

EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DEL AGUA, PARA LA
FORMULACIÓN DE ESTRATEGIAS DE APROVECHAMIENTO Y CONSERVACIÓN DE
LA MICROCUENCA QUEBRADA LA ARGENTINA, VILLAVICENCIO – META.

SANTIAGO SEBASTIAN MARTINEZ ORTIZ
INGRID JASBLEIDY BARRERO ARIAS

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2018

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DEL AGUA, PARA LA
FORMULACIÓN DE ESTRATEGIAS DE APROVECHAMIENTO Y CONSERVACIÓN DE
LA MICROCUENCA QUEBRADA LA ARGENTINA, VILLAVICENCIO – META.

SANTIAGO SEBASTIAN MARTINEZ ORTIZ

INGRID JASBLEIDY BARRERO ARIAS

Trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero ambiental

Asesor:

HENRY CONTRERAS LEÓN

Ingeniero Ambiental y Sanitario

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2018

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

Autoridades académicas

P. JUAN UBALDO LÓPEZ SALAMACA O.P.

Rector General

P. MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO O.P.

Vicerrector Académico General

P. JOSÉ ARTURO RESTREPO RESTREPO O.P.

Rector Sede Villavicencio

P. FERNANDO CAJICÁ GAMBOA O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

Ing. YESICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota De Aceptación

YESICA NATALIA MOSQUERA BELTRAN

Decana de la Facultad de Ingeniería Ambiental

HENRY CONTRERAS LEÓN

Director Trabajo de Grado

JUAN JOSÉ NIETO BERNAL

Jurado

CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA

Jurado

Villavicencio, 04 de mayo de 2018

Dedicatoria

El presente trabajo de grado lo dedico a Dios, principal dador de sabiduría, discernimiento, persistencia y paciencia para concluir con mis objetivos planteados.

A mis padres, quienes, a lo largo de mi vida, han velado por mi bienestar y educación. Por haberme enseñado que con esfuerzo, trabajo y constancia todo se logra. Su perseverancia y lucha insaciable han hecho de ellos el gran ejemplo a seguir y exaltar. Su amor, cariño, compañía, lealtad y fe en mí, fueron pilares fundamentales para mi lucha constante.

A mis hermanos, apoyos incondicionales, principal razón y motivo para esforzarme por el presente y mañana.

A mi compañero de trabajo de grado por su compromiso y dedicación. Un hombre destacado y transparente que me aportó confianza, y que, a pesar de las dificultades encontradas en el camino, no cesó, y persistió hasta el final.

Ingrith Jasbleidy Barrero Arias.

Este trabajo se lo dedico primeramente a Dios por darme la fortaleza y sabiduría, para dar cumplimiento con este objetivo.

A mi familia, en especial a mis padres por ser personas de ejemplo, lucha y tenacidad, siendo un apoyo incondicional durante mi proceso formativo.

A mis hermanos y demás personas que creyeron que este sueño sería posible materializarlo sin dudar en algún momento, hoy les puedo decir lo cumplí.

Santiago Sebastián Martínez Ortiz.

Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo de grado el cual ha incurrido arduo y extenso tiempo, le agradezco a Dios por darme el tiempo para culminar.

A mi familia por creer plenamente en mis capacidades innatas y por su consuelo en tiempos difíciles.

Este trabajo de grado es el resultado del esfuerzo conjunto de todos los que constituimos el grupo de trabajo. Por esto, agradezco a nuestro director Henry Contreras León, por su ayuda y compromiso, por compartir con nosotros sus ideas y conocimiento.

A la comunidad de la vereda La Argentina, por su gentileza, amabilidad y confianza.

A los docentes que en su debido momento acompañaron y aportaron a este proyecto.

A personal administrativo por su auxilio y compromiso.

A mis compañeros de clase y amigos que supieron dar un consejo y apoyo para continuar y terminar mi carrera universitaria.

Ingrith Jasbleidy Barrero Arias.

Resumen

El objetivo principal del proyecto fue evaluar las condiciones de calidad del agua de la microcuenca La Argentina, ubicada en la ciudad de Villavicencio, departamento del Meta, para formular estrategias de aprovechamiento y conservación de la misma. Inicialmente se identificó el uso actual del suelo dentro del área de estudio con el fin de analizar el grado de afectación o variación en las condiciones de calidad del agua. Dicha evaluación mediante monitoreos *In Situ* (Oxígeno disuelto; Conductividad; Caudal, pH, y Temperatura del agua), monitoreos *Ex Situ* (Demanda biológica de oxígeno “DBO₅”; Sólidos disueltos totales “SDT”; Dureza; Alcalinidad; NO₃ –N; Fosfatos total; Turbiedad, Coliformes totales y fecales), durante temporada húmeda (octubre y noviembre de 2017) y seca (enero y febrero de 2018). El tratamiento e interpretación de los datos físicos, químicos y microbiológicos se llevó a cabo a través del uso de índices de calidad del agua “ICA” e índices de contaminación “ICO’s, por mineralización “ICOMI” y materia orgánica “ICOMO”. Se reporta como resultados; que las condiciones de calidad del agua de la microcuenca en temporada húmeda, para cuenca alta y baja, son aceptables (78,77 – 73,21), y cuenca media regular (69,06). Asimismo, para temporada seca, se encontraron condiciones de calidad del agua aceptables (76,29, 75,35, 72,98) en los tres tramos. Por otra parte, el índice de contaminación por mineralización no presentó cambios considerables en el tiempo. Los valores obtenidos demuestran que la microcuenca presenta contaminación alta (0,758) por mineralización. Por el contrario, el ICOMO presentó baja (0,288) contaminación en los tres tramos, y temporadas evaluadas. Asociado a lo anterior, se determinó que para las dos temporadas evaluadas la microcuenca representa temperaturas entre los 23,9°C y 28,2°C; en cuanto al pH, O.D, y conductividad las variaciones fueron entre 8,44 y 8,8 unidades; 73,5 y 90 % y 544 y 596,5 µS/cm, respectivamente. El caudal máximo se registró en temporada húmeda (1,10 m³/s) y el mínimo en temporada seca (0,70 m³/s), con una variación significativa en cuenca media ($\pm$ 0,37 m³/s) debido al aporte de afluentes. Adicionalmente los valores de SDT, y fósforo total, se encontraron dentro del rango 390 - 399,65 mg/L, 0,1 y 0,325 mg/L PO₄. Los parámetros que no presentaron cambios considerables en el tiempo fueron DBO₅ y NO₃ –N, con concentraciones invariables de 5 mg/L y 3 mg/L NO₃ respectivamente. Con respecto a los parámetros microbiológicos evaluados, se obtuvieron las máximas concentraciones de coliformes fecales en temporada seca, en cuenca

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

media y alta (31 – 98 NMP/100 mL). En último lugar, el parámetro dureza registro las concentraciones más altas en las dos temporadas evaluadas, teniendo como promedio 360,42 mg/L CaCO_3 , e incursionando estas concentraciones significativamente en el índice de contaminación por mineralización. Finalmente, se formularon propuestas a nivel conceptual, enfocadas en la protección y conservación de la microcuenca, desde diferentes factores (institucional, comunidad, ecoturismo, uso productivo, y cuidado de zonas estratégicas). Lo anterior, con el fin de entregar información base primaria a entidades o corporaciones autónomas regionales correspondientes, y apoyar los estudios de calidad del recurso hídrico del país, para proporcionar información desconocida referente a cuerpos de agua especialmente de la Región Orinoquia.

Palabras clave: Calidad del Recurso Hídrico, Índices de Calidad del Agua y de Contaminación, Actividades Socioeconómicas, Gestión del Recurso Hídrico.

Abstract

The main goal of this project was to evaluate the water quality conditions of the La Argentina micro-basin, located in the city of Villavicencio, Meta's department, to formulate strategies of use and conservation of this one. Initially identifying the current use of the soil inside the studies area with the purpose of analyze the grade of affectation or variation in water quality conditions of the micro-basin. This evaluation through monitoring *In Situ* (Dissolved Oxygen, Conductivity, Flow, pH, and Water Temperature) *Ex Situ* monitoring (Biological oxygen demand "BOD5"; Total dissolved solids "SDT"; Hardness; Alkalinity; NO₃-N; Total phosphate; Turbidity) and microbiological parameters (total and fecal coliforms), during wet season (October and November of 2017) and dry season (January and February of 2018). The treatment and interpretation of physical, chemical and microbiological data was done through the use of water quality indices "ICA" and pollution indexes" ICO's, by mineralization "ICOMI" and organic matter "ICOMO". It is reported as results; that the water quality conditions of the micro-basin in the wet season, for high and low basins, are acceptable (78,77 – 73,21) and average regular basin (69,06). Also, for dry season, acceptable water quality conditions (76,29 – 75,35 72.98) were found in the three stretches. On the other hand, the mineralization contamination index did not show considerable changes over time, the values obtained show that the microbasin presents high contamination (0,75) by mineralization. On the contrary, ICOMO presented low (0,28) pollution in the three sections, and seasons evaluated. Associated with the above, it was determined that for the two seasons evaluated, the micro-basin represents temperatures between 23.9°C and 28,2°C; in terms of pH, O.D, and conductivity the variations were between 8,44 and 8,8 units; 73,5 and 90% and 544 and 596,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectively. The maximum flow was recorded in the wet season (1,10 m³/s) and the minimum in the dry season (0,70 m³/s), with a significant variation in the middle basin ($\pm$ 0,37 m³/s) due to the contribution of tributaries. Additionally, SDT and total phosphate values were within the range of 390 – 399,65 mg/L, 0,1 and 0,325 mg/L PO₄. The parameters that did not show considerable changes over time were BOD₅ and NO₃-N, with invariable concentrations of 5 mg/L and 3 mg/L NO₃ respectively. According to the microbiological parameters evaluated, the maximum fecal coliform concentrations were obtained in the dry season, in the middle and upper watershed (31 - 98 NMP/100 mL). Lastly, the hardness parameter recorded the highest

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

concentrations in the two seasons evaluated, with an average of 360,42 mg/L CaCO_3 , and entering these concentrations significantly in the mineralization contamination index. Finally, proposals were formulated at a conceptual level, focused on the protection and conservation of the microbasin, from different factors (institutional, community, ecotourism, productive use, and care of strategic areas). The above, in order to deliver primary base information to entities or autonomous regional corporations, and support the quality studies of the country's water resources, to provide unknown information regarding water bodies, especially in the Orinoquia Region.

Keywords: Wáter Resource Quality, Water Quality and Pollution Indexes, Socioeconomic Activities, Wáter Resource Management.

Tabla de Contenido

Resumen	vii
Abstract	ix
Introducción	1
Planteamiento del Problema.....	2
Pregunta Problema.....	3
Objetivos	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos.....	4
Justificación.....	5
Alcance.....	7
Antecedentes	8
Marco de Referencia	11
Marco Teórico	11
Marco Conceptual	14
Cuenca hidrográfica.....	14
Microcuenca.....	14
Calidad del agua.....	15
Índices de calidad del agua.	15
Índice de calidad del agua de la fundación de sanidad nacional (NFS).	17
Manejo integral de microcuenca.....	17
Marco Legal.....	17
Metodología	20
Diseño metodológico.....	21
Unidad de análisis.....	21
Diseño de investigación y temporalidad de estudio.	21
Fases de investigación.	21
Fase I. Reconocimiento del área de estudio, e identificación del uso de suelo actual a partir de información de tipo secundario.....	21

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

Fase II. Monitoreo y toma de muestras.....	22
Fase III. Evaluación microbiológica.	25
Fase IV. Aplicación de los Índice de calidad del agua e índices de contaminación (ICA-ICO).	27
Fase V. Formulación de propuestas de gestión, dirigidas a la conservación del recurso hídrico.....	32
Resultados – Análisis	32
Reconocimiento del área de estudio, e identificación del uso de suelo actual a partir de información de tipo secundario	32
Evaluación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos	35
Datos obtenidos en campo	35
Datos obtenidos de parámetros requeridos para el desarrollo de índice de calidad del agua y de contaminación (ICOMI – ICOMO).....	50
Formulación de propuestas de gestión, dirigidas a la conservación del recurso hídrico.....	54
Conclusiones	58
Recomendaciones.....	60
Referencias Bibliográficas	61

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Ventajas y limitaciones de los Índices del calidad del agua.</i>	16
Tabla 2. <i>Equipos requeridos en el monitoreo.</i>	22
Tabla 3. <i>Recipientes y preservación de muestras.</i>	24
Tabla 4. <i>Variables a medir, métodos de análisis y frecuencia de muestreo.</i>	24
Tabla 5. <i>Índices de Calidad del Agua – Colombia</i>	27
Tabla 6. <i>Índices de Contaminación – Colombia</i>	27
Tabla 7. <i>Pesos relativos para cada parámetro.</i>	28
Tabla 8. <i>Escala de clasificación del ICA-NSF.</i>	29
Tabla 9. <i>Escala de clasificación de los índices de contaminación.</i>	31
Tabla 10. <i>Parámetros morfométricos básicos microcuenca quebrada La Argentina.</i>	34
Tabla 11. <i>Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos requeridos en el Índice de Calidad del Agua – temporada seca y húmeda.</i>	50
Tabla 12. <i>Parámetros fisicoquímicos requeridos en el Índice de contaminación por mineralización (ICOMI) – Temporada seca y húmeda</i>	51
Tabla 13. <i>Parámetros fisicoquímicos requeridos en el Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO) – Temporada seca y húmeda</i>	51
Tabla 14. <i>Valores de indice de calidad del agua, microcuenca La Argentina.</i>	51
Tabla 15. <i>Valores de indice de contaminación (ICOMI – ICOMO) microcuenca La Argentina.</i>	53

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Zona de estudio del proyecto y su área de influencia.	7
<i>Figura 2.</i> Metodología para la Evaluación de las Condiciones de Calidad del Agua, y Formulación de Estrategias de Aprovechamiento y Conservación de la Microcuenca Quebrada La Argentina, Villavicencio – Meta.....	20
<i>Figura 3.</i> Método de incubación de los tubos de ensayo, técnica del NMP.	26
<i>Figura 4.</i> Mapa uso actual y coberturas del suelo, microcuenca quebrada La Argentina.	32
<i>Figura 5.</i> Representación gráfica porcentual de las coberturas actuales del suelo	33
<i>Figura 6.</i> Delimitación de la micro cuenca en 3D, ArcScene.	35
<i>Figura 7.</i> Representación gráfica del parámetro caudal (m^3/s), para temporada seca y húmeda.	36
<i>Figura 8.</i> Representación gráfica del parámetro temperatura ($^{\circ}C$) para temporada seca y húmeda.....	37
<i>Figura 9.</i> Representación gráfica del parámetro pH (unidades) para temporada seca y húmeda.	38
<i>Figura 10.</i> Representación gráfica del parámetro oxígeno disuelto (%) para temporada seca y húmeda.....	39
<i>Figura 11.</i> Representación gráfica del parámetro conductividad eléctrica ($\mu S/cm$) para temporada seca y húmeda.	40
<i>Figura 12.</i> Representación gráfica del parámetro dureza (mg/L) para temporada seca y húmeda.	42
<i>Figura 13.</i> Representación gráfica del parámetro DBO5 (mg/L) para temporada seca y húmeda.	43
<i>Figura 14.</i> Representación gráfica del parámetro coliformes fecales (NMP/100 mL) para temporada seca y húmeda	44
<i>Figura 15.</i> Representación grafica del parámetro sólidos disueltos totales (mg/L) para temporada seca y húmeda..	45
<i>Figura 16.</i> Representación grafica del parámetro dureza (mg/L) para temporada seca y húmeda.	46

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

<i>Figura 17.</i> Representación grafica del parámetro fosfato (mg/L) para temporada seca y húmeda.	47
<i>Figura 18.</i> Representación grafica del parámetro turbiedad (UNT) para temporada seca y húmeda.	48
<i>Figura 19.</i> Representación grafica del parámetro alcalinidad (mg/L CaCO ₃) para temporada seca y húmeda.	49

Introducción

El agua es un recurso imprescindible para la sobrevivencia de los seres humanos, lo cual ha generado que históricamente las comunidades se hayan asentado en las cercanías a las fuentes hídricas (Ramirez, 2011). Dicha proximidad aunada a la poca gestión, ha conllevado a la modificación de la calidad y disponibilidad del recurso, lo que se debe principalmente al desarrollo de actividades antrópicas como vertimiento de aguas residuales domésticas e industriales, destrucción de hábitats, modificación del régimen hídrico, entre otros. Teniendo una influencia directamente sobre sus ecosistemas, alterando la estabilidad del medio ambiente acuático.

En Colombia la riqueza hídrica es una realidad que nadie se atreve a discutir. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), el país ocupa el séptimo puesto en abundancia de agua en el mundo, después de otras naciones de enormes proporciones como Brasil, Indonesia, Rusia, India, Canadá y China. (Palacios, 2011). Pero la falta de planeación y el desconocimiento de las posibles consecuencias de un mal aprovechamiento trajeron consigo la contaminación del ambiente natural (Ruiz, Escobar, & Escobar, 2007). Por tal razón, agencias gubernamentales, ambientales, universidades y diversas organizaciones, se han preocupado por evaluar el impacto antrópico sobre los recursos hídricos a través del estudio de la naturaleza química, física y biológica del agua, mediante programas de monitoreo.

Por consiguiente es imperativo el desarrollo de metodologías, que permitan conocer su grado de alteración mediante el empleo de índices de calidad del agua (ICA's) e índices bióticos (Gonzáles, Caicedo, & Aguirre, 2013) ya que engloban varios parámetros en su mayoría fisicoquímicos y en algunos casos microbiológicos que permiten reducir la información a una expresión sencilla, (Ruiz et al., 2007) interpretada en una lista de valores numéricos.

En la quebrada La Argentina, objeto del presente estudio se aplicó el índice de calidad del agua NFS y los índices de contaminación por materia orgánica (ICOMO) y por mineralización (ICOMI), como una medida para evaluar las aguas superficiales en función del uso actual del suelo. finalmente, a partir de la evaluación realizada se proponen estrategias de gestión, protección y conservación aplicadas a esta quebrada.

Planteamiento del Problema

El recurso agua es importante para el desarrollo social y económico de una sociedad; sin embargo este recurso posee como principal característica que no se distribuye uniformemente sobre la superficie del planeta, promoviendo así la existencia de contrastes espaciales en su abundancia (IDEAM, 2014). Por su parte, el crecimiento de la población mundial implica un incremento de la actividad industrial. La creciente tendencia de satisfacer las necesidades del ser humano, comprometen a los cuerpos de agua continuamente, mediante descargas de contaminantes tóxicos de tipo metálico y sedimentos que exceden la capacidad de autodepuración, trayendo como consecuencia graves problemas de contaminación ambiental y alto riesgo toxicológico para el hombre y los animales.

De este modo, y al igual que muchos otros países, Colombia sufre la ineficiente planificación y manejo inadecuado de tan valioso recurso (Rivas & Antonio, 2013). La falta de aplicación de políticas gubernamentales ambientales y principalmente de normativa interna de municipios, es una de las causas principales para que los cuerpos de agua sean contaminados por las diversas actividades socioeconómicas que se desarrollan alrededor de estas sin controles ni conciencia.

Lo mencionado anteriormente, plantea un panorama claro de la importancia de la evaluación de la calidad del agua tanto en los aspectos fisicoquímicos como microbiológicos y la necesidad de proponer y desarrollar planes de conservación, uso y manejo adecuado de cuencas hidrográficas, puesto que es profundamente importante y necesario para el funcionamiento normal del equilibrio que involucra los actores sociales, económicos y ambientales (ConAgua, 2011).

Precisa y justamente, el presente trabajo busca identificar las actividades tanto sociales como económicas que se desarrollan en la zona de estudio, especialmente en la microcuenca La Argentina, debido al asentamiento progresivo de familias que no cuentan con los servicios públicos básicos de saneamiento. Esta situación influye en la degradación y contaminación de recurso hídrico y su entorno. Lo que genera la necesidad de evaluar las condiciones de calidad del agua a través del uso de ICA e ICO, de una microcuenca, de la ciudad de Villavicencio, afluente del Río Guatiquía. Cuenca que abarca una extensión de 180.000 hectáreas, ubicada en los departamentos de Cundinamarca y Meta, donde este último participa en mayor área siendo el 87% y donde se

cataloga como fuente principal de abastecimiento de agua de la ciudad de Villavicencio (CORMACARENA, UAESPNN, & CAEMA, 2009).

