

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA RÍO ALGODONAL, TRAMO ABREGO-OCAÑA, NORTE DE SANTANDER

ASSESSMENT OF THE WATER QUALITY RIVER ALGODONAL, SECTION ABREGO-OCAÑA, NORTE DE SANTANDER

Rocío Andrea Miranda Sanguino*
Roiman David Ramírez**
Katusca Hernández***
Wilson Angarita Castilla****

Recibido: 4 de marzo de 2019

Aceptado: 26 de junio de 2019

DOI: <https://doi.org/10.29097/2011-639X.238>

Resumen

Se evaluó la calidad fisicoquímica del agua río Algodonal mediante cinco índices de contaminación: ICOMI, ICOSUS, ICOPH, ICOMO y ICOTEMP. La investigación se desarrolló durante diez meses, tiempo que abarcó un periodo de lluvias y un periodo seco para aprovechamiento del régimen bimodal de lluvias, característico de la zona y de frecuencia trimestral. Asimismo, se determinó la relación que existe entre el conjunto de resultados y valoraciones, lo que permitió el análisis de las variaciones y el comportamiento de las variables en cada estación de control-aforo por periodo estudiado. Según resultados de la investigación, la calidad del agua en este tramo no presenta ninguna contaminación, tiene un nivel bueno y es apta para consumo humano (con tratamiento previo).

Palabras clave: agua, calidad del agua, índice de calidad, índice de contaminación del agua.

Abstract

The physicochemical and microbiological quality of Algodonal river water was assessed by determining quality indices: ICOMI; ICOSUS, ICOPH, ICOMO and ICOTEMP. The research was developed in ten months, covering a rainy season and a dry one, where the bimodal rain regime, characteristic of the area, was used. Likewise, the relationship between the set of results and assessments that allowed the analysis of variances and behavior of the variables in each season, according to the rainfall regime, was determined. According to research results, the water quality in this section does not present any contamination, with a good water quality level, being suitable for human consumption, with previous treatment.

* Ingeniera ambiental, magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Docente investigador, Grupo de Investigación en Asuntos Ambientales y Desarrollo Sostenible-Mindala, Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Norte de Santander, Colombia. ORCID: 0000-0002-5772-2640. ramirandas@ufpso.edu.co

** Ingeniero. Profesional universitario independiente. ORCID: 0000-0002-7247-3347. roiman17@outlook.es

*** Ingeniero. Profesional universitario independiente. ORCID: 0000-0003-3958-945X. katimilex91@hotmail.com

**** Ingeniero ambiental, especialista en Práctica Docente Universitario. Docente investigador, Grupo de Investigación en Asuntos Ambientales y Desarrollo Sostenible-Mindala, Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Norte de Santander, Colombia. ORCID: 0000-0002-8738-9834. wangeritac@ufpso.edu.co

Keywords: quality index, water quality assessment, water pollution index and water.

INTRODUCCIÓN

Más allá del método o la técnica de estimación, valoración y evaluación, se puede considerar que la noción de calidad de agua es relativa, pues no solamente se refiere a las propiedades y concentraciones fisicoquímicas y microbiológicas del agua de una fuente superficial, sino que también se relaciona con el uso que se le dé al agua y sus aspectos ecosistémicos y no acuáticos. Además, para la comprensión de este concepto es necesario la combinación de factores naturales con sus características fisicoquímicas y microbiológicas.

Por otra parte, para delimitar este concepto es necesario relacionar el sistema de evaluación con las características del contexto, las particularidades del componente humano y las dinámicas socioeconómicas del lugar objeto de estudio. Así, es necesario que cualquier propuesta científica de evaluación de calidad del agua considere el contexto, el cual es dinámico y cambiante, tanto espacial como temporalmente, debido a diferentes factores antrópicos relacionados al uso, ocupación y aprovechamiento del agua.

Bajo esta premisa se sopesa la importancia de evaluar la calidad del agua del río Algodonal, que es la principal fuente abastecedora de agua para consumo humano de la población asentada en los municipios de Abrego y Ocaña, Norte de Santander. Esta fuente de agua históricamente ha sido susceptible de procesos de contaminación hídrica, bien sea por vertimiento de aguas residuales de trazas de agroquímicos, entre otras sustancias de interés, o por su alta vulnerabilidad de contaminación por hidrocarburos, procesos que de alguna u otra forma alteran las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del agua. El Algodonal recibe todo tipo de vertimientos, los cuales no tienen ningún tipo de tratamiento previo; aquí se depositan las aguas residuales o vertimientos generados por las comunidades de esta zona y por el sector productivo; situación que trae consigo la alteración de la calidad del río Algodonal, además de la afectación indirecta a la salud pública y al desarrollo y funcionamiento de los ecosistemas.

