



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DETERMINACIÓN DE TRES ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA, RÍO GUADRÓN, EN EL MUNICIPIO DE GUATEMALA, HACIENDO
UNA COMPARACIÓN EN ÉPOCA SECA Y LLUVIOSA**

Luis Fernando González Villagrán

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, octubre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE TRES ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA, RÍO GUADRÓN, EN EL MUNICIPIO DE GUATEMALA, HACIENDO
UNA COMPARACIÓN EN ÉPOCA SECA Y LLUVIOSA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS FERNANDO GONZÁLEZ VILLAGRÁN
ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Núñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Orlando Posadas Valdez
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Catillo
EXAMINADOR	Ing. Gerardo Ordoñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DETERMINACIÓN DE TRES ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA, RÍO GUADRÓN, EN EL MUNICIPIO DE GUATEMALA, HACIENDO
UNA COMPARACIÓN EN ÉPOCA SECA Y LLUVIOSA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 03 de febrero de 2016.

Luis Fernando González Villagrán

Guatemala 06 septiembre de 2018

Ingeniero
Carlos Salvador Wong
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería USAC

Por este medio me dirijo a usted para informarle que he revisado el informe final del Trabajo de Graduación "**Determinación de tres índices de contaminación de aguas superficiales en la microcuenca, Río Guadrón, en el municipio de Guatemala, haciendo una comparación en época seca y lluviosa**". Elaborado por el estudiante de Ingeniería Química, **Luis Fernando González Villagrán** identificado con el número de Registro Académico **2011-14176** y Documento Personal de Identificación **2091 63348 0101**, y considero que cumple los requisitos establecidos por la escuela. Por lo tanto apruebo para que pueda ser presentado.

Agradezco de antemano su colaboración.



Atentamente,



Jorge Mario ESTRADA ASTURIAS
Ingeniero Químico, Col. 685
M. Sc. Ingeniería Sanitaria
PROFESOR TITULAR
Escuela de Ing. Química USAC

MSc. Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Colegiado No. 685

Asesor de Tesis



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

Edificio T-5, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Centroamérica
EIQD-REG-TG-008

Guatemala, 19 de septiembre de 2018.
Ref. EIQ.TG-IF.043.2018.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **108-2015** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Seminario de Investigación-**

Solicitado por el estudiante universitario: **Luis Fernando González Villagrán**.
Identificado con número de carné: **2091 63348 0101**.
Identificado con registro académico: **2011-14176**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**DETERMINACIÓN DE TRES ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS
SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA, RÍO GUADRÓN, EN EL MUNICIPIO DE
GUATEMALA, HACIENDO UNA COMPARACIÓN EN ÉPOCA SECA Y LLUVIOSA**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Mario Estrada Asturias**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. William Eduardo Fagiani Cruz
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Edificio T-5, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Centroamérica
EIQD-REG-SG-004

Ref.EIQ.TG.035.2018

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del (la) estudiante, **LUIS FERNANDO GONZÁLEZ VILLAGRÁN** titulado: **"DETERMINACIÓN DE TRES ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA, RÍO GUADRÓN, EN EL MUNICIPIO DE GUATEMALA, HACIENDO UNA COMPARACIÓN EN ÉPOCA SECA Y LLUVIOSA"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, octubre de 2018
FACULTAD DE INGENIERIA USAC
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
DIRECTOR

Cc: Archivo
CSWD/ale



Formando Ingenieros Quimicos en Guatemala desde 1939

Universidad de San Carlos
De Guatemala

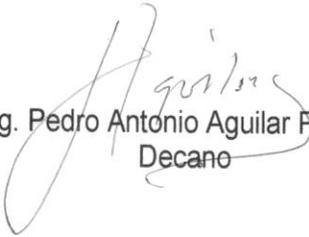


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.398.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química al trabajo de graduación titulado: **DETERMINACIÓN DE TRES ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA, RÍO GUADRÓN, EN EL MUNICIPIO DE GUATEMALA, HACIENDO UNA COMPARACIÓN EN ÉPOCA SECA Y LLUVIOSA**”, presentado por el estudiante universitario: **Luis Fernando González Villagrán** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, Octubre de 2018

/echm

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por haber diseñado mi camino hasta este momento.
Virgen María	Por ser la luz que me guio durante estos años.
Mi abuela	Mamita Aury (q.e.p.d.), cómo desearía que estuvieras aquí hoy.
Mis padres	Luis Fernando y Ana Elizabeth, por ser mi ayuda en todo sentido, mis mejores ejemplos de vida y mis modelos a seguir.
Mi hermana	Por ser mi primera heroína y mi primera inspiración.
Mis sobrinos	Luis y Guillermo, espero este sea su sueño cuando sean grandes, los quiero mucho, aunque no lo parezca.
Mis tíos	Por sus muestras de cariño y sus porras en todo momento.
Dennis Stinchcomb	Por su cariño y apoyo hoy soy una mejor persona, espero algún día ser un poco igual a ti.

Mis amigos

Por siempre estar ahí, en las buenas y en las malas, Jazz, Wixa, Sheilis, Noe, Chongo, Ale Duarte, Katy, Cubo, Rubén, Gabo, Gerson, Ana Rufis, Marito, Mily, Sofi y Nadia.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por facilitarme la educación de calidad, estaré en deuda contigo por siempre.
Facultad de Ingeniería	Por ser mi casa durante estos cuatro años y medio, donde encontré el camino correcto hacia el conocimiento.
Escuela de Ingeniería Química	Por ser una escuela que forma verdaderos pensadores, con criterios e ingenieros que son lo mejor de la ingeniería.
Dra. Casta Zeceña	Por ser un motor que me exigía lo mejor y por enseñarme lo que es ser un buen profesional, un buen compañero de trabajo y un buen jefe.
Departamento de Química General, FIUSAC	Gracias por todo, especialmente a las ingenieras Tannia y Adela, y al ingeniero Byron Aguilar, de quienes he aprendido tanto académicamente como de la vida.
Municipalidad de Guatemala	Por facilitarme el desarrollo de este proyecto, especialmente a la Inga. Beatriz Ramírez, por su conocimiento y guía.

	sólidos suspendidos (ICOSUS)	9
2.2.1.1.3.	Índice de contaminación trófica (ICOTRO)	9
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	11
3.1.	Variables	11
3.2.	Delimitación del campo de estudio	11
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	12
3.4.	Recursos materiales disponibles	12
3.4.1.	Equipo	12
3.4.2.	Cristalería	13
3.4.3.	Reactivos.....	13
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	13
3.6.	Técnica de muestreo	14
3.6.1.	Muestreo simple	14
3.6.2.	Volumen de la muestra.....	15
3.6.3.	Conservación y traslado de la muestra	15
3.7.	Recolección y ordenamiento de la información	15
3.7.1.	Determinación de conductividad eléctrica.....	15
3.7.2.	Determinación de alcalinidad.....	15
3.7.3.	Determinación de dureza total de agua	16
3.7.4.	Determinación de fosfatos presentes.....	16
3.7.5.	Determinación de sólidos suspendidos.....	17
3.8.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	17
3.8.1.	Determinación de ICOMI	18
3.8.2.	Determinación de ICOTRO.....	18