Seguidamente, contribuir con alternativas o estrategias tanto de aprovechamiento, como de conservación de la microcuenca, permitiendo esto obtener elementos de juicio o insumos para la Corporación Autónoma Regional Cormacarena de manera se contribuya a promover la gestión, conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, y reducir la vulnerabilidad socio ambiental.

Pregunta Problema

¿Cuáles son las condiciones de calidad del agua de la microcuenca quebrada La Argentina, Villavicencio – Meta y que estrategias de aprovechamiento y conservación se requiere implementar?

Objetivos

Objetivo general

Evaluar las condiciones de calidad del agua, para formular estrategias de aprovechamiento y conservación de la microcuenca quebrada La Argentina.

Objetivos específicos

- Identificar el uso actual del suelo dentro del área de estudio mediante el análisis de información secundaria disponible en la zona.
- Evaluar los parámetros físico-químicos y microbiológicos, determinar el grado de contaminación y de calidad del recurso hídrico a través del uso de Índices de Calidad del Agua (ICA) e Índices de Contaminación (ICO) y analizar el grado de afectación por actividades antrópicas dentro del área de estudio.
- Formular propuestas dirigidas al manejo, protección y conservación del recurso hídrico.

Justificación

Las principales presiones que sufren los recursos hídricos están relacionadas con los factores demográficos, económicos y sociales; de innovación tecnológica y de políticas (Rodríguez, 2012). La población mundial está creciendo a un ritmo de 80 millones de personas por año. Este elevado crecimiento urbano, permite suponer una cada vez mayor amenaza en la degradación de los recursos naturales, siendo el agua, uno de los recursos que presenta alta presión en su sostenibilidad, y cuyo manejo inadecuado afecta el equilibrio ecológico, calidad y disponibilidad para futuras generaciones (Rodríguez, 2012). El país, a pesar de los diversos esfuerzos por establecer políticas del agua, con arreglos normativos y estructurales, evidencia una crisis de gobernabilidad que no favorece la gestión integral de los recursos hídricos (Rodríguez, 2012). Actualmente se considera el agua como un recurso esencial que requiere la máxima atención de los estados por ser indispensable para la preservación de la vida y encontrarse expuesta al deterioro, en ocasiones irreversible, originado por un uso irresponsable e intensivo del recurso (Rodríguez, 2012).

Ante la anterior situación, es pertinente realizar estudios que contribuyan al mejoramiento de problemáticas ambientales que afectan el país y la región. Mediante la aplicación de los conocimientos adquiridos durante el desarrollo y la formación académica en la carrera profesional Ingeniería Ambiental. Obedeciéndose a procesos rigurosos y garantizando credibilidad, e idoneidad en la información a obtener y en los análisis respectivos a efectuar.

El planteamiento del presente trabajo permite conceptualizar y definir la quebrada La Argentina como base o soporte ecológico de una zona que presenta una gran diversidad de especies de flora y fauna, que lo hacen considerar atractivo para el desarrollo de un turismo ecológico y sostenible como es el caso específicamente del avistamiento de aves. Siendo lo anterior impulsado por el gobierno municipal como estrategias de competitividad, enmarcadas dentro del plan de ordenamiento territorial (Acuerdo 287 del 2015) de la ciudad de Villavicencio (Concejo Municipal de Villavicencio, 2015).

Por otra parte, es esta un área de recreación y entretenimiento, puesto que se desarrollan prácticas deportivas como el ciclo montañismo y senderismo, mejorando así la economía de los asentamientos urbanos cercanos (especialmente la vereda La Argentina).

Sin embargo, actividades como descarga de desechos orgánicos e inorgánicos generan un impacto negativo dentro del recurso hídrico, e incrementan la cantidad de sólidos disueltos en el agua y el grado de contaminación de la misma. Esta contaminación está relacionada con el vertido de desechos de origen doméstico y agropecuario al cuerpo hídrico. En el caso de los residuos de origen doméstico, las cargas contaminantes contienen altos niveles de materia orgánica y microorganismos de origen fecal.

La anterior situación, hace pertinente la realización de un estudio que evalúe la calidad del agua de la microcuenca. Esta evaluación desarrollada a partir de las características físicas, químicas y microbiológicas, y la aplicabilidad de los indicadores de calidad del agua (ICA) y de contaminación (ICO) (Pulido et al., 2005). Siendo los anteriores, instrumentos fundamentales para transmitir información sobre la calidad del recurso hídrico a las autoridades competentes y al público en general.

Es necesario que la evaluación siga temporalidades que determinen los cambios de la misma. Permitiendo esto, dar una idea de la variabilidad que presenta la calidad del agua de la microcuenca y demostrar si hay o no contaminación, por presencia de asentamientos humanos y desarrollo de actividades socioeconómicas.

Sumado a lo anterior, la carencia de información disponible referente al cuerpo hídrico, indica que los estudios de evaluación de calidad, planeación, gestión y conservación son insuficientes. Siendo esto, un pilar importante para el desarrollo del presente trabajo, evitando el progresivo deterioro e impacto gradual de la microcuenca, mediante la formulación de estrategias de gestión (uso y aprovechamiento) adecuada para la conservación de la misma.

Alcance

La microcuenca quebrada La Argentina se localiza a 6,2 Km del perímetro urbano de la ciudad de Villavicencio, por la antigua vía que comunicaba la capital metense con el municipio de Restrepo, con Latitud: 4° 12' 3.49"N y Longitud: 73° 38' 18.42"O. Al costado derecho de la microcuenca se sitúa un asentamiento urbano, el más importante de esa zona y al que se le asigna el mismo nombre de la microcuenca La Argentina, con una población de 228 habitantes (CORMACARENA *et al.*, 2009).

El presente trabajo de grado, comprende la evaluación de las condiciones de calidad del agua de la microcuenca, a través del uso de los índices de calidad del agua y de contaminación, para determinar, el grado de deterioro que presenta la microcuenca. Esto con el fin de conocer el uso óptimo más adecuado, enmarcado dentro del lineamiento de la preservación y conservación. Siendo lo último, el máximo alcance del presente proyecto.

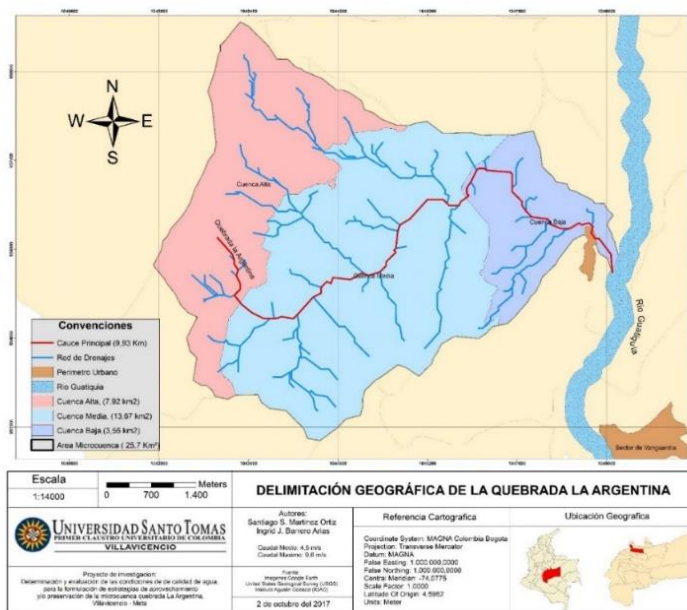


Figura 1. Zona de estudio del proyecto y su área de influencia. Adaptado de Barrero & Martínez, 2018 a partir del Software ArcGIS.10.3.

La ejecución del trabajo se delimitó temporalmente en un periodo de seis (6) meses. El monitoreo y toma de muestras se realizó durante temporada húmeda (octubre y noviembre de 2017) y seca (enero y febrero de 2018).

Antecedentes

El marcado deterioro de los cuerpos de agua superficial hace prioritaria su evaluación con el fin de tomar acciones de control y mitigación del nivel de riesgo que son determinantes en la complejidad y costos del tratamiento del agua para consumo humano (Torres *et al.*, 2009) es por esto que actualmente se ha estado promoviendo la evaluación del impacto antrópico sobre los recursos hídricos a través del estudio de la naturaleza química, física y biológica del agua (Ruiz *et al.*, 2007). Los cuales tienen como propósito simplificar en una expresión numérica las características positivas o negativas de cualquier fuente de agua. (Martínez de Bascaran, 1976)

Los pioneros en generar una metodología unificada para el cálculo del índice de calidad (ICA) fueron Hortón (1965) y Liebman (1969). Sin embargo, el índice general de calidad del agua fue desarrollado por Brown en el año de 1970 (Brown, Macclelland, Deininger, & Tozer, 1970).

Dinius (1972) planteó un ICA conformado por nueve variables fisicoquímicas y dos microbiológicas; por su parte, el ICA-INSF (Este índice es en la actualidad uno de los más utilizados por agencias e instituciones en los Estados Unidos) (Ruiz *et al.*, 2007). Está constituido por ocho variables fisicoquímicas y un elemento biótico: las coliformes fecales. Aunque la estimación en ambos índices está orientada al empleo del agua para consumo humano, el de Dinius tiene en cuenta otros usos, como son agricultura, pesca, industria y recreación (González *et al.*, 2013). Lo que permite establecer una correlación con las mediciones paramétricas con el entorno y actividades ejecutadas en el área de influencia del cuerpo hídrico.

Por otra parte, La Comunidad Europea desarrolló el índice universal de la calidad del agua (UWQI), utilizado para evaluar la calidad del agua superficial como fuente de agua potable. Este indicador se basa en doce variables: cadmio, cianuro, mercurio, selenio, arsénico, fluoruro, nitratos, oxígeno disuelto, DBO5, fósforo total, pH y coliformes totales (Boyacioglu, 2007).

Latinoamérica no se ha quedado atrás en la implementación de estas metodologías, tal es el caso de Perú, que fusionó dos indicadores el ICA-NFS y el indicador desarrollado en Cuba, en el cual incluyen los cloruros y el nitrógeno amoniacal. En Chile en 1991 desarrollaron dos tipos de ICA llamados (ICA-extendido e ICA-simplificado) y su uso involucra el nivel y tamaño del cuerpo hídrico con el fin de simplificar costos de análisis. En Brasil se tomó la metodología del ICA-NFS el cual adapto y modifiko este, teniendo en cuenta las condiciones propias del trópico y del área al

cual se daría la aplicación. Estos índices han sido utilizados para fines de uso de consumo humano y en poca frecuencia, como información para la toma de decisiones con fines conservativas y de protección (Ruiz *et al.*, 2007).

Colombia, no ha sido la excepción, los índices de calidad del agua y de contaminación han sido de gran impacto dentro del monitoreo de calidad de la red hídrica de nuestro país, los cuales son direccionados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) desde el año 2002 (Ruiz *et al.*, 2007), que incursionaron sobre la base de los índices desarrollados por Rojas (1991), Behar (1997), Ramírez y Viña (1998), en los que se han desarrollado catorce indicadores ambientales, de los cuales tres corresponden a la oferta hídrica, dos a la sostenibilidad del recurso, seis a la calidad del agua dulce y tres ICÁ adicionales para las aguas marinas y costeras (IDEAM, 2002). Los que han permitido llevar a cabo el estudio nacional del agua realizado por el IDEAM en el año 2002 y diferentes programas de monitoreo en las diferentes regiones del país.

El índice de calidad del agua elaborado por Rojas (1991), fue aplicado en la segunda fuente hídrica de mayor importancia en el país, el “Río Cauca”. Allí, se ubica un 25% de la población, distribuidos en 183 municipios de los departamentos de Cauca, Valle del Cauca, Quindío, Risaralda, Caldas, Antioquia, Córdoba, Sucre y Bolívar (Behar, Zuñiga, & Rojas, 1997). Rojas, adaptó el ICA-NFS a las condiciones específicas del río, y obtuvo como resultado en el parámetro de oxígeno disuelto 0 mg/L en el área de desembocadura y un aumento de los coliformes fecales con el transcurso del cauce, catalogando las aguas de mala calidad.

Por otra parte, también hay que destacar el trabajo realizado en el 2005 por el grupo de Investigación de Ciencias Naturales en la línea de investigación, valoración y monitoreo de la calidad ambiental de la Universidad de Pamplona, que trabajó el software ICAtes V1.0, en el cual se incluyen una gran variedad de ICA e ICO, discriminados por país y autor (Ruiz *et al.*, 2007). Lo que permite un eficiente y ágil procesamiento de información con resultados confiables, visualizando gráficamente los parámetros de mayor afectación y arrojando la categoría o el grado de calidad que presenta la fuente hídrica.

Antioquia es el departamento pionero en la aplicación y publicación de investigaciones donde se prioriza el uso de las metodologías de los índices de calidad del agua. Este es el caso específico del trabajo realizado en la quebrada La Ayurá, ubicado en el municipio de Envigado, el cual tuvo como objetivo principal evaluar la calidad del agua mediante el uso de los índices de la fundación nacional de saneamiento (NSF), Dinius y el índice biótico BMWP/Col. Inicialmente, se

determinaron variables fisicoquímicas y microbiológica, seguidamente, la estimación de los índices de calidad del agua, y finalmente muestreos cualitativos y cuantitativos de macro invertebrados acuáticos. De este modo, tuvieron como resultados que en la estación 1 se presenta un agua de buena calidad y en las estaciones 2 y 3 un deterioro medio de la calidad del agua (González *et al.*, 2013).

Por otra parte, Jiménez & Vélez (2007) caracterizaron las aguas superficiales de la cuenca de la quebrada Doña María, un efluente del río Medellín en Antioquia, Colombia, a partir de la estimación del índice NFS, mediante la información suministrada por 110 puntos de muestreo distribuidos a lo largo de la cuenca.

Por otra parte, el manejo y la conservación de las microcuencas, son temáticas significativamente alarmantes en el área académica. Se han realizado estudios, como lo fue el caso de la quebrada la vieja de los cerros orientales, ciudad de Bogotá, (Gonzalez, Lozano, & Paramo, 2004). Se tuvo como objeto de estudio la sensibilización, rehabilitación y conservación de la misma, para la identificación de los atributos eco-turísticos en la zona. Finalmente, como resultado la construcción de un plan de aprovechamiento de la quebrada.

Ahora bien, en el departamento del Meta no se encuentran estudios de este tipo, siendo uno de los departamentos con más oferta hídrica del país, lo que lleva a inferir el desequilibrio y desigualdad inminente del conocimiento en la gestión y conservación del recurso hídrico.

La microcuenca quebrada La Argentina de la ciudad de Villavicencio cuenta con muy poca información de carácter primario y secundario (en algunos casos restringida), acerca de la calidad de sus aguas. Lo que se conoce, es que se han llevado a cabo proyectos de dragado, canalización y construcción de diques, como medidas de mitigación de riesgos o amenazas por desastres naturales tales como deslizamientos o arrastre en masa por parte del cuerpo hídrico. Esta obra fue realizada por la empresa contratista INGEINCO en el año 2014 (INGEICO, 2014).

Marco de Referencia

Marco Teórico

Muchas de las actividades humanas contribuyen a la degradación del agua, afectando su calidad y cantidad. Entre las causas de mayor impacto a la calidad del agua en las cuencas hidrográficas de mayor importancia, está el aumento y concentración de la población, actividades productivas no adecuadas, presión sobre el uso inadecuado, mal uso de la tierra, la contaminación del recurso hídrico con aguas servidas domésticas sin tratar, por la carencia de sistemas adecuados de saneamiento, principalmente en las zonas rurales (Clara, 2005). Se dice que el 80% del deterioro de la calidad del agua, se debe a sedimentos suspendidos, en su mayoría provenientes de la erosión de suelos como producto de presencia de las actividades ya mencionadas (Clara, 2005).

Este estado y disturbio de los hábitats acuáticos por las actividades nombradas, indican la relevancia que tiene la valoración y protección de los recursos hídricos. Esta valoración radica en la evaluación propia de la naturaleza física, química y biológica en relación directa con sus posibles usos. Por ello, el manejo de los recursos hídricos, representa una vía idónea tanto para el aprovechamiento racional de este recurso, como para la mitigación y reducción de su vulnerabilidad (Gómez, 2002).

Una cuenca hidrográfica es considerada como un escenario altamente dinámico que integra propiamente determinadas funciones tanto externas como intrínsecas. Inicialmente, posee componentes biológicos (bosques, cultivos y vegetación), físicos (agua, suelo, subsuelo, y aire) y socioeconómicos (comunidades que residen en las cuencas, y que hacen uso de este recurso para su beneficio) (Fernandez & Gonzalo, 2012). Asimismo, posee funciones exclusivas e indispensables.

- Hidrológica: donde se capta agua de diferentes fuentes para la posterior formación de manantiales, ríos y arroyos.
- Ecológica: suministrando una alta variedad de sitios y rumbos a lo largo del cual se generan interacciones entre las peculiaridades de calidad física y química del agua; de este modo se facilita también que el agua provea o suministre hábitats para las especies de vegetación y animal que componen los compendios biológicos de los ecosistemas y desarrollan relaciones directas con todas las particularidades físicas, químicas y biológicas del agua.

- Ambiental: donde se conforman los sumideros de CO₂, aprehendiendo y reteniendo carbono, a su vez sistematizando la recarga hídrica y el buen funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos, con el fin de mantener y conservar la biodiversidad.
- Socioeconómica: provee una disponibilidad de recursos naturales para todo el compendio de actividades o diligencias fructíferas que desarrolla el hombre, que dan apoyo y sostén a la población y comunidad. Asimismo “abastece de un espacio o de un lugar para el progreso y desarrollo tanto social, como cultural de las sociedades” (Faustino, 2006) (Fernandez & Gonzalo, 2012).

Por lo explicado anteriormente, se entiende que las cuencas hidrográficas brinda beneficios señeros a las comunidades, para el desarrollo y desempeño de sus actividades básicas diarias, y sus funciones intrínsecas son motivos que conducen al auxilio de las cuencas, con el sostén de grupos multidisciplinarios preocupados e interesados en la evaluación de las mismas (Villegas, 2004).

La implementación de nuevas metodologías que involucren más de dos parámetros para la valoración de la calidad del agua toma cada vez más importancia. Los índices de calidad del agua engloban varios parámetros en su mayoría fisicoquímicos y en algunos casos microbiológicos que permiten reducir la información a una expresión sencilla, conocida como: “Índices de calidad del agua” (ICA) e “Índices de contaminación del agua” (ICO). Estos índices han tenido un significativo arribo y se han aplicado en algunos países de América y Europa (Ruiz *et al.*, 2007).

Según Fernández y Solano (2005), en el mundo hay por lo menos 30 índices de calidad del agua que son de uso común, y consideran un número de variables que van de 3 a 72. Prácticamente todos estos índices incluyen al menos 3 de los siguientes parámetros: OD, DBO o Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno en forma amoniacal y de Nitratos, Fósforo en forma de ortofosfato, pH y Sólidos Suspendedos Totales (SST) (Ruiz *et al.*, 2007).

La elaboración y aplicabilidad de los índices, es específica para cada región o fuente en particular. En Colombia los ICA fueron planteados por los autores Rojas, (1991), Behar *et al.*, (1997), e ICAUCA. La diferencia entre cada índice, radica en los parámetros que involucran en su elaboración. No obstante, el tipo de estimación utilizado es similar, mediante curvas o promedio ponderado. Los ICO fueron planteados por Ramírez y Viña (1998), y los subdividen en ICOMI (Mineralización), ICOMO (Materia Orgánica), ICOSUS (Sólidos), ICOTRO (Trofia), ICOTOX (Toxicidad), ICOMEX, ICO-PH, ICOBIO (Biológico), HIDROCARBUROS. Su diferencia radica

en los parámetros incluidos para su desarrollo, y el tipo de estimación que utilizan (Ruiz *et al.*, 2007).

