

ESTIMACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO DEL RÍO CALANDAIMA EN EL DEPARTAMENTO DE
CUNDINAMARCA, UTILIZANDO EL MÉTODO IHRA (INGENIERÍA HIDRÁULICA DE RÍOS Y
ACEQUIAS)

YULI CEPEDA ÁVILA CÓDIGO: 064072014
LYDA VELANDIA ZARATE CÓDIGO: 064072025

UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2013

ESTIMACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO DEL RÍO CALANDAIMA EN EL DEPARTAMENTO DE
CUNDINAMARCA, UTILIZANDO EL MÉTODO IHRA (INGENIERÍA HIDRÁULICA DE RÍOS Y
ACEQUIAS)

YULI CEPEDA ÁVILA CÓDIGO: 064072014
LYDA VELANDIA ZARATE CÓDIGO: 064072025

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL

DIRECTOR

RAFAEL NIKOLAY AGUDELO VALENCIA
INGENIERO QUÍMICO

UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2013

NOTA DE ACEPTACIÓN:

Firma Presidente del Jurado

Firma de jurado

Firma de jurado

Bogotá, 10 de Septiembre de 2013

Este trabajo se lo dedico principalmente a Dios que me ha acompañado en todos los momentos trascendentales de mi vida y no me dejo decaer en tiempos de dificultad, me brindó la fuerza necesaria para seguir adelante con las metas que me he propuesto.

Le agradezco inmensamente a mi madre que con esfuerzo, amor y comprensión me acompaña en cada una de mis metas. A mi hermano y abuela que con su cariño me apoyaron para que yo pudiera culminar con éxito esta etapa.

Además agradezco este trabajo a las personas que a pesar de la distancia se sacrificaron de alguna forma para que pudiera terminar mi carrera profesional, a mis compañeros pero especialmente a mi compañera de proyecto que más que eso, se convirtió en mi amiga y apoyo incondicional durante estos seis años, la cual me acompañó en alegrías y tristezas durante todo el trayecto de formación profesional.

A mi madre y a todos los que me acompañaron a lo largo de este camino, mi eterna gratitud por creer en mí.

Realizada por Lyda Constanza Velandia Zarate

Al haber finalizado satisfactoriamente este proyecto de investigación doy gracias a Dios, quien nos permite vivir el día a día y nos da fuerza y voluntad para seguir adelante, mostrándonos un camino sin adversidades en medio de momentos de dificultad.

Sé que sin su apoyo y comprensión no lo habría logrado por esta razón dedico y comparto este logro con mis padres, quienes me han brindado su amor y confianza, han dado todo por mí y mis hermanos, construyendo una familia basada en el respeto, cariño y humildad.

Agradecimientos a mi compañera Lyda por su acompañamiento y colaboración en la elaboración de nuestro proyecto de grado, por ser esa persona que me dio fuerzas y motivación en los momentos de tristeza, convirtiéndose en una amiga incondicional con quien comparto momentos de alegría.

Por ultimo agradezco a mi familia y seres queridos que confiaron en mí y me brindaron de alguna manera sus buenos deseos.

Realizada por Yuli Cepeda Ávila

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración, empeño y dedicación del ingeniero Nikolay Agudelo Valencia con nuestro proyecto de grado, ya que sin su apoyo no habiéramos podido culminar con éxito esta etapa trascendental en nuestra formación profesional. Al igual que al ingeniero Gabriel Camargo Vargas quien nos brindó asesoría incondicional en el transcurso de la investigación realizada.

Y por último, pero no menos importante agradecemos a la universidad libre y a los docentes que participaron en nuestro proceso académico, gracias a ellos obtuvimos las herramientas necesarias para desarrollar finalmente el proyecto de investigación.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN _____	13
1. TITULO _____	14
2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA _____	14
3. JUSTIFICACIÓN _____	16
4. OBJETIVO GENERAL _____	18
4.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS _____	18
5. MARCO REFERENCIAL _____	19
5.1. MARCO TEÓRICO _____	19
5.2. MARCO CONCEPTUAL _____	23
5.3. MARCO DE ANTECEDENTES _____	27
5.4. MARCO GEOGRÁFICO _____	29
6. METODOLOGÍA _____	31
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS _____	33
7.1. PERFILES MORFOMÉTRICOS _____	33
7.1.1. Punto de muestreo 1 _____	33
7.1.1.1. Perfiles del río calandaima punto 1 _____	34
7.1.2. Punto de muestreo 2 _____	35
7.1.2.1. Perfiles del río calandaima punto 2 _____	36
7.1.3. Punto de muestreo 3 _____	37
7.1.3.1. Perfiles del río calandaima punto 3 _____	38
7.1.4. Punto de muestreo 4 _____	39

7.1.4.1.	Perfiles del río calandaima punto 4 _____	40
7.2.	PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA _____	41
7.3.	IMPLEMENTACIÓN Y SUMULACIÓN DEL MODELO IHRA (INGENIERÍA HIDRÁULICA DE RÍOS Y ACEQUIAS) _____	42
7.3.1.	Tendencias para el punto 1 _____	43
7.3.2.	Tendencias para el punto 2 _____	44
7.3.3.	Tendencias para el punto 3 _____	45
7.3.4.	Tendencias para el punto 4 _____	46
7.4.	SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA _____	48
7.4.1.	Parámetros físico-químicos _____	49
7.4.1.1.	Relación entre los SST (mg/L) y la distancia (m) _____	50
7.4.1.2.	Relación entre los DQO (ppm) y la distancia (m) _____	50
7.5.	VERIFICACIÓN DE CAUDALES DEL RÍO CALANDAIMA EN CONDICIONES NORMALES _____	54
8.	CONCLUSIONES _____	55
9.	RECOMENDACIONES _____	57
10.	BIBLIOGRAFÍA _____	58
11.	ANEXOS _____	61

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1: Perfil del río punto 1 _____	34
Grafica 2: Perfil del río punto 2 _____	36
Grafica 3: Perfil del río punto 3 _____	38
Grafica 4: Perfil del río punto 4 _____	40
Grafica 5: Tendencias punto 1 _____	43
Grafica 6: Tendencias punto 2 _____	44
Grafica 7: Tendencias punto 3 _____	45
Grafica 8: Tendencias punto 4 _____	46
Grafica 9: Relación SST y distancia _____	50
Grafica 10: Relación DQO y distancia _____	50
Grafica 11: Comportamiento del oxígeno disuelto respecto a la distancia _____	52
Grafica 12: Comportamiento de la DBO ₅ respecto a la distancia _____	52
Grafica 13: Comportamiento de los SST respecto a la distancia _____	53

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Ubicación geográfico municipio de Apulo _____	29
Figura 2: Ubicación de las estaciones meteorológicas de Cundinamarca _____	66
Figura 3: Ubicación del tramo de estudio analizado _____	67

LISTA DE FOTOGRAFIAS

	Pág.
Fotografía 1: Punto de muestreo 1_____	33
Fotografía 2: Punto de muestreo 2_____	35
Fotografía 3: Punto de muestreo 3_____	37
Fotografía 4: Punto de muestreo 4_____	39
Fotografía 5: Medición de parámetros "in situ"_____	68
Fotografía 6: Cauce del río Calandaima_____	68
Fotografía 7: Cauce del río Calandaima_____	69
Fotografía 8: Aforo del punto de muestreo 4_____	69
Fotografía 9: Aforo del punto de muestreo 3_____	70
Fotografía 10: Caño temporal por aguas lluvias en el Punto de muestreo 3_____	70
Fotografía 11: Salto hidráulico del río Bogotá_____	71
Fotografía 12: Material rocoso del río Calandaima _____	71

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Parámetros de la calidad del agua "in situ"_____	41
Tabla 2: Número de Froude para determinar el estado del flujo con los caudales ecológicos_____	42
Tabla 3: Variables de la ecuación de Manning para la determinación del caudal_____	43
Tabla 4: Número de Vedernikov para los puntos 1 y 3_____	47
Tabla 5: Comparación de caudales para los cuales los tramos 1 y 3 son vulnerables desde el punto de vista hidráulico_____	48
Tabla 6: Parámetros físico-químicos_____	49
Tabla 7: Valores DBO ₅ para cada uno de los puntos_____	51
Tabla 8: Casos de variación de caudal para la simulación de calidad del agua_____	51
Tabla 9: Registro aforo 1_____	61
Tabla 10: Registro aforo 2_____	61
Tabla 11: Registro aforo 3_____	62
Tabla 12: Registro aforo 4_____	62
Tabla 13: Calculo para caudales medios_____	63
Tabla 14: Vulnerabilidad hidráulica_____	64
Tabla 15: Determinación de parámetros físico-químicos_____	65

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A	61
ANEXO B	61
ANEXO C	62
ANEXO D	62
ANEXO E	63
ANEXO F	64
ANEXO G	65
ANEXO H	66
ANEXO I	67
ANEXO J	68
ANEXO K	68
ANEXO L	69
ANEXO M	69
ANEXO N	70
ANEXO O	70
ANEXO P	71
ANEXO Q	71

INTRODUCCIÓN

Las fuentes hídricas han proporcionado diferentes utilidades a la sociedad como el suministro de agua para consumo humano e industrial, generación de energía y actividades agropecuarias. Es tanto el incremento del uso del recurso hídrico, que ha ocasionado la alteración progresiva del régimen natural de los ríos, provocando perturbaciones notables en la integridad de los ecosistemas fluviales, así como la disminución significativa de la biodiversidad, al igual que la limitación de los bienes y servicios proveídos por las corrientes fluviales.

La construcción de obras hidráulicas sobre cauces es una de las actividades que genera alteraciones en los flujos, convirtiéndose en uno de los motivos para que se vea necesario estimar caudales ecológicos, este es usado para valorar cuánta agua puede quitársele al río sin causar un nivel inaceptable de degradación del ecosistema. Se considera caudal ambiental la cantidad de agua necesaria para restablecer el río y rehabilitar el ecosistema hasta un estado o condición requerida (U. NACIONAL DE COLOMBIA , 2008).

Existen diferentes metodologías para determinar el caudal ecológico de un río, canal o acequia, uno de los más acertados es el modelo IHRA (Ingeniería Hidráulica de Ríos y Acequias) propuesto por el investigador Luis Docampo Pérez en 1998, debido a que se puede implementar para cauces naturales y/o artificiales, convirtiéndolo en modelo integral y preciso. Se ejecutara este modelo en la cuenca del río Calandaima ubicado en el departamento de Cundinamarca puesto que el río será intervenido por una obra de captación que abastecerá los municipios de Apulo, Viota, El Colegio, Anapoima y Tocaima.

1. TÍTULO

Estimación del caudal ecológico del Río Calandaima en el departamento de Cundinamarca, utilizando el método IHRA (Ingeniería Hidráulica de Ríos y Acequias).

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

A través de los años las corrientes hídricas han proporcionado diferentes utilidades a la sociedad como el suministro humano e industrial, la construcción de Obras Hidráulicas para generar energía y los proyectos de fines agropecuarios. Es tanto el incremento del uso del recurso hídrico, que está ocasionando la alteración progresiva del régimen natural de los ríos, provocando perturbaciones notables en la integridad de los ecosistemas fluviales, como la disminución significativa de la biodiversidad, al igual que la limitación de los bienes y servicios proveídos por las corrientes fluviales.

La preocupación de las consecuencias que traen este tipo de alteraciones ha generado el desarrollo de metodologías para la medición del porcentaje de agua que debe permanecer en el río, y por esta razón se ha venido implementando y ampliando el concepto de caudal ecológico o caudal ambiental. Todo esto se hace con el fin de garantizar que el recurso no se vea afectado por la modificación realizada, que esté disponible en cantidades y calidades específicas para satisfacer su demanda y que siga suministrando los servicios ambientales y ecológicos prestados.

El caudal ambiental se define como aquel que mantiene el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema fluvial que el cauce contiene en condiciones naturales, preservando los valores ecológicos, el hábitat natural (que cobija una riqueza de flora y fauna) y funciones ambientales tales como purificación de aguas, amortiguación de extremos hidrológicos, recreación, pesca, entre otros. (Castro, Carvajal, & Monsalve, 2006).

Los caudales ambientales contribuyen de manera decisiva a la salud de los ríos, al desarrollo económico y a aliviar la pobreza. Garantizan la disponibilidad constante de los muchos beneficios que aportan a la sociedad los ríos y los sistemas de aguas subterráneas sanos (Dyson, Bergkamp, & Scanlon, s.f.).

El tema de caudales ecológicos es estudiado e implementado principalmente por España, seguido por países Orientales, ya que son países que por sus condiciones geográficas y climáticas hacen que la mayoría de sus cauces no cumplan con las condiciones necesarias

para un buen desempeño del ecosistema fluvial. En el caso de España el investigador Luis Docampo Pérez realizó una Modelización hidráulica de caudales ecológicos, donde la ecuación de la velocidad media de corriente de Manning en régimen uniforme es ampliamente utilizada como simulación hidráulica en los modelos de determinación de caudales ecológicos. Él ensaya dicha ecuación en 10 tramos de los ríos Llobregat y Cardener.

En Colombia éste tema es relativamente nuevo, debido a que ha existido una considerable oferta del recurso hídrico, sin embargo en los últimos años por las consecuencias del cambio climático que se ha presentado en todo el mundo, lo que ha hecho necesario para los usuarios del recurso, establecer el caudal mínimo de los cauces, para así prolongar la sostenibilidad del hábitat además de la calidad de las corrientes hídricas. Es entonces donde los estudiantes y profesionales de éste país juegan un papel muy importante para la comunidad ya que se han dedicado a estudiar y practicar diferentes metodologías hacia la determinación de caudales ambientales, en distintos escenarios del territorio nacional.

En el departamento de Cundinamarca los municipios de Apulo, El Colegio, Anapoima, Viotá y Tocaima presentan una situación común: la disminución de los caudales en verano, las épocas de estiaje, la contaminación de las fuentes hídricas, la deforestación indiscriminada y descontrolada en las partes altas de las cuencas, además de la mínima capacidad de algunas de las fuentes de abastecimiento, hacen que el suministro de agua potable sea insuficiente para éstos municipios.

Es por este motivo que las autoridades correspondientes como la gobernación y la Corporación Autónoma Regional (CAR) del departamento de Cundinamarca, despliegan un proyecto que consiste en la construcción de un embalse sobre el Río Calandaima ubicado en éste departamento, que tiene como objetivo suplir las necesidades de suministro de agua y control de inundaciones para los cinco municipios beneficiarios de esta región. Actualmente este proyecto se encuentra en la tercera de cinco etapas, la de factibilidad, dando casi por hecho la construcción del Embalse Calandaima.

Al ejecutarse por completo esta Obra se hará inminente la modificación del cauce del Río Calandaima al igual que los de los efluentes, al mismo tiempo se alterará el hábitat natural, por lo que será necesario determinar el caudal ambiental para cada uno de estos flujos, y así mitigar el impacto negativo que genera la construcción de este tipo de Obras, además de contribuir a la conservación del ecosistema fluvial de la zona.

3. JUSTIFICACIÓN

En Colombia, al igual que otros países, actualmente tiene la necesidad de implementar algunos requerimientos mínimos, para mejorar la productividad y conservación de las fuentes hídricas, debido a que los cauces de los ríos atraviesan por una serie de cambios irregulares que alteran sus características físicas, químicas y por consiguiente traen un efecto negativo en el ecosistema fluvial. Adicional a esto, están también las captaciones irregulares que se hacen sin ningún permiso, lo cual generan un aumento gradual a la inestabilidad ecológica de los ecosistemas loticos.

Por lo anterior es que se desarrolla la medida del caudal ecológico o caudal ambiental. El caudal ecológico es un concepto nuevo en la planificación hidráulica de los ríos, que se debe determinar para mantener un equilibrio en el ecosistema fluvial en condiciones naturales, además conservar el hábitat natural y hacer que haya una sostenibilidad del entorno.