3.8.3.	Determinación de ICOSUS	18
3.9.	Análisis estadístico	19
3.9.1.	Prueba T de Student	19
3.9.1.1.	Desviación de la diferencia de medias	19
3.9.2.	Determinación del factor T	19
4.	RESULTADOS	21
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	25
5.1.	Índice de contaminación por mineralización (ICOMI)	25
5.2.	Índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS) ..	27
5.3.	Índice de contaminación trófica (ICOTRO)	27
	CONCLUSIONES	29
	RECOMENDACIONES	31
	BIBLIOGRAFÍA	33
	APÉNDICES	35

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Índice de contaminación por mineralización, evaluando ambas épocas en la parte alta	21
2.	Índice de contaminación por mineralización, evaluando ambas épocas en la parte baja	22
3.	Índice de contaminación por sólidos suspendidos, evaluando ambas épocas en la parte alta	22
4.	Índice de contaminación por sólidos suspendidos, evaluando ambas épocas en la parte baja	23
5.	Tabla de requisitos académicos	35
6.	Determinación de ICOMI para las dos épocas en ambos puntos de muestreo	37
7.	Determinación de ICOSUS para las dos épocas en ambos puntos de muestreo	38

TABLAS

I.	Clasificación del nivel trófico de un cuerpo de agua con base en la concentración de fósforo presente	10
II.	Clasificación de las variables involucradas en la metodología	11
III.	Análisis estadístico aplicando la prueba T de Student a la parte alta de la microcuenca, río Guadrón	23
IV.	Análisis estadístico aplicando la prueba T de Student a la parte baja de la microcuenca, río Guadrón.....	24

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
C_{OH}	Alcalinidad
cm	Centímetro
cm³	Centímetro cúbicos
C_{SS}	Concentración de sólidos suspendidos
Ke	Conductividad Eléctrica
C_D	Dureza
°C	Grados Celsius
g	Gramos
L	Litro
m³	Metro cúbico
μS	Microsiemen
mmHg	Milímetro de mercurio

GLOSARIO

Alcantarillado	Sistema de tuberías y construcciones usado para la recogida y transporte de las aguas residuales, industriales y pluviales de una población, desde el lugar en que se generan hasta el sitio en que se vierten al medio natural.
Calidad	Grado en el que un conjunto de características inherentes cumple con los requisitos establecidos.
Contaminación	Acción de alterar nocivamente la pureza o las condiciones normales de una cosa o un medio por agentes químicos o físicos.
Cuerpo léntico	Son cuerpos de agua cerrados que permanecen en un mismo lugar sin correr ni fluir. Comprende todas las aguas interiores que no presentan corriente continua, es decir, aguas estancadas sin ningún flujo de corriente.
Cuerpo lótico	Es el ecosistema en el cual el movimiento del agua es predominantemente en una dirección, siguiendo el curso que tenga el cuerpo, afectado por factores físicos como pendiente, caudal, profundidad, sinuosidad, entre otros.

Eutrofización	Incremento de sustancias nutritivas en aguas dulces de lagos y embalses, que provocan un exceso de fitoplancton.
Floculación	Agregación de partículas sólidas en una dispersión coloidal, en general, por la adición de un agente.
Fisicoquímica	Rama de la ciencia que estudia la interrelación entre las propiedades físicas y químicas de una sustancia.
ICOMI	Índice de contaminación por mineralización.
ICOSUS	Índice de contaminación por sólidos suspendidos.
ICOTRO	Índice de contaminación trófica.
Índice	Expresión numérica de la relación entre dos cantidades.
Hipereutrofia	Sistemas acuáticos de bajo contenido de nutrientes y producción vegetal excesiva.
Limnología	Biología de las aguas dulces en general, y estudio de los factores no bióticos de ellas.
Polución	Contaminación intensa y dañina del agua o del aire, producida por los residuos de procesos industriales o biológicos.

RESUMEN

La presente investigación consistió en la determinación de tres índices de contaminación en aguas superficiales. Se analizó la parte alta y baja del río Guadrón, en época de lluvia y época seca, y se proyectó dicha información en un mapa de la microcuenca del río Guadrón, en el municipio de Guatemala.

Se estimó el índice de contaminación por mineralización (ICOMI), índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS) e índice de contaminación trófica (ICOTRO). Se tomó una muestra representativa tanto de la parte alta y baja, para tener una medida de referencia de la contaminación en ambas regiones y con esta información se estudió el proceso de saneamiento adecuado del río en cuestión.

Las muestras fueron sometidas a una serie de pruebas fisicoquímicas, tales como conductividad, alcalinidad, dureza total, fosfatos presentes y sólidos suspendidos. Se realizó una comparación entre ambos puntos de muestreo y entre las dos épocas climatológicas analizadas.

Se concluyó que no existe diferencia significativa al comparar los índices de contaminación en los dos puntos de muestreo y las dos épocas climatológicas presentes en la región centroamericana, los cuales presentan los valores máximos en ambos casos. De esta manera se definió el grado de eutrofización hipertrófica y una elevada carga de sólidos disueltos y suspendidos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La carencia de un buen manejo de desechos sólidos, líquidos y gaseosos, el crecimiento poblacional y la falta de infraestructura, ha ocasionado la contaminación de la biosfera a una velocidad sin precedentes. Los recursos más vulnerables son aquellos cuya contaminación imposibilita su reutilización, de no haber un tratamiento previo, como es el caso de los cuerpos de agua. Desafortunadamente, dicha contaminación se debe exclusivamente a la presencia antropogénica circundante, tanto en cuerpos lóticos como en los lénticos, las cuales carecen de una red de alcantarillado sanitario y, por consiguiente, de un tratamiento adecuado para su desecho.

En la actualidad no hay un control de las aguas residuales, las cuales son descargadas en los ríos, contaminando de diferentes formas el cauce de dichos cuerpos de aguas superficiales. Por lo tanto, es necesario determinar índices de contaminación para analizar el posible origen de esta y obtener información para realizar, en un futuro, un proceso de tratamiento adecuado.

La caracterización del agua por tratar es el primer paso para definir el tratamiento más adecuado; sin embargo, debido a su elevado costo económico no es convencional que tanto la iniciativa privada como la pública, realicen esta actividad.

OBJETIVOS

General

Determinar tres índices de contaminación en aguas superficiales en la microcuenca río Guadrón, en el municipio de Guatemala. Se hará una comparación en época seca y lluviosa.

Específicos

1. Determinar la cantidad de sólidos disueltos y la naturaleza de estos, partiendo del índice de contaminación por mineralización (ICOMI).
2. Determinar la contaminación por fosfatos disueltos a través del índice de contaminación trófica (ICOTRO).
3. Determinar el índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS).

Hipótesis

La magnitud de los índices de contaminación será menor en la época de lluvia que en la época seca, debido a la dilución de los compuestos químicos contaminantes, con el agua proveniente de la lluvia.

Hipótesis nula

Existe diferencia significativa al realizar una comparación de los índices de contaminación en época seca y lluviosa.

Hipótesis alternativa

No existe diferencia significativa al realizar una comparación de los índices de contaminación en época seca y lluviosa.