Para el presente caso, el autor seleccionado para el índice de calidad del agua (ICA) es el NSF. Este índice, involucra los parámetros Temperatura, pH, OD, DBO, Sólidos Disueltos Totales (SDT), Turbiedad, Coliformes Fecales, Nitratos, y Fosfato Total. Siendo estos los parámetros seleccionados para la evaluación de la calidad del agua de la microcuenca La Argentina. A su vez, los índices de contaminación (ICO) seleccionados son: ICOMI e ICOMO; e involucran parámetros; Conductividad, Dureza, Alcalinidad - DBO, OD, Coliformes Totales, respectivamente (Ruiz *et al.*, 2007). Estos ICA e ICO son básicamente una expresión de un número de parámetros que permiten valorar el recurso hídrico para un determinado uso y pueden ser representados en forma de número, rango, descripción verbal, símbolos o color (Ruiz *et al.*, 2007).

Según Ball y Church (1980) el cálculo de los ICA e ICO consta básicamente de tres pasos fundamentales consecutivos: la selección de las variables, la determinación de los subíndices para cada parámetro y la determinación del Índice por agregación de los subíndices. El primer paso, considera la elección de los parámetros. Esta elección depende en gran medida del criterio de un experto, como también de la información existente, los criterios de tiempo, localización y su importancia como estándar de calidad (Ruiz *et al.*, 2007).

La determinación de las variables se basa substancialmente en la tipificación efectuada por los siguientes autores: Walski (1974); evalúa las características organolépticas, los efectos sobre la vida acuática y la salud humana, mediante las variables, Oxígeno Disuelto (OD), Temperatura, Coliformes, pH, Sólidos Suspendidos Totales (SST), Turbiedad, Transparencia, Nitratos, Fosfatos, Grasas, Color y Olor (Ruiz *et al.*, 2007). Por su parte, Dunnette (1979) propone la selección de variables de acuerdo al uso de las fuentes, por ejemplo, agua para consumo, recreación, riego, industria, etc. Esta metodología es la más usada y acorde en el diseño de Índices de calidad (Ruiz *et al.*, 2007).

El segundo paso, tiene como principal propósito la transformación de las variables de una escala dimensional a una adimensional para así permitir su agregación. Como lo estipula Fernández y Solano (2005), se pueden utilizar varios métodos para lograr dicho alcance. No obstante, el más utilizado es el método de curvas basadas en ecuaciones matemáticas: se parte de una fórmula matemática con la cual se desarrolla la curva de calidad respectiva para cada parámetro (Ruiz *et al.*, 2007). Por último, el tercer paso radica en la integración de los subíndices que determina el

Índice de Calidad del Agua, y que puede darse por medio de fórmulas de agregación matemática que comúnmente corresponden a una función promedio.

La elaboración y aplicabilidad de los índices, permite lograr el estricto e intenso desarrollo e inversión en las políticas nacionales para la gestión integral del recurso hídrico, compuesto por las etapas; planificación, administración, seguimiento y monitoreo, y manejo de conflictos relacionados con el agua.

Marco Conceptual

Cuenca hidrográfica.

La cuenca hidrográfica es la unidad territorial natural que capta la precipitación, por donde transita el escurrimiento y la escorrentía hasta un punto de salida en el cauce principal, o sea es un área delimitada por una divisoria topográfica (parte-agua) que drena a un cauce común. (FAO, 1993)

La cuenca hidrográfica constituye un sistema natural dinámico de elementos físico-biológico, socioeconómico, institucional y político que se relacionan entre sí, creando por consiguiente un conjunto único e indisoluble en permanente evolución, la cual constituye un importante polo de desarrollo socioeconómico. (Zambrana, 2008)

La Gestión Integral del Recurso Hídrico define la cuenca hidrográfica como la unidad fundamental de análisis para el desarrollo de los procesos de planificación y administración (MADS, 2007).

Microcuenca.

Son las áreas donde se originan las quebradas individuales que drenan las laderas desde las partes más altas del paisaje (Cauvin & Diddier, 2003). El concepto de la microcuenca debe ser considerado desde un principio como un ámbito de organización social, económica y operativa, además de la perspectiva territorial e hidrología tradicionalmente considerada. Asimismo, en la microcuenca ocurren interacciones indivisibles entre los aspectos económicos (bienes y servicios producidos en su área), sociales (patrones de comportamiento de los usuarios

directos e indirectos de los recursos de la cuenca) y ambientales (relacionados al comportamiento o reacción de los recursos naturales frente a los dos aspectos anteriores) (Alatorre, 2012).

Calidad del agua.

La preservación de la integridad de las fuentes de agua, entendida como el mantenimiento de su estructura y función, implica conservar el balance natural de sus condiciones químicas, físicas y biológicas como un todo (Campos, 2013). Aunque determinar el estado ambiental de los ríos y quebradas es complejo para su protección o restauración, es de carácter fundamental conocer su estado actual.

La calidad del agua está vinculada con la capacidad del recurso para responder al uso que se le quiera destinar. La principal problemática del agua a nivel mundial está relacionada con la eutrofización, como resultado del aumento de nutrientes de fósforo y nitrógeno, generados por actividades agrícolas, aguas residuales domésticas e industriales y de incendios forestales. (Tambo, 2015) Lo que implica la implementación de monitoreo y planes de gestión adecuada para estos cuerpos superficiales.

Índices de calidad del agua.

Un índice de calidad del agua consiste básicamente en una expresión simple relacionada con el grado de contaminación, a partir de una combinación más o menos compleja de un número de parámetros, los cuales sirven como una medida de calidad del agua (León, 2014). Esto permitirá conocer en forma general el estado o “salud” del sistema acuático de un cuerpo de agua (Zhen, 2009). El índice puede ser representado por un número (rango), una descripción verbal, un símbolo o un color, este nos indica el grado de contaminación del agua a la fecha del muestreo y está expresado como porcentaje del agua pura. Así, agua altamente contaminada tendrá un valor cercano o igual a 0%, en tanto que el agua en excelentes condiciones tendrá un valor de este índice cercano al 100%. (Guillén , Teck , & Yeomans, 2012)

Los índices de calidad del agua presentan una serie de usos que pueden destinarse a la caracterización de un determinado cuerpo de agua (León, 2014), pero a si mismo presenta

limitaciones a la hora de ser empleados causando desventajas en la investigación o estudio que se esté llevando a cabo.

Tabla 1.

Ventajas y limitaciones de los Índices de calidad del agua.

Ventajas	Limitaciones
• Permiten mostrar la variación espacial y temporal de la calidad del agua. • Método simple, conciso y válido para expresar la importancia de los datos generados regularmente en el laboratorio. • Útiles en la evaluación de la calidad del agua para usos generales. • Permiten a los usuarios una fácil interpretación de los datos. • Pueden identificar tendencias de la calidad del agua y áreas problemáticas. • Mejoran la comunicación con el público y aumentan su conciencia sobre las condiciones de calidad del agua. • Ayudan en la definición de prioridades con fines de gestión.	• Proporcionan un resumen de los datos. • No proporcionan información completa sobre la calidad del agua. • No pueden evaluar todos los riesgos presentes en el agua. • Pueden ser subjetivos y sesgados en su formulación. • No son de aplicación universal debido a las diferentes condiciones ambientales que presentan las cuencas de una región a otra. • Se basan en generalizaciones conceptuales que no son de aplicación universal. • Algunos científicos y estadísticos tienden a rechazar y criticar su metodología, lo que afecta la credibilidad de los ICA como una herramienta para la gestión.

Nota: descripción de las ventajas y limitaciones del uso de los índices de calidad de agua

.Adaptado de “Torres, Cruz & Patiño, 2009”; por Barrero & Martínez, 2018

Índice de calidad del agua de la fundación de sanidad nacional (NFS).

Manejo integral de microcuenca.

El manejo integral de la microcuenca, se refiere a un conjunto de acciones cuyo objetivo es contribuir a la protección y manejo del agua (en cantidad y calidad) y otros recursos naturales existentes en ella. Esto ayudará a que las comunidades y familias campesinas puedan disponer de fuentes de agua seguras y suelos fértiles para sus cultivos, mejora de actividades pecuarias y forestales y, en consecuencia, mejorar sus ingresos económicos (Saavedra, 2009).

Es por esto que las actividades que realizan el hombre y sus actitudes, constituyen la base fundamental del manejo de la cuenca. El manejo de las microcuencas ha demostrado ser una propuesta adecuada para manejar, conservar y recuperar el agua y recursos naturales.

Marco Legal

Debido a la importancia del recurso hídrico, es necesario la aplicabilidad de la normatividad vigente para el uso potencial del mismo, a partir de esto el marco normativo tiene como punto de partida los artículos 79 y 80 de la Constitución Política que establecen como obligación del Estado, proteger la diversidad e integridad del ambiente; fomentar la educación ambiental; prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental; imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados (Ley 99 de 1993) (Alcaldía de Bogotá, 1993).

El recurso hídrico es un elemento de uso esencial para el funcionamiento de la vida humana, como también para el desarrollo de las diferentes actividades productivas, por lo que el estado debe proteger y mitigar cualquier impacto que pueda generarse a partir de estas actividades productivas poniendo en riesgo la oferta hídrica para el consumo humano. Por consiguiente, el decreto 1575 del 2007 establece un sistema para el control de la calidad del agua para el consumo humano (MADS, 2007). Respaldado esto, mediante la resolución 0631 de 2015, en el cual se fijan los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir los vertimientos puntuales a las aguas superficiales para los parámetros físicos y microbiológicos que se tendrán en cuenta en este estudio, son nombrados a continuación: **Artículo 6.** Parámetros microbiológicos de

análisis y reporte en los Vertimientos puntuales de aguas residuales (ARD y ARND) a cuerpos de aguas superficiales (MADS, 2015).

Por otra parte, a modo de realizar un gestión adecuada del recurso, es importante conocer las características que debe tener el recurso hídrico para así darle un uso o finalidad optima es por esto que el decreto 1594 de 1984 permite dar respuesta a esta necesidad puesto que se encuentran definidas dentro de este, las características de calidad que deben cumplir las fuentes hídricas, para posibilitar los diferentes usos como: consumo humano y domésticos, preservación de la flora y fauna, agropecuario, recreativo e industrial (Alcaldia de Bogotá, 1984). La norma establece que en los lugares donde existen varios usos, los criterios de calidad del agua a cumplir deben ser el del uso más exigente (Superservicios, 2014).

Por último, se ha venido hablando reiteradamente de la necesidad de conservar y preservar las fuentes hídricas, en este caso la microcuenca quebrada La Argentina; temas apoyados normativamente por el Decreto 1640 del 2012. Este decreto hace referencia a los mecanismos de ordenación, planificación y manejo de las cuencas hidrográficas. En su artículo 16, se crea el programa nacional de monitoreo del recurso hídrico. La institución responsable de esta iniciativa es el IDEAM. Institución encargada de proporcionar insumos e información para considerar las cuencas o microcuencas como determinantes ambientales para la elaboración y adopción de planes conservativos que permitan hacer un uso adecuado y sostenible (MADS, 2012).

Metodología

Para el desarrollo del proyecto, se sustenta una metodología compuesta por cinco fases para temporada húmeda y seca.

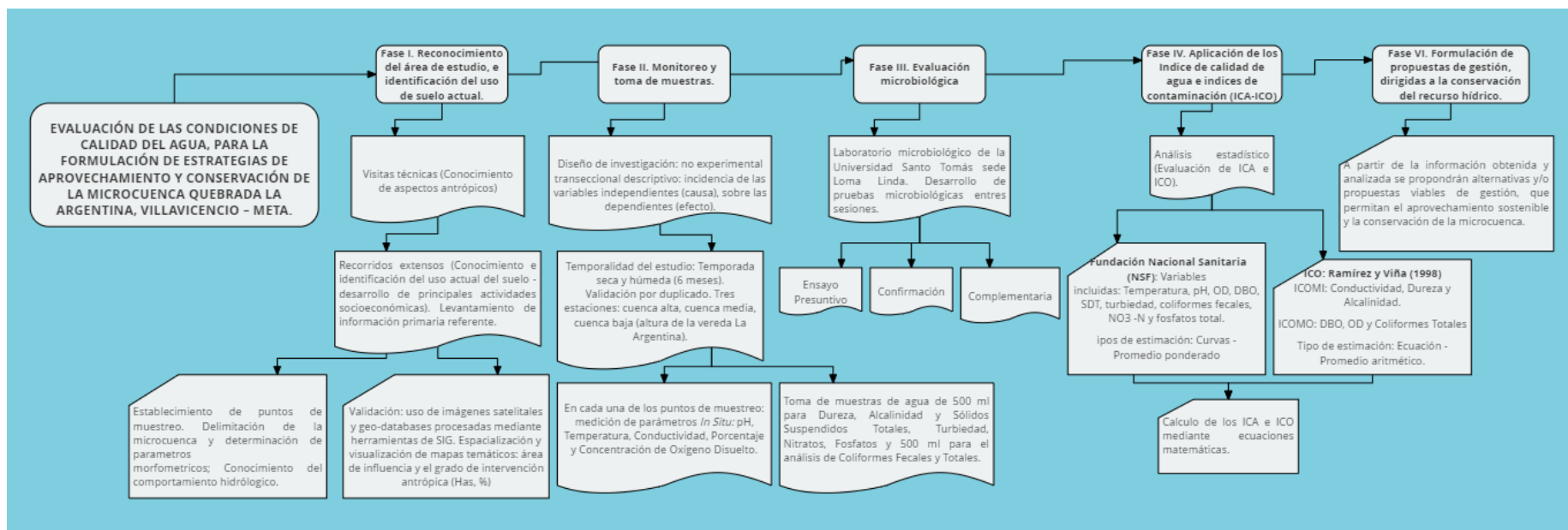


Figura 2. Metodología para la Evaluación de las Condiciones de Calidad del Agua, y Formulación de Estrategias de Aprovechamiento y Conservación de la Microcuenca Quebrada La Argentina, Villavicencio – Meta. Adaptado de Barrero & Martínez, 2018

Diseño metodológico

Unidad de análisis.

El presente trabajo, tuvo como área de influencia directa la microcuenca quebrada La Argentina, ubicada en el Municipio de Villavicencio, Departamento del Meta, donde los indicadores sociales comprometidos son los asentamientos urbanos aledaños al área de la microcuenca.

Diseño de investigación y temporalidad de estudio.

El trabajo se desarrolló bajo un análisis cuantitativo, que implicó un proceso de recolección y análisis de datos. De este modo, el diseño de investigación correspondiente al proyecto es no experimental transeccional descriptivo. Puesto que se indaga la incidencia de las variables independientes (causa), *caudal y pendiente*, sobre las dependientes (efecto), *pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad, dureza, alcalinidad, sólidos disueltos totales, demanda biológica de oxígeno, turbiedad, coliformes fecales, NO₃-N y fosfatos total*.

La temporalidad del estudio, comprende temporada seca y húmeda (6 meses), y una validación por duplicado, en tres estaciones específicas.

Fases de investigación.

Fase I. Reconocimiento del área de estudio, e identificación del uso de suelo actual a partir de información de tipo secundario.

En esta fase, se procedió al reconocimiento del área de estudio, mediante periódicas y prolongadas visitas técnicas (7 días). A partir de lo anterior, se permitió, conocer e identificar el uso actual del suelo (principales actividades socioeconómicas), dentro del área de la microcuenca. De este modo, con el fin de confirmar y validar la información primaria recolectada en campo, se hizo uso de información secundaria disponible, proporcionada por los sistemas de información ambiental de Colombia (SIAC) y otras entidades gubernamentales del país. Esta validación, implicó el uso de imágenes satelitales y geo-databases procesadas mediante herramientas suministradas por Sistemas de Información Geográfica (SIG) que, a su vez, permitieron

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

especializar y visualizar en mapas temáticos elementos tales como el área de influencia y el grado de intervención antrópica que presenta la cuenca alta, media y baja de la microcuenca quebrada La Argentina. Esto, expresado en unidades métricas de hectáreas (**Has**) y porcentuales (%).

Asimismo, se llevó a cabo el levantamiento de puntos de geoposicionamiento de la microcuenca, donde a través de archivos DEM (Modelos de Elevación Digital), se realizó la delimitación de la quebrada y se determinaron aspectos morfodinámicos básicos tales como: orden de drenaje, pendiente, tiempo de concentración, índice de gravelius, y tipo de relieve; con tal fin de profundizar y conocer el comportamiento hidrológico del cuerpo hídrico.

Fase II. Monitoreo y toma de muestras.

Para la medición de los parámetros *In Situ* se requirió los equipos y materiales de recolección listados en la tabla a continuación.

Tabla 2.

Equipos y material de recolección requeridos en el monitoreo.

Material de recolección	Equipo
Envases colectores	Sistema de Posicionamiento Global (GPS),
Guantes de nitrilo,	Conductímetro
Marcadores indelebles	Oxímetro
Papel absorbente	Micromolinetete
Etiquetas adhesivas	Sonda Multiparamétrica
Contenedores refrigerantes	Colorímetro
Barras de gel refrigerantes	
Planillas o formatos para la captura de datos e información	
Rótulos que faciliten la cadena de custodia	

Nota: material y equipos utilizados para el monitoreo, toma de muestras en campo transporte.

Adaptado de Barrero & Martínez, 2018

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

El monitoreo y toma de muestras se realizó en tres repeticiones y los intervalos de tiempo comprendidos para el proceso, contempla los siguientes horarios, 7:00 am, 12:00m, 5:00 pm.

A su vez, se realizaron tres mediciones de parámetros *In Situ*; dos en las orillas (0.5 a 1 metro y a una profundidad de 15 a 30 centímetros) y una en el centro del cuerpo hídrico para luego promediar y obtener la lectura definitiva de los respectivos parámetros por cada estación (IDEAM, 2002). Estos parámetros a monitorear son; pH, Temperatura (T), Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), y Oxígeno Disuelto ($\text{mg}/\text{L O}_2$). Adicionalmente, se tomaron muestras de agua de 500 mL para las mediciones de los parámetros fisicoquímicos: Dureza ($\text{mg}/\text{L CaCO}_3$), Alcalinidad ($\text{mg}/\text{L CaCO}_3$), Sólidos Disueltos Totales (mg/L), Demanda Biológica de Oxígeno ($\text{mg}/\text{L O}_2$), Turbiedad (UTN), $\text{NO}_3 -\text{N}$ ($\text{Mg}/\text{L NO}_3$) y Fosfatos ($\text{mg}/\text{L PO}_4$). Sumado a lo anterior, 500 mL para el análisis de Coliformes Totales y Fecales (NMP/100mL). Estos volúmenes de agua recolectados, fueron los que se mezclaron para la composición de la muestra compuesta.

A su vez, las muestras de agua recolectadas para el análisis microbiológico se transportaron al laboratorio de la Universidad Santo Tomás, sede Villavicencio. Por consiguiente, las muestras de agua para el análisis de los parámetros (DBO₅, Dureza, Nitratos, Turbiedad), fueron enviadas al laboratorio certificado Tecno Ambiental.

De igual forma, se tomaron muestras de control blanco como sistema físico para guardar confiabilidad durante la toma de muestras, y evitar alteraciones o contaminación cruzada, (IDEAM, 2002). Todos estos recolectados en envases cerrados de material plástico y vidrio herméticamente, protegiendo su área de sellado como lo especifica la guía para monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas, del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (IDEAM, 2002). Por otra parte, se tuvo en cuenta la protección en el desarrollo de las tomas, por esto, fue indispensable manipular las muestras con guantes de nitrilo. De esta forma, se tomó un envase colector esterilizado y se abrió la tapa del envase bajo el agua para evitar la contaminación por bacterias del aire, se llenó con la muestra a analizar (evitando el llenado brusco), y se enrosco rápidamente el envase estéril. Desde el momento de la toma de muestras y hasta su llegada al laboratorio, éstas se conservaron en refrigeración a 4°C, evitando la congelación (IDEAM, 2002).

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

Tabla 3.*Recipientes y preservación de muestras.*

Parámetro	Recipiente	Volumen mínimo de muestra (mL)	Preservación
Dureza	Vidrio	500	Refrigeración 4°C
Alcalinidad	Vidrio	500	Refrigeración 4°C
Sólidos disueltos totales	Vidrio	500	Refrigeración 4°C
Demanda biológica de oxígeno	Vidrio	500	Refrigeración 4°C
Coliformes totales y fecales	Vidrio	500	Refrigeración 4°C

Nota: recipientes y volumen mínimo para la recolección de muestras en campo. Adaptado de Barrero & Martínez, 2018.

