UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Evaluación de la calidad del agua en el municipio de Ciudad Bolívar (Antioquia) mediante la determinación del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA)

Sebastián Marín Gómez

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniero Sanitario

Modalidad de Práctica

Semestre de industria

Asesores

Mauricio Correa, Magíster (MSc) en Ingeniería Ambiental

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Seleccione pregrado

Medellín, Antioquia, Colombia

2026

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
1803

Cita	Marín Gómez [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] Marín Gómez, “Evaluación de la calidad del agua en el municipio de Ciudad Bolívar (Antioquia) mediante la determinación del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA).”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Sanitaria, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, Seleccione año



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado, que representa la culminación de mi formación como Ingeniero Sanitario, en primer lugar, a mis padres que a pesar de las circunstancias y dificultades que la vida pudo presentar, siempre tomaron la decisión de construir para mis hermanos y para mí un mejor futuro. No solo nos brindaron apoyo económico, sino que también nos enseñaron, con su ejemplo, el valor de la resiliencia, la valentía y la perseverancia en los momentos más difíciles.

Asimismo, dedico este logro a las personas que me acompañaron a lo largo de este hermoso camino. A mi querida novia, Valentina, quien estuvo presente brindándome fortaleza y apoyo en los momentos más complejos, recordándome siempre la importancia de seguir adelante.

A mis amigos, que con el paso del tiempo dejaron de ser solo compañeros para convertirse en hermanos, compartiendo alegrías, retos y aprendizajes que hicieron de esta etapa una experiencia inolvidable.

Finalmente, a aquellos maestros que, con dedicación y compromiso, no solo se esforzaron por transmitir conocimientos académicos, sino también por enseñarnos valiosas lecciones para afrontar la vida con responsabilidad, ética y pasión.

A todas las personas que, de una u otra manera, hicieron parte de este camino, les expreso mi más sincero y profundo agradecimiento.

Agradecimientos

Agradezco profundamente la obtención de este título de Ingeniero Sanitario a mi alma mater, institución que me abrió sus puertas y me permitió formarme no solo en el ámbito académico, sino también como una persona con pensamiento crítico, con sólidos valores éticos y con un profundo compromiso social. En sus aulas encontré las herramientas necesarias para construir mi proyecto de vida, tanto en lo personal como en lo profesional.

Agradezco también a mi facultad de ingeniería, donde encontré mis primeros propósitos de vida académica, a luchar por los sueños y a siempre ser esa persona prest al dialogo y ayudar. Asimismo, agradezco a docentes involucrados en mi desarrollo personal y académico.

Finalmente, agradezco al laboratorio G-LIMA por apoyar mi proceso de culminación de carrera, a mis compañeros profesionales que siempre estuvieron prestos al dialogo y a brindar una ayuda, o asesoría sin esperar nada a cambio, a mis compañeros auxiliares que fueron ese apoyo incondicional, y que acompañaron con las mismas obligaciones este camino.

Finalmente, y más importante, agradezco a mi familia y personas que estuvieron de forma incondicional, que siempre sostuvieron una vos de aliento y resiliencia, sin ellas no fuera posible esto.

.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 10
ABSTRACT 11
I. INTRODUCCIÓN 12
II. OBJETIVOS 13
A. Objetivo general 13
B. Objetivos específicos 13
III. MARCO TEÓRICO 14
IV. METODOLOGÍA 22
V. ANÁLISIS DE RESULTADOS 24
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 34
AGRADECIMIENTOS. 35
REFERENCIAS 36
ANEXOS 39

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 1. Valores o criterios máximos aceptables para características físicas presentes en el agua para consumo humano……...18

Tabla N°2. Criterios máximos aceptables para características Químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana…….....19

Tabla N°3. Características Químicas que tienen implicación sobre la salud humana……...20

Tabla N°4. Características Químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana……20

Tabla N°5. Características microbiológicas……..22

Tabla N°. 6. Clasificación según nivel de riesgo IRCA……22

Tabla N°7. Puntajes de riesgo para parámetros asignados en la resolución 2115 de 2007……...23

Tabla N°8. Resultados campaña 1 con su puntaje de riesgo asociado…….....27

Tabla N°9. Resultado campaña 2 con su puntaje de riesgo asociado……...29

Tabla N°10. Resultados campaña 3 agua potable con su puntaje de riesgo asociado…….30

Tabla N°11. Resultados ponderados agua natural superficial……..31

Tabla N°12. Composición química de las aguas residuales del beneficio de café……...32

LISTA DE FIGURAS

Fig 1. Ubicación Quebrada los Monos, Municipio de Ciudad Bolívar, Antioquia, Colombia…….22
Fig 2 . Mapa cosecha cafetera por Federación Nacional de Cafeteros de Colombia……..27

LISTA DE GRAFICAS

Grafico 1. pH para las tres campañas…….31
Grafico 2. Sulfatos para las tres campañas…….31

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

Cms.	Centímetros
Esp.	Especialista
ERIC	Education Resources Information Center
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MP	Magistrado Ponente
MSc	Magister Scientiae
Párr.	Párrafo
PhD	Philosophiae Doctor
PBQ-SF	Personality Belief Questionnaire Short Form
PostDoc	PostDoctor
UdeA	Universidad de Antioquia
IRCA	Índice de riesgo de calidad del agua
OMS	Organización mundial de la salud

RESUMEN

Este estudio evalúa la calidad del agua en la quebrada Los Monos, ubicada en la zona rural del municipio de Ciudad Bolívar, Antioquia la cual se encuentra intervenida por vertimientos asociados a la producción cafetera durante las etapas de crecimiento y cosecha. La evaluación se realiza mediante la aplicación del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA), con el fin de caracterizar las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas, identificar variaciones temporales y clasificar el riesgo sanitario asociado. La metodología incluye muestreos en campo, análisis de laboratorio y la comparación de resultados entre diferentes fases del proceso cafetero. Los resultados constituyen un diagnóstico técnico del impacto sanitario generado por la actividad cafetera y sirven como base para la formulación de medidas orientadas a la gestión, control y protección de los recursos hídricos del municipio.

Palabras clave — **Aguas miel, producción, variación temporal, procesos hidromecánicos, mucilago, mitaca, calidad del agua, control y vigilancia, parametrización.**

ABSTRACT

This study evaluates water qualityin Los Monos stream, located in the rural area of the municipality of Ciudad Bolivar, Antioquia, which is affected by discharges associated with coffee production during the grwin and harvesting stages. The assessment is carried out through the application of the Water Quality Risk Index (IRCA) in order to characterize physicochemical and microbiological conditions, identify temporal variations, and classify the associated sanitary risk.

The methodology includes field sampling, laboratory analysis, and the comparison of results cross different phases of the coffee production process. The results provide a technical diagnosis of the sanitary impac generated by coffee-related activities and serve as a basis for the formulation of mesasures aimed at the management monitoring, control, and protection of the municipality's water resources.

Keywords — Coffee processing wasterwater, coffee production, temporal variation, hydromechanical processing, coffee mucilage, secondary coffee harves (mitaca), water qulity, monitoring and control, parametrization.