INTRODUCCIÓN

Desde hace varias décadas se han propuesto y empleado los índices de calidad de las aguas, los cuales tienen como propósito simplificar en una expresión numérica las características positivas o negativas de cualquier fuente de agua.

Los índices de contaminación tienen como objeto la estimación de un número que define el grado de calidad de un determinado cuerpo lótico continental. Con ello se pretende reconocer, de una forma ágil y fácil, problemas de contaminación. Algunas de las variables incluidas en estos índices merecen ser monitoreadas, como es el caso de la temperatura, por cuanto su valor se modifica de forma natural con la latitud y las épocas climáticas. De igual modo, las impurezas aparentes constituyen una variable cualitativa subjetiva al observador, que incluye, entre otros, olor o apariencia.

Si bien el desarrollo de los índices de contaminación ha jugado un papel muy importante en el contexto ecológico y del medio ambiente, sus debilidades constituyen un obstáculo importante para su aplicación, ya que al concentrarse en un único número la cualidad de un cuerpo de agua, se produce una inmensa pérdida de información y con ellos, se enmascara la condición real y los cambios que se suceden sobre un recurso hídrico.

1. ANTECEDENTES

En el informe de tesis realizado en 1999 por los ingenieros Jorge Mynor Hernández Monzón y José Rolando Fuentes Handal, estudiantes de Maestría en Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, que tiene por título “Análisis de la calidad de agua de lluvia en el sector ubicado en la zona 21 de la ciudad de Guatemala, como parte del estudio de recarga de acuíferos del área metropolitana”, se determinaron los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos del agua de lluvia, escorrentía y drenaje pluvial en la colonia Nimajuyú, zona 21 de la ciudad de Guatemala.

La realización de este estudio especial permitió conocer la calidad del agua pluvial, con el propósito de evaluar la calidad del agua que recarga los acuíferos naturales.

EMPAGUA, como institución encargada del abastecimiento de agua potable, realiza un convenio de investigación con la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria (ERIS) a fin de determinar las metodologías por utilizar para solventar dicho problema. El análisis de calidad de agua superficial en diferentes sectores de la ciudad de Guatemala es uno de los frutos de dicho convenio.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Agua

Desde el punto de vista químico, el agua es una sustancia conformada por dos átomos de hidrógeno unidos, por un enlace covalente simple, a un átomo de oxígeno.

Biológicamente se define como una sustancia esencial para el desarrollo y la supervivencia de todas las formas de vida que conocemos en la actualidad.

2.1.1. Propiedades físicas y químicas

Si se le compara con los dihidruros de los elementos en la misma familia de la tabla periódica que el oxígeno, se encuentra que muchas de sus propiedades son anómalas. A presión atmosférica y temperatura ambiente, las moléculas más pesadas, como el sulfuro de hidrógeno, (H_2S) son todas gases. El agua es un líquido que solo se transforma en vapor cuando la temperatura aumenta a $100\text{ }^\circ\text{C}$ o más; además, esto depende de la presión atmosférica del lugar. Su densidad máxima se presenta a $4\text{ }^\circ\text{C}$. Su tensión superficial y constante dieléctrica son mucho más altas de lo que se podría predecir a partir de las propiedades de los otros dihidruros. Su punto de congelación es inferior de lo que podría esperarse y se congela formando hielo, una sustancia de estructura abierta que es menos densa que el agua líquida a partir de la cual se forma.

- Símbolo: H_2O
- Peso molecular: 18 g/mol
- Punto de fusión: $0\text{ }^\circ\text{C}$

- Punto de ebullición: 100 °C a 760 mmHg
- Densidad: 1 g/cm³

2.1.2. Aguas superficiales

La composición general de los diversos tipos de agua en la hidrosfera puede estudiarse mejor dentro del marco de referencia del ciclo hidrológico. De la cantidad total de agua sobre la Tierra, los océanos contienen la mayoría, 97,13 %. Los casquetes polares y los glaciares contienen 2,24%; el agua subterránea tiene el 0,61 % y los ríos, lagos y corrientes solo corresponden al 0,02 % del total.

Aguas superficiales son aquellas que se encuentran sobre la superficie del suelo. Estas se producen por la escorrentía generada a partir de las precipitaciones o por el afloramiento de aguas subterráneas. Pueden presentarse en forma correntosa, como en el caso de corrientes, ríos y arroyos, o quietas si se trata de lagos, reservorios, embalses, lagunas, humedales, estuarios, océanos y mares.

La calidad del agua está fuertemente influenciada por el punto de la cuenca en que se desvía para su uso. La calidad de corrientes, ríos y arroyos varía de acuerdo con los caudales estacionales y puede cambiar significativamente a causa de las precipitaciones y derrames accidentales. Los lagos, reservorios, embalses y lagunas presentan, en general, menor cantidad de sedimentos que los ríos; sin embargo, están sujetos a mayores impactos desde el punto de vista de actividad

microbiológica. Los cuerpos de agua quietos, tales como lagos y reservorios, envejecen en un periodo relativamente grande como resultado de procesos naturales. Este proceso de envejecimiento está influenciado por la actividad microbiológica que se encuentra relacionada directamente con los niveles de nutrientes en el cuerpo de agua y puede verse acelerada por la actividad humana.

2.1.3. Calidad del agua

Calidad del agua se refiere a las características químicas, físicas, biológicas y radiológicas del agua. Es una medida de la condición del agua en relación con los requisitos de una o más especies bióticas o a cualquier necesidad humana a propósito. Se utiliza con mayor frecuencia por referencia a un conjunto de normas contra las cuales puede evaluarse el cumplimiento. Los estándares más comunes utilizados para evaluar la calidad del agua se relacionan con la salud de los ecosistemas, seguridad de contacto humano y agua potable.

Decir que un agua se encuentra contaminada o no, es un concepto de alguna manera relativo, ya que no se puede hacer una clasificación absoluta de la calidad del agua. El agua destilada que, desde el punto de vista de la pureza, tiene el más alto grado de calidad, no es adecuada para beber, porque el grado de calidad del agua ha de referirse a los usos a que se destine. La determinación del estado de la calidad de un agua estará referida al uso previsto para la misma. De igual manera, el concepto de contaminación ha de estar referido a los usos posteriores del agua.

2.2. Contaminación

La contaminación es la introducción de sustancias en un medio que provoca que este sea inseguro o no apto para su uso. El medio puede ser un ecosistema, un medio físico o un ser vivo. El contaminante puede ser una sustancia química, energía, etc.

Es siempre una alteración negativa al estado natural del medio. Por lo general, se genera como consecuencia de la actividad humana. Es considerada una forma de impacto ambiental.

La contaminación puede clasificarse según el tipo de fuente de donde proviene, o por la forma de contaminante que emite o medio que contamina. Existen muchos agentes contaminantes entre ellos las sustancias químicas, los residuos urbanos, el petróleo o las radiaciones ionizantes. Todos pueden producir enfermedades, daños en los ecosistemas o el medio ambiente. Además, existen muchos contaminantes gaseosos que juegan un papel importante en diferentes fenómenos atmosféricos, como la generación de lluvia ácida, el debilitamiento de la capa de ozono y el cambio climático.