El tipo de muestreo implementado, fue el muestreo compuesto. Se llevó a cabo la mezcla de las diversas muestras puntuales realizadas en la microcuenca, tomadas en los intervalos programados y por periodos determinados. La composición de la muestra, se realizó a través de lo estipulado en la Guía para el Monitoreo de Vertimientos, Aguas Superficiales y Subterráneas (IDEAM, 2002).

Las estaciones correspondientes son las siguientes:

- i. Cuenca alta de la microcuenca.
- ii. Cuenca media de la microcuenca.
- iii. Altura de vereda La Argentina, (cuenca baja de la microcuenca)

A continuación, en la siguiente tabla se ilustran los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos medidos, junto con su respectivo método de análisis y frecuencia de muestreo.

Tabla 4.*Variables a medir, métodos de análisis y frecuencia de muestreo.*

Lugar de medición	Variable	Unidad	Método	Frecuencia de muestreo	Temporada
<i>In situ</i>	Temperatura del agua	°C	Lectura directa	3 veces por estación en cada época.	Seca y húmeda
	pH	Unidad de pH	Electrométrico		
	Oxígeno disuelto	mg/L O ₂	Electrométrico		
	Conductividad	μS/cm	Electrométrico		
	Caudal	L/s	Volumétrico manual		

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

(Continuación tabla 4)

	Sólidos Disueltos Totales (SDT)	ppm	Multiparametro	1 vez por estación en cada temporada	Seca y húmeda
Laboratorio Universidad Santo Tomás Loma Linda	Alcalinidad	mg/L CaCO_3	Colorímetro	1 vez por cada temporada	Seca y húmeda
	E. Coli	NMP/10 0mL	Número más probable (Tubos múltiples)	1 vez por punto en cada temporada	Seca y húmeda
	Fosfatos	mg/L PO_4	Colorímetro	1 vez por punto en cada temporada	Seca y húmeda
	Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5)	mg/L O_2	Incubación 5 días	1 vez por punto en cada temporada	Seca y húmeda
Laboratorio Certificado Tecno ambiental	Dureza	m/L CaCO_3	Volumétrico EDTA	1 vez por punto en cada temporada	Seca y húmeda
	Nitratos	Mg/L NO_3	Espectrofotométrico	1 vez por punto en cada temporada	Seca y húmeda
	Turbiedad	UTN	Turbidímetro	1 vez por punto en cada temporada	Seca y húmeda

Nota: parámetros, métodos de análisis, numero de muestreos en las temporalidades.

Adaptado de Barrero & Martínez, 2018.

Fase III. Evaluación microbiológica.

Todas las muestras colectadas fueron refrigeradas desde el momento de su recolección en campo hasta la entrega al laboratorio a una temperatura entre 2 y 8 °C, por no más de 24 horas antes del análisis para disminuir la actividad metabólica de la muestra. Los 500 mL de agua recolectados por cada estación para el respectivo análisis microbiológico, fueron transportadas al Laboratorio de Microbiología de la Universidad Santo Tomás sede Loma Linda. Allí se

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

desarrollaron las pruebas microbiológicas en dos sesiones para cada muestra, que corresponden a la técnica del número más probable (NMP); la primera titulada **ensayo presuntivo**, donde fue fundamental la incubación de los 45 tubos, quince por cada punto, estos contendrán las diluciones de 10^{-5} a 10^{-1} de las muestras de agua de la quebrada, junto con el caldo de cultivo Lauril Sulfato (ver figura 3).

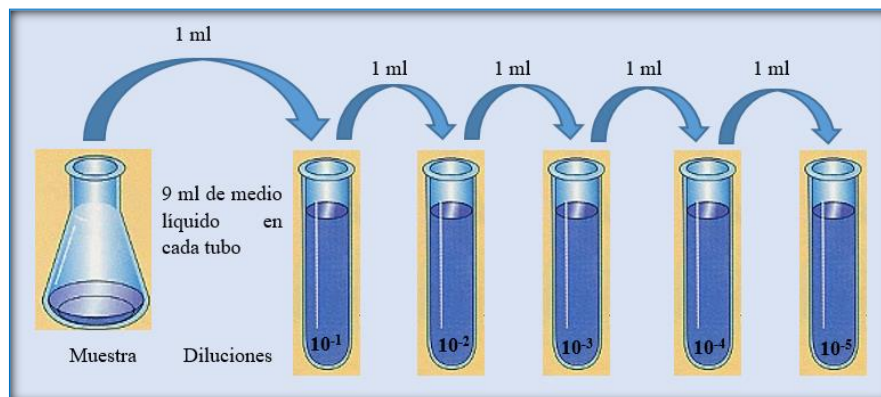


Figura 3. Método de incubación de los tubos de ensayo, técnica del NMP.
Adaptado de Barrero & Martínez, 2018.

Para el desarrollo de esta sesión fue indispensable el uso de las campanas de Durham en cada tubo, puesto que cumplen la función de ayudar a indicar si hay presencia de grupo de coliformes. Esto, con la respectiva aparición o ausencia de gas, sumado al cambio de color en la muestra que contenga cada tubo.

A partir de los tubos positivos obtenidos en la fase anterior, se procedió hacer la enumeración bacteriana de la técnica aplicada, a partir de la tabla propuesta por Woomer, (1994), para series de diluciones en réplicas de cinco por nivel de dilución.

Asimismo, en la segunda sesión titulada **confirmación**, se realizó la dilución del caldo de cultivo Verde Bilis Brillante en cada uno de los tubos y transferencias de las muestras de los tubos a las cajas Petri con Agar MacConkey y Agar Levine (EMB), con el fin de poder determinar tras una incubación los distintos microorganismos del agua de la quebrada La Argentina. Del mismo modo, a partir de los tubos positivos obtenidos en la fase confirmación, se procedió hacer de nuevo la enumeración bacteriana de la técnica aplicada, con el fin de corroborar los resultados obtenidos en la fase presuntiva.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

Fase IV. Aplicación de los Índice de calidad del agua e índices de contaminación (ICA-ICO).***Índices de Calidad del Agua (ICA).***

En las Tablas 5 y 6 se presenta un resumen de los ICA e ICO, revisados en la literatura, que emplean parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para su evaluación. Los propuestos a continuación fueron los empleados en el presente proyecto, puesto que han sido aplicados en diferentes estudios y seleccionados por corporaciones autónomas regionales en las ciudades de Bogotá, Barranquilla, Bucaramanga, Cali y Manizales (Castro *et al.*, 2014). Del mismo modo, las variables incluidas para su tratamiento, son las propuestas a evaluar en el presente trabajo.

Tabla 5.*Índices de Calidad del Agua – Colombia*

ICA	Variables incluidas	Tipo de estimación
Colombia		
NSF	Temperatura, pH, OD,	Curvas - Promedio
	DBO, SDT, turbiedad,	ponderado
	coliformes fecales, NO ₃ -N y	
	fosfatos total	

Nota: variables incluidas en la metodología NFS. Adaptado “Fernández et al., 2003” por Barrero & Martinez, 2018

Índices de Contaminación (ICO).**Tabla 6.***Índices de Contaminación – Colombia*

ICO's	Variables incluidas	Tipo de estimación
Colombia - Ramírez y Viña (1998)		
Mineralización ICOMI	Conductividad, Dureza y Alcalinidad	Ecuación - Promedio aritmético
Materia orgánica ICOMO	DBO, OD y Coliformes Totales	

Nota: variables incluidas en la metodología ICOMO-ICOMI. Adaptado “Fernández et al., 2003” por Barrero & Martinez, 2018

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

Calculo de los ICA e ICO.*Índice de Calidad del Agua.*

Para calcular el Índice de Calidad del Agua, se usa una suma lineal ponderada de los subíndices o una función de agregación del producto ponderado (ecuación 1), para lo cual se tiene en cuenta los pesos asignados de cada variable. De este modo, el subíndice de cada parámetro se obtuvo a partir de la interpretación de los diferentes gráficos establecidos por los autores, referentes a las curvas de calidez de cada parámetro.

Tabla 7.*Pesos relativos para cada parámetro.*

I	Sub_i	W_i
1	Coliformes fecales	0,16
2	pH	0,11
3	DBO ₅	0,11
4	Nitratos	0,10
5	Fosfatos	0,10
6	Temperatura	0,10
7	Turbiedad	0,08
8	Sólidos disueltos totales	0,07
9	Oxígeno disuelto	0,17
Total		1

Nota: pesos porcentuales de las variables NFS. Adaptado “Fernández et al., 2003” por Barrero & Martinez, 2018

Ecuación 1. Cálculo del Índice de Calidad del Agua.

$$ICA = \sum_{i=1}^9 (Sub_i * W_i)$$

Adaptado “Ruiz et al., 2007” por Barrero & Martinez, 2018

Dónde:

- *Sub_i* = Subíndice del parámetro
- *W_i* = Factor de ponderación para el subíndice *i*

De este modo, el resultado obtenido se interpreta de acuerdo a la tabla 8.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

Tabla 8.*Escala de clasificación del ICA-NSF.*

Descriptores	Ámbito numérico	Escala de Color
Muy malo	0 – 25	Rojo
Malo	26 – 50	Naranja
Regular	51 – 70	Amarillo
Aceptable	71 – 90	Verde
Bueno	91 – 00	Azul

Nota: escala de clasificación de la calidad del agua. Adaptado de “Fernandez & Solano, 2005” por Barrero & Martinez, 2018

Índices de contaminación.

De este modo, los cálculos de los índices de contaminación se ejecutarán mediante el desarrollo de las siguientes expresiones.

El **ICOMI** es el valor promedio de los índices de cada una de las tres variables elegidas, las cuales se definen en un rango de **0 - 1**; índices próximos a cero (0) reflejan muy baja contaminación por mineralización, e índices cercanos a uno (1), lo contrario.

Ecuación 2. Cálculo del Índice de Contaminación por Mineralización.

$$ICOMI = \frac{1}{3}(I_{conductividad} + I_{dureza} + I_{alcalinidad})$$

Adaptado “Ramírez *et al.*, 1997” por Barrero & Martinez, 2018

El *Iconductividad* se obtiene a partir de la siguiente expresión:

Ecuación 3. Cálculo del Índice de Conductividad.

$$\text{Log}(10)I_{conductividad} = -3,26 + 1,34\text{Log}(10)Conductividad (\mu\text{S}/\text{cm})$$

Adaptado “Ramírez *et al.*, 1997” por Barrero & Martinez, 2018

- Conductividades mayores a 270 $\mu\text{S}/\text{cm}$ tiene un índice de conductividad de 1.

El *Idureza* se obtiene a partir de la siguiente expresión:

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

Ecuación 4. Cálculo del Índice de Dureza.

$$\text{Log}(10)Idureza. = -9,09 + 4,40\text{Log}(10)Dureza \text{ (mg/L)}$$

Adaptado “Ruiz *et al.*, 2007” por Barrero & Martinez, 2018

- Durezas mayores a 110 mg/L tienen $Idureza = 1$
- Durezas menores a 30 mg/L tienen $Idureza = 0$

El *Ialcalinidad* se obtiene a partir de la siguiente expresión:

Ecuación 5. Cálculo del Índice de Alcalinidad.

$$Ialcalinidad = -0,25 + 0,005Alcalinidad \text{ (mg/L)}$$

Adaptado “Ruiz *et al.*, 2007” por Barrero & Martinez, 2018

- Alcalinidades mayores a 250 mg/L tienen $Ialcalinidad = 1$
- Alcalinidades menores a 50 mg/L tienen $Ialcalinidad = 0$

El **ICOMO**, al igual que el ICOMI, es el valor promedio de los índices de cada una de las tres variables elegidas.

Ecuación 6. Cálculo del Índice de Contaminación por Materia Orgánica

$$ICOMO = \frac{1}{3}(IDBO5 + Icoliformes \text{ totales} + Ioxígeno \%)$$

Adaptado “Ruiz *et al.*, 2007” por Barrero & Martinez, 2018

El *IDBO* se obtiene a partir de la siguiente expresión:

Ecuación 7. Cálculo del Índice de Demanda Biológica de Oxígeno.

$$IDBO = -0,05 + 0,70\text{Log}(10)DBO \text{ mg/L}$$

Adaptado “Ruiz *et al.*, 2007” por Barrero & Martinez, 2018

- DBO mayores a 30 mg/L tienen $IDBO = 1$
- DBO menores a 2 mg/L tienen $IDBO = 0$

El *Icoliformes totales* se obtiene a partir de la siguiente expresión:

Ecuación 8. Cálculo del Índice de Coliformes Totales.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

$$I_{Col. tot} = -1,44 + 0,56 \log_{10}(\text{Coliformes Totales (NMP/100mL)})$$

Adaptado “Ruiz *et al.*, 2007” por Barrero & Martinez, 2018

- Coliformes totales mayores a 20.000 NMP-100mL tienen $I_{Col. tot} = 1$
- Coliformes totales menores a 500 NMP-100mL tienen $I_{Col. tot} = 0$

El $I_{oxígeno\%}$ se obtiene a partir de la siguiente expresión:

Ecuación 9. Cálculo del Índice del Porcentaje de Oxígeno Disuelto.

$$I_{oxígeno\%} = 1 - 0,01 \text{ oxígeno } (\%)$$

Adaptado “Ruiz *et al.*, 2007” por Barrero & Martinez, 2018

- Oxígenos (%) mayores a 100% tienen $I_{oxígeno\%} = 0$

Los resultados obtenidos de los ICO's se interpretan de acuerdo a la tabla 9.

Tabla 9.

Escala de clasificación de los índices de contaminación.

Descriptor	Ámbito numérico	Escala de Color
Ninguno	0 – 0.2	Azul
Bajo	0.2 – 0.4	Verde
Medio	0.4 – 0.6	Amarillo
Alto	0.6 – 0.8	Naranja
Muy alto	0.8 – 1	Rojo

Nota: escala de clasificación de los índices de contaminación ICOMO-ICOMI. Adaptado de “Fernandez & Solano, 2005” por Barrero & Martinez, 2018

A partir del desarrollo de las anteriores ecuaciones ilustradas, se procedió al respectivo análisis estadístico de los Índices de Calidad del Agua y de Contaminación, mediante el desarrollo de curvas promedio y/o ponderadas, que permitieron representar gráficamente los datos obtenidos de cada parámetro, donde el análisis de estos se realizó en función de las actividades antrópicas que se encontraron dentro de la microcuenca o área de estudio, apreciando los cambios en las temporalidades trabajadas durante el desarrollo del presente proyecto.

A partir de la información obtenida y analizada se propusieron alternativas y propuestas viables de gestión, que permitan la protección y la conservación de la microcuenca, mediante el apoyo y compromiso técnico multidisciplinario de entidades gubernamentales y miembros de los asentamientos urbanos e instituciones. El fin de lo mencionado previamente, fue generar un conglomerado de información base para las entidades competentes y futuros investigadores con relación a la calidad del agua del país, y especialmente de la región Orinoquia, sirviendo como referencia teórica para hacer parte de la estructuración de información administrativa (POT o POMCA) categorizados en el ámbito social y con proyección a mediano y largo plazo.

Reconocimiento del área de estudio, e identificación del uso de suelo actual a partir de información de tipo secundario

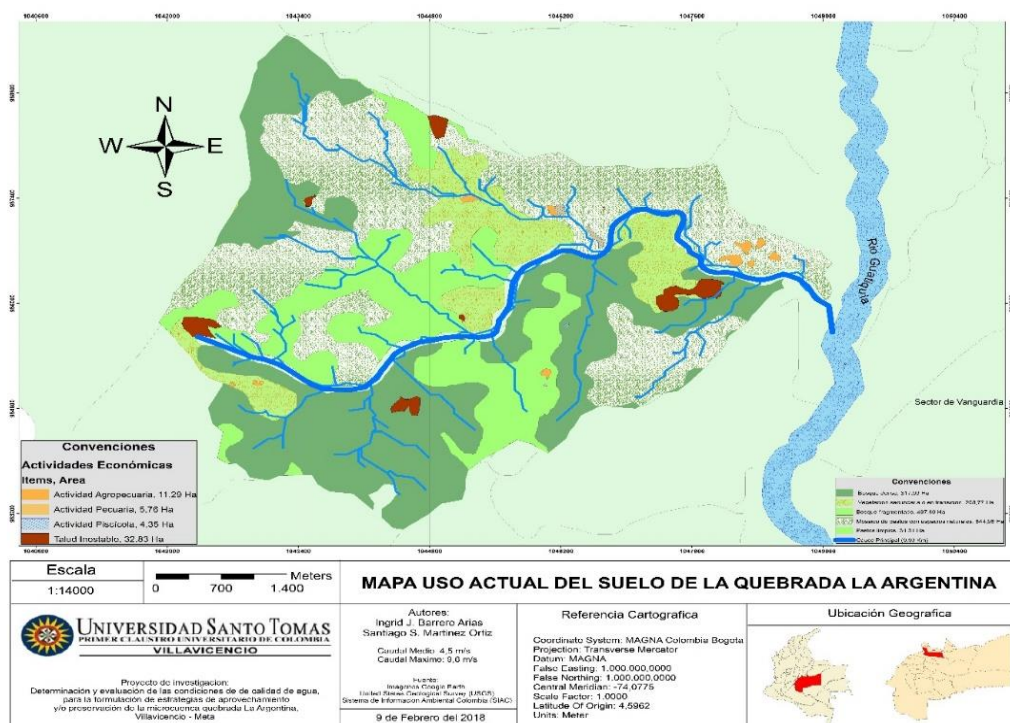


Figura 4. Mapa uso actual y coberturas del suelo, microcuenca quebrada La Argentina. Adaptado de Barrero & Martínez, 2018 a partir del Software ArcGis.10.3.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

Para determinar el estado del cuerpo hídrico, fue necesario conocer las diferentes actividades económicas y coberturas del suelo actuales de la zona de influencia de la microcuenca quebrada La Argentina, dicha información permite el desarrollo de estudios posteriores como diseño de políticas y planificación del sector forestal, cuencas hidrográficas, actualización de indicadores ambientales y económicos, gestión de riesgo, análisis sobre la dinámica de utilización y conflicto de uso del suelo, planes de ordenamiento y desarrollo territorial, gestión de áreas protegidas, entre otros (Orozco, 2015).

Por esto en la microcuenca, a través de sistemas de información geográfica (SIG), se realizó un procesamiento de información secundaria extraída del sistema ambiental de Colombia (SIAC), corroborando esta información en campo, observando el grado de intervención espacialmente del cuerpo hídrico.

las principales actividades económicas registradas en la microcuenca fueron principalmente de carácter agropecuario (11,29 ha), criaderos de animales (5,75 Ha) y por último la piscícola (4,36 Ha). Ninguna de estas se reportó de magnitud industrial, sino actividades donde se involucra el trabajo de manera familiar. Presentando tendencias de expansión de la frontera agropecuaria y la extracción del recurso del bosque, que están directamente asociadas con las dinámicas de cambio de cobertura y fragmentación eco sistémica.