I. INTRODUCCIÓN

La calidad del agua constituye un componente fundamental para la salud pública y la conservación de los ecosistemas, particularmente en zonas rurales donde los recursos hídricos son utilizados para consumo humano, actividades agrícolas y otros usos domésticos. En estos contextos, la contaminación de las fuentes superficiales representa un riesgo sanitario significativo para las comunidades que dependen directamente de ellas.

En el municipio de Ciudad Bolívar, la producción cafetera es una de las principales actividades económicas, generando empleo y desarrollo local. No obstante, este proceso productivo conlleva la generación de vertimientos líquidos, comúnmente denominados aguas mieles, caracterizados por altas concentraciones de materia orgánica, nutrientes y compuestos fenólicos, los cuales pueden deteriorar la calidad de los cuerpos hídricos receptores y afectar su aptitud para el consumo humano.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la calidad del agua en la quebrada Los Monos, ubicada en la zona rural del municipio de Ciudad Bolívar, fuente que abastece a la población rural y a la cabecera municipal. La evaluación se realiza mediante la aplicación del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA), con énfasis en las variaciones asociadas a las etapas de crecimiento y cosecha del café. El IRCA permite una valoración integral de la calidad del agua, considerando parámetros fisicoquímicos y microbiológicos relevantes para la protección de la salud pública.

La metodología del estudio comprende muestreos en campo y análisis de laboratorio, orientados a la identificación de zonas con mayor riesgo de contaminación y al análisis de la relación entre la actividad cafetera y la calidad del recurso hídrico. Los resultados del estudio permitirán cuantificar los niveles de contaminación física, química y microbiológica, identificar variaciones temporales en la calidad del agua y clasificar el riesgo sanitario asociado. Asimismo, servirán como base para la elaboración de mapas de riesgo y la formulación de recomendaciones técnicas orientadas a la gestión, control y uso sostenible de los recursos hídricos en el municipio.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Evaluar la calidad del agua de fuentes superficiales destinadas al consumo humano en el municipio de Ciudad Bolívar, Antioquia, mediante la determinación del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA).

B. Objetivos específicos

- Caracterizar las condiciones iniciales de los cuerpos hídricos en el municipio de Ciudad Bolívar mediante la toma de muestras y la identificación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos relevantes.

- Analizar las variaciones en la calidad del agua durante las diferentes etapas del proceso productivo del café (crecimiento y cosecha), determinando los cambios asociados a los vertimientos.

- Determinar el nivel de riesgo sanitario y ambiental de los cuerpos hídricos mediante la aplicación del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA).

III. MARCO TEÓRICO

El café es uno de los productos agrícolas más consumidos en el mundo [1] y representa un pilar fundamental tanto en la economía global como en los hábitos de consumo diario de millones de personas. Según estimaciones de la Organización Internacional del Café, entre 2021 y 2022 se consumieron aproximadamente 2.000 millones de tazas al día, lo que equivale a 170,3 millones de sacos de 60 kg [2]. En Colombia, alrededor de 2,7 millones de personas dependen directamente de la producción y el cultivo de café. La alta demanda ha posicionado al cultivo de café como un diferenciador económico, ya que, según estudios de la Organización Nacional del Trabajo, la caficultura genera 3,5 veces más empleo que los cultivos de arroz, maíz y papa, y diez veces más que la palma africana.

Antioquia es una región con más de 140 años de tradición cafetera y se consolida como uno de los principales departamentos productores del país. Actualmente, cuenta con aproximadamente 117.000 hectáreas sembradas de café, ocupa el segundo lugar en producción nacional y el tercero en volumen de exportaciones hacia mercados internacionales como Estados Unidos, Canadá, Japón y Alemania. Esta actividad se desarrolla en alrededor de 95.553 fincas cafeteras y vincula de manera directa a 76.543 caficultores, lo que evidencia su relevancia económica, social y territorial en la región [3]. Esta amplia cobertura productiva refleja no solo la importancia económica y social de la caficultura, sino también el nivel de intervención sobre los recursos naturales, en especial el recurso hídrico, cuya utilización es determinante durante el proceso de beneficio del grano.

El proceso de obtención del café comprende una serie de etapas orientadas a transformar el fruto en café pergamino seco, entre las que se incluyen la recepción y clasificación del café, el despulpado, la remoción del mucílago, el lavado, la clasificación y el secado [4]. De estas etapas, el beneficio húmedo es la que presenta la mayor interacción con el agua y, por tanto, la principal fuente de generación de efluentes líquidos. En las fases iniciales, la clasificación del fruto se realiza mediante sistemas hidromecánicos que utilizan agua para separar impurezas y frutos defectuosos según su densidad, mientras que etapas posteriores, como la remoción del mucílago y el lavado del grano, concentran la mayor demanda hídrica y la carga contaminante del proceso [5].

Durante el beneficio húmedo se generan aguas residuales conocidas como *aguas mieles*, caracterizadas por elevadas concentraciones de materia orgánica, cafeína, nutrientes y compuestos fenólicos, estos últimos provenientes principalmente de la pulpa y el mucílago del grano [6]. La descarga inadecuada de estos efluentes incrementa significativamente la carga contaminante sobre los cuerpos de agua receptores, favoreciendo procesos de eutrofización, disminución del oxígeno disuelto y alteraciones en las condiciones fisicoquímicas y biológicas de los ecosistemas acuáticos.

Si bien el desarrollo de tecnologías como el despulpado sin agua, el desmucilaginado mecánico y los sistemas de beneficio ecológico ha permitido reducir de manera sustancial el consumo de agua y la contaminación potencial generada, en muchas zonas cafeteras persisten prácticas tradicionales que continúan ejerciendo presión sobre los recursos hídricos. En este contexto, la caficultura se configura como una actividad con alto potencial de impacto ambiental, especialmente en regiones con elevada densidad de cultivos, lo que resalta la necesidad de evaluar y gestionar los riesgos asociados al vertimiento de aguas mieles, particularmente en relación con la protección de los cuerpos de agua superficiales y los usos del recurso para consumo humano y actividades agrícolas.

INDICE DE RIESGO DE CALIDAD DEL AGUA IRCA.

El Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA) es un indicador que determina el grado de riesgo de ocurrencia de enfermedades asociadas al consumo de agua que no cumple con las características físicas, químicas y microbiológicas establecidas para uso humano. Este índice, adoptado en Colombia a través del Decreto 1575 de 2007 y regulado por la Resolución 2115 de 2007, permite evaluar de manera integral la calidad del agua destinada al consumo humano, convirtiéndose en una herramienta clave para la vigilancia en salud pública y la gestión ambiental [7]. Esta normativa establece la asignación de puntajes de peligrosidad a las sustancias y parámetros presentes en el agua, lo que permite calcular el nivel de riesgo asociado a la calidad del recurso hídrico analizado y emitir un concepto técnico fundamentado a partir de los resultados obtenidos, contribuyendo así a la evaluación, gestión y garantía de la seguridad hídrica de las fuentes destinadas al consumo humano.

