77	166.98	814.9	934.9	1032.6	1156.0	1247.6	1338.5
Doña Maria	75.17	26.18	13.78	26.2	36.1	44.2	54.3	61.9	69.4
Quebrada La García	82.47	28.66	14.72	28.7	39.2	47.9	58.7	66.8	74.8

10.6.3 Caudales máximos: modelación en HEC-HMS.

Para la ejecución de este modelo se emplearon metodologías de cálculo semi - agregado de crecientes; en las cuales la cuenca de estudio fue subdividida en una serie de subcuencas y canales interconectados entre si, permitiendo considerar de una forma un poco más detallada la variabilidad espacio temporal de las características geomorfológicas y climáticas de la cuenca de estudio. Para tal fin, se utiliza el software HEC-HMS del cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers, 2001), que integra varias metodologías de cálculo de crecientes para el diseño hidrológico.

El modelo implementado para la cuenca del Río Medellín permite realizar el tránsito de la creciente en toda la cuenca mediante la representación del sistema de drenaje como la unión de las subcuencas principales que drenan al Río Medellín y los tramos de canales existentes entre ellas; permitiendo obtener los caudales máximos en cada subcuenca, en los canales y en diferentes puntos de control dentro de la red de drenaje.

Se trazaron las divisorias de todas las subcuencas en la zona de estudio y se determinaron los parámetros geomorfológicos requeridos por el modelo utilizando la cartografía disponible y un modelo de elevación digital con una resolución de pixel de 90 x 90 m obtenido de la NASA. Para la modelación en HEC-HMS fueron agregadas algunas subcuencas de acuerdo el siguiente criterio: a) Zonas altas y parte media (zona urbana) áreas pequeñas entre 0 y 3 Km². b) Zonas Bajas: áreas entre 3 y 10 Km².

A continuación se presentan los diferentes componentes y métodos empleados para cada uno de ellos.

Cuencas

- Métodos de transformación
 - o Hidrograma unitario de Snyder.
 - o Hidrograma unitario del SCS.
 - o Hidrograma de Clark.

- Modelos de Pérdida
 - o Método del índice de infiltración constante ϕ

- Método para estimar flujo base
 - Se utilizaron los valores del caudal promedio mensual como los del flujo base.

Canales

- Método de transito de crecientes
 - o Muskingum-Cunge.

10.6.3.1 Modelo meteorológico

Se definen unos eventos de lluvias máximas posibles que puedan ocurrir sobre la cuenca y que se traduzcan en la producción de la esorrentía. Debido a la falta de información de distribución de lluvias máximas en escala horaria sobre el área de estudio, se utiliza para la generación de hietogramas de precipitación mediante el método del hietograma de Huff (Chow V.T., 1994) y el método del hietograma de Chicago. Este ultimo método utiliza las curvas Intensidad-Frecuencia-Duración (IDF) para determinar la secuencia temporal de precipitación sobre un área dada. La ventaja de utilizar este método es que proporciona una distribución temporal de precipitación tomando de las curvas IDF las intensidades para cualquier duración dada y para un período de retorno dado.

La estimación de las tormentas de diseño parte inicialmente de una zonificación que se lleva a cabo en todas las subcuencas que son tributarias de la red de drenaje del Río Medellín. Esta zonificación se realiza con base en los mapas de precipitación total multianual de toda el área de estudio, y asimismo de las características topográficas de la zona. En la Figura 16 se presenta la zonificación de los escenarios de lluvia definidos.