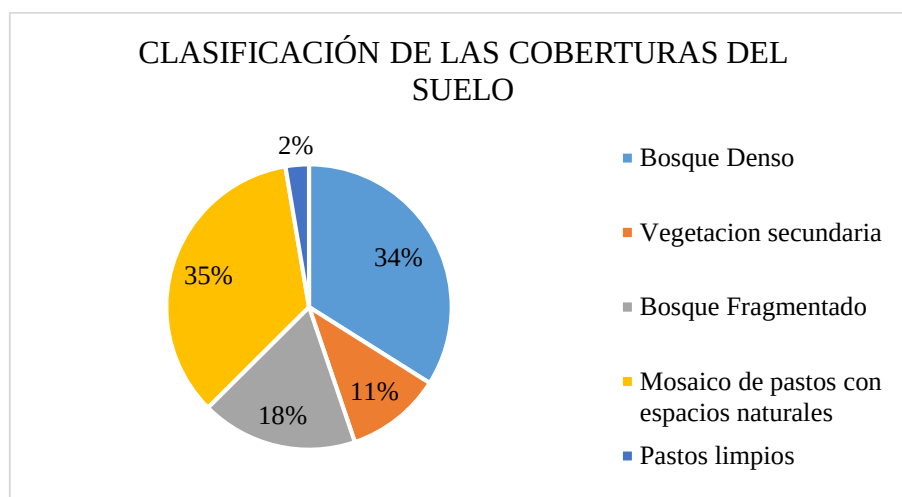


Figura 5. Representación gráfica porcentual de las coberturas actuales del suelo. Adaptado de “SIAC, 2012”; por Barrero & Martínez, 2018

La clasificación de las coberturas del suelo, refleja un mayor porcentaje representado mosaico de pastos, teniéndose espacios naturales en un 35% del área total de la microcuenca, seguido de

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

los bosques densos con un 33%, situados principalmente en la cuenca alta de la quebrada. Estos últimos presentan una característica muy particular debido a que están dominados por elementos típicamente arbóreos, cuya área de cobertura arbórea representa más de 75% del área total de esta cobertura, con altura del dosel superior a 4 metros. Valores que reflejan una alta conservación de la biodiversidad por la mínima intervención humana. Concerniente a la cuenca media, se encuentran los bosques fragmentados (18%), debido a que ya se registra intervención antrópica con familias campesinas asentadas en esta zona, con actividad piscícola, principalmente de peces como la trucha (*Oncorhynchus mykiss*) y Mojarra roja (*oreochromis sp*), y actividad agrícola, con cultivos de frutos cítricos, entre otros son los más comunes encontrar en esta zona.

En tercer lugar, se encuentra la cobertura de vegetación secundaria con un 11%. Se alude, que a través del tiempo, el asentamiento progresivo en la microcuenca ha ocasionado que la cobertura vegetal presente un proceso de sucesión de la vegetación natural a causa de la intervención o destrucción de la vegetación primaria, e incluso en algunos casos se puede encontrar zonas en recuperación (SIAT-AC, 2018). Por último la cobertura de pastos limpios registró valor inferior del 2%, presentando características principalmente de vegetación tipo gramíneas, forrajeros con una leve ocurrencia de malezas (Orozco, 2015). Utilizadas principalmente como zonas de pastoreo de ganado vacuno.

También, se evaluaron los parámetros morfométricos básicos a través de herramienta ArcGis 10.3. Información base para conocer los comportamientos hidrológicos de la microcuenca y la incidencia de estos en la evaluación de los parámetros físico-químicos y microbiológicos de calidad del agua. A continuación, se ilustran los resultados de estos parámetros.

Tabla 10.

Parámetros morfométricos básicos microcuenca quebrada La Argentina.

Parámetros morfométricos	Valor	Unidades
Área de la cuenca	25,17	Km ²
Perímetro de la cuenca	23,87	Km
Longitud del cauce	9,93	Km
Pendiente media	0,16	m/m
Índice de Gravilius	0,50	Adimensional
Tiempo de concentración	2,44	Horas

Nota: valores de los parámetros morfométricos de la microcuenca con sus respectivas unidades de medida. Adaptado de Barrero & Martínez, 2018.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

Se observa en la tabla anterior que el área y el perímetro, permiten considerar a la microcuenca como una cuenca pequeña, ya que oscila entre 25-250 km² (Ramirez , Cruz, & Sanchez , 2015). El tamaño de la cuenca, estimula la realización de estudios sobre la evaluación del recurso con miras al manejo y planificación del mismo, tanto en los aspectos biofísicos como en los aspectos socioeconómicos tales como; población, economía, infraestructura, saneamiento, servicios públicos básicos, entre otras. Continuamente, se registró una pendiente media de 0,16 m/m; relativamente empinada y susceptible a crecientes repentinas, con arrastre de gran cantidad de material, principalmente en la época de lluvias, promoviéndose así, procesos de erosión y deterioro significativo en la calidad del recurso (Ramirez *et al.*, 2015).

En último lugar, el índice de gravilius arrojó un valor 0,50. Según la clasificación propuesta por Ramirez *et al.*, (2015) corresponde a ovalo-redonda (figura 6). Este índice de gravilius junto con la pendiente, permiten inferir la reducción media del tiempo de concentración (2,44 horas), lo que influye en el modelo de lluvias-escorrentía y capacidad de filtración de la microcuenca.

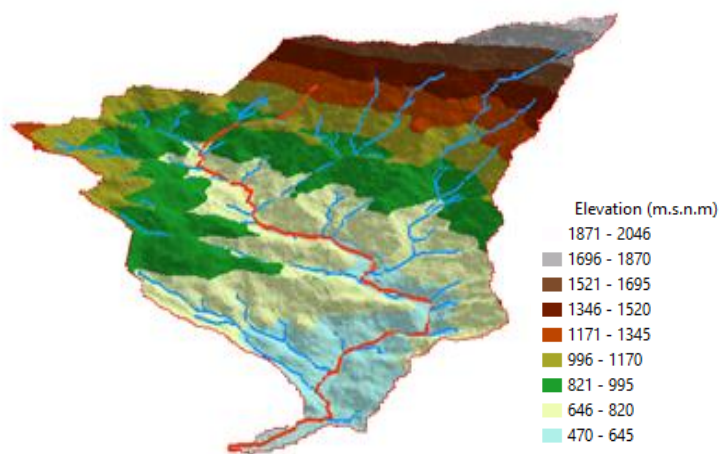


Figura 6. Delimitación de la micro cuenca en 3D, ArcScene. Adaptado de Barrero & Martinez, 2018.

Evaluación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

Datos obtenidos en campo.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

Interpretación gráfica de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

A continuación se enseñan las figuras que comprenden la ilustración gráfica de los parámetros medidos en campo, tanto para temporada húmeda como seca.

Los valores registrados en las graficas a continuación, corresponden a la media aritmética de los promedios obtenidos en el monitoreo y toma de muestras en los dos días (duplicado), ver Anexo A. Recordando que el monitoreo y toma de muestras se realizó en tres intervalos de tiempo (7 am, 12:00m, 5:00pm) y en los tres diferentes tramos (cuenca alta, cuenca media y cuenca baja), siendo de allí, de donde se obtiene el promedio de cada parametro, para cada día monitoreado.

Para el caso de los parámetros *In Situ*, (pH, Temperatura, Conductividad, OD) el valor final por cada hora y punto de muestreo para cada día, fue el promedio obtenido de las mediciones realizadas en las dos orillas y centro del lecho. Ahora bien, el valor final, representado en las graficas a continuación, es la media aritmética de dichos promedios ya obtenidos. De este modo, las muestras recolectadas (Dureza, Alcalinidad, SDT, DBO, Turbiedad, $\text{NO}_3 - \text{N}$, Fosfatos, Coliformes Totales y Fecales) que se enviaron a los laboratorios, fueron las composiciones finales (muestreo compuesto) resultantes de las muestras puntuales tomadas de cada parametro, en los tres intervalos de tiempo y punto de muestreo.

Caudal.

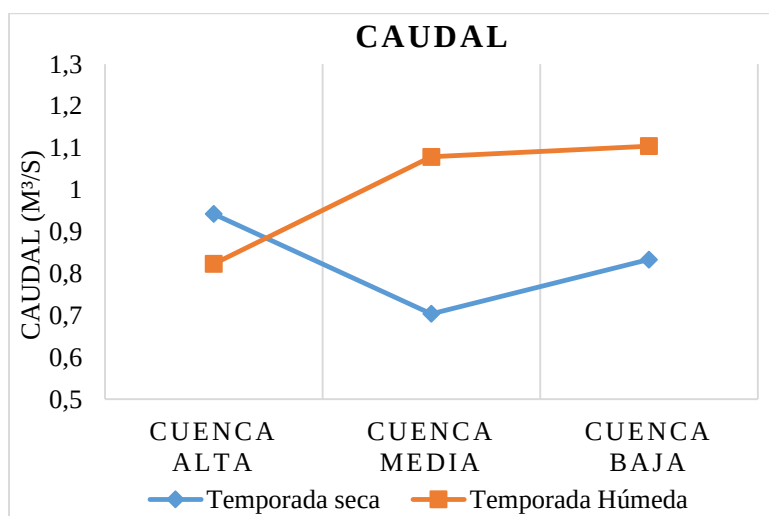


Figura 7. Representación gráfica de valores promedio del parámetro caudal (m^3/s), para temporada seca y húmeda. Adaptado de Barrero & Martinez, 2018.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

El parámetro caudal (figura 7), presento en la parte superior de la microcuenca, una variación mínima del caudal de $0,83 \text{ m}^3/\text{s}$, en temporada húmeda y $0,94 \text{ m}^3/\text{s}$ en temporada seca; mientras que en cuenca media-baja se presentó una variación significativa del mismo. Estos comportamientos registrados se deben a la variable precipitación, siendo mayores en los meses de octubre a diciembre y menores en los meses de enero y febrero (IDEAM, 2015).

Los caudales máximos se registraron en temporada húmeda en los puntos de muestreo ubicados en cuenca media y baja. Esto debido a que la pendiente media ($0,16 \text{ m/m}$) altera el tiempo de concentración y el modelo de lluvia-escorrentía de la microcuenca. Adicionalmente, estos máximos registros de caudales están influenciados por la desembocadura de sus tributarios.

Temperatura.

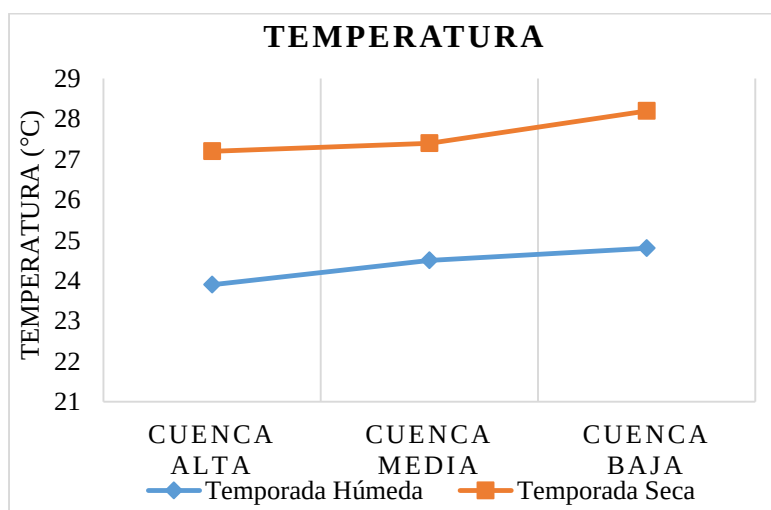


Figura 8. Representación gráfica de valores promedio del parámetro temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para temporada seca y húmeda.

Nota: $\pm 0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y $\pm 3,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, son rangos que permiten conocer la variación del parámetro temperatura, en los tres tramos y temporadas evaluadas, respectivamente. Adaptado de Barrero & Martinez, 2018

El comportamiento de la temperatura es consecuencia de la altura sobre el nivel del mar y la época de muestreo (Universidad de Manizales, 2010). En temporada húmeda, se registraron temperaturas del agua inferiores ($23,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - $24,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$), con respecto a la temporada seca, que oscilaron en un rango ($27,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - $28,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Estos valores permiten atestiguar que no existió variación de temperaturas significativas en los puntos de muestreos ($\pm 0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$). No obstante, se observó variación significativa en las temporadas de estudio ($\pm 3,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Esto, se debe a la cantidad de radiación solar, siendo mayor en temporada seca (Rodriguez & Silva, 2015).

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

Últimamente, se concluye que el parámetro no muestra grandes variaciones en general, la ausencia de descargas industriales de gran volumen y demás actividades socioeconómicas, dan paso a la estabilidad del parámetro.

Potencial de hidrógeno (pH)

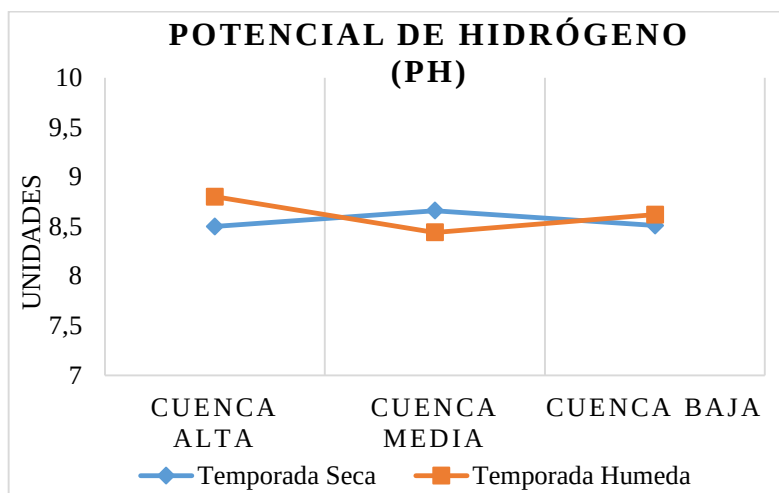


Figura 9. Representación gráfica de valores promedio del parámetro pH (unidades) para temporada seca y húmeda. Adaptado de Barrero & Martínez, 2018.

El valor de pH del agua, nos determina, a través de una escala logarítmica inversa basada en la concentración de iones de hidrógeno, que tan ácida, básica o alcalina es el cuerpo hídrico. Dicha escala parte de 0 al 14, donde un pH menor de 7.0 indica acidez en el agua, cuanto menor sea el valor del pH mayor es la concentración de iones hidrogeno y mayor es la acidez. Por el contrario, un pH por encima de 7.0 indica condiciones básicas en el agua. La concentración de iones hidrogeno es baja y se dice que el agua es alcalina. Finalmente, cuando el pH es de 7.0 se dice que el pH es neutro y el agua no tiene características ácidas ni alcalinas (Carrasco, 2014) .

En la figura 9, se ilustran los valores pertenecientes al parametro pH. Se observa, que en temporada seca, estos valores se encontraron dentro del rango 8,5 - 8,66 unidades, representando el mayor valor cuenca media y el menor valor cuenca alta. Del mismo modo, en temporada humeda se observa un escenario relativamente similar, puesto que los valores de pH oscilan dentro del rango 8,44 - 8,8 unidades, figurando el mayor valor cuenca alta, y el menor valor cuenca media.

Como se observó en el gráfico, los valores de pH pertenecientes al agua de la microcuenca La Argentina, tanto para temporada seca como húmeda, no superaron las 8,8 unidades, lo que indica un agua alcalina. Según Carrasco (2014), el valor del pH compatible con la vida de los peces, está

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

comprendido entre 5 a 9; permitiendo lo anterior, definir y destacar la buena interacción de los ecosistemas y sobrevivencia de especies que conforman el agua de esta microcuenca. Asimismo, se define que estos valores son los más adecuados para la actividad biológica de estos ecosistemas, deduciéndose que estos procesos biológicos (fotosíntesis, respiración) que se desarrollan en la microcuenca, no están siendo perturbados y/o inhibidos (Carrasco, 2014).

Oxígeno disuelto.

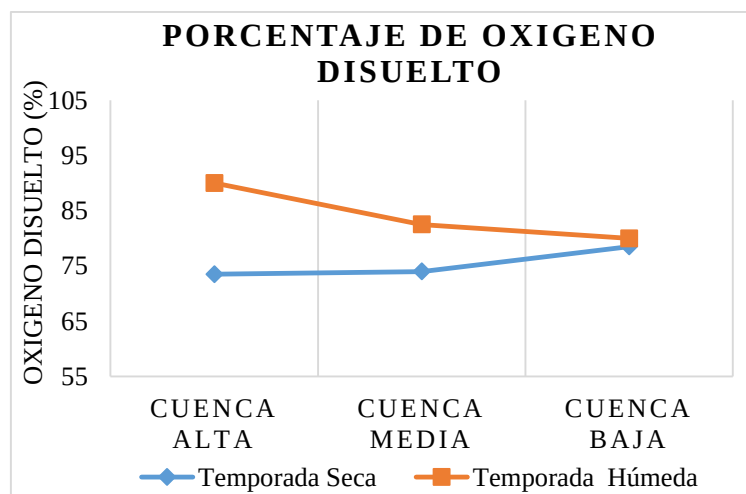


Figura 10. Representación gráfica de valores promedio del parámetro oxígeno disuelto (%) para temporada seca y húmeda. Adaptado de Barrero & Martinez, 2018.

En la ilustración anterior, se observa el comportamiento del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (POD) del agua de la microcuenca La Argentina. Parametro formado por la cantidad de oxígeno proveniente de la atmósfera y que la microcuenca es capaz de absorber y la generada dentro de la microcuenca por las diferentes actividades de organismos fotosintéticos. De este modo, los niveles de concentración (mg/L) o porcentaje de saturación (%) de oxígeno disuelto, son dependiente de la temperatura, puesto que aguas más cálidas son capaces de disolver menores cantidades de oxígeno y viceversa (Goyenola, 2007).

En la figura 10 se observa que los valores de porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en las respectivas temporadas de estudio, no superan el 90%. En temporada húmeda donde se alcanzaron los datos mínimos de temperatura, se obtuvieron los mayores valores de POD, comprendidos dentro del rango de 80 – 90 %. Por el contrario, en temporada seca con los máximos de temperatura, se obtuvieron valores menores de POD, figurados dentro de un rango de 73,5 –

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

78,5 %. El comportamiento anterior concuerda con lo propuesto por Bain y Stevenson (2000), en la tabla titulada dependencia de la concentración de oxígeno disuelto respecto a la temperatura del agua (Bain & Stevenson, 1999). Los comportamientos descritos anteriormente o la variabilidad presentada, se deben principalmente a la hora de pruebas o monitoreos, pendientes (cuenca alta, media y baja), temporadas y caudal. Si observamos en la figura 10, en temporada húmeda, se observa un POD de 90% en cuenca alta, y desciende paulatinamente conforme cuenca media y baja. Estas pendientes representadas por cada cuenca, junto con mayor caudal de las aguas, facilita el proceso de oxigenación, donde estos altos valores de POD favorecen la autodepuración del agua. Asimismo, en cuenca alta, los monitoreos fueron llevados a cabo en horas de la mañana, donde el agua está más fría y por consiguiente contiene mayor oxígeno disuelto. No obstante, en temporada seca, la disminución del POD concuerda con los valores bajos de caudal y por consiguiente una menor aireación del medio. Sumado a lo descrito anteriormente, en el mapa 2 (Anexo C), no se observan desarrollo de actividades industriales, que permitan la descarga de residuos líquidos con temperaturas altas, y que pudieran afectar en gran medida la temperatura del recurso hídrico.

Según Carrasco (2014), Los valores del POD de 60-100% se encuentran dentro de la condición aceptable y buena. Siendo estas las condiciones adecuadas para la vida de la gran mayoría de especies de peces y otros organismos acuáticos. Lo anterior, permite inferir que los POD obtenidos son óptimos para soportar una diversidad de vida acuática (Carrasco, 2014).

Conductividad.

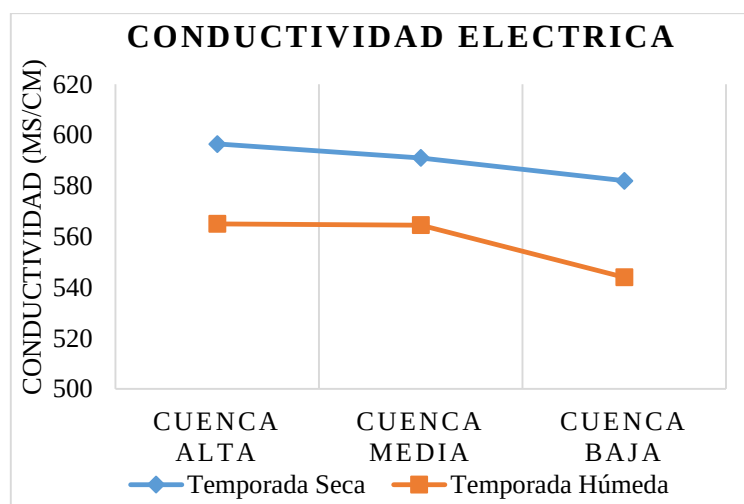


Figura 11. Representación gráfica de valores promedio del parámetro conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$) para temporada seca y húmeda. Adaptado de Barrero & Martínez, 2018.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

En la anterior figura, se refleja el comportamiento similar que la conductividad eléctrica tiene a lo largo de la microcuenca para las dos temporadas evaluadas, cuya tendencia general fue disminuir aguas abajo, presentándose los menores valores en temporada húmeda en comparación con la seca. Lo anterior sugiere que el aumento del caudal de la microcuenca La Argentina, contribuye en la disminución de la conductividad. No obstante, la conductividad obtenida en la microcuenca La Argentina presenta valores relativamente bajos, lo cual obedece a poco contenido de compuestos ionizables en el agua, tanto para temporada húmeda como seca (Rodríguez *et al.*, 2010).