Con base en esta problematización se desarrolló la presente investigación, que permitió la determinación y evaluación de la calidad del agua de la fuente superficial río Algodonal a partir de la estimación de índices de contaminación, para así comprender las variaciones y comportamiento de la calidad del agua.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA

El área objeto de investigación fue un tramo del cauce principal del río Algodonal ubicado entre los municipios de Abrego y Ocaña. Esta área, que abarca la parte media de la cuenca del río, fue priorizada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2007) para el proceso de ordenación y manejo de cuenca POMCHRA (Corponor, 2007) e identificada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) con el código 1605. La figura 1 ilustra el área objeto de estudio:

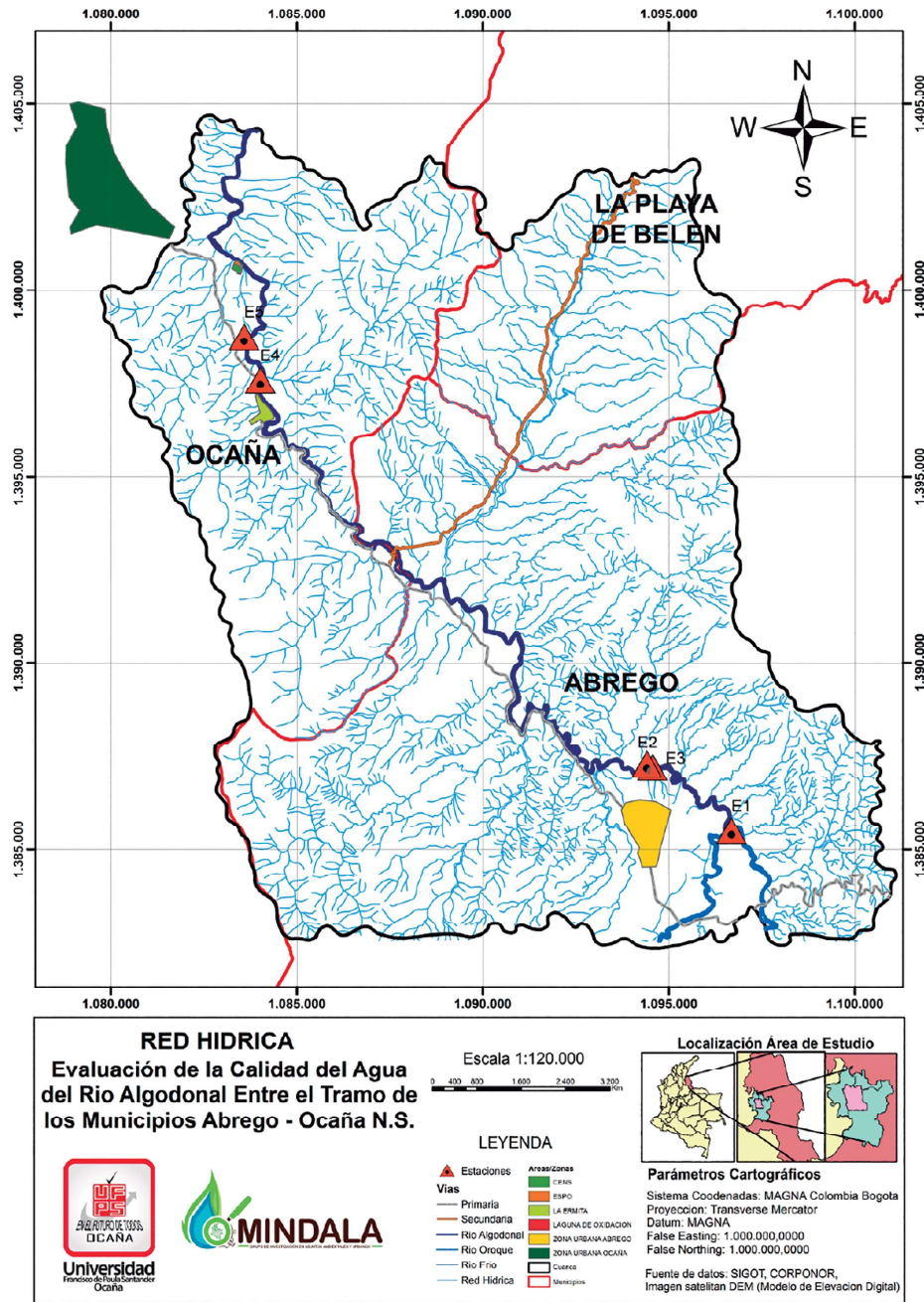


Figura 1. Zona de estudio y estaciones de control y aforo (E).