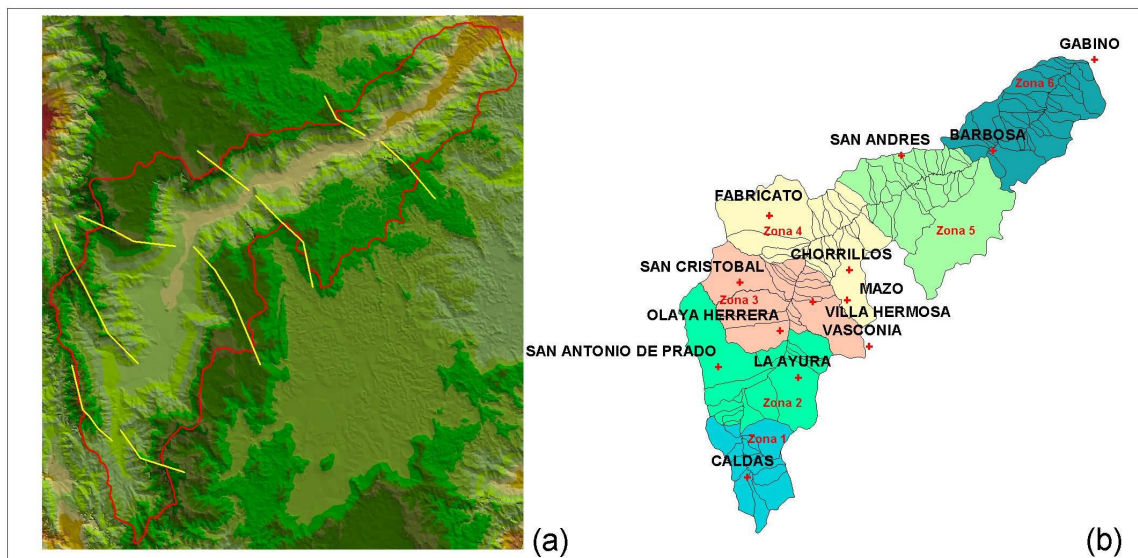
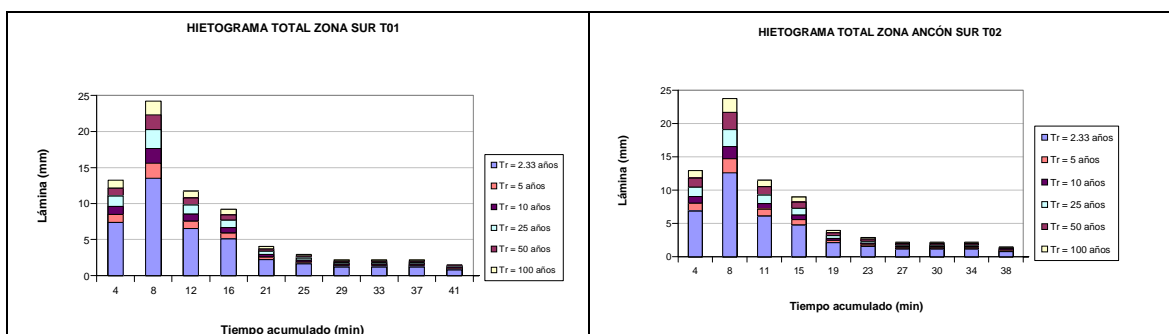


Figura 16 (a) caracterización topográfica (b) Zonificación de las tormentas de diseño.

En las Figura 17 y Figura 18 se presentan los hietogramas obtenidos con las metodologías propuestas.



DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DE LA RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO MEDELLÍN EN JURISDICCION DEL AREA METROPOLITANA
 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA - UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA – UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN – UNIVERSIDAD NACIONAL