El valor de la conductividad eléctrica es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, por lo tanto, cuanto mayor sea dicha concentración de sólidos disueltos en el agua, mayor será la conductividad y viceversa (Zúñiga *et al.*, 2016). El comportamiento anterior, se observa claramente en el recurso hídrico estudiado. En la figura 11, y 15 se observa cuya tendencia general (disminución) paulatina conforme aguas abajo para los dos parámetros.

En la resolución 2115 de 2007 (Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano), el valor máximo aceptable para la conductividad puede ser hasta 1000 microsiemens/cm (Resolución 2115, 2007). Asimismo, Rodríguez *et al.*, (2010) definen que, en soluciones acuosas, conductividades dentro de un rango 500 a 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, permiten considerar el agua para usos domésticos. Sumado a lo anterior, Espinoza (2005), menciona que en general, las aguas que contienen menos de 500 mg/L de sólidos disueltos totales son aptas para usos domésticos e industriales. Los resultados obtenidos en el periodo de estudio tanto de conductividad eléctrica, como de sólidos disueltos totales están dentro o por debajo de estos rangos o valores establecidos por los autores y mencionados anteriormente. Esta baja presencia de sustancias diluidas en el agua de la microcuenca, permite inferir que no es significativa la escorrentía agrícola y residencial, lixiviación de la contaminación del suelo, o fuentes puntuales de tratamientos industriales o aguas residuales. Esto se evidencia en el mapa 2 (figura 4) de uso actual del suelo de la microcuenca, donde se observa que la intervención antrópica o incidencia en la afectación del suelo en la microcuenca la Argentina, no es significativamente alta. No obstante, se alude que los valores máximos presentados en cuenca alta tanto de conductividad eléctrica como de sólidos disueltos totales, se debe al escurrimiento natural de nutrientes y a posibles deslizamientos y eventuales caídas o desprendimientos por presencia de taludes inestables (ver mapa 2).

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

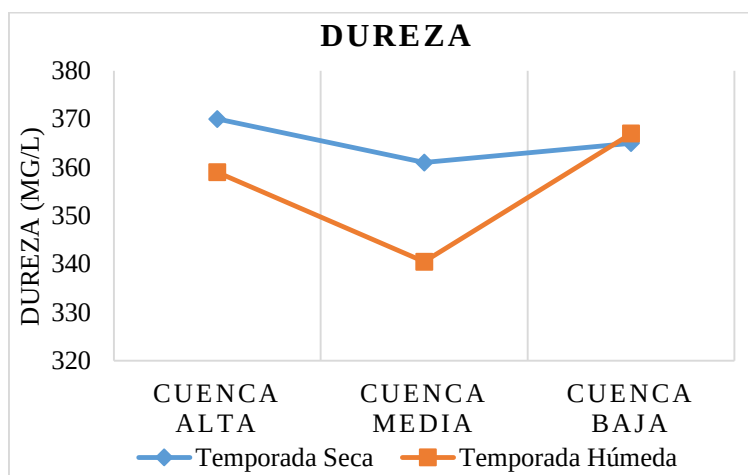
Dureza.

Figura 12. Representación gráfica de valores promedio del parámetro dureza (mg/L CaCO₃) para temporada seca y húmeda. Adaptado de Barrero & Martínez, 2018.

La dureza del agua corresponde a la concentración de determinados compuestos minerales que hay en una cantidad de agua, en particular sales de magnesio y calcio (Zamora, 2008). El grado de dureza es directamente proporcional a la concentración de estas sales. De este modo, se observa, que en temporada húmeda se obtuvieron menores concentraciones con respecto a la seca, esto debido al incremento del caudal del agua de la microcuenca que conduce a un mayor lavado de estos compuestos minerales. Asimismo, se observa que los valores pertenecientes a este parámetro superan los 300 mg/L CaCO₃ en las dos temporadas evaluadas. De igual forma, se observa un escenario afín, donde en cuenca media se presenta un declive y en cuenta baja aumenta este valor. Este comportamiento es notorio en temporada húmeda, siendo cuenca baja la que obtuvo el mayor valor de dureza total, asimismo, entre cuenca media y baja se presenta una diferencia significativa de 26,5 unidades exactamente, muy cercano al máximo valor obtenido de las dos temporadas (370 mg/L CaCO₃).

Según la clasificación de la Organización Mundial de la Salud (OMS), se define como agua blanda la que presenta concentraciones inferiores a 60 mg/L de carbonato de calcio (CaCO₃), medianamente dura entre 61 y 120 mg/L, dura entre 121 y 180 mg/L y muy dura aquella con valores superiores a 180 mg/L. Asimismo, en la resolución 2115 de 2007 se establece un valor máximo permisible de 300 mg/L de CaCO₃. Lo anterior, permite concretar que la concentración de dureza total del agua de la microcuenca La Argentina supera los 180 mg/L, lo que define un agua muy dura. Lo anterior, compromete la presencia de compuestos minerales (que tienen su

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

origen en el suelo y las formaciones geológicas), de este modo, se define una representativa suma de cationes metálicos divalentes. El calcio, por ejemplo, que se disuelve en las rocas y, por lo tanto, se detecta en el agua.

DBO_5 .

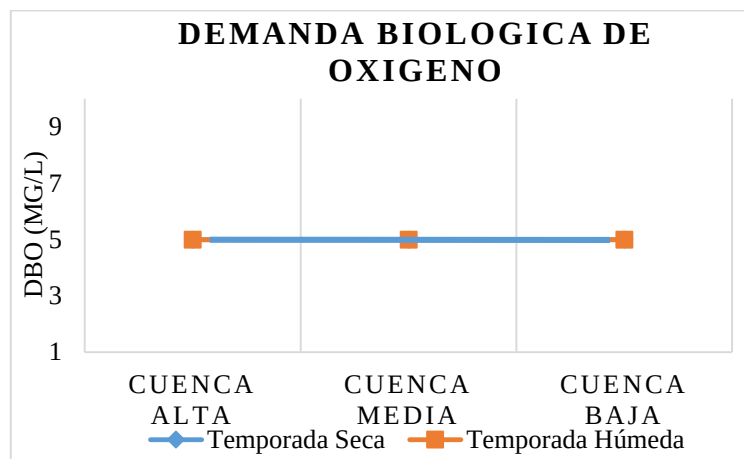


Figura 13. Representación gráfica de valores promedio del parámetro DBO_5 (mg/L) para temporada seca y húmeda. Adaptado de Barrero & Martinez, 2018.

La demanda bioquímica de oxígeno es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable, en condiciones aeróbicas en un periodo de cinco días a 20 °C. A través del procesamiento de las muestras en el laboratorio, se registraron en temporada seca y húmeda valores inferiores al límite de detección de 5 mg/L. Siendo estos, los valores típicos de aguas con bajos niveles de contaminación por materia orgánica biodegradable (Chapman , 1992).

A su vez, estas concentraciones de DBO registradas en la microcuenca, asienten inferir, que los vertimientos de aguas residuales son mínimos. Por consiguiente, la magnitud de los efectos y/o impactos son menores en el cuerpo receptor.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

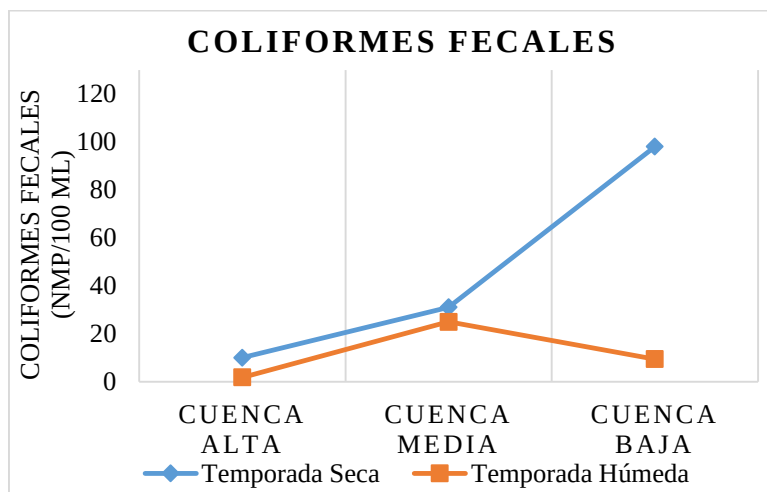
Coliformes fecales.

Figura 14. Representación gráfica de valores promedio del parámetro coliformes fecales (NMP/100 mL) para temporada seca y húmeda. Adaptado de Barrero & Martinez, 2018.

Para el parámetro microbiológico coliformes fecales, se observa en la figura 14 comportamientos análogos en temporada seca y húmeda, principalmente en la cuenca alta y media de la microcuenca La Argentina con valores que oscilan entre (1,8 y 31 NMP/100 ML). En comparación con la cuenca baja, en temporada seca se registró el valor máximo 98 NMP/100 mL. Esto debido a la considerable disminución del caudal, lo que maximizó la concentración de este tipo de microorganismos en el cuerpo superficial. Lo mencionado previamente, da paso a la presencia de contaminación proporcionada por parte del núcleo urbano (Vereda La Argentina) asentada al costado derecho de la microcuenca. De este modo, el desarrollo en bajas proporciones de actividades como; ganadería y piscícolas, principalmente en cuenca media-baja de la microcuenca. Esta situación, trae consigo enfermedades intestinales por el consumo de contaminada. Dentro de estas, se menciona la fiebre tifoidea, la gastroenteritis viral o bacteriana y la hepatitis A (León, 2014)

Por el contrario, en temporada húmeda se obtuvo un registro de 9,4 NMP/100 mL. Dicha concentración, relacionada con el aumento del caudal, que permite la dilución del parámetro, y mayor oxigenación, para una autodepuración óptima, y reducción en la concentración del mismo.

Para la normatividad colombiana, los valores registrados en el presente estudio no superan el valor límite permisible (1.000 NMP/100 mL) para su potabilización y posterior consumo según el decreto 1575 del 2007-

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

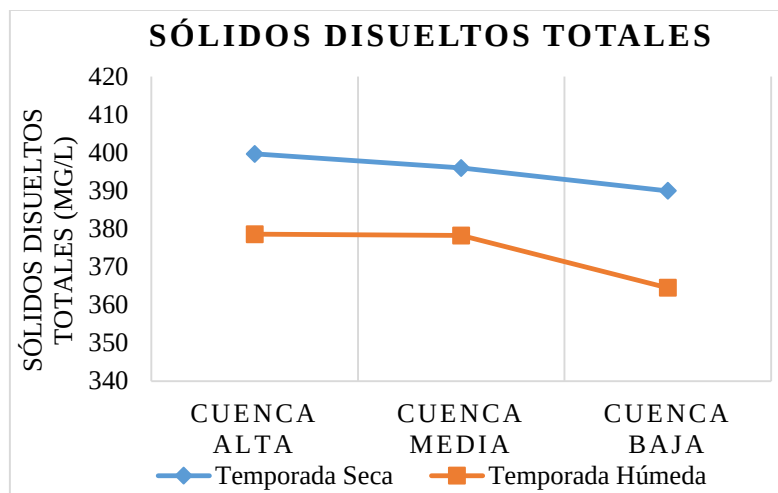
Sólidos disueltos totales.

Figura 15. Representación gráfica de valores promedio del parámetro sólidos disueltos totales (mg/L) para temporada seca y húmeda. Adaptado de Barrero & Martinez, 2018.

El parámetro de sólidos disueltos totales presenta una gran variación en los registros obtenidos entre las dos temporalidades, siendo mayor en la temporada seca con valores que oscilan entre los 390- 399,65 mg/L, esto debido a la reducción en el caudal del cuerpo hídrico y conductividad aumentando la concentración principalmente de sustancias orgánicas e inorgánicas de tipo molecular o micro granular de posibles fuentes tales como hojas vegetales, sedimentos, plancton, fertilizantes y pesticidas, como también de materiales inorgánicos tales como rocas y de gases en el agua ya que pueden contener bicarbonato de calcio, de nitrógeno, de fósforo de hierro, azufre, y otros minerales (Panachlor, 2014). Específicamente en la cuenca alta de la microcuenca donde se presenta taludes inestables, lo que influyen en el lavado y remoción en masa. Por otra parte, sus valores mínimos que se registraron fueron en el punto de muestreo ubicado en la cuenca baja de la quebrada con valores 364,48 mg/L en temporalidad húmeda y 389,94 mg/L en temporada seca.

Para la organización mundial de la salud, en su guía para la calidad del agua potable hace una recomendación para los TDS, en un valor inferior a los 600 mg/L para su consumo, puesto que concentraciones superiores afectarían la palatabilidad del agua, deteriorando su sabor amargo a metal o salado, siendo desagradable para los consumidores.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

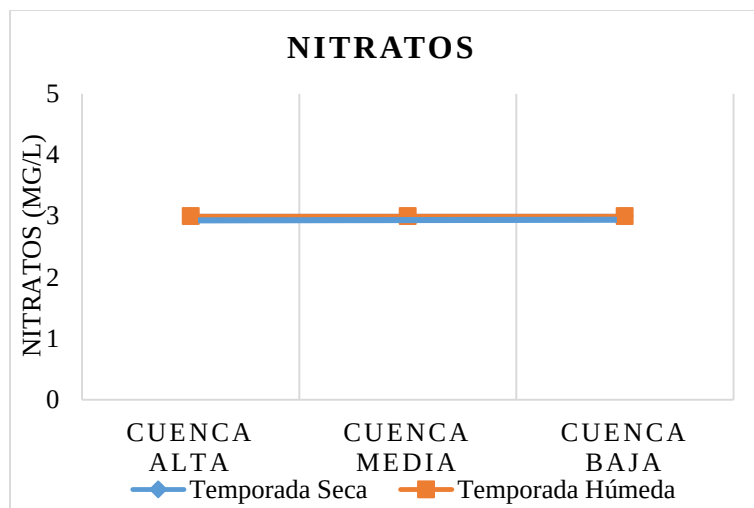
Nitratos.

Figura 16. Representación gráfica de valores promedio del parámetro nitratos (mg/L NO_3) para temporada seca y húmeda. Adaptado de Barrero & Martínez, 2018.

Este parámetro, como la demanda biológica de oxígeno, no presenta cambios durante el periodo de estudio. Tuvo un comportamiento constante en las temporadas de estudio, representando concentraciones constantes de 0,3 mg/L NO_3 . El parámetro químico nitrógeno al combinarse con el oxígeno forma los llamados nitratos, compuestos inorgánicos formados por un átomo de nitrógeno (N) y tres átomos de oxígeno (O). Se alude que el origen de las concentraciones de nitratos presentadas en las aguas de la microcuenca La Argentina, está asociada al uso de fertilizantes en actividades agrícolas desarrolladas en la zona de estudio y al almacenamiento de estiércol. Estos fertilizantes nitrogenados no son absorbidos totalmente por las plantas, y terminan siendo arrastrados por la escorrentía superficial. Normalmente los niveles de concentración estándar de nitratos en el agua superficial son de 10 mg/L. Las concentraciones obtenidas se encuentran por debajo del anterior valor mencionado.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

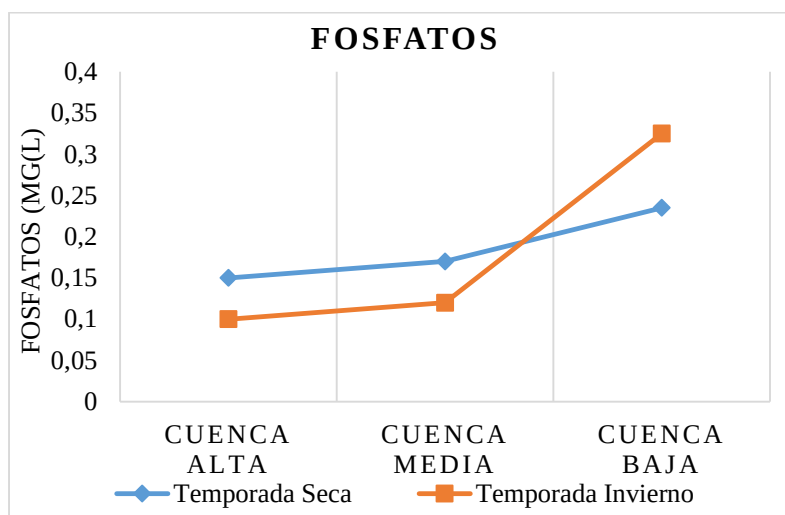
Fosfatos.

Figura 17. Representación gráfica de valores promedio del parámetro fosfatos (mg/L PO_4) para temporada seca y húmeda. Adaptado de Barrero & Martinez, 2018.

En la ilustración anterior se observa el comportamiento del parámetro químico fosfato. Compuesto químico que según la resolución 2115 del 2007, se encuentra dentro de los compuestos que tienen implicaciones económicas y en la salud. Las concentraciones registradas de este parámetro, no supero para ninguna de las épocas estudiadas los 0,325 mg/L PO_4 . Valor que se encuentra por debajo de lo expuesto en la resolución. Se observa en la anterior ilustración, que, en las dos temporadas, el comportamiento general tiende a ascender gradualmente. Presentando las menores concentraciones la temporada húmeda a excepción de la cuenca baja que presenta un cambio brusco.

Las concentraciones de fosfatos obtenidas en la microcuenca La Argentina son esenciales para el crecimiento, desarrollo y potencial genético de las plantas y de los animales presentes en la misma. De este modo, estas concentraciones permiten procesos de transferencia de energía, como el metabolismo, la fotosíntesis, la función nerviosa y la acción muscular de especies presentes en el recurso (Carrasco, 2014). No obstante, como se observa en el gráfico, en cuenca baja se obtuvieron las concentraciones más altas de fosfato, esto debido a que en la misma se llevan a cabo las actividades económicas primarias determinadas en el mapa 2, dentro de estas actividades, encontramos cultivos agrícolas transitorios. Esta actividad involucra el uso de fertilizantes químicos en baja proporción, pero que representan un grado de implicancia en el registro de los datos, puesto que la adición de fosfatos por el hombre excede las concentraciones naturales del

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

agua de la microcuenca, y el ciclo del fósforo es interrumpido. Este incremento de la concentración de fósforo en el agua de la microcuenca aumenta el crecimiento de organismos dependientes del fósforo, como son las algas. Estos organismos usan grandes cantidades de oxígeno e impiden que los rayos de sol entren en el agua, lo hace que el agua sea poco adecuada para la vida de otros organismos (Carrasco, 2014). Este fenómeno es comúnmente conocido como eutrofización, y durante el periodo de estudio, este fenómeno no se presentó en el agua de la microcuenca La Argentina.

Turbiedad.

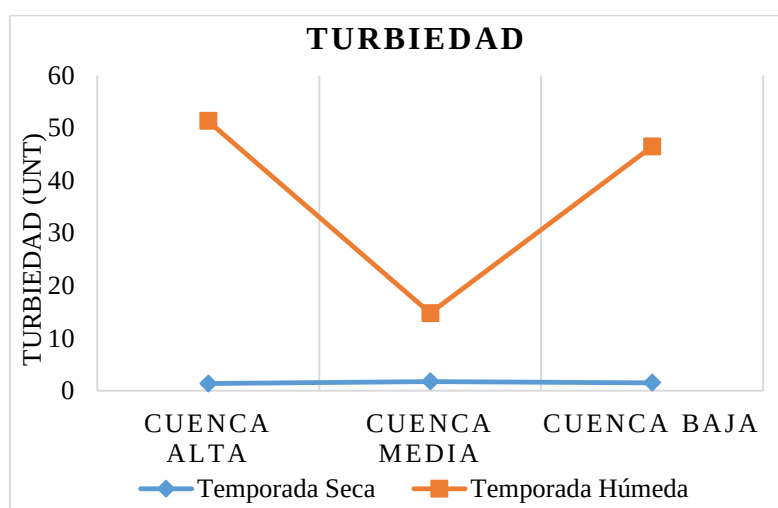


Figura 18. Representación gráfica de valores promedio del parámetro turbiedad (UNT) para temporada seca y húmeda. Adaptado de Barrero & Martinez, 2018.