Fuente: Miranda y Ramírez (2016).

METODOLOGÍA

Se desarrolló una metodología de investigación tipo exploratorio con enfoque cuantitativo para el análisis estadístico descriptivo (Hernández, Fernández y Baptista, 2010), con relacionamiento de variables fisicoquímicas para determinar calidad del agua.

Se buscó aportar conocimiento sobre el estado actual de la calidad del agua del río Algodonal,

además de corroborar hipótesis colectiva de tipo subjetiva que existe sobre la calidad del agua de esta fuente, así como generar nuevos planteamientos de investigación que conlleven nuevos estudios. Con base en esto se seleccionó estratégicamente, según metodología de Sierra (2011), un tramo del río de 30.27 km de longitud, ubicado entre el municipio de Abrego y Ocaña.

Este tramo abarca la confluencia del río Algodonal hasta 1000 m de aguas arriba del punto de captación de la bocatoma del acueducto del municipio de Ocaña. También se seleccionó de manera aleatoria o mecánicamente la población presente cinco unidades de análisis, es decir, cinco estaciones de control-aforo, distribuidas a lo largo del tramo. Cada estación seleccionada se ubicó a distancias aleatorias en el gradiente del río Algodonal.

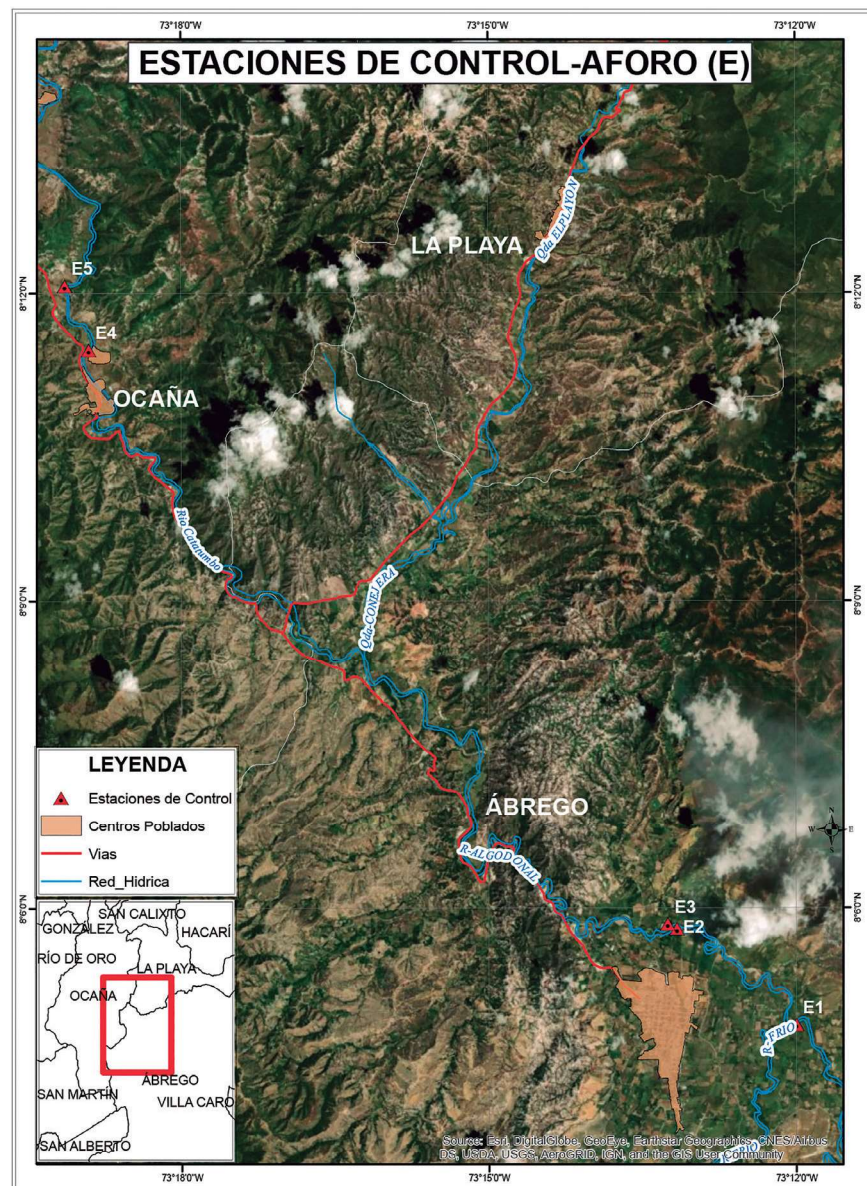


Figura 2. Tramo del río Algodonal, objeto de estudio.

Fuente: Miranda (2016).

Las distancias entre estaciones de control se establecieron según el protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua (Ideam, 2007), es decir, entre las estaciones a monitorear, los indicadores de calidad y la oferta superficial, en las que se procuró determinar, en la medida de lo posible, distancias similares, excepto cuando las condiciones topográficas o de otra índole no lo permitían.

Además, en el establecimiento de las estaciones de control se tuvo en cuenta la influencia de un vertimiento o presencia de nuevo tributario del río para establecer las estaciones de control, ya que esto altera la composición fisicoquímica y microbiológica del agua (Sierra, 2011). En la tabla 1 se relaciona la ubicación geográfica de cada estación de control:

Tabla 1. Descripción y georreferenciación de las estaciones de control

E	Localización	Geográficas		Altitud (m s. n. m)
		Latitud	Longitud	
E1	Nacimiento río Algodonal	8°4'51.8"	73°12'02.4"	1373
E2	Hasta 100 m aguas arriba de la laguna oxidación de Abrego.	8°5'47"	73°13'10.2"	1337
E3	Hasta 100 m aguas abajo de laguna oxidación de Abrego	8° 5' 43.2"	73° 13' 19.2"	1357
E4	Punto San Luis	8°11'26.4"	3°18'54.2"	1249