Para la fijación de los caudales ecológicos se han desarrollado varias metodologías, que permiten tener un acercamiento a la realidad y aportar al desarrollo y conocimiento del comportamiento de los ríos y ecosistemas fluviales locales. Dentro de ésta variedad de métodos existe el modelo IHRA (Ingeniería hidráulica de ríos y acequias), el cual se implementará para el desarrollo de esta investigación. Éste método es propuesto por el autor Luis Docampo Pérez en 1998, quien propone una modelización hidráulica que tiene en cuenta criterios biológicos como conservación del paisaje hidráulico, biodiversidad fluvial, vegetación de riberas.(Rincon, 2004)

El modelo IHRA será empleado especialmente en ésta investigación porque es un método que a nivel nacional ha sido poco aplicado y explorado. Además que realiza un modelamiento hidráulico que lo hace más verídico y razonable frente a otras metodologías, como los estadísticos que son los que generalmente se utilizan y están propuestos en nuestro país.

El Río Calandaima en el departamento de Cundinamarca, es seleccionado para implementar el modelo IHRA ya que es importante por ser una fuente hídrica de gran abastecimiento para la región, y sobre él se realizara la construcción del Embalse Calandaima que tiene como fin suministrar agua a los municipios de Apulo, El Colegio, Anapoima, Viotá y Tocaima del mismo departamento.

El modelo será usado con el objetivo de preservar la biodiversidad fluvial y también asegurar un flujo preciso y permanente a lo largo del Río Calandaima y sus afluentes, para no comprometer el funcionamiento ambiente del cauce. Éste método será aplicado en dos

tramos del río donde se cuenta con datos históricos de caudales, en caso de ser necesario, se realizarán algunas modificaciones para adaptarlo a las condiciones específicas del caso de estudio.

4. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el Caudal Ecológico para el Río Calandaima ubicado en el departamento de Cundinamarca, mediante el modelo hidráulico IHRA.

4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar el modelo IHRA (ingeniería hidráulica de ríos y acequias) al río Calandaima. Haciendo las adaptaciones necesarias, en el caso de que el modelo no sea aplicable en su totalidad al caso de estudio.
- Ejecutar una simulación hidráulica con los datos obtenidos en el muestreo.
- Verificar que los caudales ecológicos calculados por medio del modelo, correspondan a caudales del río en condiciones normales.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1 MARCO TEÓRICO

Según (Docampo, s.f.) los principales modelos y métodos que se utilizan para la determinación de caudales ecológicos se resumen:

- Resolución del Principado de Asturias (1988/01/21), Decreto Foral Navarra (1990/344), el $Q_{10\%}$ ($0,1 \times$ Caudal Medio Aritmético Interanual) del MOPU (1980) y Ley 6/1992 de la Junta de Castilla y León, utilizan como método de cálculo del QE un porcentaje fijo (10%, 20%, etc.) del caudal medio interanual, o fórmulas donde intervienen los caudales clasificados (Q_{330} , Q_{347} , superados por 330 y 347 días al año, respectivamente). Estas estimas de caudal ecológico tienen el inconveniente de que el QE es un módulo único a establecer durante todo el año o casi todo el año, sin tener en cuenta el régimen fluvial fluctuante a lo largo del año y de los años, además generan baja calidad de hábitat para las poblaciones piscícolas y para la conservación y dinámica ecológica de las riberas.
- Modelo de Simulación Hidráulica de White (1976). En distintas secciones de un tramo establece la relación algebraica existente entre el perímetro mojado y el caudal circulante. A partir de esta relación, los caudales se establecen teniendo en cuenta las condiciones de freza, cría y migración de ciertas especies de peces.
- Modelo de biomasa de Wyoming (Binns, 1982). Consiste en un modelo de regresión múltiple sin interacciones entre las variables independientes, que relaciona la biomasa piscícola de salmónidos (Kg Ha^{-1}) versus, caudal al final del estío, rango anual de caudal, temperatura del agua, concentración de nitrato (NO_3^-), velocidad del agua, tipo de sustrato, cobertura, erosión en las orillas y anchura del cauce. Las variables independientes están codificadas en una escala de 0 a 4. Es de gran utilidad para la familia de los salmónidos de Wyoming, cuya extrapolación a otros estados, países y regiones biogeográficas no ha sido comprobada.
- Modelo IFIM (InstreamFlow Incremental Methodology) (su programación informática se denomina PHABSIM), desarrollado por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos (Bovee, 1982). Establece mediante simulación hidráulica curvas que relacionan el caudal circulante con la denominada Anchura Ponderada útil (APU). La APU es el producto de la anchura real del cauce por un coeficiente de ponderación, estimado de acuerdo con los siguientes parámetros: profundidad del agua, velocidad del flujo, cobertura, sustrato y temperatura. La temperatura se considera constante al

variar el caudal, lo que difiere de las estimaciones resultantes de la aplicación de la ecuación fundamental del transporte de masas en ríos, donde la tasa de incremento de calor por unidad de volumen de agua depende del caudal y de la profundidad hidráulica (área mojada/anchura mojada del cauce) (véase p.ej. Brown & Barnwell, 1987). El IFIM se aplica con algunas especies de peces, en ningún caso se ha mostrado en la bibliografía consultada una aplicación con invertebrados del bentos fluvial, plantas acuáticas, anfibios u otros grupos taxonómicos. Los coeficientes de ponderación se determinan a partir de curvas de preferencia del hábitat de las especies de peces analizadas con respecto a los cinco parámetros indicados. Estas curvas resultan de ajustar polinomios de grado entero 3 o 4 a los histogramas de frecuencias de ocurrencia acumuladas de la especie para el parámetro considerado. La primera derivada de la curva polinómica ajustada, normalizada a la unidad, determina la curva de preferencia para ese parámetro. Normalmente IFIM se aplica estableciendo una ecuación de regresión lineal simple (potencial, exponencial o línea recta) entre la biomasa de la especie piscícola y la APU (García de Jalón, 1990). El caudal ecológico es aquel que genera una APU capaz de mantener una determina biomasa piscícola establecida previamente. Da lugar a valores de caudales ecológicos que no se ajustan al hidrograma de los ríos.

- Modelo de medias móviles de Palau (1994). Aplica medias móviles sin transformar ni diferenciar, sobre la serie de caudales aforados o simulados de un tramo fluvial o río, para determinar los caudales ecológicos, los cuales posteriormente se ensayan mediante modelización hidráulica, y con las citadas curvas de preferencia de hábitats. El modelo en si constituye la parte más elemental de la metodología estadística utilizada para realizar análisis cronológicos (series temporales) de cualquier variable, denominada ARIMA (Proceso Autorregresivo Integrado de Media Móvil). Utiliza las medias móviles como tal, no establece autorregresiones, ni transformaciones, ni diferenciaciones con operadores de retardo, por lo que puede conducir a resultados contradictorios, ciclos irreales, funciones crecientes de forma monótona, etc. (Box & Jenkins, 1976; Spiegel, 1993; Peña, 1989).
- Balances de Masas. Los modelos de predicción de las características fisicoquímicas de las aguas basados en la ecuación general del balance de masas (transporte, dispersión, dilución, sumideros y reacciones químicas), como el QUAL 2E (Brown & Barnwell, 1987), MICHIV model (Delos et al., 1983), etc., son de gran utilidad práctica para determinar caudales ecológicos en ríos afectados por la contaminación y regulados por embalses. No existe ninguna característica fisicoquímica de las aguas fluviales que no fluctúe en función del caudal, y ninguno de los modelos anteriormente citados, excepto el de biomasa de Wyoming, utiliza parámetros químicos de las aguas. De la misma forma que se manifiestan curvas de preferencia del hábitat de los peces u

otros organismos frente a la velocidad de corriente o a la temperatura, también son ajustables curvas de preferencia respecto a otros parámetros como el oxígeno disuelto, nitrito (NO_2^-), calcio (Ca^{2+}), NH_3 , etc.

Otras metodologías que se implementan según (Rincon, 2004) son:

- Método Vasco Docampo et al. (1995). Método elaborado para los ríos de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Basado en la teoría biogeográfica insular de MacArthur & Wilson (1967), utiliza la modelización hidráulica y una curva de regresión de la riqueza de especies de invertebrados del bentos en función del perímetro mojado y del grado de irregularidad del cauce.
- Modelo RECE (Régimen Estacional de Caudales Ecológicos). De acuerdo con Docampo, (1997). Este modelo procede de la siguiente forma:
 - 1) Determinación del período mínimo para el cual deben estimarse los caudales ecológicos (cada mes, época del año, etc...) y Ajuste de la función de distribución estadística de la serie de caudales aforados o simulados del periodo considerado.
 - 2) Cálculo del Caudal de Cambio mediante el primer punto de inflexión no nulo de la curva que ajusta la función de distribución de caudales. Este caudal de cambio está destinado a ser el caudal ecológico de cada periodo, si cumple una serie de criterios biológicos (conservacionistas) y fisicoquímicos.
 - 3) Modelización Hidráulica que permite establecer la relación entre la hidrología (caudal de cambio) y las características fisicoquímicas y biológicas del ecosistema fluvial.
 - 4) Comprobación del cumplimiento de criterios abióticos y biológicos, entre los que destacan:
 - a) vulnerabilidad hidráulica de los cauces a la continuidad del flujo, derivada de la detracción de aguas.
 - b) irrigación de la vegetación de riberas (conservación del bosque de galería).
 - c) conservación de la biodiversidad fluvial, estimada como riqueza de especies de invertebrados del bentos, peces y batracios y
 - d) Índice de Calidad del Hábitat (ICH) de especies biológicas catalogadas o emblemáticas, si las hubiese. El ICH es la frecuencia o probabilidad de ocurrencia de una especie (o conjunto de especies) frente a un valor de una variable fisicoquímica y es equivalente a las curvas de preferencia del hábitat del modelo IFIM.
- El modelo IHRA (Docampo, 1998) plantea una modelización hidráulica generalista, tanto para el flujo uniforme como para el lentamente variable en canales abiertos, con o sin transporte de sólidos suspendidos, donde la ecuación de Manning es un caso

particular de dicha modelización. La aplicación de la ecuación de Manning solamente es viable cuando la rugosidad relativa del canal abierto adquiere valores comprendidos en un determinado rango intermedio.

Mientras que IFIM es una metodología que permite abordar el problema de la gestión del agua con consideraciones hidrobiológicas, El modelo I.H.R.A propone una modelización hidráulica generalista, que se puede aplicar tanto para el flujo uniforme como para el lentamente variable en canales abiertos, con o sin transporte de sólidos suspendidos. En el presente trabajo se aplica la metodología IHRA para el flujo sin transporte de sedimentos.

5.2 MARCO CONCEPTUAL

CAUDAL

El caudal corresponde al volumen de agua que pasa instantáneamente por la sección de aforos en la unidad de tiempo y se expresa en metros cúbicos por segundo (m^3/s) o en litros por segundo (L/s), cuando se manejan pequeñas magnitudes. Las mediciones de caudal están orientadas a conocer las características geométricas e hidráulicas del cauce en diferentes estados hidrológicos, asociados con las temporadas de lluvias. El caudal en una corriente de agua es función del área (A) de función de aforos y la velocidad media del flujo (V), el caudal se obtiene mediante el producto de estas dos variables.

Si la geometría del perfil de la sección de aforo no se modifica, la velocidad mantiene su comportamiento horizontal y en profundidad; por lo contrario, si la geometría cambia se altera la relación nivel-área, en consecuencia, la velocidad cambia su comportamiento. Por esta razón, en la etapa de selección de aforos, primordialmente se busca que el cauce sea estable para que la velocidad no presente alteraciones, debido a cambios por sedimentación o socavación del lecho y/o los taludes. (IDEAM, 2007)

CAUDAL ECOLOGICO

A través de los años han surgido diferentes definiciones como caudal ecológico y caudal ambiental como consecuencia de haber alterado o intervenido el caudal de los ríos.

Debido a esto se han presentado diferentes denominaciones y conceptos de diferentes autores definidos así por (U. NACIONAL DE COLOMBIA , 2008):

DENOMINACIÓN	CONCEPTO	REFERENCIA
Caudal Ecológico Mínimo	Es el caudal que restringe el uso durante las estaciones de caudales bajos y mantienen la vida en el río. No aporta una solución ecológica. Se calcula de forma directa y arbitraria, producto de un pacto más que de una formulación científica.	King <i>et al.</i> (1999); Palau (2003)
	Caudal mínimo necesario en una fuente o curso fluvial, para preservar la conservación de los ecosistemas fluviales actuales, en atención a	

Caudal Ecológico	los usos de agua comprometidos, a los requerimientos físicos de la corriente fluvial, para mantener su estabilidad y cumplir sus funciones tales como, dilución de contaminantes, conducción de sólidos, recarga de acuíferos y mantenimientos de las características paisajísticas del medio.	Ormazabal (2004)
Caudal de mantenimiento	Caudal requerido para mantener todas las funciones ecosistémicas del río, incluyendo la incorporación continua y balanceada de las especies acuáticas y riparias. Es un caudal calculado y dirigido hacia la conservación de los valores bióticos del ecosistema fluvial.	APROMA (2000)
Caudal ambiental	Es el régimen hídrico que se establece en un río, humedal o zona costera para sustentar ecosistemas y sus beneficios donde hay usos del agua que compiten entre sí y donde los caudales están regulados. El caudal ambiental es usado para valorar cuánta agua puede quitársele al río sin causar un nivel inaceptable de degradación del ecosistema ribereño en el caso de ríos gravemente alterados. Se considera caudal ambiental la cantidad de agua necesaria para restablecer el río y rehabilitar el ecosistema hasta un estado o condición requerida.	King & Louw (1998); Palau (1994); Dyson et al. (2003)
Caudal de Acondicionamiento	Se refiere a un caudal que puede establecerse como complemento de caudales mínimos o de mantenimiento, para una finalidad concreta, ajena a la conservación de valores bióticos del ecosistema fluvial y referida a aspectos abióticos (dilución, paisaje, usos recreativos, etc.)	Palau (2003)
Caudal de Compensación	Caudal mínimo necesario para asegurar la supervivencia de un ecosistema acuático preestablecido.	UNESCO (s.f)
Régimen de Caudal Ambiental	Es aquel que permite cumplir con una condición establecida del ecosistema ribereño. En él se detallan caudales específicos en magnitud, periodicidad, frecuencia y duración,	King <i>et al.</i> (1999)

	tanto de caudales basales como de avenidas y crecientes en la escala de variabilidad intra e interanual, todo ello diseñado para mantener en funcionamiento todos los componentes del ecosistema.	
--	---	--

Para términos de desarrollo de este proyecto se elige el término de caudal ecológico ya que se considera como el concepto más acertado y concreto en cuanto se refiere a las alteraciones generadas por la intervención del caudal en un río que afectan el ecosistema.

(Rincon, 2004) Dice: De acuerdo con Brown et al. (1987) Definen el caudal ecológico como el caudal mínimo que debe mantenerse en un curso fluvial al construir una presa, en la captación o derivación, de forma que no se alteren las condiciones naturales del biotopo y se garantice el desarrollo de una vida fluvial igual a la que existía anteriormente.

Otros autores como Verweij, (s.f.) definen el caudal ecológico como: el agua reservada para preservar valores ecológicos; los habitats naturales que cobijan una riqueza de flora y fauna, las funciones ambientales como purificación de aguas, amortiguación de los extremos climatológicos e hidrológicos, los parques naturales y la diversidad de paisajes.

Se han desarrollado innumerables métodos y metodologías para determinar los requerimientos del caudal de los ecosistemas. Los más simples son los métodos hidrológicos o estadísticos, que determinan el caudal mínimo ecológico a través del estudio de los datos de caudales. Un ejemplo de método estadístico es definir el caudal mínimo ecológico como un 10% del caudal medio histórico.

(Rincon, 2004) Dice que fuera cual fuese el método de cálculo adoptado deben cumplir con los siguientes requisitos:

- La base de cálculo debía responder a una regularidad natural real que, como tal, formara parte de la coevolución entre el medio físico y las comunidades naturales, independientemente de que fuera una relación poco reconocible. Debía evitarse al máximo la incorporación de arbitrariedad, en la medida en que supone una intrusión de subjetividad y puede devaluar la solidez del cálculo.
- La aplicación del método y el resultado a obtener debían ser personalizable y personalizado, respectivamente, para cada río o tramo de río en concreto, evitando planteamientos basados en proporcionalidades fijas. Había que aprovechar al máximo la información que cada río aporta sobre las necesidades de sus comunidades naturales y concretar en qué parámetros o variables se podía obtener

de forma sintética toda esa información o, al menos, la relación información obtenible/aplicabilidad práctica más óptima.