La turbiedad representa la cantidad de partículas sólidas presentes en el agua, donde varían en tamaño desde 10 nm (nanómetros) a 0.1 mm de diámetro (Carrasco, 2014) para este caso específicamente, la turbiedad tuvo unos registros inferiores en temporada seca, oscilando entre 1,2 y 1,8 UNT. En comparación con la temporada húmeda donde se registraron valores superiores en cuenca alta y baja oscilando 50 y 45 UNT respectivamente, esto debido principalmente por las características geomorfológicas que permiten un arrastre de sedimentos y procesos erosivos cuyo génesis se da por la dinámica natural de la zona, teniendo como consecuencia la pérdida de capacidad de acoger organismo de diversidad acuática, como también al aumentar la turbiedad las partículas suspendidas absorben el calor del sol y por ello aumenta la temperatura del agua, lo que a su vez reduce los niveles de oxígeno disuelto. Además, como las partículas dispersan la luz,

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

impiden que este alcance a las plantas más profundas, afectando la actividad fotosintética y causando su muerte. (Elmore & Welch , 2010)

Para la organización mundial de la salud (OMS) la turbiedad del agua para consumo humano no debe ser superior a 5 UNT y estará idealmente por debajo de 1 UNT (OMS, 2013).

Alcalinidad.

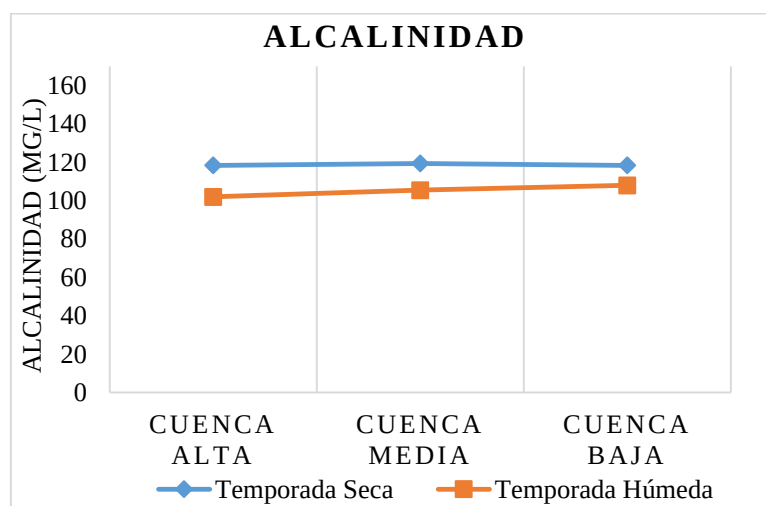


Figura 19. Representación gráfica de valores promedio del parámetro alcalinidad (mg/L CaCO_3) para temporada seca y húmeda. Adaptado de Barrero & Martinez, 2018.

La capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones se conoce como alcalinidad, y se encuentran muy ligado con el parámetro del pH y dureza por lo que en la quebrada la Argentina, se registraron valores con poca variación entre los puntos de muestreos oscilando 102 y 108 mg/L en la temporada húmeda. Por otro lado se registraron mayores valores de alcalinidad en temporada seca los cuales oscilaron entre los 118,5 y 120 mg/L, esto influenciado por la disminución del caudal y por consiguiente el aumento de la concentración de los carbonatos, principal sistema que determina la alcalinidad en las aguas superficiales, que se originan generalmente del desgaste y disolución de rocas en la cuenca que contienen carbonatos tales como la piedra caliza (Massol, 2014). El exceso de estos minerales provocaría turbiedad debido a su suspensión, reduciendo la capacidad del ecosistema para mantener la vida.

Según el rango de alcalinidad propuesto por Kevern en (1989) en términos generales la microcuenca La Argentina se encuentra con una alcalinidad media puesto que los datos obtenidos oscilan dentro del rango de 75 y 150 mg/L CaCO_3 .

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

En Colombia, en la Resolución 2115 del 2007, el valor máximo aceptable para este parámetro, que permita considerarla apta para consumo humano es de 200 mg/L CaCO_3 . Como se pudo observar, la microcuenca La Argentina no registro datos superiores a este valor máximo establecido.

Datos obtenidos de parámetros requeridos para el desarrollo de índice de calidad del agua y de contaminación (ICOMI – ICOMO)

Índice de calidad del agua (ICA).

En las siguientes tablas (11,12,13) se exponen los datos obtenidos de los parametros tanto fisicos, quimicos y microbiologicos necesarios en el tratamiento del indice de calidad del agua y de contaminación, en los tres diferentes tramos y para las dos temporadas evaluadas.

Tabla 11.

Media aritmética resultante del duplicado, de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para cada temporada de estudio, requeridos en el Índice de Calidad del Agua.

Parámetros		Unidades	T. Húmeda			T. Seca		
			Cuenca Alta	Cuenca Media	Cuenca Baja	Cuenca Alta	Cuenca Media	Cuenca Baja
Microbiológicos	Coliformes fecales	NMP/100mL	<1,8	24,95	9,4	10	31	98
Químicos	pH	unidad pH	8,5	8,665	8,51	8,8	8,44	8,62
	DBO ₅	mg/L	<5	<5	<5	<5	<5	<5
	Nitratos	mg/L	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3
	Fosfatos	mg/L	0.10	1,115	0,32	0,15	0,17	0,23
	Sólidos disueltos totales	mg/L	378,55	378,21	364,48	399,65	395,97	389,94
Físicos	Oxígeno Disuelto	% saturación	90	82,5	80	73,5	74	78,5
	Cambio temperatura	°C	1,9	1	1,05	0,5	0,6	0,75
	Turbiedad	NTU	50	13	45	1,35	1,75	1,5

Nota: se demuestra el promedio aritmetica de los parametros registrados en las dos temporadas. Adaptado de Barrero & Martinez, 2018.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

Índices de contaminación (ICO's).**Tabla 12.**

Media aritmética resultante del duplicado, de los parámetros fisicoquímicos requeridos en el Índice de contaminación por mineralización (**ICOMI**) – Temporada seca y húmeda

Parámetro	Unidades	Temporada húmeda			Temporada seca		
		Cuenca Alta	Cuenca Media	Cuenca Baja	Cuenca Alta	Cuenca Media	Cuenca Baja
Conductividad	μS/cm	565	564,5	544	596,5	591	582
Dureza	mg/L	359	340,5	367	370	361	365
Alcalinidad	mg/L	102	105,5	108	118,5	119,5	118,5

Nota: promedio aritmetica de los parametros fisicoquimicos registrados en las dos temporadas para la realizacion del ICOMI. Adaptado de Barrero & Martinez, 2018.

Tabla 13.

Media aritmética resultante del duplicado, de los parámetros fisicoquímicos requeridos en el Índice de contaminación por materia orgánica (**ICOMO**) – Temporada seca y húmeda

Parámetro	Unidades	Temporada húmeda			Temporada seca		
		Cuenca Alta	Cuenca Media	Cuenca Baja	Cuenca Alta	Cuenca Media	Cuenca Baja
DBO ₅	mg/L	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Coliformes totales	NMP/100mL	12,7	1,9	7,4	14,05	2,4	9,4
Oxígeno disuelto	%	90	82,5	80	73,5	74	78,5

Nota: promedio aritmetica de los parametros fisicoquimicos-microbiologicos registrados en las dos temporadas para la realizacion del ICOMO. Adaptado de Barrero & Martinez, 2018.

Estimación de índice de calidad del agua.**Tabla 14.**

Valores de indice de calidad del agua, microcuenca La Argentina

ICA								
Descriptor	Cuenca Alta	Escala de Color	Descriptor	Cuenca Media	Escala de Color	Descriptor	Cuenca Baja	Escala de Color
Temporada Húmeda								
Aceptable	78,77	Verde	Regular	69,06	Amarillo	Aceptable	73,21	Verde
Temporada Seca								
Aceptable	76,29	Verde	Aceptable	75,35	Verde	Aceptable	72,98	Verde

Nota: valores de los indices de calidad de agua NFS, apartir de los registros obtenidos en campo y laboratorio de los parametros evaluados. Adaptado de Barrero & Martinez, 2018.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

El índice de calidad del agua en las mejores condiciones, llega a tener un valor asignado de 1 o 100 y conforme la calidad disminuye este va adquiriendo un menor valor próximo a cero. Como se puede identificar en la tabla; un Índice bueno de calidad del agua corresponde a un rango de entre 0.91 a 1, lo que significa que esta agua posee una alta diversidad de vida acuática; mientras más disminuye el valor del ICA, la diversidad de la vida acuática decrece, hasta ser nula, con el aumento en concentración de contaminantes. De este modo, las aguas con un ICA de categoría aceptable poseen una capacidad moderada para albergar vida acuática, de igual manera permite el contacto directo con ella para el desarrollo de actividades domésticas y recreativas. Al tener un ICA de categoría regular, se aumenta el crecimiento de algas y por esta razón se tiene menor diversidad acuática. Cuando existe un ICA de categoría mala esta agua puede presentar problemas de contaminación por lo que la vida acuática es baja. Finalmente si se presenta una categoría muy mala del ICA, esto representa que solo un número limitado de organismos acuáticos poseen vida en esas condiciones y además posee muchas limitaciones para su uso, por lo que se puede considerar que no es apta para las actividades que implican el contacto directo con ella, tal como para la recreación o peor aún para el consumo humano (Carrasco, 2014).

A partir de lo dicho previamente, y del análisis del ICA de la tabla 14, se observa que, en temporada húmeda, cuenca alta y baja pertenecen a la escala aceptable, y cuenca media a la escala regular. No obstante, el valor obtenido en cuenca media es de 69,06, muy cerca al rango de la escala aceptable. De este modo, como se evidencia, los ICA en temporada seca van disminuyendo conforme la trayectoria de la microcuenca. No obstante, la disminución a lo largo del curso no es significativa. En terminos generales se observa una conducta semejante, donde los ambitos numericos obtenidos en las tres cuencas de la microcuenca, se sitúan dentro del rango de la escala aceptable. Con base en lo anterior y los resultados arrojados por el índice de calidad del agua analizado en el presente proyecto, se encontro que la microcuenca quebrada La Argentina presenta unas condiciones aceptables de calidad del agua. No obstante, el minimo valor obtenido registra un deterioro poco significativo, como consecuencia de la actividad antropica a baja escala que se desarrolla en la zona de estudio. Estas condiciones generales de calidad del agua permiten el adecuado desarrollo de vida acuatica y el contacto directo con el agua.

Asimismo, los resultados fisicoquimicos y microbiologicos indicaron que los parametros con mayor variacion espacio-temporal en los diferentes tramos de la microcuenca La Argentina fueron coliformes fecales y porcentaje de oxigeno disuelto, los que tienen la mas alta significancia en

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

relacion con el valor de los pesos asignados en el índice NSF aplicado. Esta variación de porcentaje de oxígeno disuelto puede ser el resultado de las condiciones hidráulicas del cauce, el cual de acuerdo a las características morfológicas, permiten una buena oxigenación del agua de este recurso. Sumado a lo anterior se estima que la variación presentada en los coliformes fecales se debe al aporte de los ciclos naturales del recurso y a la contribución antrópica (desarrollo de actividades domésticas, ganaderas y piscícolas) que aunque se desarrollan en proporciones relativamente bajas, representan determinado grado de implicancia. Sin embargo, estas concentraciones se encontraron dentro de los rangos o valores establecidos por la normatividad colombiana específica para agua potable y consumo humano, lo que permite aludir condiciones de calidad del agua aceptables.

Estimación de índices de contaminación.**Tabla 15.**

Valores de índice de contaminación (ICOMI – ICOMO) microcuenca La Argentina

ICO's								
	Descriptor	Cuenca Alta	Escala de Color	Descriptor	Cuenca Media	Escala de Color	Descriptor	Cuenca Baja
Temporada húmeda								
ICOMI	Alto	0,753		Alto	0,759		Alto	0,763
ICOMO	Ninguno	0,18		Bajo	0,205		Bajo	0,213
Temporada seca								
ICOMI	Alto	0,78		Alto	0,783		Alto	0,781
ICOMO	Bajo	0,235		Bajo	0,233		Bajo	0,218

Nota: valores de los índices de calidad de agua ICOMO-ICOMI, apartir de los registros obtenidos en campo y laboratorio de los parámetros evaluados. Adaptado de Barrero & Martinez, 2018.

En la tabla anterior, se ilustra la estimación de los índices de contaminación desarrollados. El rango establecido para los ICO's se encuentra de 0-1. Índices próximos a cero reflejan muy baja contaminación por mineralización e índices cercanos a 1, lo contrario. En el caso del índice de contaminación por mineralización (ICOMI) no se presentan cambios considerables en el tiempo. Los valores obtenidos demuestran que la microcuenca quebrada La Argentina presenta contaminación alta por mineralización. Teniendo en cuenta que este índice relaciona parámetros

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

fundamentales como conductividad, dureza y alcalinidad, permite aludir la presencia de contenidos de magnesio y calcio. Lo anterior se corrobora con las concentraciones obtenidas de dureza en la microcuenca quebrada La Argentina. Sumado a lo anterior, es importante anotar que las concentraciones de sólidos disueltos en la microcuenca son significativas, superando la mitad del valor recomendado por la Organización Mundial de la Salud. Lo anterior, principalmente por la geomorfología presente en esta zona.

Por otro lado, el índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO) e igual que en la mineralización, se expresa en diferentes variables fisicoquímicas las cuales son, demanda bioquímica de oxígeno, coliformes totales y porcentaje de saturación de oxígeno disuelto. En la tabla 15, se observa que el índice de contaminación por materia orgánica para las cuencas alta, media y baja de la microcuenca en las temporadas evaluadas, se acercan a cero. Lo que demuestra que la microcuenca quebrada La Argentina presenta contaminación baja por materia orgánica. Estos resultados se deben principalmente a la mínima variación y concentraciones obtenidas de los parámetros requeridos para su tratamiento. La DBO hace presente una baja carga de contaminantes orgánicos que pueden llegar a tener origen de desechos domésticos, agrícolas, o industriales a gran escala o en grandes proporciones. Esta baja presencia de desechos no permite que el porcentaje de oxígeno en el agua descienda dramáticamente generando grandes afectaciones para la vida y el medio. No obstante, no se rechaza la relación que tienen los valores obtenidos en el índice con las actividades agrícolas, pecuarias y domésticas (Vereda La Argentina) desarrolladas en la zona.

Formulación de propuestas de gestión, dirigidas a la conservación del recurso hídrico

Luego de la revisión de información secundaria y de la evaluación de la calidad del agua a través de los ICA's de la microcuenca quebrada la argentina, se llega a la cuarta fase concluyente del estudio, en el cual se generaron propuestas y elementos de buen uso y aprovechamiento de la microcuenca acoplada a la situación real de la región, desarrolladas dentro de un marco normativo viable.

Las propuestas, involucran distintos ámbitos; no solo la comunidad, sino también los entes gubernamentales e instituciones encargadas de la administración de la quebrada la Argentina.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

A continuación, se trazan las diferentes estrategias y acciones relacionadas con el manejo, aprovechamiento y conservación de la microcuenca.

1). *Institucional*: como punto de partida, los entes gubernamentales tales como la CAR, Acueducto Municipal, Secretaria de Agricultura y Medio Ambiente, tienen la máxima responsabilidad de impulsar estrategias con objetivos orientados al control y seguimiento continuo de las condiciones de calidad de la microcuenca La Argentina, mediante monitoreos continuos de parámetros físicos, químicos, biológicos y microbiológicos, con el fin de generar bases de datos y registros cuantitativos, que permitan conocer cambios y comportamientos hídricos en el tiempo. Es de suma importancia que la ejecución de dichas estrategias incluya personal capacitado y tecnología adecuada, para así proporcionar información confiable. Sumado a lo anterior, la articulación de procesos de planificación como: los POMCAs, POT, EOT, Planes de Desarrollo Municipal y Departamental, PGAR, y planes de gestión del riesgo.

Como se expuso anteriormente, las condiciones aceptables de calidad del agua de la microcuenca, indican una muy baja intervención o alteración por el hombre. Por este motivo, la construcción y ejecución de las estrategias y planes, deben tener como pilares fundamentales el uso eficiente, aprovechamiento y conservación. Asimismo, promover canales de divulgación optima de estudios realizados con la comunidad asentada en la zona de influencia, con el fin de mitigar o reducir los impactos generados al agua y el ecosistema en general.

2). *Comunidad*: El manejo adecuado de una cuenca hidrográfica depende del uso racional que se haga de los recursos naturales agua, suelo, flora y fauna y de la interacción de estos con el hombre que los utiliza y que existen dentro de sus linderos. De aquí que se considere que el principal protagonista de la cuenca es el hombre, pues es el quien decide el tratamiento y manejo que se va a dar a los recursos naturales involucrados en ella (Triana & Lopez, 1998). Es por esta razón que la vereda La Argentina cumple un papel muy importante en la ejecución de planes de manejo y conservación del recurso hídrico, a partir de la sensibilización y concientización del valor del agua y de su entorno. Lo anterior, mediante talleres y cursos teórico – prácticos comprensibles, que adopten las problemáticas actuales generadas en la microcuenca derivadas de sus actividades productivas primarias.

Una comunidad capacitada identifica racionalmente los problemas que presenta la microcuenca, proponiendo alternativas o soluciones que llevadas a la práctica mancomunadamente con los entes gubernamentales logran un mayor desarrollo social y ambiental en la zona.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

3). *Uso productivo*: en este aspecto se encuentra ligado principalmente a la gestión integral del recurso hídrico, en lo que concierne con la actividad agropecuaria, donde las instituciones gubernamentales capaciten las familias campesinas y promuevan el uso de tecnologías limpias, estrategias eficientes de riego y la reducción de uso de fertilizantes que tienen componentes nocivos contaminantes del agua y del suelo. Por otra parte, impulsar los cultivos orgánicos donde se haga uso de abonos naturales, reduciendo costos de producción y aumentando sus ingresos económicos.

Ahora bien, en el sector pecuario, es necesario llevar un inventario de las áreas utilizadas para la cría de ganado vacuno, para así generar planes de rotación de pastos y reducir la sobrecarga en el suelo, disminuyendo la erosión principalmente en la cuenca media-baja de la microcuenca en donde más se presenta esta problemática. Por último, el sector piscícola, actividad económica presente en la zona de influencia de la microcuenca, se deben promover estudios en el cual se realice un diagnóstico del impacto de esta actividad en la misma y alternativas para reducir el volumen del caudal usado. Por otra parte se debe impulsar la generación de planes de manejo ambiental para esta actividad como estrategia alineada hacia la sostenibilidad para la generación de valor, la reducción de residuos, la mitigación del impacto ambiental y la diversificación de la producción (Bohorquez, 2015).

4). *Ecoturismo*: actualmente dentro del área de la microcuenca se ha venido fomentando el senderismo ecológico (avistamiento de aves), actividad congruente por la abundancia de especies de aves. Es necesario dar un enfoque pedagógico en colegios, universidades y demás grupos ecológicos de la región, con el fin de crear conciencia, comprensión y compromiso con los recursos naturales. De este modo, destacar la importancia de la microcuenca, haciendo énfasis en la caracterización y conservación de la riqueza (hídrica y biológica) de la zona.

Ahora bien, las condiciones de calidad del agua de la microcuenca, permiten el contacto directo con la misma. Esto permite el uso recreativo y lúdico, lo que se considera como potencial atractivo turístico.

Por su parte, el ecoturismo aumentaría la participación de la comunidad asentada, siendo esta fuente de ingresos económicos, lo que mejoraría la calidad de vida de los mismos, provocando indirectamente un sentido de pertenencia y admiración de la riqueza natural.

Es necesario que las empresas del sector turístico y agencias desarrollen programas publicitarios, venta de paquetes de servicios, e iniciativas de conceder microcréditos a los

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

habitantes de la zona con el objetivo de que adapten sus viviendas al turismo y, de este modo, cuenten con una alternativa de subsistencia diferente a la agricultura (Cabrera, 2006).