E5	Hasta 1000 m aguas arriba de la torre de captación de Ocaña.	8°12'04"	3°19'08"	1231

La metodología implementada se basó en el desarrollo de las siguientes actividades para alcanzar el logro de los objetivos de la investigación:

- Recopilación y análisis de la información secundaria.
- Reconocimiento preliminar del área y de las condiciones de la red hídrica y levantamiento de la información primaria (in situ), además de la determinación de las estaciones de control de monitoreo de la calidad del río Algodonal. Asimismo, determinación de la oferta superficial del agua mediante aforo de caudales en cada periodo y durante seis meses (periodo seco y periodo de lluvias).
- Implementación de plan de monitoreo.
- Análisis de variables fisicoquímicas a nivel de análisis de laboratorio.
- Análisis comparativo de los resultados de variables fisicoquímicas del agua del río Algodonal con los parámetros definidos por ley.
- Estimación de índices de contaminación y de calidad del agua con la aplicación del software de código libre ICATEST.
- Análisis estadístico descriptivo de resultados arrojados de variables fisicoquímicas del agua para evaluar la calidad del agua.
- Triangulación de resultados, sistematización y documentación de la información veraz y confiable.

DESARROLLO

Se implementó un plan de monitoreo y evaluación de la calidad del agua para el río Algodonal, que cubrió un periodo de lluvias y un periodo seco, según las características del régimen bimodal de lluvias

de esta zona. Se desarrollaron dos muestreos *in situ* de tipo manual con una frecuencia trimestral (Ideam, 2007).

El monitoreo se realizó con base en las técnicas y procedimientos de recolección, conservación y preservación estandarizados en *Standard methods for the examination of water and wastewater* (Rice, Baird, Eaton y Clesceri, 2012) y lo establecido por Environment Protection Agency (2013) y el Instituto Nacional de Salud (2011), entidades que definen los procedimientos para la evaluación de variables en cuerpos lóticos de agua dulce.

Los análisis de variables que se realizaron para la valoración y evaluación de la calidad del agua fueron:

Los análisis físicos permitieron determinar los parámetros físicos organolépticos para detectar presencia de sustancias que repercuten directamente sobre las condiciones estéticas del agua e inciden en la determinación de la calidad del agua. Estos análisis se realizaron mediante índices de contaminación (ver tabla 2).