- Derivado en parte del requisito anterior, el método adoptado debía cumplir un axioma tan simple y obvio como que el caudal ecológico fuese comparativamente más conservativo en los ríos menores y menos en los de mayores caudales circulantes. Restar menos de "poco" puede conducir a nada, mientras que restar mucho de "más" puede permitir una situación sostenible.
- Los resultados obtenidos debían estar en línea con experiencias empíricas, tanto bibliográficas como personales, y con los condicionantes propios de los aprovechamientos fluviales ordinarios sobre regulación y/o derivación de caudales. A pesar de la enorme variedad de métodos de cálculo existentes, los resultados obtenibles de todos ellos siguen una distribución más o menos normal que encierra el intervalo de máxima probabilidad entre el 10% y el 30% del caudal medio interanual.

Se trata de que el método adoptado mantenga también como intervalo más probable el indicado, a fin y efecto de intentar representar un equilibrio racional entre la conservación de los ambientes fluviales y el aprovechamiento del agua como recurso.

El caudal ecológico, debe estar basados en los siguientes requisitos según (Aguirre & Bikuña, s.f.):

- Ser coherente con la distribución hidrológica de caudales circulantes por ese tramo, es decir, ser representativo de un porcentaje importante de los volúmenes de aguas circulantes.
- Ser coherente con las variaciones estacionales de la distribución de caudales circulantes por el tramo. Debe consistir en un régimen.
- Perseguir la conservación de las comunidades naturales del ecosistema fluvial en el tramo de estudio: macrófitos, macroinvertebrados, ictiofauna y herpetofauna (anfibios y reptiles).
- Asegurar la conservación de la diversidad ecológica mediante el establecimiento de un caudal que actúe como nivel base, por debajo del cual las poblaciones de las especies más exigentes experimentarían riesgo de extinción.
- Permitir en los tramos fluviales contaminados o degradados una mejora de la composición fisicoquímica del agua, así como de las condiciones hábitat.

5.3 MARCO DE ANTECEDENTES

(Docampo, s.f.) En su artículo *Modelización Hidráulica De Caudales Ecológicos*, señala diferentes modelos de caudal ecológico e implementa el modelo I.H.R.A (Ingeniería Hidráulica de Ríos y Acequias) para su investigación.

En el artículo (Docampo, s.f.) Resume lo siguiente: La ecuación de la velocidad media de corriente de Manning en régimen uniforme es ampliamente utilizada como simulación hidráulica en los modelos de determinación de caudales ecológicos (p.ej. modelos IFIM, RECE, medias móviles, etc.). En este trabajo se ensaya dicha ecuación en 10 tramos de los ríos Llobregat y Cardener, comparándola con la fórmula de Chezy ajustada esta última mediante el diagrama de Moody (formulación basada en el coeficiente de fricción del canal y en el número de Reynolds). Se determina que la ecuación de Manning da lugar a importantes errores (del 20% al 61%) en la estima de los caudales circulantes por el río y en el cálculo de caudales ecológicos, cuando la rugosidad relativa del canal $0,0002 < e/Dh < 1$. Para evitar dichos errores se propone que la modelización hidráulica de caudales ecológicos se basa en la ecuación de Chezy ajustada con dicho diagrama.

(Rincon, 2004) Como trabajo de grado se realizó una investigación para calcular el caudal ecológico en la cuenca del río Lenguazaque, por medio del modelo I.H.R.A. (ingeniería hidráulica de ríos y acequias).

El trabajo consta de una investigación y posterior análisis de los principales conceptos y metodologías que se han establecido sobre caudal ecológico, luego se hace una descripción de los componentes de los ecosistemas loticos y finalmente el estudio de caso. Este estudio, se realiza inicialmente con una descripción de la cuenca y su problemática en cuanto al uso del agua, posteriormente se realiza un análisis general sobre la metodología a aplicar, llevando a cabo todos los estudios y trabajos de campo necesarios para determinar los componentes que se incluyen en la metodología.

Por último, se presentan los resultados obtenidos y se realiza el análisis y se presentan las recomendaciones correspondientes.

A partir de este trabajo se puede realizar el seguimiento de los caudales ecológicos que se calcularon, con el fin de determinar el tiempo en que el río es capaz de mantener estos valores, teniendo en cuenta factores como el crecimiento de la población o la decisión de crear una conciencia ambiental. También se pueden realizar estudios sobre bioindicadores en la cuenca para establecer los estados de calidad que maneja el río en las diferentes épocas a lo largo del tiempo.

(Diez & Burbano, 2007) En su artículo resumen: La regulación de las corrientes fluviales es un proceso creciente desde que la sociedad comenzó a explotar los bienes y servicios que proporcionan estos sistemas.

Una Gestión Hídrica ambiental persigue el aprovechamiento equilibrado de las funciones del medio fluvial, mediante un Régimen de Caudales Ambientales (RCA) adecuado que salvaguarde el patrimonio hidrobiológico y sociocultural, así como el disfrute de valores intrínsecos cada vez más apreciados (ecología, cultura, recreación o estética). Este trabajo revisa los efectos de la alteración del régimen natural de caudales en el ecosistema fluvial y amaíza el método de implantar unos caudales ecológicos confiables en Colombia. Se exponen ordenadamente los métodos principales para calcular RCA en el ámbito internacional y las pautas especificadas en la legislación nacional para esta finalidad. Finalmente se concretan varios conceptos claves y las pautas convenientes para incorporar los caudales ambientales en los Planes de Ordenamiento de Cuencas y en las Evaluaciones Ambientales Estratégicas locales.

(Diez, 2005) En su artículo *Bases metodológicas para el establecimiento de caudales ecológicos en el ordenamiento de cuencas hidrográficas* dice: La demanda de agua superficial para fines productivos está aumentando progresivamente como respuesta a un crecimiento económico deseado, a la vez que la sociedad está reclamando una gestión de los ríos verdaderamente ambiental.

Los Regímenes de Caudales Ecológicos constituyen una herramienta fundamental en los Planes de Ordenamiento de Cuencas, al posibilitar un manejo del agua racional que compagine sus distintos usos y preserve la funcionalidad del ecosistema fluvial. Este trabajo presenta los efectos ecológicos de la modificación de los caudales y los enfoques principales empleados para determinar caudales ecológicos. Se profundiza en la metodología IFIM ("InstreamFlow Incremental Methodology"), cuyo empleo es preferencial en el ámbito mundial y está ampliamente aceptada científicamente. Esta revisión analiza el contexto legal de Colombia relativo a la regulación de caudales y plantea unas pautas básicas para la determinación de caudales ecológicos, coherentes con las características de los sistemas fluviales locales.

5.4 MARCO GEOGRÁFICO

La cuenca del río Calandaima se encuentra ubicada en el departamento de Cundinamarca, exactamente en la provincia del Tequendama. Con el fin de realizar los aforos correspondientes se concluyó tomar el municipio de Apulo como referencia para el desarrollo del proyecto de investigación debido a que los puntos de muestreo están localizados cerca a dicho municipio y tiene mayor accesibilidad.

("Nuestro municipio - Apulo," n.d.)El Municipio de Apulo,se encuentra a una altura de 420 m.s.n.m., con latitud de $4^{\circ} 31'$, longitud $74^{\circ} 36'$ y se encuentra localizado al sur-occidente del Departamento de Cundinamarca, pertenece a la provincia del Tequendama, a una distancia de 101 KM de Bogotá, sobre la vía que conduce a Girardot (vía La Mesa). Sus límites son:

- Oeste con Tocaima
- Norte con Anapoima
- Sur con Tocaima y Viotá
- Este con Anapoima

Con un clima aproximado de 28° C, se encuentra a 400Mts, sobre el nivel del mar. El relieve es montañoso. El municipio esta bañado por los ríos Apulo, Calandaima y Bogotá, (el agua de los ríos Apulo y Bogotá no son aptas para el consumo

humano. El total de la población del Municipio de Apulo es: 8162 habitantes, de los cuales 3345 se ubican en la cabecera municipal y 4893 en la zona rural lo que representa solo el 41% de la población reside en área urbana, mientras el 59% se localiza en el área rural del municipio.

El municipio de Apulo presenta un desarrollo económico lento, siendo las actividades agrícola y ganadera las que tienen mayor incidencia, seguidas por el comercio y el turismo. Sin embargo se identifican algunas potencialidades que se infieren el actual y futuro desarrollo del municipio. El cultivo de frutas como los cítricos, banano, melón,

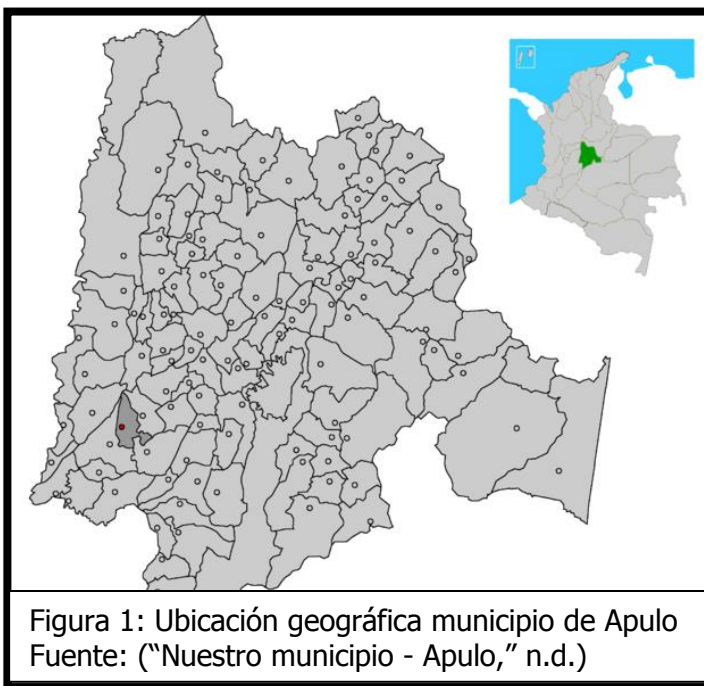


Figura 1: Ubicación geográfica municipio de Apulo
Fuente: ("Nuestro municipio - Apulo," n.d.)

patilla, mamoncillo, aguacate, zapote, representa la principal fuente de sustento del pequeño y mediano agricultor.

La actividad turística en Apulo se desarrolla en pasos lentos a pesar de varias condiciones que hacen del municipio un lugar atrayente para el turista; condiciones tales como: La accesibilidad, el clima, los paisajes y la gente.

6. METODOLOGÍA

El diseño metodológico que se desarrollara para llevar a cabo la realización de esta investigación será la siguiente:

- Recopilación y análisis de las metodologías existentes para la determinación del caudal ecológico.
- Investigación sobre la metodología I.H.R.A (antecedentes, aplicación, resultados obtenidos, condiciones).
- Recopilación de información sobre la cuenca del Río Calandaima, topografía del lugar, características, ubicación, descripción física del municipio, estaciones de aforo de caudal, entre otros, por media información suministrada por la CAR.
- Teniendo en cuenta que la principal vulnerabilidad del río se presentara en la parte baja de la cuenca, zona en la cual la topografía se facilita para que se presente tramos lentos, se seleccionaran cuatro puntos de aforo y muestreo en la zona cercana a la desembocadura al río Bogotá.
- Se hará un recorrido de campo en el río por los cuatro puntos de muestreo para poder identificar la presencia y el número de vertimientos y/o afluentes.
- Realizar mediciones de las propiedades morfométricas de los tramos del río elegidos para muestreo, también se harán mediciones "in situ" de Temperatura, pH y ORP. Además se tomaran muestras de agua en cada tramo para determinar parámetros físicos y químicos que permitan establecer la calidad del agua.
- Realizar aforos y muestreos: Para facilitar la ejecución de aforos de caudal en sectores corrientosos como lo es el río Calandaima no es viable realizar el aforo por vadeo, por la carencia de puentes u otras estructuras, ni por molinetes ya que la corriente tiene un flujo turbulento y sección irregular por esto se hace necesario construir instalaciones para la realización de aforos por trazadores (aforadores químicos) que nos permiten conocer el caudal a partir de la variación de la concentración de la sustancia que inyectaremos al cauce. El químico que se utilizara es el Cloruro de sodio (NaCl) ya que se inyecta en la corriente, y su detección "in situ" por el medio de medidas de la conductividad, el cual es un análisis relativamente sencillo, el grado de disolución es de 600 gramos por Litro y así se procede a inyectar el trazador en una sección de la corriente y revisar aguas abajo, a una distancia lo suficientemente lejos para que haya dilución total y así mediante la medición de la conductividad eléctrica detectamos el paso de la nube y así medir el caudal. Este procedimiento se realizara cuatro veces en un intervalo de veinte días cada uno.

- Aplicación del modelo I.H.R.A: después de realizar las medias morfométricas y aforos correspondientes se procede a la aplicación del método I.H.R.A haciendo los ajustes y adaptaciones necesarias y así poder determinar la vulnerabilidad del río.
- Calidad del agua: después de realizar las muestras y mediciones pertinentes se analizan los resultados de las características físicas y químicas y se determina la calidad del agua.
- Interpretación y análisis de resultados: Una vez aplicado el modelo I.H.R.A se procede a hacer un análisis de los resultados que arroja el método.
- Elaboración del informe final.

7. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

7.1 PERFILES MORFOMETRICOS

Se determinaron 4 puntos de muestreos aguas abajo del río Calandaima, cerca a la desembocadura en el río Bogotá, los cuales se aforaron 4 veces en intervalos de 20 días.

- El punto 1 se localiza en una latitud $4^{\circ} 29' 49''$ y longitud $74^{\circ} 33' 2.3''$ con una distancia de 1350 m a la desembocadura del río Bogotá.
- El punto 2 se encuentra en la latitud $4^{\circ} 29' 59''$ y longitud $74^{\circ} 33' 12.5''$ a una distancia de 404.76 m del primer punto.
- El punto 3 se ubica en la latitud $4^{\circ} 30' 02.3''$ y longitud $74^{\circ} 33' 22.9''$ a una distancia de 580.11 m del segundo punto.
- El punto 4 se localiza en la latitud $4^{\circ} 30' 11''$ y longitud $74^{\circ} 33' 24.5''$ a una distancia de 220 m del tercer punto y 146 m de la desembocadura del río Bogotá.

7.1.1 Punto de muestreo 1.

Fotografía 1: Punto de muestreo 1.