La contaminación está generalmente ligada al desarrollo económico y social. Actualmente, muchas organizaciones internacionales, como la ONU, ubican al desarrollo sostenible como una de las formas de proteger el medio ambiente para las actuales y futuras generaciones.

2.2.1. Contaminación hídrica

Se da por la liberación de residuos y contaminantes que drenan a las escorrentías y luego son transportados hacia ríos, penetrando en aguas

subterráneas o descargando en lago o mares. También puede ser por derrames o descargas de aguas residuales, eutrofización o descarga de basura, o por liberación descontrolada del gas de invernadero, CO₂, que produce la acidificación de los océanos. Los desechos marinos son mayormente plásticos que contaminan los océanos y costas; algunas veces se acumulan en alta mar, como la gran mancha de basura del Pacífico Norte. Los derrames de petróleo en mar abierto por el hundimiento o fugas en petroleros y algunas veces derrames desde el mismo pozo petrolero, son otro ejemplo.

2.2.1.1. Índices de contaminación

Los índices de contaminación califican diferentes cualidades de las aguas y, por lo tanto, complementan el panorama ambiental de un recurso hídrico, tal como lo demuestra la correlación próxima a cero entre ellos, que representa una baja concentración de nutrientes, que son los agentes contaminantes de los recursos hídricos. Los mismos han sido propuestos a partir de la experiencia acumulada en programas de monitoreo hidrobiológico, implementados por la industria petrolera en Colombia por más de seis años y en los resultados arrojados por estadísticas multivariadas. Los índices se desarrollan con base en legislaciones de diversos países, acordes con las concentraciones de distintas variables y los usos potenciales de las aguas. Dichos índices de contaminación son: ICOMI o de mineralización, ICOTRO o de contaminación trófica, ICOSUS relativo a los sólidos suspendidos. Los índices son de fácil estimación y permiten puntualizar el tipo de problema ambiental existente, tal como se observa en la aplicación desarrollada. En virtud del reducido número de variables involucradas, la aplicación de estos índices representa claras ventajas económicas, por lo que sería muy importante vincularlos a la legislación ambiental.

2.2.1.1.1. Índice de contaminación por mineralización (ICOMI)

Se expresa en numerosas variables, de las cuales se eligieron: conductividad eléctrica como reflejo del conjunto de sólidos disueltos, dureza por cuanto recoge los cationes calcio y magnesio, y la alcalinidad porque hace lo propio con los aniones carbonatados y bicarbonatados.

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 reflejan bajo nivel de contaminación por mineralización e índices cercanos a uno, lo contrario.

Dentro de los parámetros evaluados se encuentra el ICOMI, el cual cuantifica, de manera directa, los sólidos disueltos presentes en el cuerpo de agua analizado, al ser un promedio de los índices de alcalinidad, dureza y conductividad. “La alcalinidad es la demanda de ácido de un volumen dado de agua para alcanzar la neutralización frente a un indicador apropiado. Es impartida por los bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e hidróxidos (OH^-).” (Ing. Jorge Arturo Pérez, 1995 p 13).

La dureza total es la cuantificación de calcio y magnesio presente en los cuerpos de agua. Esta cuantificación se determina en términos de carbonato de calcio (CaCO_3).

El índice se calcula utilizando las siguientes correlaciones:

$$ICOMI = \frac{1}{3}(I_{Ke} + I_{CD} + I_{COH})$$

$$\log_{10} I_{K_e} = -3,26 + 1,34 \log_{10} K_e / (\mu S/cm)$$

$$\log_{10} I_{C_D} = -9,09 + 4,40 \log_{10} C_D / (g/m^3)$$

$$I_{C_{OH}} = -0,25 + 0,005 C_{OH} / (g/m^3)$$

2.2.1.1.2. Índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS)

Se determina tan solo mediante la concentración de sólidos suspendidos. Si bien esta variable muestra alguna correlación significativa con la demanda de oxígeno (DBO y DQO) y con el amonio, se desagregó de las anteriores por cuanto estas últimas corresponden con claridad a procesos de contaminación orgánica, mientras que los sólidos suspendidos bajo muchas circunstancias podrían, perfectamente, hacer referencia tan solo a compuestos inorgánicos.

El índice de contaminación por sólidos suspendidos cuantifica los sólidos no disueltos que pueden ser sedimentables o coloidales. Estos pueden ser removidos por diferencia de densidades, sedimentación, o utilizando un agente floculante como el sulfato de aluminio, que es el más utilizado comercialmente.

$$ICOSUS = -0,02 + 0,003 C_{SS} / (g/m^3)$$

2.2.1.1.3. Índice de contaminación trófica (ICOTRO)

Se determina en esencia por la concentración del fósforo total. A diferencia de otros índices, en los cuales se determina un valor particular entre

0 y 1, la concentración del fósforo total define por sí misma una categoría discreta, a saber:

Tabla I. **Clasificación del nivel trófico de un cuerpo de agua con base en la concentración de fósforo presente**

Clasificación	Contenido de Fosforo (mg/L)
Oligotrófia	< 0.01
Mesotrófia	0.01-0.02
Eutrófia	0.02-1.00
Hipereutrófia	> 1.00

Fuente: elaboración propia

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Se presenta la clasificación de las variables involucradas en la realización de este tema de investigación.

Tabla II. **Clasificación de las variables involucradas en la metodología**

Independientes	Dimensiones	Dependientes
Sólidos suspendidos	mg/L	ICOSUS
Fosfatos		ICOTRO
Alcalinidad		ICOMI
Dureza		
Conductividad	μS/cm	

Fuente: elaboración propia

3.2. Delimitación del campo de estudio

La investigación realizada se centró en determinar tres índices de contaminación, partiendo de la medición de parámetros fisicoquímicos para determinar la calidad del agua del río Guadrón. Se evaluó la calidad del agua de dicho cuerpo durante las dos épocas climatológicas que se desarrollan en la región. Este monitoreo se efectuó en la parte alta y baja de la microcuenca.

Se monitoreó el cuerpo lótico durante las dos épocas climatológicas presentes en nuestra región, las cuales comprenden la estación seca y la estación lluviosa.

Los puntos de muestreo se localizaron en la parte alta y baja de la microcuenca, y corresponden a la colonia Pamplona en la zona 13 y la colonia Nuevo Amanecer en zona 21, respectivamente.

3.3. Recursos humanos disponibles

Investigador: Luis Fernando González Villagrán

Asesor: Ingeniero químico Jorge Mario Estrada Asturias

3.4. Recursos materiales disponibles

Se contó con el siguiente equipo y cristalería de laboratorio para la realización de la metodología experimental.

3.4.1. Equipo

- Multiparamétrico
- Guantes de látex
- Bata
- Mascarilla
- Recipiente de recolección de muestra
- Potenciómetro
- Campana de extracción
- Balanza analítica
- Bomba de vacío
- Mufla
- Filtro
- Succionador para pipeta
- Espectrofotómetro

3.4.2. Cristalería

- Erlenmeyer
- Balón aforado
- Bureta
- Crisol
- Embudo
- Papel filtro
- Probeta
- Pipeta
- Kitasato
- Celdas para espectrofotómetro

3.4.3. Reactivos

- Ácido sulfúrico
- Fenolftaleína
- Naranja de metilo
- Negro de ericromo T
- Hidroxicloruro de amonio
- EDTA
- Fosver 3

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Se cuantificó por medio del espectrofotómetro la concentración total de fosfatos presentes en las muestras tomadas. Con un potenciómetro se cuantificó la conductividad eléctrica de las muestras analizadas.