Tabla 2. Variables físicas

VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	MÉTODO
Color real	UPtCo	SM 2120 C
Turbiedad	UNT	SM 2130 B
Temperatura	°C	SM 2550 B
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg SST/L	SM 2540 D
Sólidos totales (ST)	mg SST/L	SM 2540 B

Fuente: Reporte de resultados de ensayo. Laboratorio de Estudios Ambientales, UPB/Bucaramanga (2016).

El análisis de las variables químicas se describe en la tabla 3.

Tabla 3. Variables químicas

VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	MÉTODO LAB.
INDICADORES		
Conductividad	µS/cm	SM 2510 B
Alcalinidad total	mg CaCO ₃ /L	SM 2320 B
pH	Por análisis químico en una escala de 0 a 14	SM 4500-H+ B
Dureza total	mg CaCO ₃ /L	SM 2340 C
SUSTANCIAS QUÍMICAS		
Oxígeno disuelto (OD)	mg O ₂ /L	SM 4500-O C
Fluoruros	mg F ⁻ /L	SM 4500- F C
Cloruros	mg Cl ⁻ /L	SM 4500-Cl- B
Nitratos	mg NO ₃ /L	SM 4500-NO ₃ B
Nitritos	mg NO ₂ /L	SM 4500-NO ₂ B
Nitrógeno amoniacal	mg NH ₃ /L	SM 4500-NH ₃ B, C

VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	MÉTODO LAB.
DBO5	mg O ₂ /L	SM 5210 B, SM 4500-O C
DQO	mg O ₂ /L	SM 5220 C
Organoclorados	µg/L	EPA 3510C- EPA 8081 B -
Hidrocarburos totales	mg TPH /L	EPA 8015C
Organofosforados	µg/L	EPA 3510C-EPA 8141 B

Fuente: Laboratorio de estudios ambientales de la UPB/Buramanga (2016).

Asimismo, se establecieron los límites permisibles de acuerdo a lo definido en la normatividad vigente para el análisis comparativo de los resultados de las variables arrojadas a nivel de laboratorio y la norma, así como para definir el criterio de calidad del agua (véase tabla 3).

Tabla 4 . Valores permisibles de resultados de variables

PARÁMETROS ¹	ABREVIATURAS	LÍMITES PERMISIBLES	
		Norma nacional (mg/l)	Guidelines for drinking water quality (OMS, 1997)
Oxígeno disuelto	OD	5.0	---
Demanda bioquímica O ₂	DBO	5.0	No hay directriz
Demanda química O ₂	DQO	25.0	No hay directriz
Sólidos suspendidos Totales	SST	1000	1000
Nitratos	NO	10.0	505
Nitritos	NO	1.0	3
PH	Unidades	5-9 unidades	6.5-8.5
Temperatura	°C	Ausente	
Turbiedad	NTU		510
Coliformes totales	NMP	20 000 microorganismos/100mL	0
Coliformes fecales	NMP	2000 microorganismos/100mL	0
Alcalinidad	mg/l (CaCO ₃)	100	No hay directriz
Dureza total	mg O ₂ /L	169	500
Carbamatos	Ppb	---	----15
Organoclorados	mg/L	----	----
Órgano-fosforados	µg/L	---	2
Hidrocarburos totales	mg/ C ₆ H ₆	0	0
Grasas y aceites	mg/L MEH (material extraíble del hexano)	0	0

⁵ Cantidad presente de nitrato y nitrito . La suma de las dos concentraciones no debe exceder 10 mg/L.

¹⁰ Turbiedad promedio para una efectiva desinfección = 1 UNT. Muestra simple = 5 UNT.

¹⁵ Se aplica cuando en el agua hay más de un plaguicida considerado en las guías de calidad.

Fuente: Organización Mundial de la Salud (1997).

Después se generó un análisis estadístico comparativo con la serie de datos arrojados en los dos periodos para observación de las variaciones y comportamiento de variables, insumo para la determinación de los índices de contaminación del agua propuestos por Ramírez, Restrepo y Viña (1997) mediante aplicación del Software ICATEST V1.0 (Fernández, Ramos y Solano, 2004).