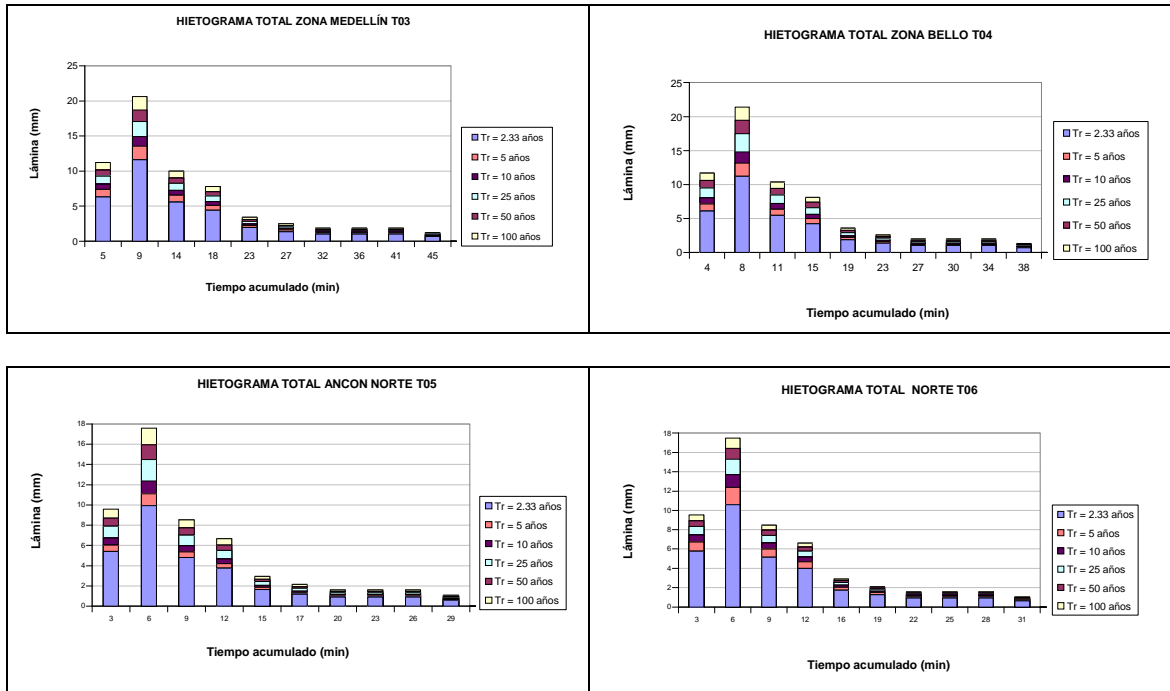
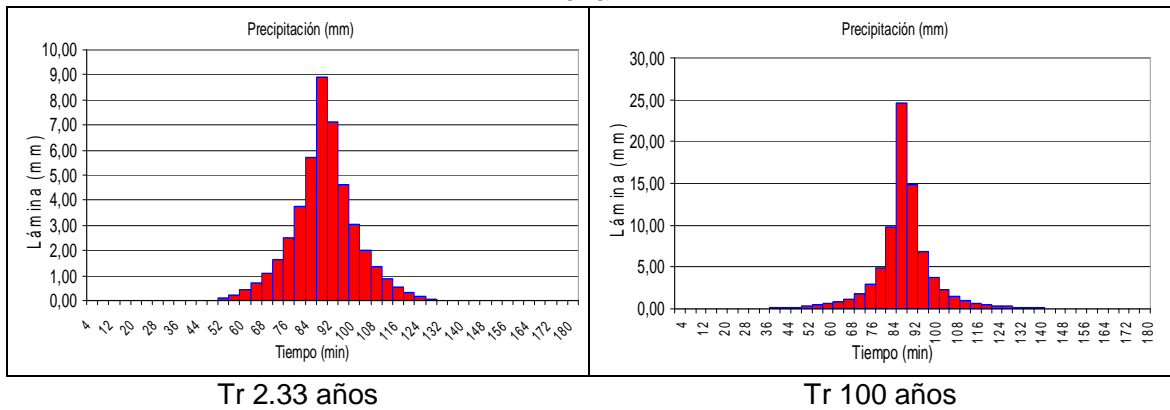


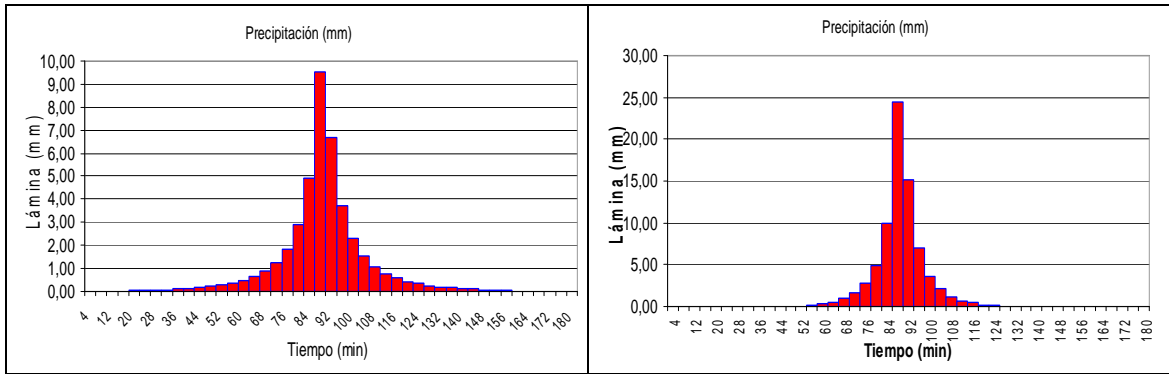
Figura 17 Hietogramas de precipitación por zonas para tormentas con Tr = 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años