Por medio de una titulación se cuantificó la alcalinidad de las muestras. Se empleó como titulante ácido sulfúrico 0,2 N, y como indicadores, fenolftaleína y naranja de metilo.

La cuantificación de dureza total se realizó titulando las muestras con EDTA, y se empleó como indicador negro ericromo T.

A través de un proceso de filtración al vacío, se cuantificó la cantidad de sólidos suspendidos en las muestras en análisis.

3.6. Técnica de muestreo

Tomando en cuenta que el objetivo del estudio fue determinar los índices de contaminación y no el horario de carga máxima de los contaminantes, se realizó un muestreo simple.

3.6.1. Muestreo simple

- Identificar los factores como profundidad, caudal y distancia de la orilla.
- Antes de la toma de muestra, se debe marcar el frasco para su identificación.
- Tomar la muestra lo más lejos posible de la orilla, sin remover el fondo.
- Evitar las zonas de estancamiento.
- Sujetar el frasco por el fondo en posición invertida.
- Sumergir completamente y dar la vuelta en sentido contrario a la corriente.
- Desplazarlo horizontalmente.

3.6.2. Volumen de la muestra

- Para la mayoría de los análisis fisicoquímicos se necesitan muestras de 2 L.

3.6.3. Conservación y traslado de la muestra

- El tiempo entre toma de muestras y comienzo del análisis debe ser el mínimo.
- El transporte debe ser lo más rápido posible.
- Utilizar durante el trayecto neveras portátiles.

3.7. Recolección y ordenamiento de la información

Para realizar los diferentes tratamientos, se utilizó la siguiente metodología de cálculo.

3.7.1. Determinación de conductividad eléctrica

- Destapar recipiente de toma de muestra
- Encender potenciómetro
- Presionar botón para medición de conductividad eléctrica
- Introducir electrodo en la muestra de agua
- Anotar el valor de conductividad eléctrica medida

3.7.2. Determinación de alcalinidad

- Tomar 50 mL de muestra en Erlenmeyer
- Agregar 4 gotas de indicador fenolftaleína
- Agregar 10 gotas de indicador naranja de metilo

- Observar cambio de color a naranja
- Titular con ácido sulfúrico 0,02 N
- Dejar de titular al cambiar de color de naranja a salmón
- Anotar el volumen de ácido sulfúrico utilizado

3.7.3. Determinación de dureza total de agua

- Tomar 50 mL de muestra
- Agregar 1 mL de hidroxloruro de amonio
- Agregar 3 gotas de indicador negro ericromo T
- Observar cambio de color a morado
- Titular con EDTA
- Dejar de titular al cambiar de color de morado a azul oscuro
- Anotar el volumen de EDTA utilizado

3.7.4. Determinación de fosfatos presentes

- Tomar 5 mL de muestra y colocarlos en una probeta de 50 mL
- Agregar el resto de agua desmineralizada para aforar 50 mL
- Colocar 25 mL de la dilución preparada en una celda y los otros 25 mL en otra celda
- Agregar reactivo Fosver 3 a la segunda celda
- Agitar vigorosamente
- Observar un cambio de color a azul
- Encender espectrofotómetro
- Seleccionar programa de medición de fosfatos
- Esperar 2 minutos
- Colocar la primera celda, denominada blanco

- Presionar botón “Cero”
- Sacar el blanco y colocar la segunda celda
- Presionar botón “Leer”
- Anotar valor de fosfatos

3.7.5. Determinación de sólidos suspendidos

- Colocar crisol en desecador
- Conectar una entrada de la manguera a un Kitasato
- Conectar la otra entrada de la manguera a una bomba generadora de vacío
- Colocar embudo en el Kitasato
- Tarar papel filtro por utilizar
- Anotar valor de tara
- Colocar papel filtro en embudo
- Agitar la muestra de agua vigorosamente
- Tomar 100 mL de muestra
- Filtrar el volumen de agua indicado
- Colocar filtros empleados en crisoles
- Colocar el crisol en la mufla durante 1 hora
- Tarar el papel filtro usado en proceso de filtración
- Descartar la masa tomada inicialmente

3.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Los valores obtenidos experimentalmente fueron ordenados, tabulados y procesados de la siguiente forma:

3.8.1. Determinación de ICOMI

- Se calcula el índice de conductividad partiendo de los valores experimentales.

$$I_{K_e} = 10^{-3,26+1,34\log_{10}(K_e)}$$

- Posteriormente se determina el índice de dureza empleando los valores obtenidos por la titulación ácido-base.

$$I_{C_D} = 10^{-9,09+4,40\log_{10}(C_D)}$$

- Finalmente se calcula el índice de alcalinidad utilizando los valores obtenidos de la titulación complejométrica.

$$I_{C_{OH}} = 10^{-0,25+0,005(C_{OH})}$$

- El índice de contaminación por mineralización es el promedio aritmético de los tres índices anteriores.

$$ICOMI = \frac{1}{3}(I_{K_e} + I_{C_D} + I_{C_{OH}})$$

3.8.2. Determinación de ICOTRO

- Ingresar valor obtenido experimentalmente de fosfatos en hoja de cálculo
- Determinar valor de ICOTRO
- Colocar valor de ICOTRO en tabla de resultados

3.8.3. Determinación de ICOSUS

- Ingresar valor obtenido experimentalmente de sólidos suspendidos en hoja de cálculo

- Determinar valor de ICOSUS
- Colocar valor de ICOSUS en tabla de resultados

3.9. Análisis estadístico

Para determinar si había diferencia significativa entre los índices de calidad del agua analizados, se utilizó la prueba T para comparar las medias obtenidas en las dos épocas climatológicas analizadas.

3.9.1. Prueba T de Student

La prueba T consiste típicamente en una muestra de pares de valores con similares unidades estadísticas o un grupo de unidades que han sido evaluadas en dos ocasiones diferentes.