Para su cálculo, el IRCA asigna un puntaje de riesgo a cada parámetro físico, químico y microbiológico que no cumpla con los valores aceptables fijados en la normativa. Dichos puntajes

se suman y se expresan en una escala porcentual que clasifica la calidad del agua en cinco rangos: sin riesgo, riesgo bajo, riesgo medio, riesgo alto y riesgo inviable sanitariamente. A continuación, se presenta la ecuación para el cálculo del índice:

CALCULO DEL INDICE DE RIESGO DE CALIDAD DEL AGUA.

$$\%\text{IRCA}=\left|\frac{\sum \textit{puntaje de riesgo asignado a las caracteristicas No aceptables}}{\sum \textit{puntaje de riesgo asignado a todas las caracteristicas analisadas}}\right| \text{ x } 100\ \%$$

Ecuación 1.

Esta clasificación facilita la interpretación de los resultados y orienta la toma de decisiones sobre medidas correctivas, planes de mejoramiento y acciones de control por parte de las autoridades competentes y los prestadores del servicio de acueducto [8].

A continuación, y de acuerdo con los criterios normativos establecidos, se enumerarán los valores permisibles para las diferentes características físicas, químicas y microbiológicas del agua, con el fin de garantizar su calidad y cumplimiento con los estándares sanitarios vigentes.

CARACTERISTICAS FISICAS, QUIMICAS Y MICROBIOLOGICAS DE IMPORTANCIA PARA EL CALCULO DEL IRCA.

CARACTERISTICAS FISICAS:

Según el **Articulo N°2** de la Resolución 2115 de 2007 los valores permisibles para las características físicas del agua son:

Tabla N° 1. *Valores o criterios máximos aceptables para características físicas presentes en el agua para consumo humano.*

Caracteristicas fisicas	Expresadas como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Color Aparente	Unidades Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y Sabor	Aceptable o no Aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidaad Nefelometrica de Turbiedad (UNT)	2

De igual manera, al considerar otros valores relevantes, se relacionan los A**rtículos N.º 3 y N.º 4** con los límites permisibles para la conductividad eléctrica y el potencial de hidrógeno (pH), establecidos en 1000 µS/cm para la conductividad y en un rango de 6,5 a 9,0 para el pH. La conductividad eléctrica del agua corresponde a la capacidad del medio para transportar corriente eléctrica y se expresa comúnmente en µS/cm a una temperatura de referencia de 25 °C, estando directamente relacionada con la concentración de sales disueltas que, al disociarse, generan iones capaces de conducir la corriente. Dado que la solubilidad de las sales depende de la temperatura, la conductividad puede presentar variaciones asociadas a cambios térmicos del agua. En este sentido, un incremento superior al 50 % en la conductividad del agua fuente puede indicar una variación anómala en la concentración de sólidos disueltos totales, lo que constituye un posible indicio de contaminación o alteración en la calidad del recurso hídrico. Adicionalmente, este parámetro se encuentra estrechamente vinculado con la dureza del agua, la cual refleja la presencia de metales alcalinotérreos, principalmente calcio y magnesio, provenientes de la disolución de rocas y minerales, y se expresa generalmente en mg/L como CaCO3 [9]. Esta situación justifica la necesidad de realizar una inspección más exhaustiva y un seguimiento continuo para identificar el origen del cambio y adoptar las medidas correctivas correspondientes.

Los artículos N.º 5, 6 y 7 establecen los criterios y valores máximos permisibles para elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que pueden generar efectos adversos, implicaciones directas sobre la salud humana y consecuencias económicas significativas, así como impactos indirectos en la salud de la población. En las **Tablas N.º 3, 4 y 5** se presentan los

parámetros correspondientes a cada uno de estos artículos, los cuales constituyen la base normativa para la evaluación de la calidad química del agua destinada al consumo humano.

CARACTERISTICAS QUIMICAS.

Tabla N°2. *Criterios máximos aceptables para características Químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana.*

Elementos, compuestos Quimicos y mezclas de compuestos Quimicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Antimonio	Sb	0,02
Arsénico	As	0,01
Bario	Ba	0,7
Cadmio	Cd	0,003
Cianuro libre y Disociable	CN	0,05
Cobre	Cu	1
Cromo Total	Cr	0,05
Mercurio	Hg	0,001
Niquel	Ni	0,02
Plomo	Pb	0,01
Selenio	Se	0,01
Trihalometanos Totales	THM´s	0,2
Hidrocarburos Aromaticos Policiclicos	HAP´s	0,01

En disposición al artículo N°6 de la Resolución 2115 de 2007 se señalan en la **Tabla N°4** los compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen IMPLICACIONES sobre la salud humana:

Tabla N°3. *Características Químicas que tienen implicación sobre la salud humana.*

Elementos, compuestos Quimicos y mezclas de compuestos Quimicos que tienen implicaciones sobre la salud.	Expresados como	Valor máximo aceptable
Carbono organico Total	COT	5
Nitritos	NO^2-	0,1
Nitratos	NO^3-	10
Fluoruros	F^-	1

En última instancia se exponen características químicas habituales que tienen mayores consecuencias económicas indirectas sobre la salud humana que, según el Articulo N°7 son:

Tabla N°4. *Características Químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana.*

Elementos y compuestos Quimicos que tienen implicaciones de tipo económico	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Calcio	Ca	60
Alcalinidad Total	CaCO3	200
Cloruros	CL-	250
Aluminio	AL3+	0,2
Dureza Total	CaCO3	300
Hierro Total	Fe	0,3
Magnesio	Mg	36
Manganeso	Mn	0,1
Molibdeno	Mo	0,07
Sulfatos	SO4^2-	250
Zinc	Zn	3
Fósfatos	PO4^3-	0,5

CARACTERÍSTICAS MICROBIOLOGICAS.

El capítulo III de la Resolución 2115 de 2007 selecciona las técnicas para realizar análisis microbiológicos, asimismo, busca establecer los criterios y valores máximos aceptables desde el punto de vista microbiológico, los cuales son establecidos teniendo en cuenta los límites de confianza del 95% y para técnicas con habilidad de detección desde 1 Unidad Formadora de

Colonia (UFC) o 1 microorganismo en 100 cm3 de muestra. Los resultados de la normativa para los parámetros microbiológicos se encuentran en la **Tabla N°5.**

Tabla N°5. *Características microbiológicas.*

Técnicas utilizadas	Coliformes Totales	Escherichia coli
Filtración por membrana	0 UFC/100 cm^3	0 UFC/100 cm^3
Enzima Sustrato	< de 1 microorganismo en 100 cm^3	< de 1 microorganismo en 100 cm^3
Sustrato Definido	0 microorganismo en 100 cm^3	0 microorganismo en 100 cm^3
Presencia - Ausencia	Ausencia en 100 cm^3	Ausencia en 100 cm^3

CLASIFICACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO EN LA SALUD SEGUN EL INDICE DE RIESGO DE CALIDAD DEL AGUA PARA EL CONSUMO HUMANO.