Zona 1



Zona 2

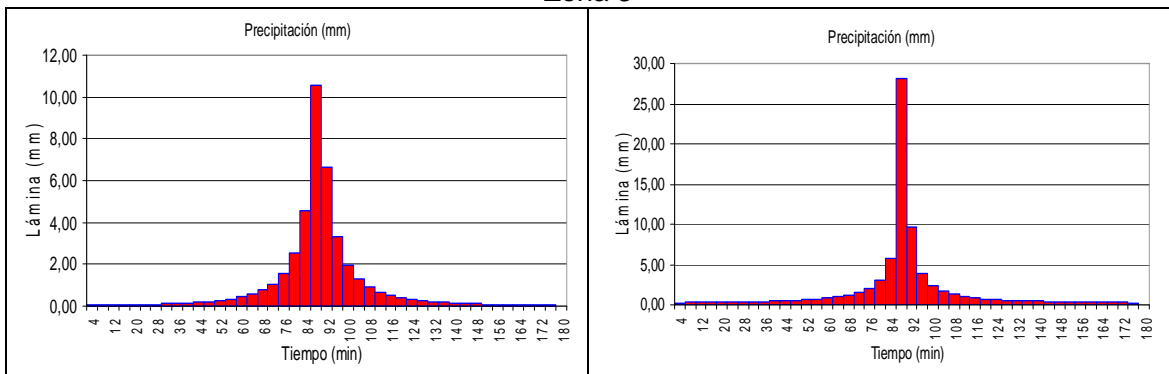
DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DE LA RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO MEDELLÍN EN JURISDICCIÓN DEL ÁREA METROPOLITANA
 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA - UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA – UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN – UNIVERSIDAD NACIONAL