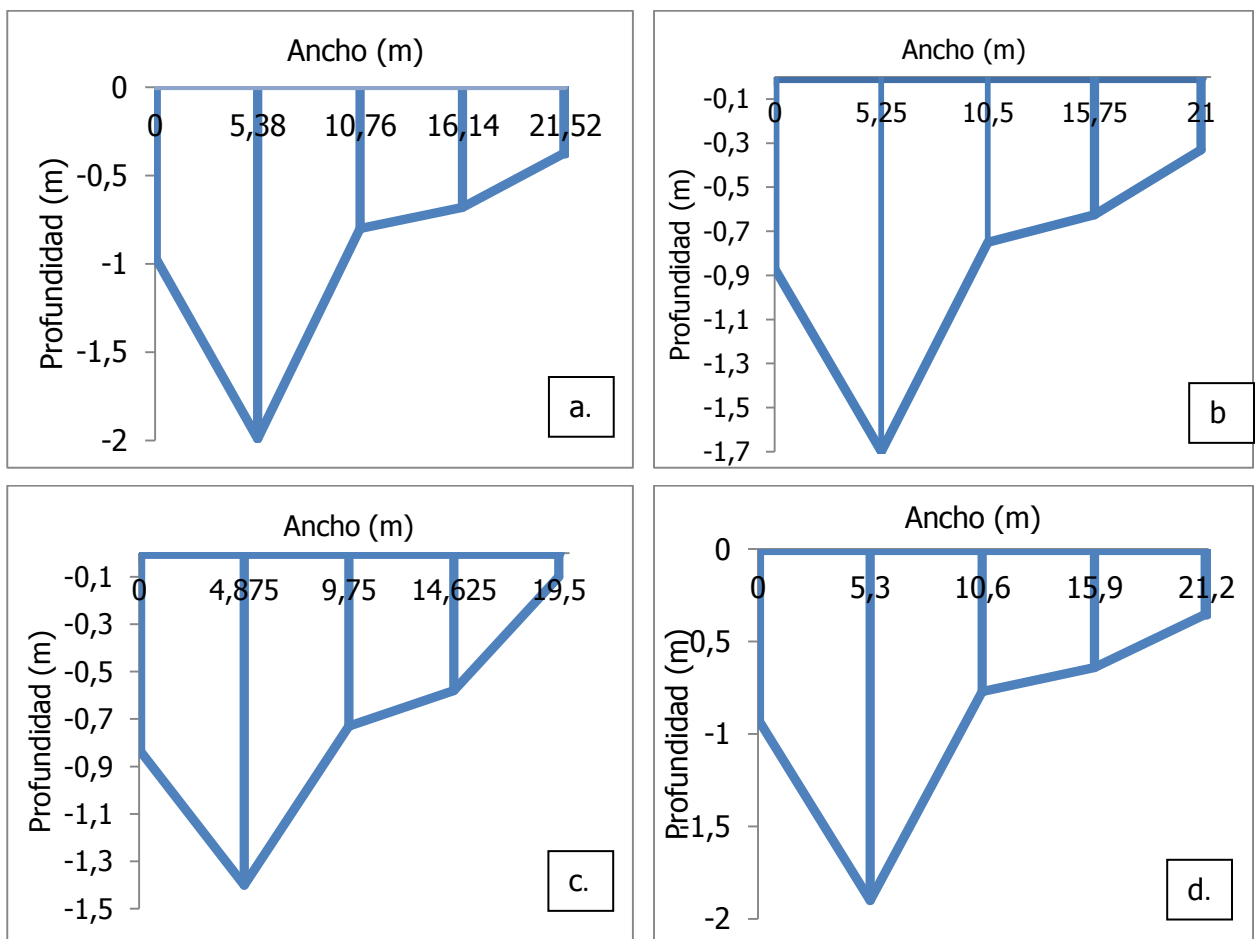


Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

Este punto es el más tranquilo de los 4 debido a que presenta mayor uniformidad, se observa que hay invasión en la ronda hídrica por vivienda y siembra. Además tiene un promedio de 20.80 m de ancho y una profundidad máxima de 1.74 m. (véase, ANEXO A)

7.1.1.1. Perfiles del río calandaima punto 1.

Grafica 1: perfil del río punto 1. a). Aforo 1 el día 6 de abril b). Aforo 2 el día 27 de abril c). Aforo 3 el día 18 de mayo d). Aforo 4 el día 8 de Junio



Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

7.1.2 Punto de muestreo 2.

Fotografía 2: Punto de muestreo 2.

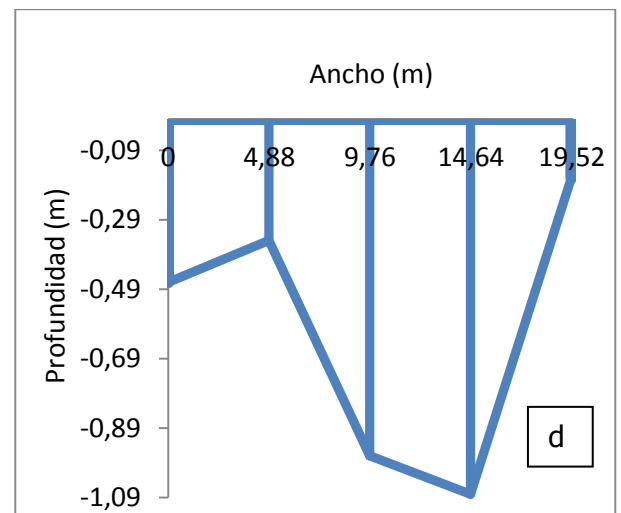
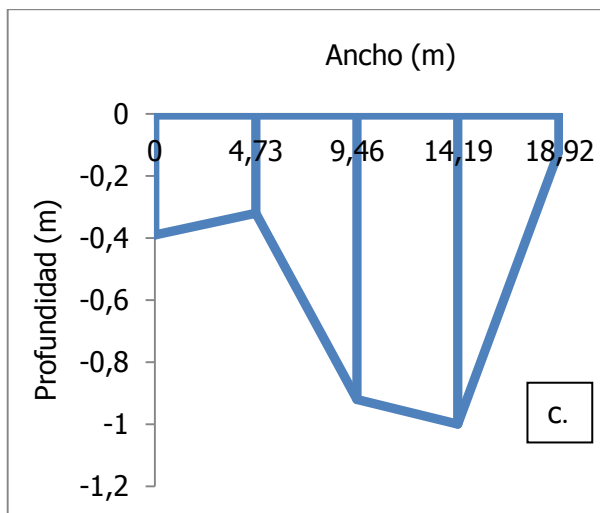
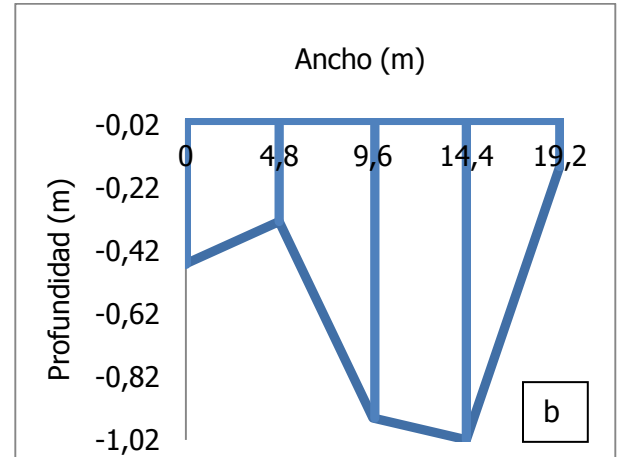
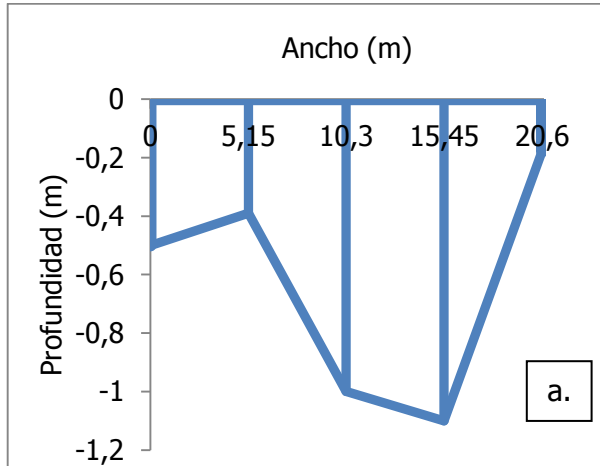


Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

Este punto presenta mayor dificultad en el momento de realizar el aforo debido a la alta turbulencia resultante de su pendiente y la cantidad de material rocoso, también cuenta con una profundidad máxima de 1.23 m y un ancho promedio de 19.56 m. (véase, ANEXO B)

7.1.2.1 Perfiles del río calandaima punto 2.

Grafica 2: perfil del río punto 2. a). Aforo 1 el día 6 de abril b). Aforo 2 el día 27 de abril
c). Aforo 3 el día 18 de mayo d). Aforo 4 el día 8 de Junio



Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

7.1.3. Punto de muestreo 3

Fotografía 3: Punto de muestreo 3.

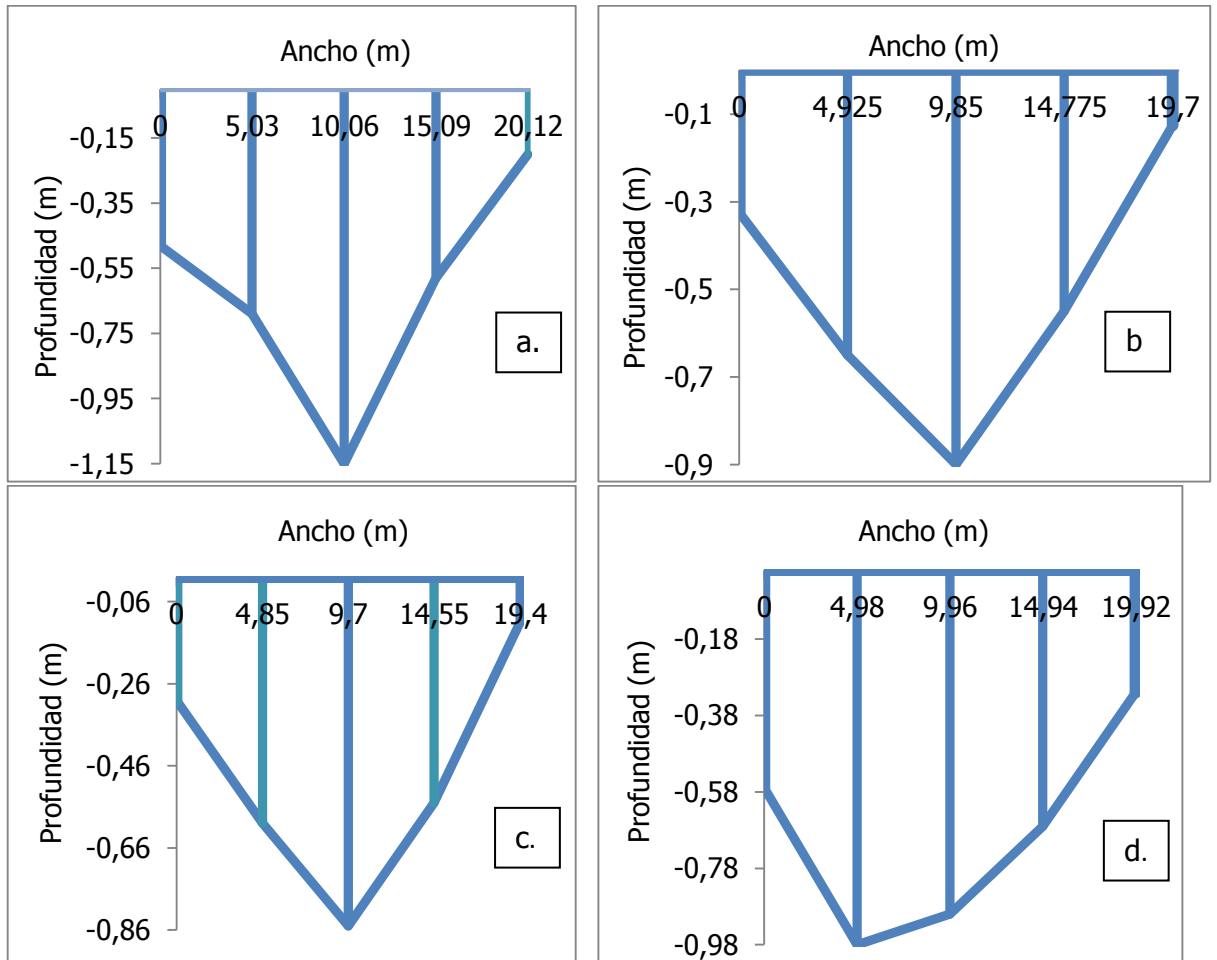


Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

Este se caracteriza principalmente por tener la pendiente más elevada, cuenta con un caño temporal por aguas lluvias el cual no altera significativamente el caudal del río y el punto no presenta intervención en sus laderas. Tiene una profundidad máxima de 0.97 m y un ancho promedio de 19.78 m. (véase, ANEXO C)

7.1.3.1. Perfiles del río calandaima punto 3

Grafica 3: perfil del río punto 3. a). Aforo 1 el día 6 de abril b). Aforo 2 el día 27 de abril
c). Aforo 3 el día 18 de mayo d). Aforo 4 el día 8 de Junio



Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

7.1.4. Punto de muestreo 4

Fotografía 4: Punto de muestreo 4

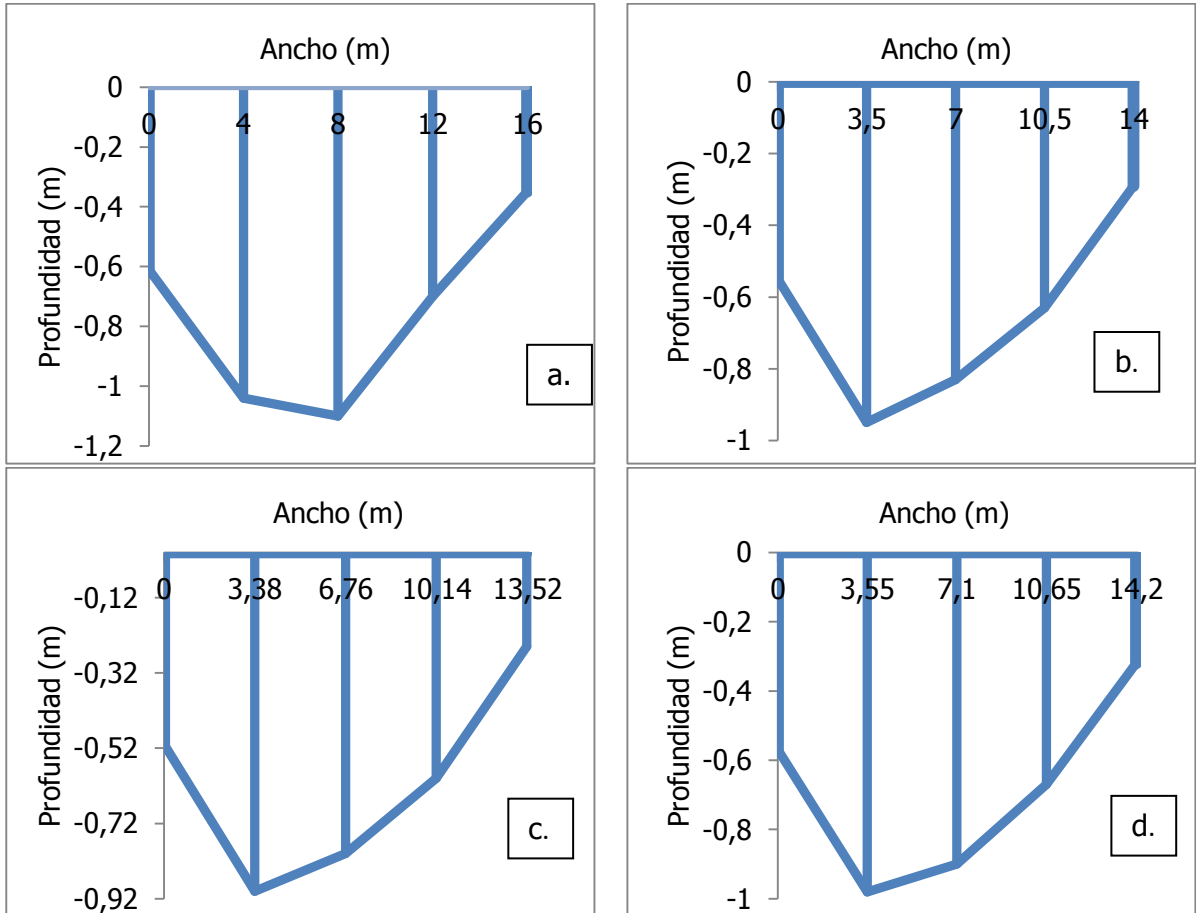


Fuente: Autores 2013

Este posee una profundidad máxima de 0.96 m y un ancho promedio de 14.43 m. (véase, ANEXO D)

7.1.4.1. Perfiles del río calandaima punto 4

Grafica 4: perfil del río punto 4. a). Aforo 1 el día 6 de abril b). Aforo 2 el día 27 de abril c). Aforo 3 el día 18 de mayo d). Aforo 4 el día 8 de Junio



Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

- Se aprecia que la morfología en cada uno de los puntos no varía significativamente a través del tiempo transcurrido entre un aforo y otro.
- Si el punto 1 tuviera en algún momento una disminución considerable del caudal, el río se desplazara al costado derecho del cauce debido a que las áreas profundas se encuentran en este punto.
- Evidenciamos que por la elevación de la pendiente entre los puntos no permitiría que el flujo fuera intermitente en el momento que este fuera reducido, así que este a pesar de su condición seguiría siendo continuo.

7.2 PARAMETROS DE CALIDAD DEL AGUA

En cada uno de los puntos de muestreo se hizo medición "in situ" utilizando el multiparametro portátil Horiba que determino la de Temperatura, pH, conductividad, turbiedad, ORP y SDT. Además se tomaron muestras de agua en cada uno de los puntos para determinar parámetros físicos y químicos que permitan establecer la calidad del agua.