Los índices de contaminación estimados fueron: ICOMO (índice de contaminación por materia orgánica), ICOMI (índice de contaminación por mineralización), ICOSUS (índice de contaminación por sólidos suspendidos), ICOPH (índice de contaminación por pH) e ICOTEMP (índice de contaminación por temperatura). Este último solo se determinó en la estación 3 (aguas abajo de la laguna de estabilización), con base en la temperatura del vertimiento reportado por los valores arrojados en el estudio realizado por el Instituto Colombiano del Petróleo (2011). En la tabla 5 se relacionan los índices de contaminación estimados:


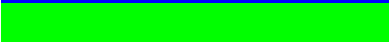



Tabla 5. Relación de índices de contaminación

ECUACIÓN DEL INDICADOR	DESCRIPCIÓN
$ICOMI = \frac{1}{3} (\dot{I}.conductividad + \dot{I}.dureza + \dot{I}.alcalinidad).$ $\dot{I}.conductividad = \text{Log}_{10}. \dot{I}.conductividad = 3.26 + 1.34 \text{Log}_{10}. Conductividad.$ $\dot{I}.conductividad = 10^{\log.I.Conductividad}$ $\dot{I}.dureza = \text{Log}_{10}. \dot{I}.dureza = -9.09 + 4.40\text{Log}_{10}. Dureza \text{ mg/L}.$ $\dot{I}.dureza = 10^{\log.I.Dureza}$	ICOMI (índice de contaminación por mineralización) Conductividades mayores a 270 $\mu\text{S/cm}$ tienen un índice de conductividad = 1 Durezas mayores a 110 mg/L tienen un índice = 1 Durezas menores a 30 mg/L tienen un índice = 0
$\dot{I}.alcalinidad = -0.25 + 0.005 \text{Alcalinidad mg/L}$	Alcalinidades mayores a 250 mg/L tienen un índice de 1 Alcalinidades menores a 50 mg/L tienen un índice de 0
$ICOMO = \frac{1}{3} (I.DBO + I.coliformes + I.oxígeno \%)$	ICOMO (índice de contaminación por materia orgánica), conformado por demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), coliformes totales y porcentaje de saturación de oxígeno.
$\dot{I}.DBO = -0.05 + 0.70\text{Log}_{10}. DBO(\text{mg/L})$	DBO > 30 (mg/l) = 1 DBO < 2 (mg/l) = 0
$\dot{I}.coliformes \text{ totales} = -1.44 + 0.56\text{Log}_{10}. \text{Col. Tol} (\text{NMP}/100\text{ml})$	Coliformes totales > 20.000 (NMP/100ml) = 1 Coliformes totales < 500 (NMP/100ml) = 0
$I.oxígeno \% = 1 - 0.01 \text{oxígeno}\%$	Oxígenos (%) > a 100% tienen un índice de oxígeno de = 0. Para sistemas lenticos con eutrofización y porcentajes de saturación > al 100% se sugiere reemplazar la ecuación por: $I.oxígeno \% = 0.01 \text{oxígeno}\% - 1$
$ICOSUS = -0.02 + 0.0003 \text{sólidos suspendidos}(\text{mg/L})$	ICOSUS (índice de contaminación por sólidos suspendidos) Sólidos suspendidos > a 340 mg/l tienen un ICOSUS = 1 Sólidos suspendidos < a 10 mg/l tienen un ICOSUS = 0
$ICOTEMP = -0.49 + 1.27\text{Log}(\text{temp. vertimiento} - \text{temp. cursoreceptor})$	ICOTEMP (índice de contaminación por temperatura). Si la diferencia de temperatura es menor a 2.5° C (275.5 K), ICOTEMP = 0 Si la diferencia de temperatura es mayor a 15.0 °C (288.5 K), ICOTEMP = 1
$ICOPH = e^{-31.08+3.45pH/1+e^{-31.08+3.45p}}$	ICOPH (índice de contaminación por pH)

Fuente: Fernández, Ramos y Solano (2004).

Después de calcular los índices de contaminación se hizo una evaluación con base en la escala de juicio y valoración del grado de contaminación del agua:

Tabla 6 . Escala de juicio y valoración del grado de contaminación del agua

ICO	GRADO DE CONTAMINACIÓN	ESCALA DE COLOR
0-0.2	Ninguna	
>0.2-0.4	Baja	
>0.4-0.6	Media	
>0.6-0.8	Alta	
>0.8-1	Muy alta	

Fuente: Ramírez, Restrepo y Viña (1997)

Los resultados de los índices se compararon con base en lo descrito en la tabla 6, la cual muestra rangos y asigna un valor numérico de cero a uno. El grado de contaminación del agua se clasifica en orden ascendente en una de las cinco categorías de contaminación identificadas con un tipo de color.