Tr 2.33 años

Tr 100 años

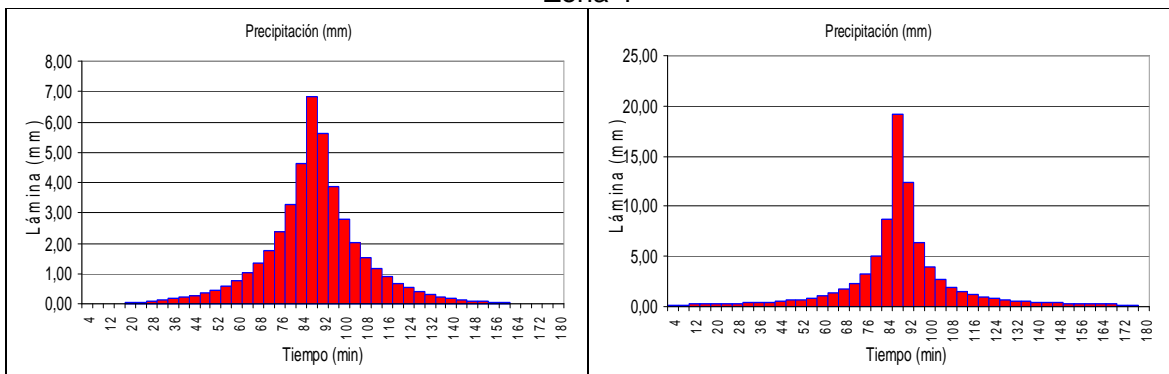
Zona 3



Tr 2.33 años

Tr 100 años

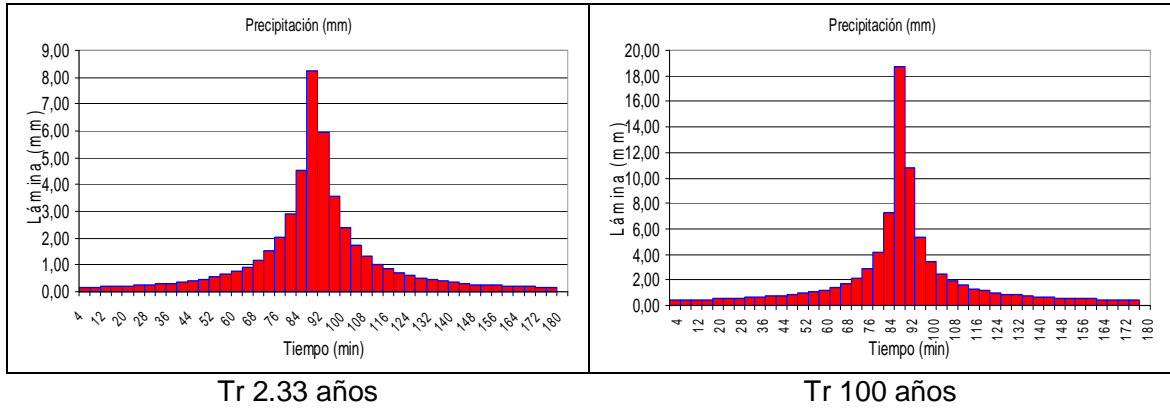
Zona 4



Tr 2.33 años

Tr 100 años

Zona 5



Zona 6

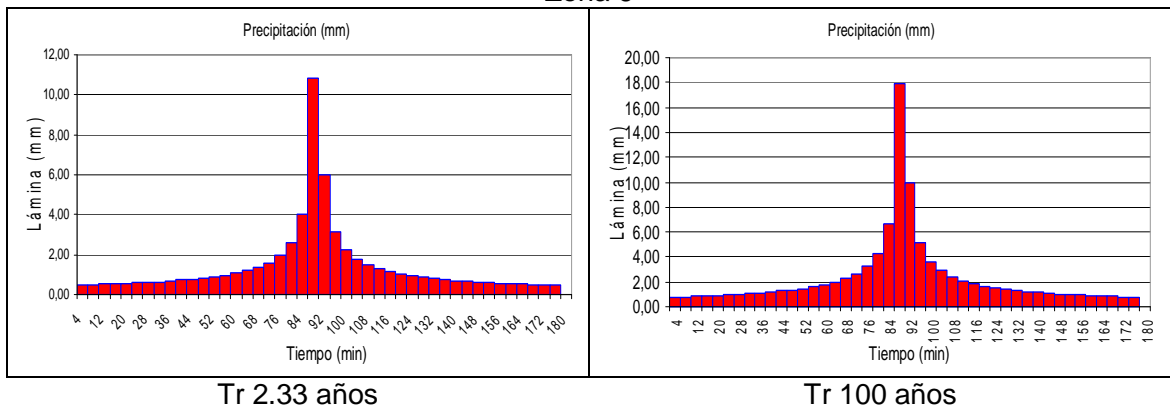


Figura 18 Hietogramas de precipitación de Chicago por zonas para periodos de retorno de Tr = 2.33 y 100 años

10.6.3.2 Definición de Escenarios de Modelación

Basados en el estudio de la variabilidad espacial de las tormentas en la cuenca del río Medellín y con las lluvias de diseño obtenidas para las diferentes zonas, los diferentes periodos de retorno y los dos métodos empleados se definieron los siguientes escenarios.

Escenario 1: Este escenario presenta un aguacero con un periodo de retorno de 2.33 años en la parte alta de la cuenca en la *zona 1* (Sur Caldas) y ausencia de lluvia en el resto de la cuenca.

Escenario 2: Este escenario presenta el aguacero con un periodo de retorno de 2.33 años en la media alta de la cuenca en la *zona 2* (Ancón Sur) y ausencia de lluvia en el resto de la cuenca.