Tabla 1: Parámetros de calidad del agua "in situ"

	PARAMETROS	PUNTOS DE MUESTREO			
		1	2	3	4
Aforo 1	Temperatura (°C)	24.75	24.33	24.14	24.03
	Ph	6.78	6.7	6.58	6.58
	Conductividad (ms/cm)	0.214	0.213	0.21	0.211
	Turbiedad (NTU)	325	360	370	345
	ORP (%)	178	186	205	208
	SDT (mg/L)	139	139	137	137
Aforo 2	Temperatura (°C)	25.1	24.9	24.1	23.7
	Ph	7.5	6.7	6.5	6.4
	Conductividad (ms/cm)	0.289	0.289	0.286	0.276
	Turbiedad (NTU)	154	154	165	170
	ORP (%)	169	168	177	175
	SDT (mg/L)	188	188	186	182
Aforo 3	Temperatura (°C)	25.35	25.3	25.15	24.5
	Ph	6.8	6.7	6.74	6.52
	Conductividad (ms/cm)	0.316	0.314	0.314	0.312
	Turbiedad (NTU)	123	122	130	140
	ORP (%)	180	163	180	180
	SDT (mg/L)	190	205	204	203
Aforo 4	Temperatura (°C)	25.2	24.9	24.7	23.9
	Ph	7.3	7	6.8	6.5
	Conductividad (ms/cm)	0.295	0.295	0.288	0.285
	Turbiedad (NTU)	135	122	130	140
	ORP (%)	175	163	162	160
	SDT (mg/L)	175	173	176	175

Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

7.3 IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIÓN DEL MODELO IHRA (INGENIERÍA HIDRÁULICA DE RÍOS Y ACEQUIAS)

El modelo seleccionado para ser implementado en el proyecto de investigación para la estimación del caudal ecológico en el río Calandaima es el IHRA, ya que puede ser adecuado a sus condiciones y permite a su vez realizar una simulación hidráulica con los datos obtenidos mediante los aforos realizados en campo.

(Docampo, n.d.)El modelo IHRA (Docampo, 1998) plantea una modelización hidráulica generalista, tanto para el flujo uniforme como para el lentamente variable en canales abiertos, con o sin transporte de solidos suspendidos, donde la ecuación de Manning es un caso particular de dicha modelización.

El modelo IHRA consiste en 8 componentes, en los cuales son especificadas las ecuaciones correspondientes, pero estos no serán utilizados en su totalidad ya que el modelo fue adoptado a las condiciones del río Calandaima:

1. Se clasifica el Régimen Hidrodinámico del Río Calandaima utilizando los números de Froude (Fr) para saber si el estado del flujo es Subcritico (Fr<1), critico (Fr=1) o supercrítico (Fr>1).

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g * DH}}$$

Tabla 2: Número de Froude para determinar el estado del flujo con los caudales ecológicos.

Velocidad media (m/s)	Gravedad (m/s²)	DH (m)	Numero de Froude	Estado del flujo
0.38	9.8	3.77205	0.062919579	Subcritico
0.50	9.8	2.26173	0.106850774	Subcritico

Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

2. La ecuación de Manning se empleó para calcular los caudales medios, mediante los aforos previamente realizados (véase, ANEXO E), y a partir del área mojada y la velocidad determinada en cada punto se estiman los caudales calculados para cada uno de ellos.

Tabla 3: Variables de la ecuación de Manning para la determinación de caudal.

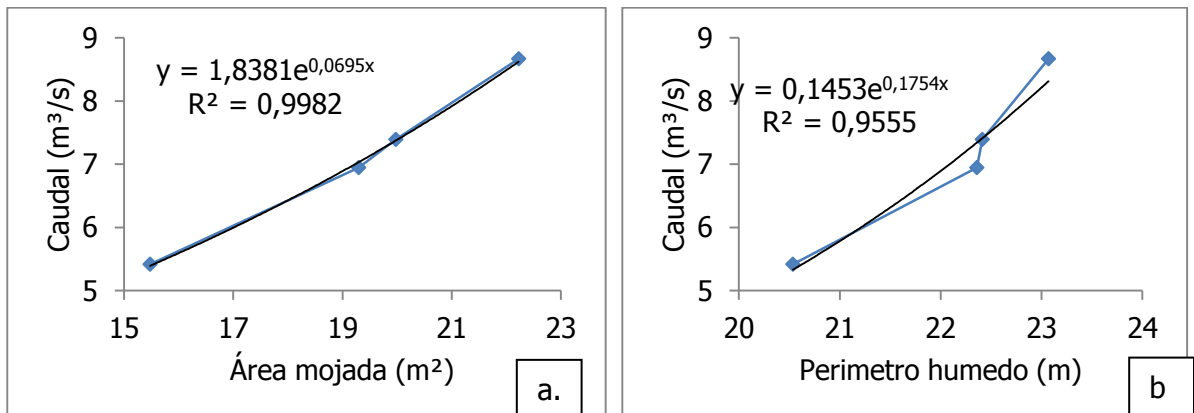
		Velocidad (m/s)	Área mojada (m ²)	Perímetro húmedo (m)	Radio hidráulico (m)	Caudal medio aforo (m ³ /s)	Caudal calculado (m ³ /s)
Punto 1	Aforo 1	0.39	22.226	23.068	0.963	8.001	8.668
	Aforo 2	0.36	19.294	22.360	0.863	7.525	6.946
	Aforo 3	0.35	15.478	20.535	0.754	4.278	5.417
	Aforo 4	0.37	19.976	22.412	0.891	6.173	7.391
Punto 2	Aforo 1	0.57	15.461	23.947	0.646	8.001	8.813
	Aforo 2	0.5	12.480	19.931	0.626	7.525	6.240
	Aforo 3	0.47	11.789	19.530	0.604	4.278	5.541
	Aforo 4	0.54	12.810	20.052	0.639	6.173	6.918
Punto 3	Aforo 1	0.63	13.869	20.852	0.665	8.001	8.737
	Aforo 2	0.51	11.451	20.198	0.567	7.525	5.840
	Aforo 3	0.48	10.694	19.855	0.539	4.278	5.133
	Aforo 4	0.51	12.140	20.344	0.597	6.173	6.191
Punto 4	Aforo 1	0.69	11.625	15.986	0.727	8.001	8.021
	Aforo 2	0.56	9.905	14.887	0.665	7.525	5.547
	Aforo 3	0.55	9.045	14.308	0.632	4.278	4.975
	Aforo 4	0.57	10.152	15.007	0.676	6.173	5.787

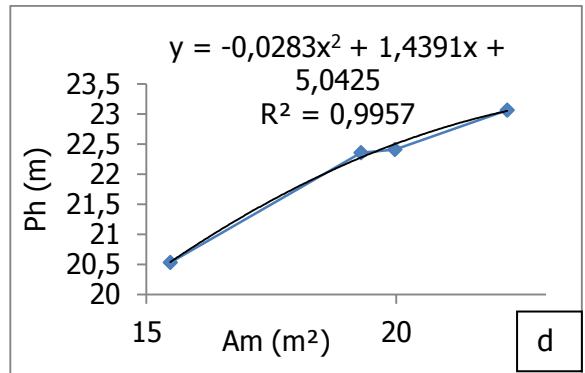
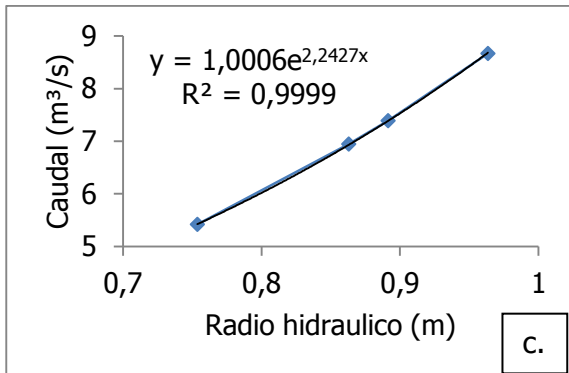
Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

- Para desarrollar la simulación hidráulica, se deben relacionar el caudal calculado contra las diferentes propiedades morfométricas tales como: el radio hidráulico (Rh), área mojada (Am), perímetro húmedo (Ph).

7.3.1. Tendencias para el punto 1

Grafica 5: Tendencias punto 1. a). Relación área mojada (Am) y caudal b). Relación perímetro húmedo (Ph) y caudal c). Relación radio hidráulico (Rh) y caudal d). Relación área mojada (Am) y perímetro húmedo (Ph)

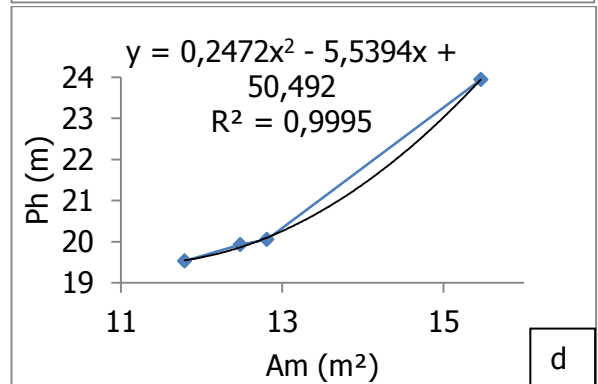
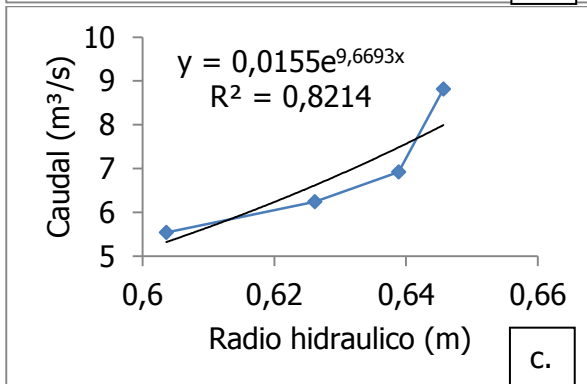
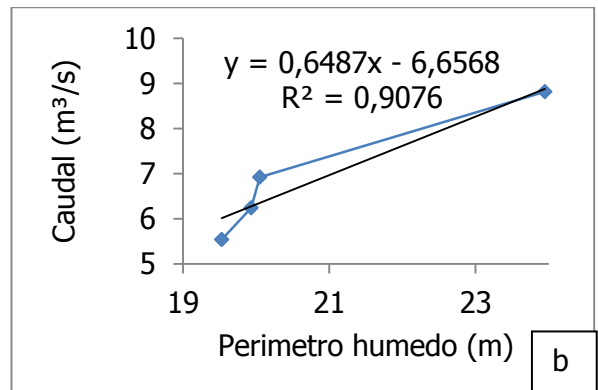
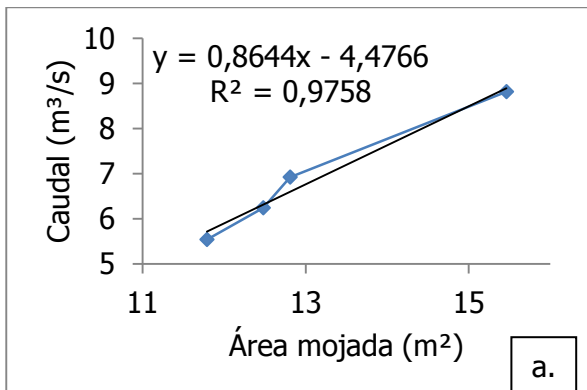




Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

7.3.2. Tendencias para el punto 2

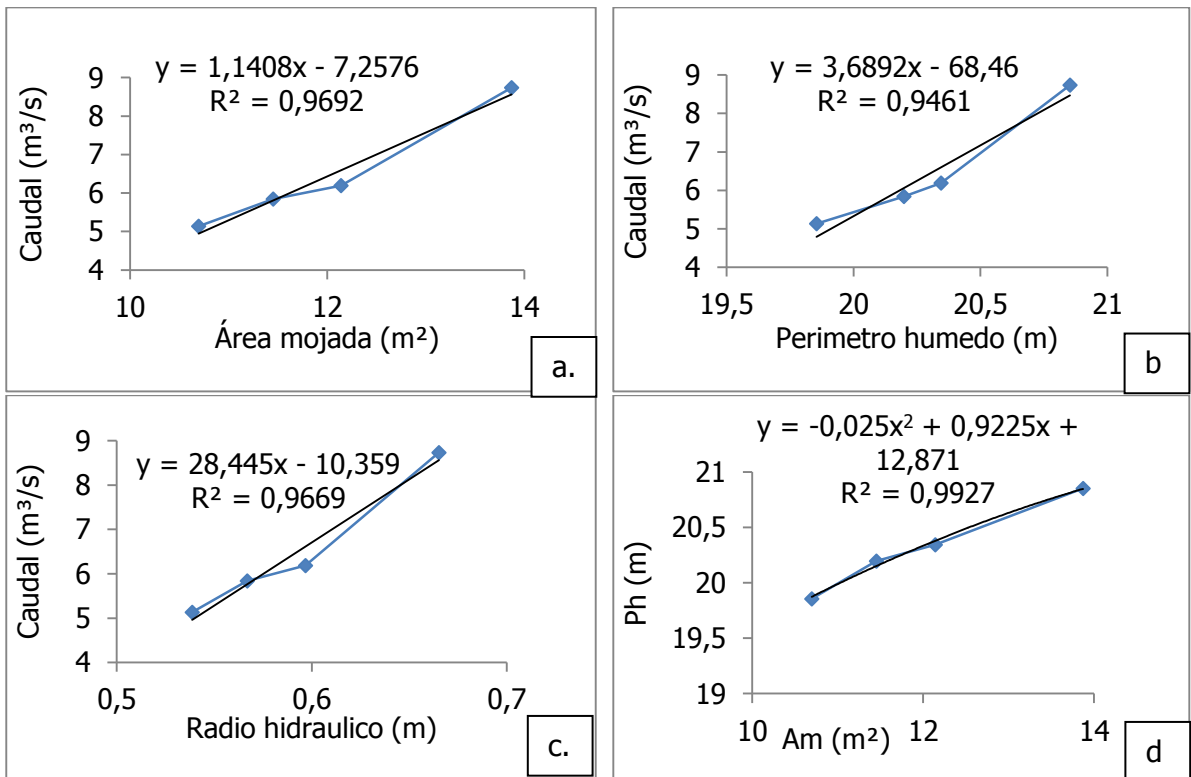
Grafica 6: Tendencias punto 2. a). Relación área mojada (Am) y caudal b). Relación perímetro húmedo (Ph) y caudal c). Relación radio hidráulico (Rh) y caudal d). Relación área mojada (Am) y perímetro húmedo (Ph)



Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

7.3.3. Tendencias para el punto 3

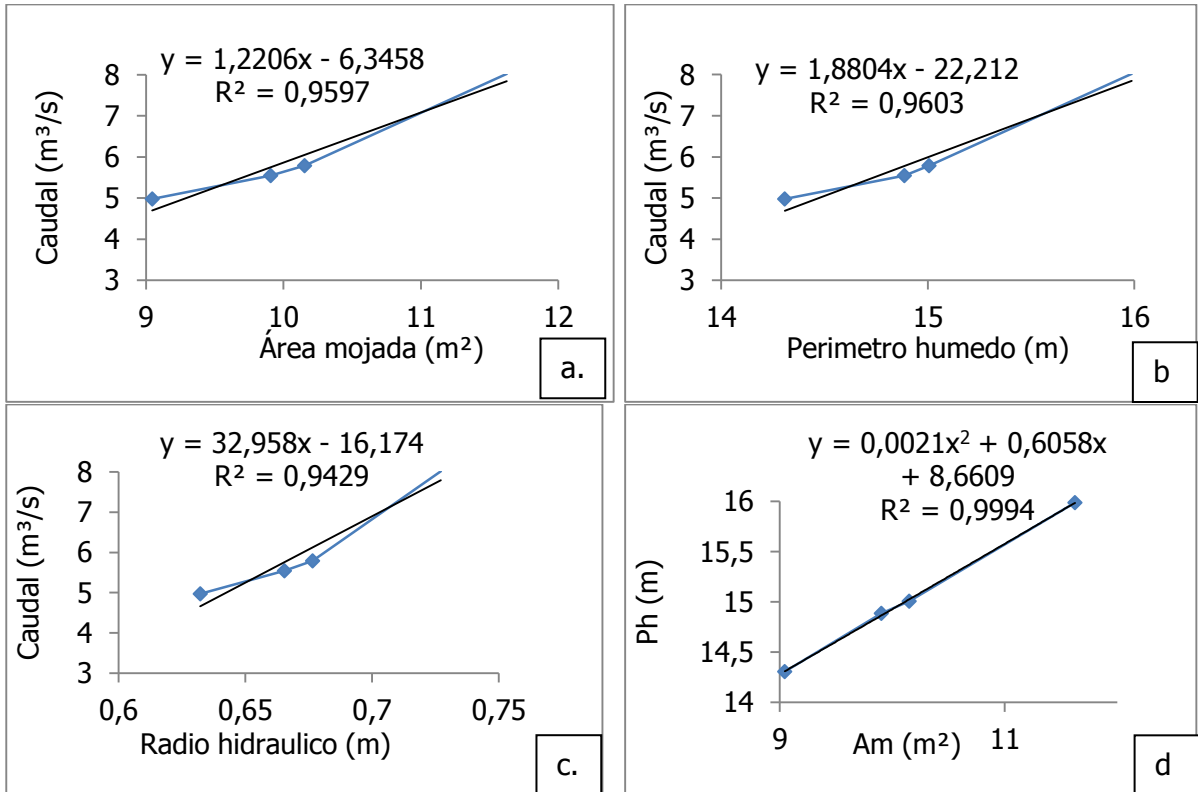
Grafica 7: Tendencias punto 3a). Relación área mojada (A_m) y caudal b). Relación perímetro húmedo (Ph) y caudal c). Relación radio hidráulico (R_h) y caudal d). Relación área mojada (A_m) y perímetro húmedo (Ph)



Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

7.3.4. Tendencias para el punto 4

Grafica 8: Tendencias punto 4. a). Relación área mojada (A_m) y caudal b). Relación perímetro húmedo (Ph) y caudal c). Relación radio hidráulico (R_h) y caudal d). Relación área mojada (A_m) y perímetro húmedo (Ph)



Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

- (Docampo, n.d.) La Vulnerabilidad Hidráulica (VH) es un parámetro de gran utilidad ambiental; representa la facilidad con que un cauce hidráulicamente ancho se transforma en estrecho, y viceversa, ante la extracción o adición de caudales. Este componente determina que cauces pueden aproximarse de forma trapezoidal o de forma rectangular y cuales son muy irregulares. Asimismo, la VH interviene en el cálculo de la estabilidad del flujo de gran importancia en la previsión de catástrofes de índole fluvial y constituye un parámetro utilizado en el cálculo de caudales ecológicos para el criterio de conservación del paisaje fluvial.