3.9.1.1. Desviación de la diferencia de medias

$$\hat{S}_{\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)\hat{S}_1^2 + (n_2 - 1)\hat{S}_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left[\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right]}$$

Donde:

\bar{Y}_1 y \bar{Y}_2 = Medias de las muestras

\hat{S}_1^2 y \hat{S}_2^2 = Varianzas insesgadas de las muestras

n_1 y n_2 = Tamaño de las muestras

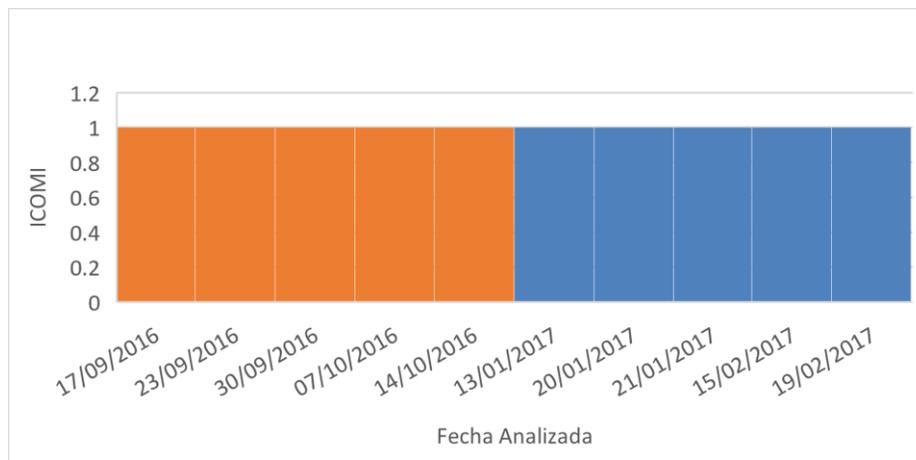
3.9.2. Determinación del factor T

$$T = \frac{(\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2)}{\hat{S}_{\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2}}$$

4. RESULTADOS

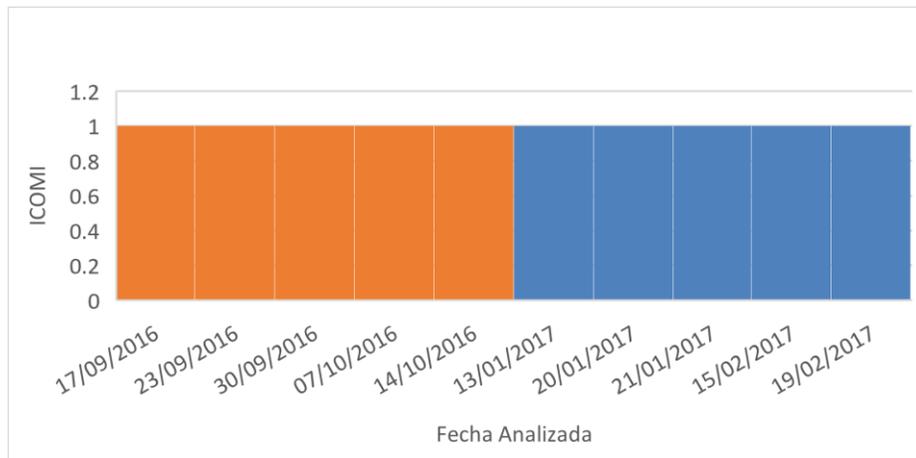
Se presenta la magnitud del índice de contaminación por mineralización, para cada punto de muestreo monitoreado. En color naranja se ilustran los valores obtenidos en la época lluviosa y en azul los obtenidos en la época seca.

Figura 1. **Índice de contaminación por mineralización, evaluando ambas épocas en la parte alta**



Fuente: elaboración propia, 2018.

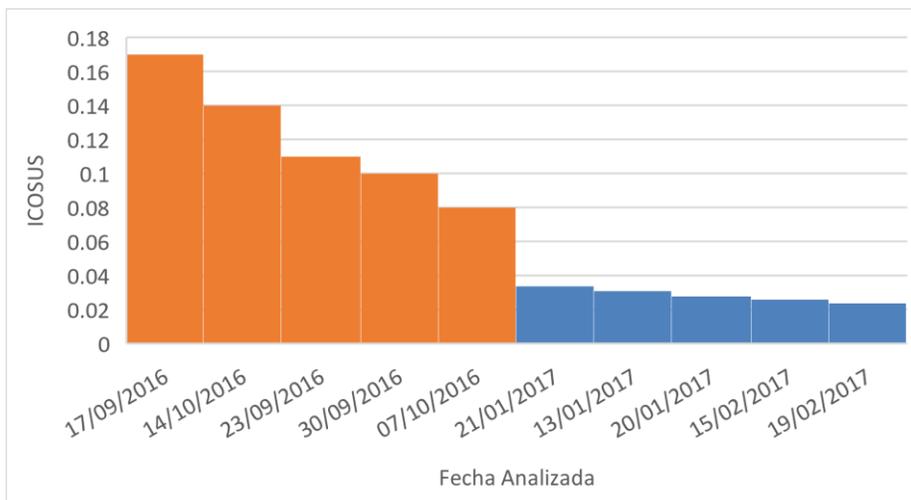
Figura 2. **Índice de contaminación por mineralización, evaluando ambas épocas en la parte baja**



Fuente: elaboración propia, 2018.

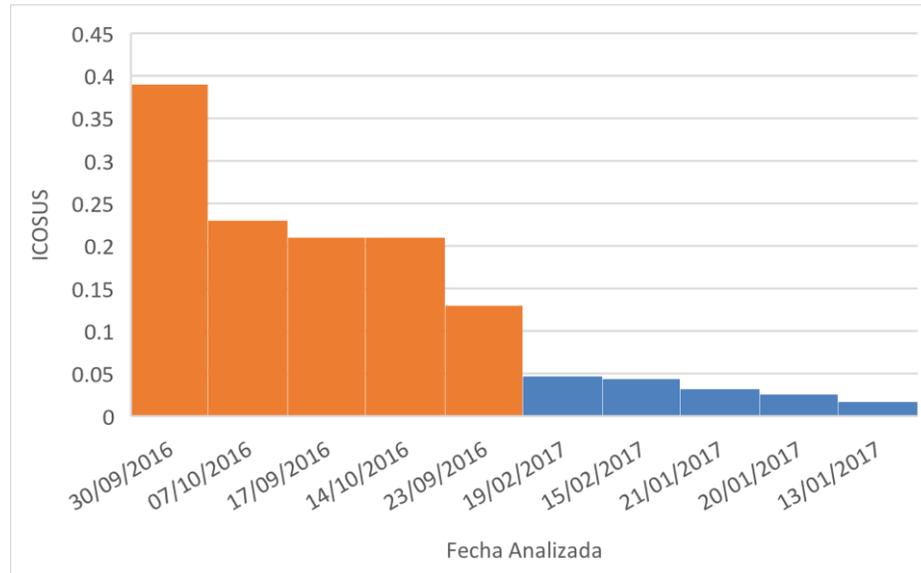
Se presenta la magnitud del índice de contaminación por sólidos suspendidos comprendidos para ambos puntos de muestreo monitoreado. En color naranja se ilustran los valores en la época lluviosa y en azul, los valores en la época seca.

Figura 3. **Índice de contaminación por sólidos suspendidos, evaluando ambas épocas en la parte alta**



Fuente: elaboración propia, 2018.

Figura 4. Índice de contaminación por sólidos suspendidos, evaluando ambas épocas en la parte baja



Fuente: elaboración propia, 2018.