Teniendo en cuenta los resultados del IRCA obtenidos por cada muestra, se definen las clasificaciones del nivel de riesgo del agua analizada. Asimismo, se establecen las acciones que deben ser ejecutadas por la autoridad prestadora del servicio. En la Tabla N.º 7 se presentan los niveles de riesgo, su clasificación según el IRCA y las acciones correspondientes. Es importante mencionar que las muestras serán analizadas por muestra, esto es, procesando datos por muestra en diferentes temporadas, esta aclaración se realiza dado que la clasificación del IRCA también puede realizarse de forma mensual.

Tabla N°. 6. Clasificación según nivel de riesgo IRCA.

Clasificación IRCA (%)	Nivel de Riesgo	IRCA por muestra	Resultado
80.1-100	INVIABLE SANITARIAMENTE	Informar a la persona prestadora, al COVE, Alcalde, Gobernador, SSPD, contraloria General, Procuradoria general	Agua no apta para consumo humano
35.1-80	ALTO	Informar a la persona presatadora, COVE, Alcalde y Gobernador	Agua no apta para consumo humano
14.1-35	MEDIO	Informar a la persona prestadora, COVE, Alcalde y Gobernador	Agua no apta para consumo humano
5.1-14	BAJO	Informar a la persona prestadora y al COVE	Agua no apta para consumo humano
0-5	SIN RIESGO	Continuar control y vigilancia	Agua Apta para consumo humano

Los puntajes asignados por la presente resolución se relacionan en la siguiente tabla:

Tabla N°7. *Puntajes de riesgo para parámetros asignados en la resolución 2115 de 2007.*

Caracteristica	Puntaje de riesgo	Caracteristica	Puntaje de riesgo
Color Aparente	6	Dureza Total	1
Turbiedad	15	Sulfatos	1
pH	1,5	Hierro Total	1,5
Cloro Residual Libre	15	Cloruros	1
Alcalinidad Total	1	Nitratos	1
Calcio	1	Nitritos	3
Fosfatos	1	Aluminio	3
Manganeso	1	Fluoruros	1
Molibdeno	1	COT	3
Mangnesio	1	Coliformes Totales	15
Zinc	1	E. Coli	25
SUMATORIA DE PUNTAJES ASIGNADOS		**100**	

El Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA) adopta un valor de cero (0) cuando el agua cumple con los rangos permisibles establecidos para la totalidad de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos definidos en la presente Resolución, y alcanza un valor de cien (100), correspondiente al nivel máximo de riesgo, cuando no se cumple ninguno de dichos criterios.

No obstante, la aplicación del IRCA presenta importantes limitaciones metodológicas que afectan su capacidad para reflejar de manera precisa el riesgo sanitario asociado al agua para consumo humano. En particular, se ha identificado un desequilibrio en la ponderación de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos, lo que puede conducir a una subestimación del riesgo real en algunos municipios, aun cuando el índice indique niveles bajos o nulos de riesgo [10] Adicionalmente, la ausencia de criterios estadísticos para definir un tamaño de muestra representativo reduce la confiabilidad del indicador y limita su efectividad como herramienta para la toma de decisiones en salud pública.

IV. METODOLOGÍA

La metodología del estudio se fundamentó en un enfoque de métodos mixtos, que integró análisis cualitativos y cuantitativos. El componente cualitativo se desarrolló a partir de la observación directa y el diálogo con los operarios de los sistemas de abastecimiento, con el propósito de identificar posibles causas y actividades que generaran afectaciones directas sobre la fuente superficial. De manera complementaria, se realizó la recolección de muestras puntuales para el análisis cuantitativo, orientado principalmente a evaluar la variación de parámetros relevantes y permitir una caracterización más detallada de la calidad del agua. El trabajo de caracterización se llevó a cabo en la jurisdicción del municipio de Ciudad Bolívar, ubicado en la subregión del Suroeste antioqueño, específicamente en la vereda Los Monos.

Figura 1. Ubicación Quebrada los Monos, Municipio de Ciudad Bolívar, Antioquia, Colombia.



La metodología se estructuró en tres etapas fundamentales:

1- Visita técnica al punto de captación (bocatoma):
Se realizó una visita técnica ocular al lugar de captación del agua con el fin de reconocer

las condiciones físicas y ambientales del entorno e identificar posibles fuentes de contaminación directa sobre el afluente, tales como viviendas, fincas, cultivos agrícolas y actividades ganaderas. Durante esta etapa se llevó a cabo un primer muestreo preliminar, orientado al análisis de los parámetros que presentan mayor incidencia en la zona de estudio.

2- Muestreo en la fuente de captación y en la red de distribución:
Se tomaron muestras puntuales tanto en el sitio de captación de la fuente hídrica como en puntos representativos de la red de distribución del sistema de acueducto asociado a dicha fuente. Estas muestras se destinaron al análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de mayor relevancia para la evaluación de la calidad del agua utilizada para consumo humano.

3- Procesamiento, análisis e interpretación de la información:
Los datos obtenidos a lo largo de los diferentes muestreos fueron organizados y analizados para identificar correspondencias y variaciones entre los parámetros evaluados en las distintas temporadas de cosecha. El análisis incluyó la evaluación comparativa del agua natural superficial (fuente de captación) y del agua tratada en la red de distribución, con el fin de caracterizar los cambios más relevantes en la calidad del agua destinada al consumo humano en el municipio de Ciudad Bolívar, Antioquia, y apoyar la posterior evaluación del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA).

Es importante resaltar que la prestación del servicio de agua potable en el municipio de Ciudad Bolívar se encuentra a cargo de tres empresas: el Acueducto Multiveredal Bolívar Arriba (AMBA), la Asociación de Acueducto Comunitario ACOLINDA y la empresa Ingeniería Total, siendo esta última la que concentra la mayor cobertura del municipio. En este contexto, el adecuado funcionamiento de las empresas prestadoras, así como la correcta operación, tratamiento y distribución del agua potable, resultan fundamentales para garantizar la calidad del agua suministrada a la población. Por ello, su papel es clave en los procesos de vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano, los cuales constituyen un componente esencial para la protección de la salud pública.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos permiten caracterizar la calidad del agua destinada al consumo humano en el municipio de Ciudad Bolívar, Antioquia, considerando tanto la fuente de captación como los distintos puntos de la red de distribución operada principalmente por la empresa Ingeniería Total. Los muestreos realizados en diferentes temporadas de cosecha de café evidencian variaciones en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos [11], reflejando la influencia de las actividades agrícolas y del entorno sobre la fuente hídrica, la Quebrada Los Monos. La evaluación incluyó tanto el agua cruda como el agua tratada [12], lo que permitió identificar los cambios más relevantes en la calidad del agua a lo largo del proceso de tratamiento y distribución. Estos hallazgos, integrados mediante el cálculo del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA), ofrecen una visión integral del estado del recurso hídrico, resaltando la importancia del correcto funcionamiento de la empresa prestadora y de los sistemas de vigilancia y control de calidad para garantizar la seguridad del agua destinada al consumo humano. Asimismo, los resultados proporcionan información útil para la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico y para la implementación de medidas y soluciones alternas frente a posibles riesgos sanitarios asociados a la actividad agrícola en la zona.