Se calcula la primera derivada de la relación entre el área mojada (A_m) y el perímetro húmedo (P_h) de la sección transversal del cauce, para ser reemplazado en la ecuación del número de Vedernikov (k) con el fin de sustituir éste en la fórmula de vulnerabilidad hidráulica (VH), (véase, ANEXO F).

$$VH = 1 - k$$

$$k = 1 - R_h * \frac{dP_h}{dA_m}$$

De acuerdo al cálculo de la vulnerabilidad hidráulica (VH) se considera que los puntos 1 y 3 son vulnerables si se disminuye el caudal a partir de 8.2937 m³/s y 5.7247 m³/s respectivamente, mientras que los puntos 2 y 4 presentan vulnerabilidad con cada uno de los caudales estimados, haciendo estos puntos más sensibles a la formación de estancamientos o pozas de agua. (Véase, ANEXO F).

Tabla 4: Número de Vedernikov para los puntos 1 y 3.

Caudal estimado (m ³ /s)	k	VH	Vulnerabilidad	Re	Flujo
8.2937	0.800070178	0.1999	No vulnerable	1432963.3	Turbulento
8.2879	0.79960231	0.2004	vulnerable	1432157.75	Turbulento
5.7247	0.800119903	0.20	No vulnerable	1129851.66	Turbulento
5.7144	0.799993217	0.20	vulnerable	1127997.41	Turbulento

Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

En los cauces hidráulicamente sensibles a la formación de pozas, donde $VH > 0,2$, el caudal ecológico nunca debe generar un número de Reynolds (Re) inferior a 12.500, con el cual se asegura la turbulencia y continuidad del flujo. Utilizando la ecuación de Chezy (como se muestra en la Tabla 4.)

$$V = C \sqrt{R_h * S}$$

$$C = \frac{1}{n} * R_h^{\frac{1}{6}}$$

Se determinó la velocidad media para calcular el caudal ecológico mediante la ecuación de Chezy. Sin embargo se determinó el caudal ecológico por medio de la ecuación de Manning para hacer una comparación entre los caudales calculados y los ecológicos. Se

decide tomar los valores de caudal de Chezy debido a que presenta un menor margen de error, ya que la ecuación de Manning tiene un porcentaje de error entre 20 y 61% en canales naturales con un coeficiente de rugosidad >0.05 de acuerdo a lo que se expone en el modelo elegido (IHRA). El coeficiente de Manning o de rugosidad que se tomo fue de 0.20 debido a que el río presenta un fondo irregular, corrientes en terreno rocoso y con algo de vegetación.

Tabla 5: Comparación de caudales para los cuales los tramos 1 y 3 son vulnerables desde el punto de vista hidráulico.

Caudal medio	Caudal aforado	Caudal Chézy	Caudal Manning	Re	Flujo
8.001225	8.668	8.08	8.293668807	1432963.3	Turbulento
4.2777	5.417	6.05	5.724704	1129851.66	Turbulento

Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

7.4 SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

Con los caudales ecológicos determinados hidráulicamente también se espera que no se altere la calidad del agua, por esta razón se establece una simulación de la misma a partir de los parámetros físico-químicos analizados.

Las muestras tomadas en cada uno de los aforos se analizaron en el laboratorio (Véase, ANEXO G), y los resultados fueron los siguientes:

7.4.1. Parámetros físico-químicos

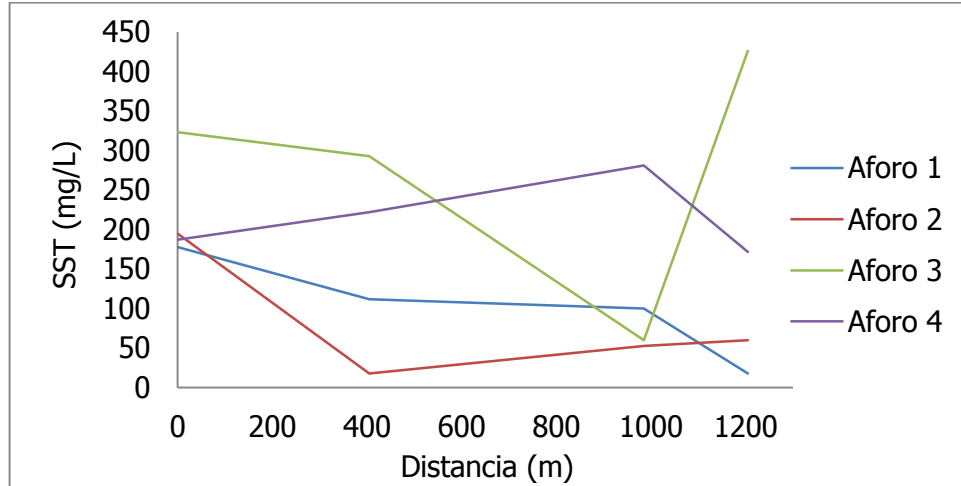
Tabla 6: Parámetros físico-químicos.

	Distancia (m)	SST (mg/L)	DQO (ppm)
Punto 1	0	178	89.104
		195	68.64
		323	42.43008
		187	35.17184
Punto 2	404.76	112	77.448
		18	64.74
		293	65.43328
		222	41.01504
Punto 3	984.87	100	65.884
		53	73.524
		60	57.97792
		281	25.17504
Punto 4	1204.87	18	99.244
		60	70.4
		426	90.85472
		172	14.7312

Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

7.4.1.1. Relación entre los SST(mg/L) y la distancia (m)

Grafica 9: Relación SST y distancia

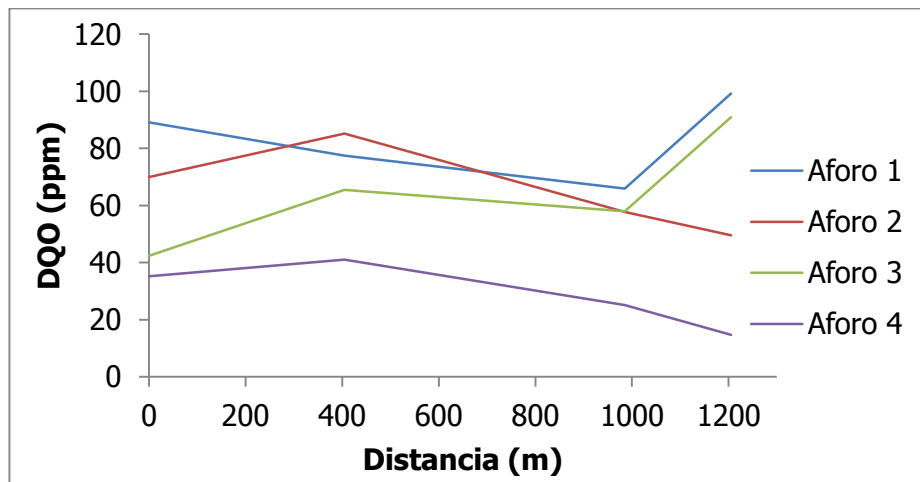


Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

Al analizar los sólidos suspendidos totales (SST), el comportamiento es consecuente en el aforo 1 ya que se aprecia la disminución del parámetro a través de la distancia recorrida a diferencia de los aforos restantes donde no se evidencia dicho comportamiento y esto se debe a que el río Calandaima presenta una morfología irregular, flujo turbulento, y altas pendientes.

7.4.1.2. Relación entre DQO (ppm) y la distancia (m)

Grafica 10: Relación DQO y distancia



Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

Tabla 7: valores DBO₅ para cada uno de los puntos.

Punto	DBO ₅ (ppm)
1	10
2	0
3	10
4	10

Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

El río puede tener mayor DBO debido a la arena negra que contiene y esto se debe a la cantidad considerable de materia orgánica.

Para la simulación de calidad de aguase procedió a tomar 5 casos de estudio variando las condiciones para cada uno de ellos.

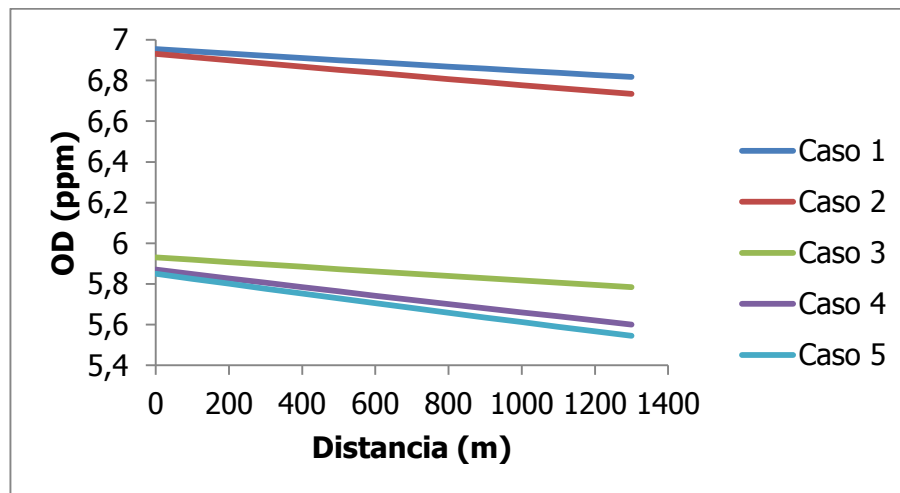
Tabla 8: Casos de variación de caudal para la simulación de calidad del agua.

Parametros	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4		Caso 5	
	Vertimiento	Río Calandaim	Vertimiento	Río Calandaim	Vertimiento	Río Calandaim	Vertimiento	Río Calandaim	Vertimiento	Río Calandaim
dotación (L/(hab*día))	150		150		150		150		150	
Habitantes	42837		51331		61590		75590		88289	
Caudal (m ³ /s)	0.07436979	8.07767206	0.08911632	6.39650415	0.10692708	6.05046531	0.13123264	3.92224	0.15327951	3.92224
DBO5 (ppm de O ₂)	300	10	360	10	360	10	370	10	370	10
Oxigeno Disuelto (ppm de O ₂)	2	7	2	7	2	6	2	6	2	6
Solidos Suspendidos Totales (ppm)	250	170	280	180	280	180	300	180	300	180
velocidad promedio de la corriente receptora (m/s)		0.38		0.33		0.33		0.3		0.3

Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

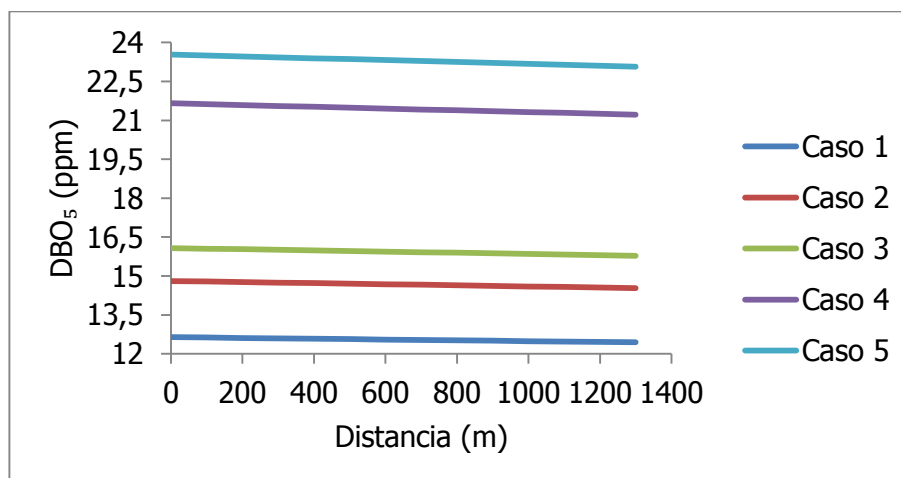
Se utilizaron los caudales ambientales hallados como referencia para que a partir de ellos se comenzaran a disminuir y simular las condiciones en las que se encontraría la calidad del agua, para cada uno de los casos se introduce un vertimiento de aguas residuales generado por las poblaciones aledañas al cauce del río Calandaima y con esto observar el comportamiento de parámetros como Oxígeno disuelto (OD), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) y Solidos Suspendidos Totales (SST). Los resultados fueron los siguientes para cada caso:

Grafica 11: Comportamiento del Oxígeno Disuelto respectó a la distancia.



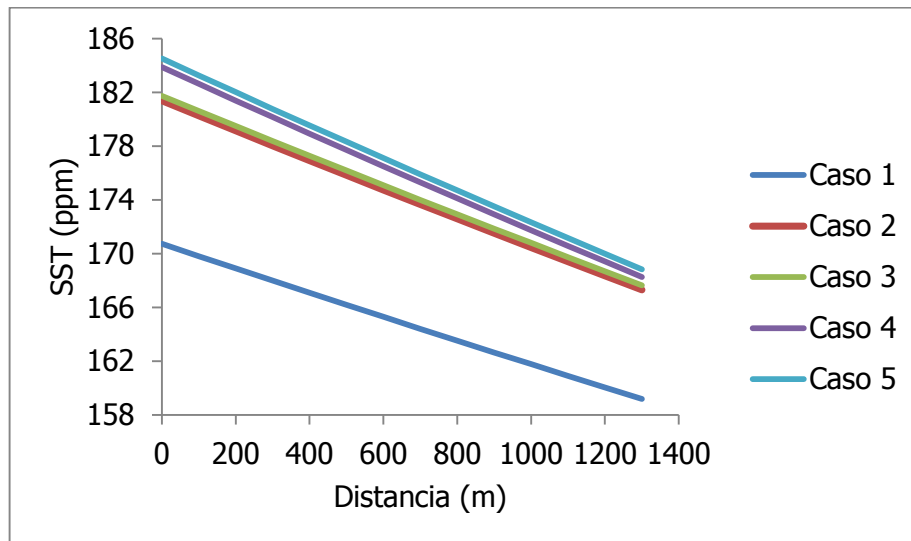
Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

Grafica 12: Comportamiento de la DBO₅ respectó a la distancia.



Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

Grafica 13: Comportamiento de los SST respectó a la distancia.



Fuente: Cepeda, Velandia 2013.

La distancia que se toma es la de 1300 m. debido a que esta corresponde a la longitud del tramo estudiado.

De los tres parámetros estudiados (OD, SST y DBO_5) el que tiene una relevancia mayor por ser este el indicador ambiental más importante en la calidad del agua es el oxígeno disuelto (OD) ya que indica la calidad ecológica de un cuerpo de agua debido a que cuando este gas se encuentra presente en el agua favorece la vida acuática, no presenta problemas de malos olores y permite la movilidad de los peces a las zonas altas de los ríos para desovar, mientras que la DBO_5 , solo se debe analizar como un parámetro que impacta directamente la concentración de oxígeno en el agua.

Se infiere mediante la gráfica que a partir de la disminución de un caudal de $6.05 \text{ m}^3/\text{s}$ se afectara las condiciones biológicas del río debido a que se vería comprometida la calidad del agua por la disminución del OD, esto a consecuencia de los vertimientos de las poblaciones aledañas a la cuenca del río.

7.5. VERIFICACIÓN DE CAUDALES DEL RÍO CALANDAIMA EN CONDICIONES NORMALES

Para realizar la verificación de los caudales calculados en condiciones normales se deberecopilar información mediante estaciones hidrometereológicas de la Corporación Autónoma Regional (CAR), para el caso de estudio no es posible realizar la verificación debido a que hay estaciones que poseen datos insuficientes y otras que no se encuentran ubicadas sobre el río Calandaima sino en quebradas cercanas. (Véase, ANEXO H). Como es el ejemplo de la estación "Pte. Samper Madrid" que se localizan sobre el río, pero los datos no son completos. También está la estación "Pueblo de piedra" que cuenta con datos suficientes pero se encuentra ubicada a una distancia considerable del tramo analizado.

8. CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta la forma del cauce y las variaciones del área de flujo con respecto al caudal se determinó la vulnerabilidad hidráulica del río para el tramo estudiado. El valor de caudal ecológico desde el punto de vista hidráulico debe ser de $8.07 \text{ m}^3/\text{s}$.
- La simulación de calidad del agua señala que al generarse una disminución significativa del caudal del río, este se verá afectado de manera negativa con respecto a sus características físicas y químicas, ocasionando una afectación del ecosistema. La simulación realizada dio como resultado que el caudal mínimo que puede ser transportado por el cauce debe ser de $6.05 \text{ m}^3/\text{s}$, con este caudal se logra que este ecosistema acuático no presente afectaciones significativas en sus características físicas y químicas.
- No se encontraron registros de caudales del río Calandaima en el tramo analizado, por este motivo no se pudo realizar la comparación de caudal promedio del río y caudal ecológico hallado en el presente trabajo.
- Durante las campañas de muestreo y aforo no se apreciaron vertimientos de agua residual al río que pudiesen afectar significativamente la calidad del agua.
- Con base en los perfiles del río se aprecia que el cauce tiende a concentrarse en áreas con forma de v, por este motivo en periodos de estiaje, el flujo de agua se centrara en dichas zonas posibilitando la formación de pozos de agua unidos entre sí por pequeños hilos de agua corriente.
- Teniendo en cuenta el análisis realizado por el método IHRA, el río Calandaima en la parte más baja de su cuenca es susceptible a importantes variaciones en su régimen hidráulico a causa de una disminución considerable de caudal en la parte alta de la cuenca.
- La simulación de calidad del agua señala que al generarse una disminución significativa del caudal del río, este se verá afectado de manera negativa con

respecto a sus características físicas y químicas, ocasionando una afectación del ecosistema.

- La disminución del caudal del río en la parte alta de la cuenca afecta directamente la disponibilidad del recurso para el principal uso que este tiene, el cual es el uso para consumo humano.
- En la simulación de calidad del agua el comportamiento de los SST no varía considerablemente dado que se disminuye la velocidad y el caudal del flujo, dando resultado a un aumento en la sedimentación y esto a una problemática ambiental mayor.

9. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios en los que se analicen los factores sociales, biológicos y económicos que se puedan ver afectados por la intervención del cauce del río a causa de algún tipo de obra hidráulica.
- Evaluar el transporte de sedimentos realizado por el río y su posible afectación sobre los tramos lenticos.
- Realizar una simulación del comportamiento del cauce ante caudales máximos para determinar la extensión de las llanuras de inundación.
- Ubicar una estación hidrometeorológica en la parte baja de la cuenca del río Calandaima para poder verificar el cumplimiento del caudal ecológico que establezca la autoridad ambiental competente.

10. BIBLIOGRAFÍA

1. Aguirre, A., & Vicuña, B. (s.f.). Conceptos básicos para la aplicación del caudal ecológico en los ríos ibéricos.
2. Castro, L., Carvajal, Y., & Monsalve, E. (2006). Enfoques teóricos para definir Caudal Ambiental.
3. Davis, R., & Hirji, R. (1999). Environmental flows: Concepts and Methods. Water Resources and Environment Technical Note C. 1. Series Editors.
4. Diez, J., & Burbano, L. (2006). Técnicas avanzadas para la evaluación de caudales ecológicos en el ordenamiento sostenible de cuencas hidrográficas. Ingeniería e Investigación. Vol 26 Nº 1 , 58-68.
5. Diez, J., & Burbano, L. (2007). Tecnología ecológica para la planificación de cuencas hidrográficas: Regímenes caudales ambientales. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Vol 5. Nº 2 , 20-31.
6. Dyson, M., Bergkamp, G., & Scanlon, J. (s.f.). Caudal. Elementos esenciales de los caudales ambientales. San Jose, C.R.: UICN-ORMA.
7. IDEAM. (2007). Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. Bogotá D.C.: Imprenta Nacional de Colombia.

8. García De Jalón, D., & González del Tánago, M. (s.f.). El concepto de concepto de caudal ecológico y criterio para su aplicación en los ríos españoles. Madrid: Departamento de Ingeniería Forestal, Escuela de Ingenieros de Montes: Universidad politécnica de Madrid.
9. Merritt, D., Scott, M., Poff, L., Auble, G., & Lytle, D. (2010). Theory, methods and tools for determining environmental flows for riparian vegetation: riparian vegetation-flow response guilds. *Freshwater Biology*. Vol 55 , 206–225.
10. Poff, L., & Zimmerman, J. (2010). Ecological responses to altered flow regimes: literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biology*. Vol 55 , 194–205.
11. Rincon, A. (2004). Aplicación del modelo IHRA para calcular el caudal ecológico en la cuenca del Río Lenguazaque. Bogotá, D.C.: UNIVERSIDAD DE LA SALLE: FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA.
12. Smith, M. (2009). FINDING COMMON GROUND: HOW ADVOCACY COALITIONS SUCCEED IN PROTECTING ENVIRONMENTAL FLOWS. *JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION* , Vol 45. Nº 5 pag 1100-1115.
13. U. NACIONAL DE COLOMBIA . (2008). METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL EN PROYECTO LICENCIADOS. Bogotá D.C.
14. Docampo, L. (N.D.). MODELIZACIÓN HIDRÁULICA DE CAUDALES ECOLÓGICOS. RECUPERADO MARZO 11 DE 2011 DE, [HTTP://HISPAGUA.CEDEX.ES/SITES/DEFAULT/FILES/HISPAGUA_ARTICULO/INGCI VIL/113/ARTICULO5/MODELIZACION.HTML](http://HISPAGUA.CEDEX.ES/SITES/DEFAULT/FILES/HISPAGUA_ARTICULO/INGCI VIL/113/ARTICULO5/MODELIZACION.HTML)
15. Nuestro municipio - Apulo. (n.d.). RECUPERADO JULIO 15, 2013, DE [HTTP://WWW.APULO-CUNDINAMARCA.GOV.CO/NUESTROMUNICIPIO.SHTML](http://WWW.APULO-CUNDINAMARCA.GOV.CO/NUESTROMUNICIPIO.SHTML)

16. (CAR), C. A. (S.F.). *CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL (CAR)*. RECUPERADO EL 9 DE ABRIL DE 2013, DE [HTTP://WWW.CAR.GOV.CO](http://www.car.gov.co)
17. CUNDINAMARCA, A. M. (S.F.). *PLANEACIÓN CUNDINAMARCA*. RECUPERADO EL 10 DE JULIO DE 2013, DE [HTTP://WWW.PLANEACION.CUNDINAMARCA.GOV.CO/BANCOMEDIOS/DOCUMENTOS%20PDF/SIG_DOC_2000%20APULO%201COMPONENTE%20GENERAL.PDF](http://www.planeacion.cundinamarca.gov.co/bancomedios/documentos%20pdf/sig_doc_2000%20apulo%201componente%20general.pdf)
18. Posey, S. W. (s.f.). *Coficiente de Manning*. Recuperado el 18 de Mayo de 2013, de <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/flujoencanales/manning/manning.html>

11.ANEXOS

ANEXO A

Tabla 9: Registro aforo 1.

PUNTO 1	Ancho del río	m	21.5	m	profundidad
	sección 1	m	0	m	0.96
	sección 2	m	5.375	m	1.99
	sección 3	m	10.75	m	0.8
	sección 4	m	16.125	m	0.68
PUNTO 2	sección 5	m	21.5	m	0.37
	Ancho del río	m	20.6	m	
	sección 1	m	0	m	0.5
	sección 2	m	5.15	m	0.39
	sección 3	m	10.3	m	1
PUNTO 3	sección 4	m	15.45	m	1.1
	sección 5	m	20.6	m	0.18
	Ancho del río	m	20.1	m	
	sección 1	m	0	m	0.48
	sección 2	m	5.025	m	0.69
PUNTO 4	sección 3	m	10.05	m	1.15
	sección 4	m	15.075	m	0.58
	sección 5	m	20.1	m	0.2
	Ancho del río	m	16	m	
	sección 1	m	0	m	0.61
PUNTO 4	sección 2	m	4	m	1.04
	sección 3	m	8	m	1.1
	sección 4	m	12	m	0.7
	sección 5	m	16	m	0.35

Fuente: Cepeda, Velandia 2013

ANEXO B

Tabla 10: Registro aforo 2.

PUNTO 1	Ancho del río	21	m	profundidad	
	sección 1	0	m	0.87	m
	sección 2	5.25	m	1.70	m
	sección 3	10.5	m	0.75	m
	sección 4	15.75	m	0.625	m
PUNTO 2	sección 5	21	m	0.33	m
	Ancho del río	19.2	m		
	sección 1	0	m	0.46	m
	sección 2	4.8	m	0.325	m
	sección 3	9.6	m	0.95	m
PUNTO 3	sección 4	14.4	m	1.02	m
	sección 5	19.2	m	0.15	m
	Ancho del río	19.7	m		
	sección 1	0	m	0.325	m
	sección 2	4.925	m	0.65	m
PUNTO 4	sección 3	9.85	m	0.9	m
	sección 4	14.775	m	0.55	m
	sección 5	19.7	m	0.125	m
	Ancho del río	14	m		
	sección 1	0	m	0.55	m
PUNTO 4	sección 2	3.5	m	0.95	m
	sección 3	7	m	0.83	m
	sección 4	10.5	m	0.63	m
	sección 5	14	m	0.29	m

Fuente: Cepeda, Velandia 2013

ANEXO C

Tabla 11: Registro aforo 3.

PUNTO 1	Ancho del río	19.5	m	profundidad	
	sección 1	0	m	0.83	m
	sección 2	4.875	m	1.40	m
	sección 3	9.75	m	0.73	m
	sección 4	14.625	m	0.58	m
	sección 5	19.5	m	0.1	m
PUNTO 2	Ancho del río	18.9	m		
	sección 1	0	m	0.39	m
	sección 2	4.725	m	0.32	m
	sección 3	9.45	m	0.92	m
	sección 4	14.175	m	1	m
	sección 5	18.9	m	0.12	m
PUNTO 3	Ancho del río	19.4	m		
	sección 1	0	m	0.3	m
	sección 2	4.85	m	0.6	m
	sección 3	9.7	m	0.85	m
	sección 4	14.55	m	0.55	m
	sección 5	19.4	m	0.11	m
PUNTO 4	Ancho del río	13.5	m		
	sección 1	0	m	0.51	m
	sección 2	3.375	m	0.9	m
	sección 3	6.75	m	0.8	m
	sección 4	10.125	m	0.6	m
	sección 5	13.5	m	0.25	m

Fuente: Cepeda, Velandia 2013

ANEXO D

Tabla 12: Registro aforo 4.

PUNTO 1	Ancho del río	21.2	m	profundidad	
	sección 1	0	m	0.92	m
	sección 2	5.3	m	1.90	m
	sección 3	10.6	m	0.77	m
	sección 4	15.9	m	0.64	m
	sección 5	21.2	m	0.35	m
PUNTO 2	Ancho del río	19.5	m		
	sección 1	0	m	0.47	m
	sección 2	4.875	m	0.35	m
	sección 3	9.75	m	0.97	m
	sección 4	14.625	m	1.08	m
	sección 5	19.5	m	0.17	m
PUNTO 3	Ancho del río	19.9	m		
	sección 1	0	m	0.43	m
	sección 2	4.975	m	0.67	m
	sección 3	9.95	m	1.10	m
	sección 4	14.925	m	0.56	m
	sección 5	19.9	m	0.19	m
PUNTO 4	Ancho del río	14.2	m		
	sección 1	0	m	0.57	m
	sección 2	3.55	m	0.98	m
	sección 3	7.1	m	0.9	m
	sección 4	10.65	m	0.67	m
	sección 5	14.2	m	0.32	m

Fuente: Cepeda, Velandia 2013

ANEXO E

Tabla 13: Calculo para caudales medios:

	Punto	Coef. de rugosidad	Pendiente	Área mojada <m ² >	Perimetro o humedo <m>	Radio hidraulico <m>	Velocidad del agua en el canal <m/s>	Caudal <m ³ /s>	Velocidad medida <m/s>	Caudal medio
Aforo 1	Punto 1	0.2	0.006	22.225625	23.068225	0.9634736	0.377808889	8.3970387	0.36	8.001225
	Punto 2	0.2	0.022	14.5745	23.451346	0.6214782	0.54008893	7.8715261		
	Punto 3	0.2	0.024	13.869	20.85197	0.665117	0.590211501	8.1856433		
	Punto 4	0.2	0.024	13.28	17.01873	0.7803168	0.65653253	8.718752		
Aforo 2	Punto 1	0.2	0.006	19.29375	22.360234	0.8628599	0.351025901	6.772606	0.41	7.9104375
	Punto 2	0.2	0.022	12.48	19.931134	0.626156	0.542795693	6.7740903		
	Punto 3	0.2	0.024	11.450625	20.197777	0.566925	0.530590375	6.0755914		
	Punto 4	0.2	0.024	9.905	14.887025	0.6653445	0.590346066	5.8473778		
Aforo 3	Punto 1	0.2	0.006	15.478125	20.534917	0.7537467	0.320771593	4.9649428	0.4	4.2777
	Punto 2	0.2	0.022	11.788875	19.530387	0.6036171	0.529690705	6.2444575		
	Punto 3	0.2	0.024	10.69425	19.854896	0.5386203	0.512779637	5.4837936		
	Punto 4	0.2	0.024	9.045	14.30796	0.6321656	0.570553261	5.1606542		
Aforo 4	Punto 1	0.2	0.006	20.9085	22.688488	0.9215466	0.366767218	7.6685524	0.47	6.17298
	Punto 2	0.2	0.025	13.26	20.266191	0.6542917	0.595828037	7.9006798		
	Punto 3	0.2	0.024	13.134	20.587294	0.6379663	0.574038185	7.5394175		
	Punto 4	0.2	0.024	10.63225	15.139154	0.7023015	0.61200929	6.5070358		

Fuente: Cepeda, Velandia 2013

ANEXO F
 Tabla 14: Vulnerabilidad hidráulica.