Tabla III. Análisis estadístico aplicando la prueba T de Student a la parte alta de la microcuenca, río Guadrón

Parámetro estadístico	ICOSUS seca	ICOSUS lluvia
Media	0,0286	0,12
Varianza	0,00002	0,0013
Observaciones	5	5
Coeficiente de correlación de Pearson	0,0534	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-5,8420	
P(T<=t) una cola	0,0021	
Valor crítico de t (una cola)	2,1318	
P(T<=t) dos colas	0,0043	
Valor crítico de t (dos colas)	2,7764	

Fuente: elaboración propia, 2018

Tabla IV. **Análisis estadístico aplicando la prueba T de Student a la parte baja de la microcuenca, río Guadrón**

Parámetros estadísticos	ICOSUS seca	ICOSUS lluvia
Media	0,0332	0,2340
Varianza	0,0002	0,0091
Observaciones	5	5
Coeficiente de correlación de Pearson	0,1211	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-4,7704	
P(T<=t) una cola	0,0044	
Valor crítico de t (una cola)	2,1318	
P(T<=t) dos colas	0,0088	
Valor crítico de t (dos colas)	2,7764	

Fuente: elaboración propia, 2018

El ICOTRO obtuvo la misma magnitud, hipereutrofia, para ambas épocas climatológicas analizadas y en ambos puntos de muestreo, y es el valor máximo para la escala de este índice.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los índices de calidad del agua son empleados para clasificar un cuerpo de agua, abordando un conjunto de parámetros que indican de forma cualitativa o cuantitativa la contaminación hídrica.

5.1. Índice de contaminación por mineralización (ICOMI)

La alcalinidad presente en el cuerpo lótico analizado se debe probablemente a la descarga de aguas grises y negras, provenientes de los desechos domiciliarios. Tomando en cuenta que el caudal de aguas grises es mayor que el caudal de aguas negras, ya que se contempla la descarga de diferentes actividades diarias, tales como lavado de manos, alimentos, ropa, utensilios de cocina, etc., habrá una mayor presencia de aguas jabonosas en el cuerpo receptor de las aguas residuales. Este tipo de descargas presenta alta carga de jabones y detergentes, los cuales son elaborados con el objetivo de romper las cadenas carbonadas de la materia orgánica presente, empleando álcalis para lograr este objetivo. Al momento de realizar los procesos domésticos que implican la utilización de estos productos, no se realizan de manera estequiométrica, es decir, en la mayoría de los casos existe un exceso lo que conlleva a una alta carga de álcalis en las descargas.

La dureza en los cuerpos lóticos probablemente se debe, en su mayoría, a la erosión que genera la escorrentía del río, en este caso, sobre el suelo. La concentración de dureza total se encuentra dentro del rango de agua dulce; por lo tanto, este parámetro no presenta una contaminación significativa; sin embargo, aporta concentración de sólidos disueltos.

El factor más importante de este índice es la conductividad, ya que se puede cuantificar los sólidos disueltos partiendo de este parámetro, sin tomar en cuenta la naturaleza química de los sólidos disueltos; es decir, si se debe a carbonatos, bicarbonatos, calcio o magnesio.

El ICOMI para las dos épocas analizadas en los dos puntos de muestreo obtiene el valor máximo. Esto concuerda con los parámetros anteriormente descritos, ya que la contaminación es de origen antropogénico, por lo que las descargas al cuerpo receptor son constantes, sin importar la época climatológica.

Al comparar los valores obtenidos en ambas épocas se infiere que en la época lluviosa se tiene un valor diez veces mayor que en época seca; este comportamiento es tanto para la parte alta como para la parte baja. Al comparar los valores en la misma época climatológica, se determina que, en ambos casos, la parte baja tiene el índice más elevado. Esto se debe, probablemente, al arrastre de materia orgánica desde la parte alta, la cual se degrada en un proceso aeróbico a lo largo del trayecto de la microcuenca. Al reducir el tamaño de partícula, incrementa la concentración de sólidos suspendidos en el cuerpo receptor.

Como se puede observar gráficamente, no existe diferencia significativa al comparar los valores obtenidos en la época seca y lluviosa, ya que ambas tienen el valor máximo con relación a este índice fisicoquímico de calidad del agua.

5.2. Índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS)

Los valores obtenidos no denotan una alta carga de sólidos suspendidos; esto puede deberse a la metodología de muestreo, ya que los sólidos de mayor tamaño se acumulan en la ribera del río y no son arrastrados por la corriente.

Como se aprecia en los resultados del análisis estadístico, la magnitud del valor calculado se encuentra inferior al valor T crítico, lo cual indica que no existe una diferencia significativa entre las medias de dicho índice, en ambas épocas climatológicas.

5.3. Índice de contaminación trófica (ICOTRO)

El índice de contaminación más importante en un cuerpo lótico o léntico es el índice de contaminación por eutrofización, ya que cuantifica el fósforo presente en términos de concentración de fosfatos. La eutrofización es el proceso en el que un cuerpo de agua aumenta su contenido de algas y vegetación, lo que genera una mayor demanda química de oxígeno y disminuye la concentración de oxígeno disuelto, lo cual representa un problema para los ecosistemas que se desarrollan en dicho cuerpo de agua. La demanda química de oxígeno varía en sus valores entre la mañana y la noche, debido al proceso biológico de fotosíntesis.

En los muestreos realizados en esta investigación se determinó que el cuerpo, independientemente de la estación climatológica o del punto de muestreo, presenta hipereutrofia, que es el máximo valor que puede determinar este índice. Estos valores se obtienen por la descarga, sin un tratamiento previo, de las aguas residuales domésticas con un alto contenido de fósforo por los detergentes que se utilizan, añadido la carga orgánica que proporcionan las

heces fecales por las aguas negras. Estas fuentes generan un aumento de las demandas químicas y biológicas de oxígeno, reducen la biodiversidad en los cuerpos de agua y aumentan el riesgo de volver estos recursos hídricos en pantanos futuros.

Como se observa en los resultados, no existe variación significativa entre los valores obtenidos, tanto en las dos épocas climatológicas analizadas como en los dos puntos de muestreo.

CONCLUSIONES

1. El índice de contaminación por mineralización en ambas épocas climatológicas y en ambos puntos de muestreo presenta el valor máximo, lo que indica una carga alta de sólidos suspendidos, mayoritariamente por sustancias alcalinas.
2. La cuantificación de los sólidos suspendidos no detecta los sólidos más grandes, los cuales se depositan en la ribera del río, por lo que este valor no es representativo.
3. El nivel de eutrofización, según el ICOTRO, tanto para la época seca y lluviosa como para ambos puntos de muestreo es el máximo valor, lo cual indica posiblemente una alta concentración de nutrientes, un decrecimiento en el oxígeno disuelto y en una elevada población de algas.