5). *Cuidado de zonas estratégicas*: dentro de la microcuenca es crucial, el cuidado, control y conservación de ecosistemas estratégicos, principalmente cuenca media y baja donde se registra un alto impacto como consecuencia de la actividad humana, áreas tales como nacimientos de agua, en las áreas de bosques naturales y rondas de los ríos, dada la importancia que éstos presentan para absorber el agua en épocas de lluvia y dosificarla en tiempos de sequía. De este modo, llevar a cabo programas de reforestación y protección de zonas altas de la microcuenca con especies vegetales propias que presenten una adaptación óptima para los diferentes tipos de suelo del lugar, debido a que la cobertura de bosques solo es un 33% del área total de la quebrada, acobijados por una normatividad rigurosa, para así evitar que las actividades humanas continúen expandiéndose y causando mayor afectación sobre estas zonas de especial cuidado (Vega, 2011).

6). *Uso doméstico*: dentro de este ítem, es de suma importancia la cobertura del suelo y el acceso al agua potable para las poblaciones asentadas cercanas a la microcuenca. Conjuntamente las capacitaciones que promuevan el ahorro y control mediante la instalación de medidores, para obtener la mayor eficiencia en el uso del recurso. Adicionalmente, la creación de mecanismos de tratamiento de aguas residual por medio de plantas de tratamiento y pozos sépticos. Esto con el fin de reducir los posibles impactos por parte de vertimientos de aguas residuales a la microcuenca.

Conclusiones

- El mayor porcentaje de coberturas del suelo, está representado por el mosaico de pastos con espacios naturales (844,98 has), seguido de los bosques densos (817,99 has). Estos espacios naturales están conformados por las áreas ocupadas en relictos de bosque natural y densa en cuenca alta; arbustivas y bosques de galería en su mayoría, situados en cuenca media; y herbazales y pastizales característicos en la zona baja de la microcuenca. A partir de estos porcentajes se determina el bajo grado de intervención antrópica y esto se ve reflejado en la calidad del agua en el cuerpo hídrico. Por último, el área de la microcuenca posee gran cantidad de zonas no intervenidas, (2100,77 Has). Esto permite consolidar el desarrollo de caminatas ecológicas y avistamiento, con fines turísticos y pedagógicos (investigaciones).
- A partir de la identificación del uso actual se determinó que las actividades socioeconómicas desarrolladas en la microcuenca, se encuentran dentro de la clasificación actividades primarias. El desarrollo de las mismas en conjunto (actividades agropecuarias, pecuarias y piscícola) no superan las 22 has, de las 2517 has que representa el área total de esta microcuenca. Estas actividades se desarrollan en bajas proporciones para satisfacer necesidades básicas y progreso de las familias asentadas en esta área.
- El uso de sistemas de información geográfica (SIG) permitió realizar el análisis morfométrico de la microcuenca. La determinación de los parámetros área, perímetro, longitud y pendiente fue de gran importancia para interpretar el comportamiento hidrológico y comprender su incidencia ante la presencia de externalidades, como pueden ser, remoción en masa y crecientes repentinos. El tamaño de la microcuenca clasifica la quebrada La Argentina, como una cuenca pequeña (25,17 Km²). Esto permite despertar interés en futuros investigadores y entes gubernamentales para conducir actividades (estudios hidrológicos o hidráulicos), procesos de manejo, aprovechamiento, planeación y administración. Promoviendo la gestión integral de este recurso.
- Los índices de calidad del agua y de contaminación, presentaron una opción viable para la interpretación de las variables físicas, químicas y microbiológicas del programa de monitoreo, debido a que las diferentes variables o parámetros son combinados para general un valor que puede ser interpretado fácilmente tanto por expertos, como por la comunidad en general.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

- Dentro de la jerarquización y escala de color ICA-NSF que involucra el índice de calidad del agua, se encontró que para temporada húmeda, cuenca alta y baja presenta condiciones de calidad del agua aceptables, y cuenca media regular. No obstante, estas condiciones generales de calidad permiten el adecuado desarrollo de vida acuática de la microcuenca y permiten el contacto directo con la misma (recreación). A su vez, dichas condiciones de calidad se debe a las concentraciones obtenidas en los parámetros requeridos para su tratamiento; la DBO₅, coliformes fecales y porcentaje de oxígeno disuelto, representaron concentraciones favorables en el tiempo 5 mg/L, 1,98 – 98 NMP/100 mL, 73,5 – 90 %, respectivamente.

A su vez, la estimación de los índices de contaminación, permitieron destacar que la contaminación por mineralización es mayor que por materia orgánica. Los valores numéricos obtenidos demuestran que la microcuenca quebrada La Argentina presenta contaminación alta por mineralización. Lo anterior permite definir la presencia de contenidos de magnesio y calcio, y esto se corrobora con las concentraciones obtenidas de dureza (340,5 -370 mg/L CaCO₃) en la microcuenca quebrada La Argentina para las dos temporadas evaluadas. Asociado a lo anterior las concentraciones registradas de conductividad y alcalinidad se encontraron entre (544 – 696,5 µS/cm) y (102 – 119,5 mg/L) respectivamente. Por el contrario, en el caso del ICOMO, esta baja contaminación se asocia a las concentraciones propicias registradas en los parámetros DBO, y coliformes fecales.

- Se definió como componente importante la institucionalidad encargada de los asuntos referentes al recurso hídrico y la comunidad asentada en el lugar, con el fin de impulsar, incursionar y optar las diferentes alternativas y estrategias para el seguimiento continuo de las actividades socioeconómicas que se desarrollan, y posterior a esto, la evaluación de las condiciones de calidad del cuerpo hídrico, aplicando e implementando la gestión conjunta, para que las estrategias se puedan desarrollar a cabalidad y conseguir en esta medida, el manejo eficiente del recurso este importante recurso y su sostenibilidad.
- El fortalecimiento de la población está en función del acompañamiento y asesoramiento por parte de entidades o instituciones en pro de conversión a una comunidad moderna con un criterio empresarial amigable con el medio ambiente (ecoturismo) con el fin de contribuir al desarrollo integral y sostenible, permitiendo lograr un alto valor de bienestar y calidad de vida.

Recomendaciones

- Realizar estudios con grupos multidisciplinarios y fines investigativos referentes a biodiversidad (flora y fauna) presente en el área de estudio, como insumos bases para establecer lineamientos y realizar inventarios. Asimismo, como potencial atractivo para el desarrollo de turismo ecológico.
- Realizar monitoreos continuos en el recurso hídrico de manera sistemática y periódica, con el fin de tener registros sobre las condiciones de calidad del agua de la microcuenca, y tomar los correctivos pertinentes, permitiendo el accionar oportuno con miradas puestas en la conservación del recurso.
- Formular un plan de gestión de riesgo de la microcuenca, orientado a la gestión y monitoreo ante deslizamientos o crecientes repentinas. Lo anterior, debido a la susceptibilidad que tiene la microcuenca para presentar este tipo de problemáticas, afectando principalmente la población asentada en la zona.
- Aplicar estudios que incluyan metodologías biológicas en la evaluación de condiciones de calidad del agua, con el fin de observar y registrar cambios o alteraciones en los ecosistemas presentes en la microcuenca La Argentina, siendo el caso específico de los macro invertebrados acuáticos. Asimismo, incluir en estos estudios, metodologías robustas y/o técnicas analíticas para detectar presencia de minerales y metales pesados. Esto debido a que el índice de contaminación por mineralización estimado en el presente trabajo arroja datos relativamente altos, indicando contaminación, y siendo esto ratificado con las concentraciones de dureza registradas en el monitoreo realizado en las temporadas evaluadas.

Referencias Bibliográficas

A. d.-L. (1993). Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y otras disposiciones. Bogotá: Consulta la Norma.

Alatorre, N. (2012). La microcuenca como elemento de estudio de la vulnerabilidad ambiental. Centro de estudio en geografía humana, Colegio de Michoacán. A.C

Alcaldía de Bogotá, Decreto 1594 de 1984. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Bogotá.

Bain, M. B., & Stevenson, N. J. (1999). Aquatic habitat assessment. *Bethesda, Maryland: American Fisheries Society*, 1-216.

Behar, R., Zúñiga de Cardozo, M. D. C., & Rojas Ch, O. (1997). Análisis y valoración del índice de calidad del agua (ICA) de la NSF: casos ríos Cali y Meléndez.

Bohórquez Giraldo, L. C. (2015). *La importancia del plan de manejo ambiental para la formulación de estrategias de aprovechamiento industrial y económico de los residuos de la cadena piscícola* (Bachelor's thesis, Universidad Militar Nueva Granada).

Boyacioglu, H. (2007). Development of a water quality index based on a European classification scheme. *Book Water Sa*, 33(1), 101-106.

Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & O'Connor, M. F. (1972). A water quality index—crashing the psychological barrier. In *Indicators of environmental quality* (pp. 173-182). Springer, Boston, MA.

Cabrera, M. (2006). Ecoturismo: una alternativa para conocer el mundo. *Revista Compromiso empresarial*, 8-12.

Campos, A. (2013). Evaluación de el estado actual de la calidad del agua de la quebrada la Jaramilla, municipio La Tebaida, departamento del Quindío. Tesis de Maestría, Universidad de Manizales.

Carrasco, M. G. (2014). “Diagnóstico de la calidad del agua de la microcuenca del río congüime y diseño de una propuesta de mitigación para la zona crítica establecida mediante el índice de calidad del agua (ica brown) en la provincia de zamora chinchipe cantón paquisha.” Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

Castro, M., Almeida, J., & Ferrer, J. (2014). Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencia a nivel global. *Revista Ingeniería Solidaria*, 10(17), 111-124.

Cauvin , A., & Diddier, J. (2003). Distribución de aguas en las aglomeraciones. Reverte S.A, 461.

Chapman, D. V., & World Health Organization. (1996). Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring.

Clara, M. R. (2005). Análisis de la calidad del agua para consumo humano y percepción local de las tecnologías apropiadas para su desinfección a escala domiciliaria, en la microcuenca El Limón, Tesis de Maestría, San Jerónimo, Honduras. Turrialba, Costa Rica

ConAgua. (2011). *Agua en el Mundo* - Capítulo 8. México: Estadísticas del agua en México.

Concejo Municipal de Villavicencio. (29 de Diciembre). Acuerdo No. 287 del 2015, "por medio del cual se adopta el nuevo plan de ordenamiento territorial del municipio de villavicencio y se dictan otras disposiciones". Villavicencio.

CORMACARENA, UAESPNN, & CAEMA. (2009). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Guatiquía. Villavicencio: Contrato de Cooperación Científica No. 001-2008 .

Decreto N° 32327-S. (2005). Reglamento para la Calidad del Agua Potable. El presidente de la república y la ministra de salud.

Elmore, B., & Welch , J. (2010). Condiciones físicas, químicas, y biológicas de aguas superficiales en monteverde, Costa Rica. Programa de Adopte-Una-Quebrada Monteverde.

Espinoza, C. (2005). Calidad del agua y contaminación de agua subterránea. Chile: Hidráulica de aguas subterráneas y su aprovechamiento.

Becerra, E. H. (1993). *Monitoreo y evaluación de logros en proyectos de ordenación de cuencas hidrográficas* (Vol. 24). Food & Agriculture Org.

Faustino, J. (2006). Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas. Turrialba – Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 400 p.

Fernández, L., & Solano, N. (2005). Índices de Calidad y de contaminación del Agua. Universidad de Pamplona.

Fernández, A., & Gonzalo, O. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca hidrográfica chinchao, distrito de Chinchao, provincia Huanuco, Región Huanuco. Tingo María: Universidad Nacional Agraria de la Selva, facultad de recursos naturales renovables, Departamento Académico de Ciencias Ambientales.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

Fernández, N., Ramírez, A., & Solano, F. (2003). Índices fisicoquímicos de Calidad del Agua. Un estudio comparativo. Universidad del Valle - Cinara: Conferencia Internacional Usos Múltiples del Agua: Para la Vida y el Desarrollo Sostenible, *Revista Agua*.

Gómez, E. U. (2002). Educación ambiental con enfoque en manejo cuencas y prevención de desastres. San Nicolás, Estelí, Tesis Pregrado, Universidad Nacional Agraria, Facultad de recursos naturales y del ambiente - Departamento de manejo cuencas y gestión ambiental.

González Meléndez, V., Caicedo Quintero, O., & Aguirre Ramírez, N. (2013). Aplicación de los índices de calidad de los índices de calidad del agua NSF, DINIUS y BMWP. *Revista de gestión y ambiente*, 16(1), 97-108.

Gonzalez, L. F., Lozano, L., & Paramo, A. (2004). Manejo y conservación de la microcuenca quebrada la vieja, cerros orientales de Bogotá. *Redalyc*, 95-103.

Goyenola, G. (2007). *Guía para la utilización de las Valijas Viajeras – Oxígeno Disuelto*. Obtenido de Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos; RED MAPSA: <http://imasd.fcien.edu.uy/>

Guillén, V., Teck, H., & Yeomans, J. (2012). Microorganismos como bioindicadores de la calidad del agua. *Tierra tropical: sostenibilidad, ambiente y sociedad*, Vol 8, 65- 93.

IDEAM. (2002). *Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – República de Colombia.

IDEAM. (2002). *Sistema de Información Ambiental de Colombia –SIAC- Primera generación de indicadores de la línea base de la información ambiental de Colombia*. Bogotá: ISBN 958-8067-08-1.

IDEAM. (2014). *Estudio nacional del agua: información para la toma de decisiones*. Bogotá: Ministerio de Medio Ambiente.

Ingeniería, Inmobiliaria, Construcción. (INGEICO). (2014). Mitigación de riesgo quebrada La Argentina. Recuperado el 12 de 08 de 2017 URL: <http://www.ingecoinco.com/>

Jiménez, M., & Velez, M. (2007). Análisis comparativo de indicadores de la calidad del agua superficial. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 14, 53 - 69 .

Landívar, I. d. (2003). Estado actual de los bosques en Guatemala. Gobierno de Guatemala: 68 pp.

Laureano, F., & Santos, J. (1997). *Evaluación de la calidad del agua del río San Juan, en el estado de Nuevo León* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

Martínez de Bascaran, G. (1976). El índice de calidad del agua. *Ingeniería Química*, 45- 49.

Massol , A. (2014). Manual de la Ecología Microbiana. Puerto Rico: Recinto Universitario de Mayaguez.

Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2007). Decreto 1575: Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua. Bogotá.

Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 631: Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Bogotá.

Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. (2012). Decreto 1640: por la cual se reglamentan los instrumentos de planificación, ordenación y manejo de cuencas hidrográficas. Bogotá.

OECD. (2003). *Environmental Indicators: Development, Measurement and Use*. Obtenido de <http://www.oecd.org/environment/>

OMS. (2013). *Guías para la calidad del agua potable*. Ginebra: Vol. 1 Tercera Edición.

Orozco, C. (2015). Cobertura y uso del suelo en la subcuenca del Río las Piedras, departamento del Cauca. Tesis de especialización, Universidad de Manizales .

Ott, W. (1978). *Environmental Indices. Michigan: Theory and Practice*, Aa Science, Ann Arbor,.

Palacios, L. (2011). UN supervisa plan de agua potable para Cundinamarca. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Panachlor. (2014). *water Maker LA*. Obtenido de [http://panachlor.com/wp-content/uploads/pdf/Solidos-Disueltos-Totales-\(TDS\)-Electroconductividad-\(EC\).pdf](http://panachlor.com/wp-content/uploads/pdf/Solidos-Disueltos-Totales-(TDS)-Electroconductividad-(EC).pdf)

Pulido, M. D. P. A., de Navia, S. L. Á., Torres, S. M. E., & Prieto, A. C. G. (2005). Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua. *Nova*, 3(4)

Ramírez, A., Restrepo, R., & Viña, G. (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. formulaciones y aplicación. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, Vol 1. N°. 3(19), 135 - 153.

Ramírez, C. A. (2011). Calidad del agua evaluación y diagnóstico. Medellín: Universidad de Medellín.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

Resolución 2115. (22 de Junio de 2007). Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

Rivas, L., & Antonio, W. (2013). *Calidad fisicoquímica del agua*. Bogotá: Grupo de Investigaciones en Ambiente y Sostenibilidad, Universidad Piloto de Colombia.

Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, P. B. (2014). *Metodología de la Investigación*. México: Sexta edición.

Rodriguez, C. I., Duque, C., Calvache, M. L., & López, M. (2010). Causas de las variaciones de la conductividad eléctrica del agua subterránea en el acuífero Motril-Salobreña, España. *Sociedad Geologica.*, 5.

Rodríguez, C. Z. (2012). Gobernabilidad sobre el recurso hídrico en Colombia: entre avances y retos. *Gestión y Ambiente*, 15(3), 99-112.

Rodriguez, C., & Silva, M. (2015). Calidad del agua en la microcuenca alta de la quebrada Estero en San Ramón de Alajuela, Costa Rica. *Revista Pensamiento Actual*, 85-97.

Rogers, P. (2002). *Gobernabilidad del agua en América Latina y en el Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo.

Ruiz, N. E., Escobar, Y. C., & Escobar, J. C. (2007). Revisión de parametros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Revista Ingeniería e Investigación*, Volumen 27 (3), 172 -181.

Saavedra, C. (2009). *El manejo, protección y conservación de las fuentes de agua y recursos naturales*. Bolivia: Ministerio del Agua.

SIAT-AC. (28 de Enero de 2018). *Sistema de información Ambiental Territorial de Amazonia Colombiana*. Obtenido de <http://siatac.co/web/guest/productos/coberturasdelatierra/>

Superintendencia Delegada para Acueducto, Alcantarillado y Aseo - Superservicios. (2014). *Informe Diagnóstico de la calidad del agua*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.

Tambo, C. S. (2015). Propuesta de un índice de calidad del agua como herramienta de gestión para los humedales capitalinos. Tesis de pregrado, Bogota D.C: Universidad Santo Tomás.

Thompson, B., & Postel, B. (2005). Watershed protection: capturing the benefits of nature's water supply services. *Natural Resources Forum*(29), 98-108.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AGUA

Torres, P., Cruz, C. H., & Patiño, P. J. (2009). Índices de calidad del agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano: Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 79-94.

Triana, M., & López, O. (1998). Plan para el manejo ambiental de la microcuenca "Quebrada la Resaca" Municipio de Belén de los Andes Caquetá. Florencia: OIMIT-CEUDES.

Universidad de Pamplona. (2010). ICA's e ICO's de importancia Mundial. Pamplona: Capítulo III.

Universidad del Norte. (2012). *Criterios de aceptación de muestras de agua para el análisis fisicoquímicos*. Barranquilla: Gestión técnica para la evaluación de muestras.

Varcárcel, L., Alberro, N., & Frias, D. (2009). El Índice de Calidad del Agua como herramienta para la gestión de los recursos hídricos. *Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente*. 9(16)

Vega, H. (2011). Propuesta Para Promover el Manejo Eficiente del Recurso Hídrico en la Microcuenca Alta del Río Botello en el Municipio de Facatativá, desde el Marco de la Gestión Integral del Agua. Tesis de Maestría, Bogotá D.C: Pontificia Universidad Javeriana.

Villegas. (2004). Análisis del conocimiento en relación agua-suelo-vegetación. Distrito Federal México: 79 Pag.

Zambrana, Y. (2008). *Plan de manejo y gestión de la subcuenca del río San Francisco: Matagalpa-Nicaragua* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Agraria, UNA).

Zamora, J. R. (2009). Parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio, pH, conductividad y temperatura del agua potable, analizados en conjunto con las Asociaciones Administradoras del Acueducto, (ASADAS), de cada distrito de Grecia, cantón de Alajuela, noviembre. *Pensamiento Actual*, 9 (12), 125-134.

Zhen, Y. (2009). Calidad Fisico-químico y bacteriológica del agua para el consumo humano de la microcuenca Quebrada Victoria Curubande, Costa Rica. Tesis de Pregrado, Guanacaste: Universidad Estatal a Distancia.

Zúñiga, Ó. O., Cobas, G. G., Rivera, J. G., & Hernández, K. T. (2016). Evaluación de la turbiedad y la conductividad ocurrida en temporada seca y de lluvia en el río Combeima (Ibagué, Colombia). *Ingeniería Solidaria*, 18.