Como parte de la investigación, se incorporan los resultados técnicos derivados de las distintas metodologías analíticas aplicadas a parámetros de especial relevancia para el estudio de la calidad del agua, los cuales fueron procesados por el Laboratorio de Estudios Ambientales y el Laboratorio G-LIMA de la Universidad de Antioquia. Dichos resultados se presentan en el ANEXO TÉCNICO RESULTADO DE PARÁMETROS para las tres campañas, tanto en agua natural superficial como en agua potable.

La selección de los parámetros evaluados en la fuente de agua natural superficial respondió a su relación directa con el proceso de producción de café, incluyendo el Carbono Orgánico Total (COT), la alcalinidad total, la dureza total, los nitritos, los nitratos y los compuestos fenólicos derivados.

A continuación, se analizarán las tres campañas de muestreo con sus respectivos datos procesados. Posteriormente se hará un análisis exhaustivo fundamentado en consultas, e información recolectada por otros autores con el fin de dar fundamento y bases sólidas a los resultados y conclusiones obtenidos.

CAMPAÑA 1.

La campaña 1, realizada del 25 al 28 de agosto de 2025, consistió en los primeros muestreos de agua natural superficial y potable para la generación de mapas de riesgo del municipio de Ciudad Bolívar, Antioquia. Para este punto, la cosecha de café aún estaba en proceso de crecimiento, lo que resulta en un bajo porcentaje de producción y transformación del grano, generando condiciones "normales" en las fuentes hídricas y un mínimo desbalance de sus condiciones naturales.

Es importante resaltar que, aunque el estudio estará orientado hacia la influencia de la producción de café a gran escala sobre las fuentes hídricas, también existen otros factores que pueden afectar la calidad del agua, como la agricultura en mayor escala, seguida de la industria y el uso doméstico. [13]. A continuación, se presentan los resultados correspondientes para esta campaña.

Tabla N°8. *Resultados campaña 1 con su puntaje de riesgo asociado.*

Parametro	Unidad	Resultado	valor maximo	Puntaje riesgo
pH	pH	7,03	6,5-9,0	1,5
Cloro Residual Libre	mg/L Cl2	1,7	2	15
Fosfatos	mg PO43-/L	<0,500	0,5	1
Manganeso	mg/L	<0,050	0,1	1
Zinc	mg/L	<0,050	3	1
Sulfatos	mg SO42-/L	7,201	250	1

$$\% \text{ IRCA} = \frac{0}{1{,}5+15+1+1+1+1} x\ 100 \ = \ 0\%$$

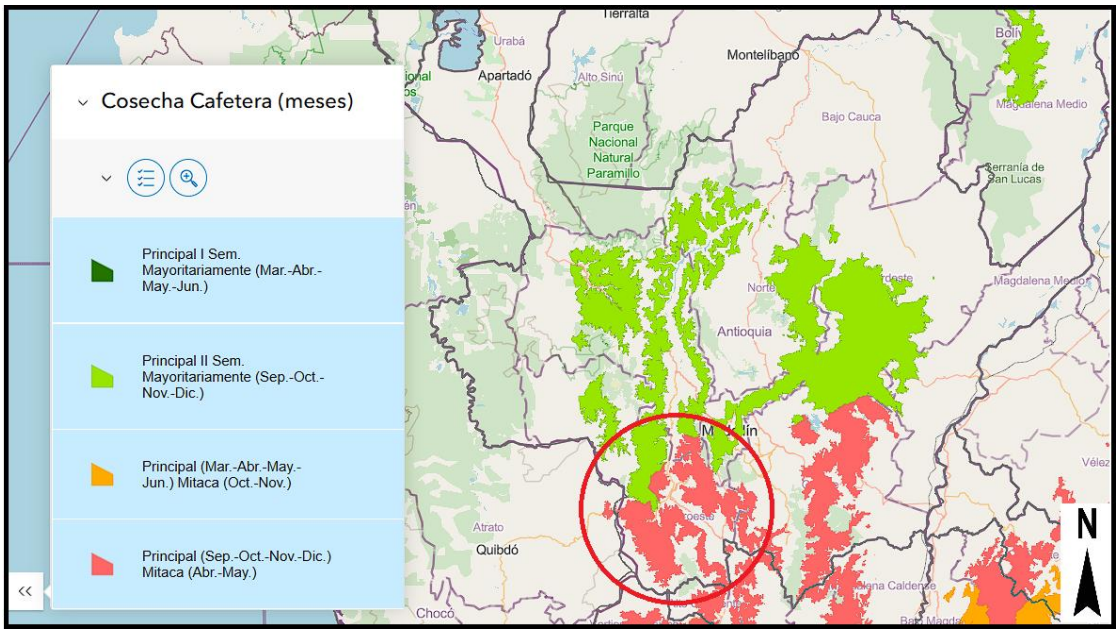
Como se evidencia en la tabla 8, aunque los parámetros se encuentran dentro de los rangos aceptables, se observa una breve desviación en el pH, acercando sus valores al limite acido (6,5) y alejándose gradualmente de su valor estándar o normal (8,0) soportando un comportamiento

característico para ejercer vigilancia y seguimiento de estos parámetros de importancia para el estudio y el control de la calidad del agua.

CAMPAÑA 2.

La campaña 2, realizada del 8 al 10 de septiembre de 2025, empezaba a evidenciar de manera significativa la temporada cafetera, con los primeros brotes de café, así como el inicio de su producción y transformación. Es importante mencionar que en las regiones cafeteras colombianas se presentan dos temporadas de cosecha: la más importante, denominada principal, y una segunda temporada en la que se recolecta un menor volumen, pero que sigue siendo significativa, conocida como "mitaca" [14]. En la región andina, principalmente en el Suroeste del departamento de Antioquia, se presenta la cosecha principal entre septiembre y diciembre, mientras que la mitaca ocurre entre los meses de abril y mayo, como se puede observar en el gráfico presentado por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

Figura 2. *Mapa cosecha cafetera por Federación Nacional de Cafeteros de Colombia [15]*



Los resultados para esta campaña se presentan a continuación.

Tabla N°9. *Resultado campaña 2 con su puntaje de riesgo asociado.*

Parametro	Unidad	Resultado	valor maximo	Puntaje riesgo
pH	pH	6,53	6,5-9,0	1,5
Cloro Residual Libre	mg/L Cl2	1,7	2	15
Fosfatos	mg PO43-/L	<0,500	0,5	1
Manganeso	mg/L	<0,050	0,1	1
Zinc	mg/L	<0,050	3	1
Sulfatos	mg SO42-/L	6,467	250	1

$$\% \text{ IRCA} = \frac{0}{1{,}5+15+1+1+1+1} x\ 100 \ = \ 0\ \%$$

Los resultados obtenidos en esta campaña reflejan una variación significativa, pues puede evidenciarse cambios en parámetros relevantes como el pH y los sulfatos. Es claro que la etapa de transformación del grano implica directamente uso de agua para diferentes procesos, como el lavado del café, por ejemplo, involucrando grandes volúmenes de agua y siendo esta una de las temporadas mas criticas para los cuerpos de agua a los que llegan estas aguas transformadas desbalanceando de manera negativa el sistema acuático, y acarreando eventuales inconvenientes ambientales.