Escenario 3: Este escenario presenta el aguacero con un periodo de retorno de 2.33 años en la parte media de la cuenca en la *zona 3* (Medellín) y ausencia de lluvia en el resto de la cuenca.

Escenario 4: Este escenario presenta el aguacero con un periodo de retorno de 2.33 años en la parte media de la cuenca en la *zona 4* (Bello) y ausencia de lluvia en el resto de la cuenca.

Escenario 5: Este escenario presenta el aguacero con un periodo de retorno de 2.33 años en la parte media baja de la cuenca en la *zona 5* (Ancon Norte) y ausencia de lluvia en el resto de la cuenca.

Escenario 6: Este escenario presenta el aguacero con un periodo de retorno de 2.33 años en la parte baja de la cuenca en la *zona 6* (Norte) y ausencia de lluvia en el resto de la cuenca.

En las Tabla 22 y Tabla 23 se presenta un resumen de los resultados empleando los métodos de transformación de lluvia de Snyder, Clark y SCS en los puntos de control correspondientes a Doña María, Metromezclas y Puente Gabino y para las lluvias de diseño de corta duración obtenidas a partir del tiempo de concentración más alto para cada zona y mediante el método de Chicago respectivamente.

Tabla 22 Valores de caudales Máximos obtenidos para diferentes puntos de control con método de lluvia de corta duración (m³/s).

DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DE LA RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO MEDELLÍN EN JURISDICCION DEL AREA METROPOLITANA
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA - UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA – UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN – UNIVERSIDAD NACIONAL

CORRIDAS PARA SEIS ESCENARIOS APLICADOS													
A TRES METODOS DE TRANSFORMACION DE PRECIPITACION													
		Caudales (m³/s) Tr: 2.33						Caudales (m³/s) Tr: 100_2.33					
	ESCENARIO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
METODOS DE CTRL													
CLARK	DOÑA MARIA	402.16	423.39	4.78	4.78	4.78	4.78	1241.27	1210.88	708.46	708.46	708.46	708.46
	METROMEZCLAS	147.36	260.86	317.01	310.69	20.99	20.99	1434.79	1629.35	1535.40	1567.20	1125.65	1125.65
	PTE GABINO	87.70	87.70	87.70	265.52	187.47	553.99	1089.15	1206.33	1192.54	1268.11	984.12	1286.77
SCS	DOÑA MARIA	510.72	444.09	4.78	4.78	4.78	4.78	1460.78	1144.77	772.26	772.26	772.26	772.26
	METROMEZCLAS	140.27	263.81	338.90	383.38	20.99	20.99	1463.95	1642.80	1624.96	1557.57	1124.12	1124.12
	PTE GABINO	87.70	87.70	87.71	266.56	191.68	590.92	1051.83	1174.13	1163.43	1233.03	952.35	1444.50
SNYDER	DOÑA MARIA	492.97	371.12	4.78	4.78	4.78	4.78	1419.89	1114.69	758.13	758.13	758.13	758.13
	METROMEZCLAS	132.23	244.56	281.94	320.77	20.99	20.99	1302.66	1442.88	1388.09	1372.01	996.67	996.67
	PTE GABINO	87.70	87.70	87.70	253.21	186.24	547.25	965.18	1076.69	1053.67	1120.19	874.08	1319.82
Escenarios													
	1	Zona 1 (Sur Caldas), Tr 2.33 ausencia de lluvia en el resto						7 Zona 1 (Sur Caldas), Tr 100 y Tr 2.33 en el resto					
	2	Zona 2 (Ancón Sur), Tr 2.33 ausencia de lluvia en el resto						8 Zona 2 (Ancón Sur), Tr 100 y Tr 2.33 en el resto					
	3	Zona 3 (Medellín), Tr 2.33 ausencia de lluvia en el resto						9 Zona 3 (Medellín), Tr 100 y Tr 2.33 en el resto					
	4	Zona 4 (Bello), Tr 2.33 ausencia de lluvia en el resto						10 Zona 4 (Bello), Tr 100 y Tr 2.33 en el resto					
	5	Zona 5 (Ancón Norte), Tr 2.33 ausencia de lluvia en el resto						11 Zona 5 (Ancón Norte), Tr 100 y Tr 2.33 en el resto					
	6	Zona 6 (Norte), Tr 2.33 ausencia de lluvia en el resto						12 Zona 6 (Norte), Tr 100 y Tr 2.33 en el resto					

Tabla 23 Valores de caudales Máximos obtenidos para diferentes puntos de control en método de lluvia de Chicago (m³/s).