Caudal Estimado (m³/s)	Am (m²) Estimada	Ph (m) Estimado	Rh (m) Estimado	(dPh)/(dAm)	k	VH	Vulnerabilidad
8.614211737	22.225625	23.27461845	0.959920429	0.181129625	0.826129973	0.173870027	No vulnerable
8.598884017	22.2	23.26446487	0.959126325	0.18258	0.824882716	0.175117284	No vulnerable
8.480186389	22	23.18521743	0.952928439	0.1939	0.815227176	0.184772824	No vulnerable
8.421453427	21.9	23.14559372	0.949829495	0.19956	0.810452026	0.189547974	No vulnerable
8.363127244	21.8	23.10597	0.946730552	0.20522	0.805711956	0.194288044	No vulnerable
8.305205023	21.7	23.06634628	0.943631609	0.21088	0.801006966	0.198993034	No vulnerable
8.293668807	21.68	23.05842154	0.94301182	0.212012	0.800070178	0.199929822	No vulnerable
8.28790671	21.67	23.05445917	0.942701926	0.212578	0.79960231	0.20039769	vulnerable
8.190561293	21.5	22.98709885	0.937433722	0.2222	0.791702227	0.208297773	vulnerable
7.910827806	21	22.78898026	0.921939006	0.2505	0.769054279	0.230945721	vulnerable
7.379695882	20	22.39274309	0.890949574	0.3071	0.726389386	0.273610614	vulnerable
6.202686033	17.5	21.40215016	0.813475993	0.4486	0.63507467	0.36492533	vulnerable
5.213401018	15	20.41155723	0.736002412	0.5901	0.565684977	0.434315023	vulnerable
4.38190004	12.5	19.4209643	0.658528831	0.7316	0.518220307	0.481779693	vulnerable
3.683017649	10	18.43037137	0.58105525	0.8731	0.492680661	0.507319339	vulnerable
3.095602108	7.5	17.43977844	0.503581669	1.0146	0.489066039	0.510933961	vulnerable
2.601875235	5	16.44918551	0.426108088	1.1561	0.507376439	0.492623561	vulnerable
8.8881045	15.46125	24.0042638	0.656886131	2.110142	-0.386123014	1.386123014	vulnerable
8.22482	14.8	23.03056371	0.648865137	1.78322	-0.157069289	1.157069289	vulnerable
7.95905	14.5	22.64041398	0.645468121	1.6349	-0.055275831	1.055275831	vulnerable
7.5161	14	21.99016442	0.639546052	1.3877	0.112501944	0.887498056	vulnerable
7.33892	13.8	21.73006459	0.637078894	1.28882	0.17891998	0.82108002	vulnerable
7.07315	13.5	21.33991486	0.633264164	1.1405	0.277762221	0.722237779	vulnerable
6.18725	12.5	20.03941574	0.619424982	0.6461	0.599789519	0.400210481	vulnerable
5.7443	12	19.38916618	0.611742661	0.3989	0.755975852	0.244024148	vulnerable
8.5641552	13.869	22.31622032	0.665254182	0.22905	0.84762353	0.15237647	No vulnerable
7.0024	12.5	21.94513716	0.610349798	0.2975	0.818420935	0.181579065	No vulnerable
6.20384	11.8	21.75539412	0.582275971	0.3325	0.80639324	0.19360676	No vulnerable
5.8616	11.5	21.67407568	0.570244331	0.3475	0.801840095	0.198159905	No vulnerable
5.74752	11.4	21.64696953	0.566233784	0.3525	0.800402591	0.199597409	No vulnerable
5.724704	11.38	21.6415483	0.565431675	0.3535	0.800119903	0.199880097	No vulnerable
5.7144368	11.371	21.63910875	0.565070726	0.35395	0.799993217	0.200006783	vulnerable
5.63344	11.3	21.61986339	0.562223238	0.3575	0.799005192	0.200994808	vulnerable
4.83488	10.6	21.43012035	0.534149411	0.3925	0.790346356	0.209653644	vulnerable
4.49264	10.3	21.34880191	0.522117771	0.4075	0.787237008	0.212762992	vulnerable
3.92224	9.8	21.21327117	0.502065038	0.4325	0.782856871	0.217143129	vulnerable
2.4392	8.5	20.86089125	0.449927931	0.4975	0.776160854	0.223839146	vulnerable
1.64064	7.8	20.67114822	0.421854104	0.5325	0.775362689	0.224637311	vulnerable
1.18432	7.4	20.56272363	0.405811918	0.5525	0.775788915	0.224211085	vulnerable
7.843675	11.625	15.98366039	0.728735815	0.654625	0.522951317	0.477048683	vulnerable
6.22638	10.3	15.12358009	0.679664421	0.64906	0.558857011	0.441142989	vulnerable
5.2499	9.5	14.60428632	0.65003641	0.6457	0.58027149	0.41972851	vulnerable
3.90724	8.4	13.89025739	0.609297894	0.64108	0.609391306	0.390608694	vulnerable
2.44252	7.2	13.11131674	0.564855877	0.63604	0.640729068	0.359270932	vulnerable
1.95428	6.8	12.85166986	0.550041871	0.63436	0.651075438	0.348924562	vulnerable
1.5881	6.5	12.65693469	0.538931367	0.6331	0.658802551	0.341197449	vulnerable
1.22192	6.2	12.46219953	0.527820863	0.63184	0.666501666	0.333498334	vulnerable

Fuente: Cepeda, Velandia 2013

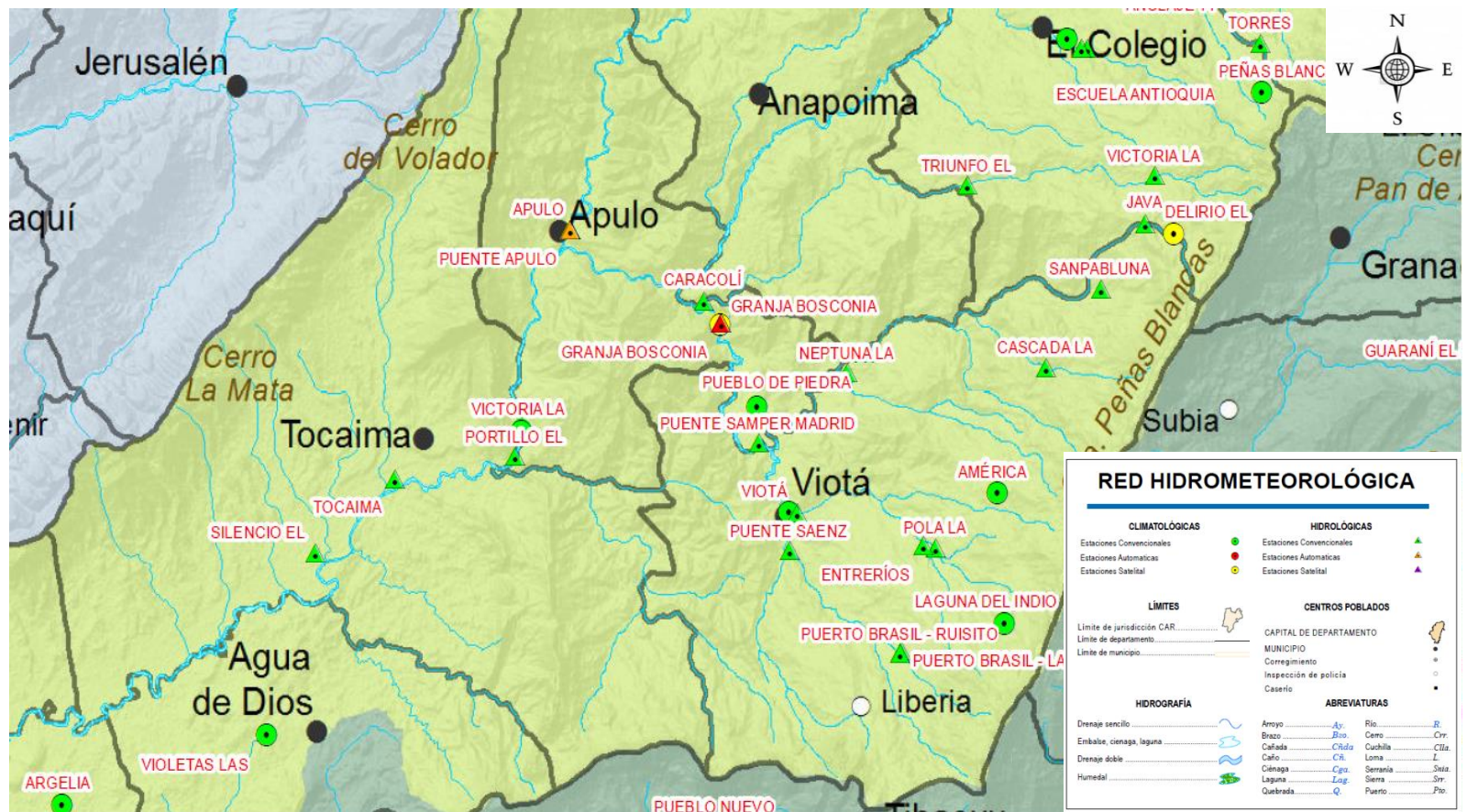
ANEXO G

Tabla 15: Determinación de parámetros físico-químicos.

		filtro vacío	filtro con sólidos (g)	vol. De la muestra tomada	SST (mg/L)	Concentración FAS (N)	Vol. Muestra (ml)	Vol. FAS a (ml)	Vol. FAS b (ml)	Promedio Vol. Fas	DQO
Aforo 1	Muestra 1	1.003	1.0208	100	178	0.025	2.5	14.8089	14.258	14.53345	89.104
	Muestra 2	1.0439	1.0551	100	112	0.025	2.5	14.3588	14.9995	14.67915	77.448
	Muestra 3	1.0034	1.0134	100	100	0.025	2.5	14.8014	14.846	14.8237	65.884
	Muestra 4	1.0632	1.065	100	18	0.025	2.5	14.473	14.3404	14.4067	99.244
	blanco					0.025	2.5	15.697	15.5975	15.64725	
Aforo 2	Muestra 1	0.763	0.7825	100	195	0.025	2.5	14.598	14.662	14.63	69.972
	Muestra 2	0.751	0.7528	100	18	0.025	2.5	14.403	14.477	14.44	85.172
	Muestra 3	0.809	0.8143	100	53	0.025	2.5	14.854	14.711	14.7825	57.772
	Muestra 4	0.7338	0.7344	100	6	0.025	2.5	14.907	14.863	14.885	49.572
	blanco					0.025	2.5	15.485	15.5243	15.50465	
Aforo 3	Muestra 5	0.7773	0.8096	100	323	0.022	2.5	15.005	15.0841	15.04455	42.43008
	Muestra 6	0.7661	0.7954	100	293	0.022	2.5	14.7175	14.7181	14.7178	65.43328
	Muestra 7	0.8141	0.8201	100	60	0.022	2.5	14.8014	14.846	14.8237	57.97792
	Muestra 8	0.7975	0.8401	100	426	0.022	2.5	14.473	14.2404	14.3567	90.85472
	blanco					0.022	2.5	15.697	15.5975	15.64725	
Aforo 4	Muestra 5	0.7025	0.7212	100	187	0.022	2.5	14.1243	14.3202	14.22225	35.17184
	Muestra 6	0.7512	0.7734	100	222	0.022	2.5	14.0275	14.251	14.13925	41.01504
	Muestra 7	0.8012	0.8293	100	281	0.022	2.5	14.3278	14.4007	14.36425	25.17504
	Muestra 8	0.7837	0.8009	100	172	0.022	2.5	14.4578	14.5674	14.5126	14.7312
	blanco					0.022	2.5	14.6547	14.789	14.72185	

Fuente: Cepeda, Velandia 2013

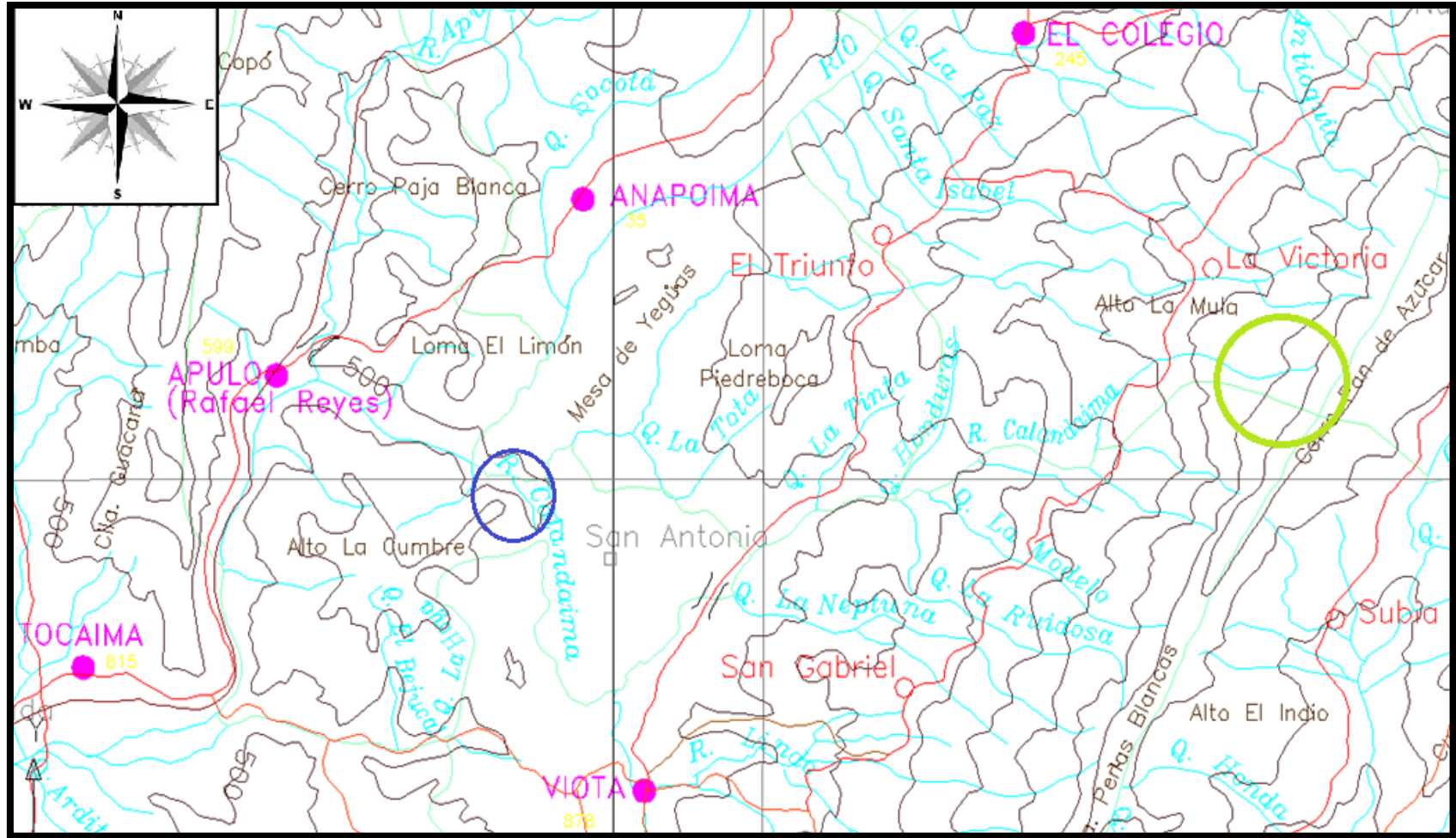
ANEXO H
 Figura 2: Ubicación de estaciones meteorológicas.



Fuente: Corporación Autónoma regional (CAR) 2013

ANEXO I

Figura 3: Ubicación del tramo de estudio analizado.



ANEXO J

Fotografía 5: Medición de parámetros "in situ".



Fuente: Cepeda, Velandia 2013

ANEXO k

Fotografía 6: Cauce del Río Calandaima



Fuente: Cepeda, Velandia 2013

ANEXO L

Fotografía 7: Cauce del Río Calandaima



Fuente: Cepeda, Velandia 2013

ANEXO M

Fotografía 8: Aforo del punto de muestreo 4



Fuente: Cepeda, Velandia 2013

ANEXO N

Fotografía 9: Aforo del punto de muestreo 3



Fuente: Cepeda, Velandia 2013

ANEXO O

Fotografía 10: Caño temporal por aguas lluvias en el punto de muestreo 3.



Fuente: Cepeda, Velandia 2013

ANEXO P

Fotografía 11: Salto hidráulico del Río Bogotá



Fuente: Cepeda, Velandia 2013

ANEXO Q

Fotografía 12: Material rocoso del Río Calandaima



Fuente: Cepeda, Velandia 2013