CAMPAÑA 3.

Finalmente, la campaña 3, realizada del 22 al 23 de septiembre de 2025, se realizó en época de cosecha cafetera, una temporada de vital importancia para los pueblos caficultores del país dada su relevancia socioeconómica, generando empleo para la recolección, procesamiento y transporte del grano. En esta etapa los resultados evidenciaron mínimos cambios, principalmente dado a la etapa de producción en la que se encontrada la temporada, siendo esta etapa la etapa de recolección, transporte y venta del café procesado. Colombia cerró el año calendario 2025 con una producción total de 13,67 millones de sacos de 60 kg de café [15] con un aporte de 2,1 millones de sacos en el

departamento de Antioquia, según reportes oficiales del sector caficultor [16], lo cual posicionó nuevamente al país como uno de los principales productores mundiales del grano a pesar de las condiciones climáticas variables.

Estos datos reflejan la importancia económica del cultivo para regiones como el Suroeste de Antioquia, reconocida por su significativa contribución a la producción nacional, aportando un volumen relevante dentro de la dinámica cafetera regional y nacional.

Para este punto, los resultados obtenidos en campo arrojaron valores significativos que serán fundamentales para las conclusiones valoradas en este estudio. A continuación, se presentan los resultados de esta campaña.

Tabla N°10. *Resultados campaña 3 agua potable con su puntaje de riesgo asociado.*

Parametro	Unidad	Resultado	valor maximo	Puntaje riesgo
pH	pH	6,86	6,5-9,0	1,5
Cloro Residual Libre	mg/L Cl2	1,58	2	15
Fosfatos	mg PO43-/L	<0,500	0,5	1
Manganeso	mg/L	<0,050	0,1	1
Zinc	mg/L	<0,050	3	1
Sulfatos	mg SO42-/L	6,069	250	1

$$\% \text{ IRCA} = \frac{0}{1{,}5+15+1+1+1+1} x\ 100 \ = \ 0\%$$

Como resultado de las campañas de monitoreo realizadas, se evidenció un comportamiento estable de las aguas suministradas a la comunidad por parte de la empresa prestadora del servicio Ingeniería Total en el municipio de Ciudad Bolívar, obteniéndose resultados concluyentes que indican características favorables para las aguas destinadas al consumo humano en la quebrada *Los Monos* y tratadas en la planta de potabilización dado a que no presentan alteraciones significativas que representen un riesgo para la salud humana, por lo cual se clasifican según la **tabla N° 6** como **aguas sin riesgo**. No obstante, se identificaron variaciones atípicas en algunos parámetros fisicoquímicos, particularmente en el pH y la concentración de sulfatos, los cuales, si bien no

superan los límites máximos permisibles establecidos por la normativa vigente, muestran incrementos o disminuciones en determinadas campañas de muestreo.

Con el fin de comprender de manera más profunda este comportamiento, se analizaron parámetros adicionales que, aunque no tienen una implicación directa sobre la salud humana, permiten inferir las posibles causas de las fluctuaciones observadas en los parámetros de mayor relevancia. Este enfoque integral facilitó una interpretación más completa de la problemática y permitió la formulación de conclusiones fundamentadas en resultados y análisis técnicos confiables.

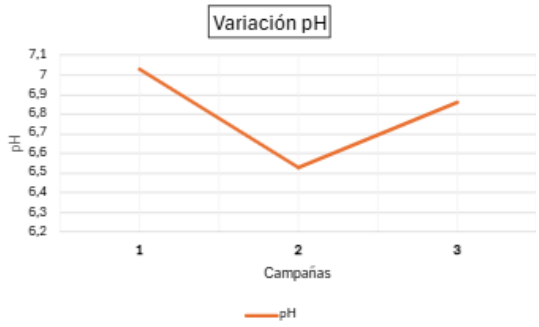
Para este análisis se tendrán en cuenta las aguas crudas de la fuente superficial (agua Natural superficial) de la Quebrada *Los Monos* comparando variaciones en parámetros claves como la Alcalinidad Total, la Dureza Total, el Carbono Orgánico Total (COT), la Conductividad Eléctrica y la Turbiedad con el fin de entender más a fondo el comportamiento en la variación de los parámetros iniciales. A continuación, se presenta la tabla resumen con los resultados correspondientes para cada parámetro en cada campaña.

Tabla N°11. *Resultados ponderados agua natural superficial.*

Parametro	Unidad	Valor campaña 1	Valor campaña 2	Valor campaña 3
Carbono Organico Total (COT)	mg C/L	< 1,000	1,589	< 1,000
Alcalinidad Total	mg/L	22,49	24,3	21,64
Dureza Total	mg/L	22,93	25,34	22,67
Conductividad electrica	us/cm	64,7	73,15	60,5
Ortofosfatos	mg PO43-/L	< 0,500	< 0,500	<0,500
Turbiedad	NTU	2,5	2,9	2,1

Como se observa en la **Tabla N°11**, las variaciones más significativas se presentan en la campaña 2, la cual muestra incrementos notorios en todos los parámetros evaluados en comparación con las campañas 1 y 3, evidenciando variaciones significativas en la alcalinidad total, la conductividad eléctrica y la turbiedad. De manera análoga como se puede evidenciar en las gráficas 1 y 2 respectivamente para la variación de pH y los sulfatos los cambios más relevantes también se registran en la campaña 2, donde se observa un pH cercano al límite ácido (6,53) y una disminución en la concentración de sulfatos de al menos 1 mg/L. Estos resultados evidencian una anormalidad durante esta temporada de estudio, la cual coincide con el inicio de la etapa de recolección y procesamiento del grano de café.

Grafica 1. pH para las tres campañas



Grafica 2. Sulfatos para las tres campañas



Resulta adecuado considerar que los procesos involucrados en la producción del grano de café hasta obtener café pergamino listo para su comercialización, si bien no afectan directamente la calidad del agua destinada al consumo humano, pueden alterar parámetros relevantes para su vigilancia y control.

En este sentido, las aguas mieles generadas durante etapas como la fermentación, el desmucilaginado, el despulpado, el lavado y el transporte del café [17] presentan valores de turbiedad que oscilan entre 400 y 600 Unidades Nefelométricas de Turbiedad (UNT) [18], pudiendo incluso superar las 1000 UNT [19]. Esta condición puede ocasionar un aumento significativo de la turbiedad natural en fuentes hídricas superficiales, así como un desbalance en sus parámetros fisicoquímicos.

Desde una perspectiva más integral de este subproducto generado en la producción cafetera, se identificaron diversos parámetros fisicoquímicos que caracterizan la composición de las aguas mieles derivadas del procesamiento del café.