	ESCENARIO	Caudales (m ³ /s) Tr: 2.33						Caudales (m ³ /s) Tr: 100_2.33						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
METRO PTO DE CTRL														
CLARK	DOÑA MARIA	459.58	461.34	4.78	4.78	4.78	4.78	1372.09	1330.75	798.17	798.17	798.17	798.17	
	METROMEZCLAS	166.76	291.64	376.67	445.51	20.99	20.99	1719.60	1922.26	1860.76	1902.72	1380.59	1380.59	
	PTE GABINO	87.70	87.70	87.70	354.87	287.90	1079.10	1420.60	1548.65	1563.91	1657.87	1329.08	2243.15	
SCS	DOÑA MARIA	587.06	490.48	4.78	4.78	4.78	4.78	1616.47	1242.12	871.73	871.73	871.73	871.73	
	METROMEZCLAS	158.19	293.28	413.23	545.58	20.99	20.99	1768.36	1955.56	1978.24	1922.35	1391.63	1391.63	
	PTE GABINO	87.70	87.70	87.70	340.37	300.84	1192.76	1397.38	1527.55	1557.20	1646.96	1319.11	2526.66	
SNYDER	DOÑA MARIA	566.11	410.59	4.78	4.78	4.78	4.78	1569.63	1217.23	853.78	853.78	853.78	853.78	
	METROMEZCLAS	148.53	270.14	340.34	455.79	20.99	20.99	1571.27	1712.66	1694.23	1683.97	1229.83	1229.83	
	PTE GABINO	87.70	87.70	87.70	326.24	288.63	1092.27	1252.20	1367.42	1380.16	1469.02	1182.91	2327.67	
Escenarios														
	1 Zona 1 (Sur Caldas), Tr 2.33 ausencia de lluvia en el resto							7 Zona 1 (Sur Caldas), Tr 100 y Tr 2.33 en el resto						
	2 Zona 2 (Ancón Sur), Tr 2.33 ausencia de lluvia en el resto							8 Zona 2 (Ancón Sur), Tr 100 y Tr 2.33 en el resto						
	3 Zona 3 (Medellín), Tr 2.33 ausencia de lluvia en el resto							9 Zona 3 (Medellín), Tr 100 y Tr 2.33 en el resto						
	4 Zona 4 (Bello), Tr 2.33 ausencia de lluvia en el resto							10 Zona 4 (Bello), Tr 100 y Tr 2.33 en el resto						
	5 Zona 5 (Ancón Norte), Tr 2.33 ausencia de lluvia en el resto							11 Zona 5 (Ancón Norte), Tr 100 y Tr 2.33 en el resto						
	6 Zona 6 (Norte), Tr 2.33 ausencia de lluvia en el resto							12 Zona 6 (Norte), Tr 100 y Tr 2.33 en el resto						

10.7 MODELACIÓN HIDRÁULICA

En esta primera etapa de la modelación hidráulica del río Medellín, se consideró el tramo comprendido entre Ancón Sur y Acevedo, el cual está canalizado. Para la modelación hidráulica se emplearon las secciones transversales levantadas en campo durante las campañas de aforos y la información obtenida de la planoteca del Metro de Medellín, en esta se encuentran planos “As Build” de los tramos del Metro y de las canalizaciones y obras hidráulicas que se realizaron.

En el estudio se analizan los perfiles de flujo y los niveles de la lámina de agua para caudales máximos estimados mediante la metodología regionalización de características medias. La modelación del tránsito de los caudales máximos se llevó a cabo para periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Para el cálculo de los perfiles de flujo se utilizó el software de libre acceso HEC-RAS versión 3.1.1 desarrollado por U.S Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center.