RECOMENDACIONES

1. Aumentar los puntos de muestreo a lo largo de la microcuenca, con la finalidad de determinar la descarga con mayor concentración de agentes contaminantes hacia el río.
2. Medir parámetros relacionados con la cantidad de materia orgánica que hay en los cuerpos, como DBO y DQO.
3. Realizar una campaña de limpieza y concientización en las comunidades aledañas, para disponer de los sólidos de una manera sanitaria.
4. Diseñar una red de alcantarillado sanitario adecuada para la disposición final de las aguas residuales.
5. Para el tratamiento de este recurso hídrico se recomienda un sistema de intercambio iónico, con el objetivo de reducir la cantidad de minerales disueltos. De esta forma se busca reducir los nutrientes que pueden ser captados por microorganismos, los cuales en estas condiciones suelen ser indicadores de mala calidad, por su proliferación.
6. Para el tratamiento de la contaminación por sólidos suspendidos se puede utilizar tanques sedimentadores o etapas de filtración en serie, para realizar una remoción por métodos físicos. La desventaja de este tipo de métodos es el costo de inversión inicial, ya que por lo general

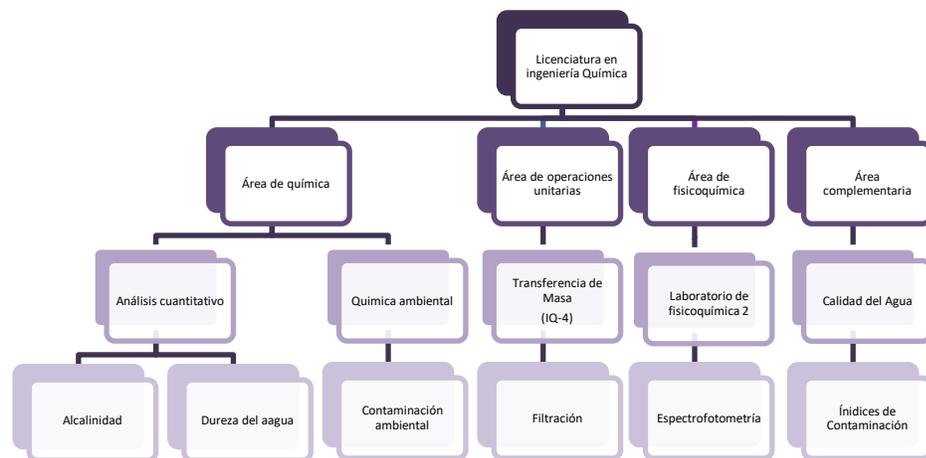
tienden a necesitar de infraestructuras civiles de gran escala y se requiere de un tiempo de retención mayor. Por tanto se propone un tratamiento de floculación con sulfato de aluminio y realizar una prueba de jarras para la determinar la dosificación óptima.

BIBLIOGRAFÍA

1. JENKINS, David. *Química del agua*. México: Limusa, 1999. 508 p.
2. MARTÍNEZ, Gabriel. *El índice de calidad del agua*. Trabajo de graduación de Ingeniería Química. Universidad Nacional Autónoma de México, 1994. 120 p.
3. MAYCO INDUSTRIES, INC. *Ficha de datos de seguridad – agua*. [en línea].
<http://saicm.cnpml.org.sv/SAICM/public/documetos/HojasDeSeguridad/Hoja_de_Seguridad_del_Plomo.pdf> [Consulta: 4 de mayo de 2015].
4. ZUÑIGA, María del Carmen. *Interrelación de indicadores ambientales de calidad en cuerpos de aguas superficiales del Valle del Cauca*. Trabajo de graduación de Ingeniería Química. Universidad del Valle de Colombia, 1994. 235 p.

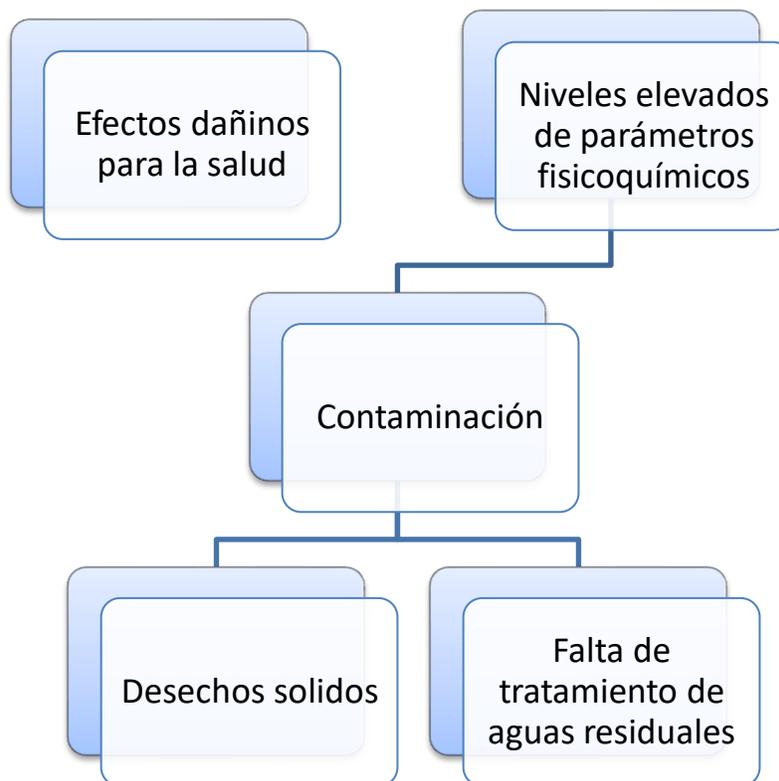
APÉNDICES

Apéndice 1. Tabla de requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Determinación de ICOMI para las dos épocas en ambos puntos de muestreo**

Muestreo	Época	Fecha	Ke	C _D	C _{OH}	I _{Ke}	I _{CD}	I _{COH}	ICOMI
Parte alta	Seca	17/09/2016	613	120	242	1	1	1	1
		23/09/2016	504	120	254	1	1	1	1
		30/09/2016	590	118	284	1	1	1	1
		07/10/2016	672	114	274	1	1	1	1
		14/10/2016	580	110	294	1	1	1	1
	Lluviosa	13/01/2017	732	130	292	1	1	1	1
		20/01/2017	752	125	234	1	1	1	1
		21/01/2017	775	138	273	1	1	1	1
		15/02/2017	735	104	256	1	1	1	1
		19/02/2017	756	120	289	1	1	1	1
Parte baja	Seca	17/09/2016	514	180	274	1	1	1	1
		23/09/2016	500	180	332	1	1	1	1
		30/09/2016	700	182	302	1	1	1	1
		07/10/2016	783	170	308	1	1	1	1
		14/10/2016	660	166	314	1	1	1	1
	Lluviosa	13/01/2017	853	178	245	1	1	1	1
		20/01/2017	949	195	300	1	1	1	1
		21/01/2017	861	162	378	1	1	1	1
		15/02/2017	860	183	352	1	1	1	1
		19/02/2017	898	194	303	1	1	1	1

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Determinación de ICOSUS para las dos épocas en ambos puntos de muestreo**

Muestreo	Época	Fecha	C _{SS}	ICOSUS
Parte alta	Seca	13/01/2017	49.0	0.031
		20/01/2017	175.0	0.028
		21/01/2017	54.0	0.034
		15/02/2017	220.0	0.026
		19/02/2017	340.0	0.024
	Lluviosa	17/09/2016	64.0	0.17
		23/09/2016	42.0	0.11
		30/09/2016	40.0	0.10
		07/10/2016	33.0	0.08
		14/10/2016	54.0	0.14
Parte baja	Seca	13/01/2017	75.0	0.017
		20/01/2017	784.6	0.026
		21/01/2017	366.7	0.032
		15/02/2017	589.3	0.044
		19/02/2017	654.9	0.047
	Lluviosa	17/09/2016	133.3	0.21
		23/09/2016	51.3	0.13
		30/09/2016	135.9	0.39
		07/10/2016	81.8	0.23
		14/10/2016	78.0	0.21

Fuente: elaboración propia.