Tabla N°12. *Composición química de las aguas residuales del beneficio de café.*

		COMPOSICION GUAS MIEL			
Proceso	**compuesto**	**% concentracion**	**Materia extraida (kg/QQ oro)**	**Estimadoo DQO (kg/QQ oro)**	
Despulpe	Proteinas	12	0,16	0,25	9,10%
	Tninos	2,4	0,14	0,27	9,80%
	Acido Clorogenico	2,6	0,28	0,40	14,50%
	Acido cafeico	0,1	0,01	0,02	0,70%
	Cafeina	1,6	0,29	0,57	20,70%
	Azúcres	8,3	1,13	1,24	45,10%
	TOTAL	**27**	**2,01**	**2,75**	**100%**
Lavado	Sustancias Pecticidas	36	1,4	1,2	29,50%
	Celulosa	46	1,9	2,04	50,10%
	Azucares	17	0,7	0,83	20,40%
	TOTAL	**99**	**4**	**4,07**	**100%**
	TOTAL			**6,82**	**kg DQO /QQ oro**

Se evidencia un alto contenido de Demanda Química de Oxígeno (DQO), debido a que durante estos procesos se generan elevadas cargas de materia orgánica disuelta, las cuales pueden oxidarse mediante procesos naturales, demandando grandes cantidades de oxígeno en el agua [20]. Asimismo, estos altos contenidos de materia orgánica, tanto disuelta como suspendida, provenientes de sustancias derivadas del café, afectan de manera directa parámetros de importancia como el Carbono Orgánico Total (COT), ya que dichos compuestos son ricos en carbono [21] y su presencia incrementa directamente este parámetro.

Finalmente, otro de los parámetros alterados es la conductividad eléctrica, la cual depende de la cantidad de iones disueltos en el agua. Inicialmente, muchos de estos compuestos no presentan naturaleza iónica; sin embargo, durante su biodegradación, sustancias como el ácido cafeico y el ácido clorogénico pueden transformarse en ácidos orgánicos, CO_2, amonio y otros compuestos

solubles [22], los cuales pueden liberar iones en el medio acuoso, contribuyendo así a un aumento significativo de la conductividad.

En conjunto, el incremento de parámetros como la turbiedad, el Carbono Orgánico Total (COT) y la conductividad eléctrica puede influir directamente en la variación del pH de aguas superficiales naturales. La elevada turbiedad suele asociarse con la presencia de partículas suspendidas y materia orgánica coloidal que favorecen procesos de degradación biológica. Durante la descomposición de esta materia orgánica se generan subproductos como ácidos orgánicos y dióxido de carbono (CO_2), los cuales alteran el equilibrio ácido-base del agua [23]. El CO_2 disuelto puede reaccionar con el agua formando ácido carbónico, lo que contribuye a disminuir el pH del sistema. De igual manera, el incremento de la conductividad eléctrica refleja una mayor concentración de iones disueltos, capaces de participar en reacciones químicas que modifican los sistemas tampón naturales del agua, generando variaciones en su estabilidad química y, por ende, en el pH.



Fig. 1. Imagen corporativa Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

Nota: fuente https://www.ieee.org/ Esta entidad edita y normaliza la presentación de documentos científicos en el área de ingenierías.



Fig. 2. Logo Universidad de Antioquia

Nota. Fuente http:/www.udea.edu.co

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En conclusión, la evaluación cuantitativa de la calidad del agua en el municipio de Ciudad Bolívar, Antioquia, utilizando el Índice de Riesgo de Calidad del Agua (IRCA), permitió determinar que la fuente superficial "Los Monos" presenta condiciones adecuadas para su uso, evidenciando finalmente una caracterización sin riesgo.

No obstante, al realizar un análisis temporal que consideró muestreos durante las temporadas de cosecha y de no cosecha, se observó un cambio significativo en los valores de pH, indicando un desbalance natural de la fuente superficial. Este comportamiento se relaciona directamente con los subproductos generados en la producción de café pergamino, principalmente las aguas mieles derivadas del despulpado y lavado del grano, que afectan parámetros como el Carbono Orgánico Total (COT), la turbiedad y la conductividad eléctrica. Estos cambios generan alteraciones en el equilibrio fisicoquímico del agua y contribuyen a la disminución temporal del pH, un parámetro fundamental para la evaluación de la calidad del agua.

Por lo tanto, aunque la calidad general del agua en Ciudad Bolívar se considera buena, es fundamental implementar estrategias de vigilancia y control, especialmente durante las temporadas de cosecha, cuando la fuente superficial presenta mayor vulnerabilidad debido a la influencia de los vertimientos orgánicos. La adopción de estas medidas es clave para prevenir impactos significativos sobre la calidad del agua y garantizar su uso seguro para la población.

AGRADECIMIENTOS.

Expreso mi más sincero agradecimiento al Laboratorio de Estudios Ambientales G-LIMA de la Universidad de Antioquia por brindarme la valiosa oportunidad de desarrollar mis prácticas académicas mediante la modalidad de trabajo de grado, en el marco de la campaña “Mapas de Riesgo”, iniciativa liderada por este laboratorio. Este proceso permitió la elaboración de un producto técnico entregado a la Gobernación de Antioquia, con el propósito de contribuir a la retroalimentación de los municipios y a la divulgación de los resultados obtenidos.

De igual manera, manifiesto mi profundo agradecimiento a los profesores Claudia Lucia Zuluaga, Mauricio Correa y David Aguiar, quienes, junto con el equipo de trabajo, acompañaron y orientaron el desarrollo de esta propuesta, así como la consolidación del trabajo y del producto final. Su guía, conocimiento y compromiso fueron fundamentales para lograr un entregable riguroso y pertinente, el cual se proyecta como un insumo técnico que podrá aportar a futuras estrategias de mejoramiento, gestión y control de la calidad del agua en el municipio de Ciudad Bolívar

REFERENCIAS

[1] S. Industria Colombiana de Café, *"Día Internacional del Café: explorando los hábitos de consumo en el mundo,"* Industria Colombiana de Café, 02 oct. 2023. Disponible: https://industriacolombianadecafe.com/actualidad/dia-internacional-del-cafe-explorando-los-habitos-de-consumo-en-el-mundo/ 7.

[2] Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, *"Descripción del proceso productivo y del beneficio del café,"* en *Guía Ambiental para el Sector Cafetero – Segunda Edición*, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Disponible: https://federaciondecafeteros.org/static/files/8Capitulo6.pdf

[3] Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia, *"Antioquia Café Región,"* Servicio " Café Región," Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia, 2026. Disponible: h ttps://www.camaramedellin.com.co/quiero-un-servicio-para-mi-empresa/cafe-region

[4] "*Ingeniería y café en Colombia,*" *Revista de Ingeniería*, no. 33, pp. 99–114, 2018. Disponible: http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n33/n33a11.pdf

[5] S. Z. Mejía Zuluaga, *Manejo de aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café en la zona cafetera central de Colombia*, Monografía (Agronomía), Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, Medellín, Colombia, 25 sep. 2018. Disponible: https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/21180/42683065.pdf?sequence=1.