La calibración del modelo hidráulico consistió en el ajuste de los niveles observados en campo en las campañas de aforos con los niveles calculados por el modelo numérico, esto se consiguió variando el coeficiente de rugosidad, n, hasta el punto donde el porcentaje de error fuera menor del 10%, valor aceptable para este tipo de modelación.

Se contaron con 23 secciones transversales, en una distancia de 20,600.00 metros. Todas las secciones transversales se levantaron de izquierda a derecha en dirección del flujo, aguas abajo. En la zona de estudio se encuentran cinco estaciones de aforos de las campañas realizadas a lo largo del proyecto la cuales se muestran en la Tabla 24

Tabla 24 Estaciones de monitoreo

Estación	X	Y
Ancón Sur	828253.9	1172302.9
Antes de San Fernando	833045.9	1176082.1
Puente Guayaquil	834153.5	1180877.0
Aula Ambiental	834522.9	1184488.1
Puente Acevedo	836275.1	1189174.5

El coeficiente de rugosidad de Manning es una de las variables de mayor incertidumbre para la estimación de los niveles de flujo; en el presente estudio los coeficientes de rugosidad inicialmente fueron obtenidos a partir de comparación visual con valores previamente registrados en la literatura. Para nuestro caso de estudio, la pendiente y la geometría son conocidos, por lo tanto emplearemos este parámetro para la calibración del modelo. La calibración consiste en estimar un valor de Manning que represente las pérdidas y ganancias de energía en cada tramo para que de esta manera el nivel determinado se ajuste al observado.

Se evaluaron las condiciones hidráulicas para los niveles de flujo de los caudales asociados a los períodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años en el tramo de estudio. Los caudales máximos utilizados fueron los estimados mediante la metodología Regionalización de Características Medias. La modelación se realizó para la opción de flujo mezclado que permite diferenciar tramos con flujo subcrítico y supercrítico. Para esta opción es necesario indicar las condiciones de borde tanto para el extremo aguas arriba como para el extremo aguas abajo.

En la Tabla 25 se presenta los caudales máximos encontrados mediante la metodología de Regionalización de Características medias.

Tabla 25 Caudales máximos (m³/s)

ESTACIÓN	PERIODO DE RETORNO (Años)					
	2.33	5	10	25	50	100
Ancón Sur	45.79	60.64	72.73	88.01	99.35	110.60
Antes de San Fernando	80.40	102.74	120.94	143.93	160.98	177.91
Puente Guayaquil	112.20	140.66	163.83	193.11	214.84	236.40
Aula Ambiental	158.26	194.78	224.52	262.11	289.99	317.66
Puente Acevedo	170.15	208.64	239.99	279.60	308.99	338.15

En la Tabla 26 se presenta los resultados obtenidos de la modelación hidráulica del tramo de estudio.

Tabla 26 Resultados de la modelación.

Sección	Estación	Q Total (m3/s)	Min Ch Elev (m)	W.S. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
2000	Ancón Sur	4.79	1600.21	1600.71	0.024524	1.74	2.75	9.17	1.02
1650	Antes de San Fernando	7.16	1510.11	1511.07	0.002596	0.71	10.15	17.12	0.29
1350	Puente Guayaquil	9.91	1467.9	1468.86	0.001945	0.62	15.17	27.13	0.26
1200	Aula Ambiental	13.53	1451.6	1452.22	0.00919	0.93	13.9	33.29	0.45
900	Puente Acevedo	23.09	1431.36	1432.21	0.003774	0.83	26.12	38.17	0.31

En general las condiciones de flujo para las demás zonas del Río presentan números de Froude menores que 1, por lo tanto el régimen de flujo es subcrítico. Velocidades máximas de 3.6m/s en la zona del puente de Guayaquil y valores máximos de nivel de agua en la zona de Acevedo 3.76m. Para todos los caudales para los periodos de retorno el perfil de flujo se comporta de la misma manera, de una forma estable.