[6] L. S. Torres-Valenzuela, A. Sanín-Villarrea, A. Arango-Ramírez y J. A. Serna-Jiménez, "Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio del café," *Revista ION*, vol. 32, no. 2, pp. 59–66, Jul.–Dic. 2019, DOI: 10.18273/revion.v32n2-2019006. Disponible: http://www.scielo.org.co/pdf/rion/v32n2/2145-8480-rion-32-02-59.pdf

[7] **República de Colombia**, *Decreto 1575 de 2007*, Diario Oficial No. 46623, 09 may 2007. Disponible: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=30007

[8] República de Colombia, *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*, Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Diario Oficial No. 46 679, 22 jun. 2007. Disponible: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=30007

[9] Y. Solís-Castro, L. A. Zúñiga-Zúñiga y D. Mora-Alvarado, "La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica," *Tecnología en Marcha*, vol. 31, no. 1, pp. 35–46, Ene.-Mar. 2018. Disponible: https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v31n1/0379-3982-tem-31-01-35.pdf

[10] C. A. García-Ubaque, J. C. García-Ubaque, J. P. Rodríguez-Miranda, R. Pacheco-García y M. C. García-Vaca, "Limitaciones del IRCA como estimador de calidad del agua para

consumo humano," *Revista de Salud Pública*, vol. 20, no. 2, pp. 204–207, Mar.–Abr. 2018, Disponible: https://www.scielosp.org/article/rsap/2018.v20n2/204-207/

[11] J. J. Martínez Ramos y D. P. Almario Guio, *"Análisis del índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano – IRCA y su relación con variables meteorológicas y ubicación geográfica para el departamento de Tolima en los años 2012–2013,"* Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia, 2013. Disponible: https://ciencia.lasalle.edu.co/items/edc653c0-73f2-4f52-ac88-901925a9f49c

[12] R. A. Colmenares Cruz y D. L. Rojas Rodríguez, "Análisis de los índices de riesgo de calidad de agua potable (IRCA) en Boyacá entre 2016-2019," *Agricolae & Habitat*, vol. 4, no. 1, pp. 14–28, Abr. 2021. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/350745890_Analisis_de_los_indices_de_riesgo_de_calidad_de_agua_potable_IRCA_en_Boyaca_entre_2016-2019

[13] M. del P. Arcos Pulido, S. L. Ávila de Navia y S. M. Estupiñán Torres, "*Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua*," Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Facultad de Ciencias de la Salud, Bogotá, Colombia, Dic. 2005. [En línea]. Disponible: sestupinant59@unicolmayor.edu.co

[14] "La cosecha intermedia de café caería 30% y presagia un mal año," *La República*, 02 may. 2012. [En línea]. Disponible: https://www.larepublica.co/economia/segun-productores-la-cosecha-intermedia-de-cafe-caeria-30-y-presagia-un-mal-ano-2009114

[15] Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, *"Cosecha Cafetera,"* Sitio Oficial, 02 feb. 2026. [En línea]. Disponible: https://federaciondecafeteros.org/wp/cosecha-cafetera/

[16] D. K. Rodríguez T., "Producción de café en Colombia cerró 2025 con 13,67 millones de sacos y anticipa menor oferta en 2026," *Portafolio*, 08-ene-2026. Disponible: https://www.portafolio.co/economia/agro/produccion-de-cafe-en-colombia-cerro-2025-con-13-67-millones-de-sacos-y-anticipa-menor-oferta-en-485906

[17] R. N. Huerta Obregón, "*Evaluación y diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café para mejorar los parámetros de temperatura, pH, conductividad eléctrica, DQO, DBO_5 de las aguas miel en el Fundo Monterrico - San Juan de Cacazú - Villa Rica – Oxapampa"*, Tesis de pregrado, Univ. Nac. Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco, Perú, 2017. Disponible: http://45.177.23.200/bitstream/undac/2164/1/T026_45081405_T.pdf

[18] F. Oumer, *Wet coffee processing wastewater characterization and treatment using effective microorganism activated solution*, Tesis de pregrado, Jimma University, Jimma, Etiopía, 2012. Disponible: https://repository.ju.edu.et/bitstream/handle/123456789/2562/Fuad%20Oumer%20Thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[19] W. X. Ibáñez-Moreno, J. P. Arcos-Logroño, L. de L. Ortiz-Contreras, y B. J. Ortega-Naranjo, "Diseño de una planta de tratamientos de aguas miel de Kilamupi café (Wastewater treatment system design for Kilamupi café)," *Ciencias de la Educación*, vol. 6, no. 3, pp. 1039–1061, Mar. 2021. Disponible: https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/2420/html

[20] A. E. Molina-Guardado y R. A. Villatoro-Martínez, *Propuesta de tratamientos de aguas residuales en beneficios húmedos de café*, Trabajo de graduación, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador, Mar. 2006. Disponible: https://repositorio.ues.edu.sv/server/api/core/bitstreams/a0eaaa4b-452b-4deb-b666-c8e18e700db6/content

[21] Universidad Nacional Agraria de la Selva, *Revisión de literatura: Aguas mieles del beneficio del café*, Repositorio Institucional UNAS, Tingo María, Perú. Disponible en: https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/b750a650-ea9f-4d06-a09f-858a0abbda24/content.

[22] L. S. Torres-Valenzuela, A. Sanín-Villarrea, A. Arango-Ramírez y J. A. Serna-Jiménez, "Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio del café," *Revista ION*, vol. 32, no. 2, pp. 59–66, 2019. doi: 10.18273/revion.v32n2-2019006. Disponible en : https://paperity.org/p/251078984/caracterizacion-fisicoquimica-y-microbiologica-de-aguas-mieles-del-beneficio-del-cafe

[23] Chaudhuri, K., Manna, S., Sarma, K. S., *et al.*, "Physicochemical and biological factors controlling water column metabolism in Sundarbans estuary, India," *Aquatic Biosystems*, vol. 8, art. 26, 2012. Disponible en: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4594903/

ANEXOS

Los resultados técnicos de la parametrización de los valores reportados pueden ser consultados por el público en las páginas oficiales de la Gobernación y de la Secretaría Seccional de Salud de Antioquia. En el siguiente enlace se presenta, como anexo técnico, la compilación de los resultados obtenidos para el municipio de Ciudad Bolívar en las tres campañas de muestreo. Esta información se encuentra disponible en las plataformas institucionales previamente mencionadas.

ANEXO TÉCNICO DE RESUTADOS : Anexo técnico de resultados

Anexo A. Autoarchivo en Repositorio y documentos de interés

Consulte el instructivo de autoarchivo en el este enlace.

Anexo B. Póster Autoarchivo en Repositorio y documentos de interés

En último lugar, se incluye el anexo del poster que utilizarás en la jornada de prácticas académicas, en caso de aplicar. Guárdelo de forma tal que no modifique el tamaño de las hojas ni afecte la presentación del documento.