A cada conjunto de datos obtenidos en este estudio se le realizó un análisis estadístico descriptivo para conocer las medidas de tendencia central y las medidas de variabilidad. Esto llevó a un análisis múltiple, ya que se trabajó con las diferentes variables fisicoquímicas del agua, junto con la variable de oferta superficial del agua (caudal); igualmente, se evidenciaron las fluctuaciones de las variables por medio de coeficientes de correlación que determinaron la covariación.

RESULTADOS

Se realizó una caracterización de la oferta superficial del río Algodonal en el tramo comprendido entre el municipio de Abrego y Ocaña. A partir del monitoreo y evaluación de la oferta superficial según régimen de lluvias para esta zona se realizaron dos monitoreos de una frecuencia trimestral. Es necesario resaltar que los resultados de esta variable estuvieron inmersos en un contexto de variabilidad climática caracterizada por dos efectos bien definidos.

El primer efecto, un frente cálido en el Pacífico tropical, desencadenó un fenómeno meteorológico comúnmente conocido como el fenómeno del Niño, que trajo consigo una reducción significativa de caudales en la región Caribe y la región Andina en un periodo oficial extendido desde mayo 2015 hasta marzo de 2016 (Ideam, 2016), lo que significó que la oferta superficial del río Algodonal para este periodo presentó una disminución significativa de caudales.

Por su parte, en el segundo periodo se presentó una intensa actividad en el océano Atlántico tropical, dando lugar a una temporada de ondas tropicales con lluvias atípicas mínimas fuera de la época. Situación que se vio reflejada en el río Algodonal e incidió en el comportamiento hidrológico, así como alteró ciertas características fisicoquímicas y microbiológicas del agua.

En la tabla 7 se relacionan los caudales registrados para el periodo de lluvias en las cinco estaciones de control definidas en el tramo objeto de estudio:

Tabla 7. Caudales periodo de lluvias

ESTACIÓN	CAUDAL (m ³ /s)
1	1.009
2	0.773
3	1.080
4	2.375
5	2.711
Media aritmética	1.5896

Se evidencia que los caudales no sobrepasaron para este periodo los 3 m³/s y que a lo largo de la extensión del tramo se alcanzó un caudal máximo de 2.7 m³/s con una media aritmética de 1.59 m³/s.

En cuanto al periodo seco, se presentó un caudal promedio de 1.12 m³/s y un mínimo de 0.55 m³/s, tal como se evidencia en la tabla 8:

Tabla 8. Registro de caudales periodo seco

PUNTO	CAUDAL (m ³ /s)
1	0.555
2	0.686
3	0.99
4	1.74
5	1.72
Media aritmética	1.138

Con base en estos caudales registrados en los dos periodos se muestra a continuación los valores del análisis estadístico descriptivo (tabla 9 y figuras 4 y 5), para efectos de confiabilidad de los datos de caudal tomados en la investigación:

Tabla 9. Análisis estadístico descriptivo de caudales

	N	MÍN.	MÁX.	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VARIANZA
Valores de caudales (m ³ /s)	10	0.555	2.711	1.36390	0.738967	0.546

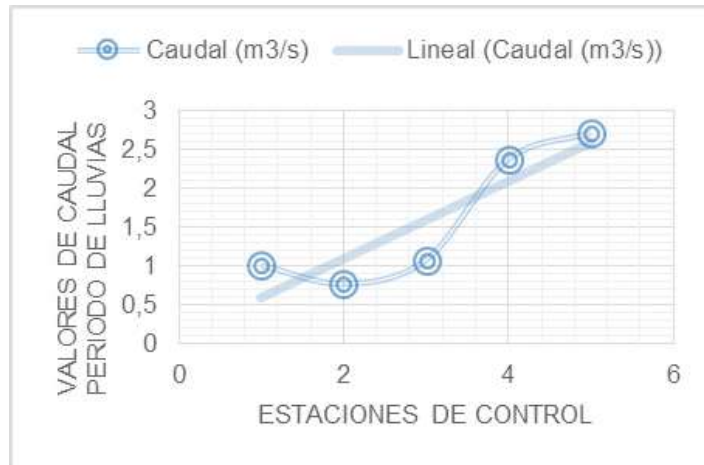


Figura 3. Curva de dispersión para caudales periodo de lluvias.

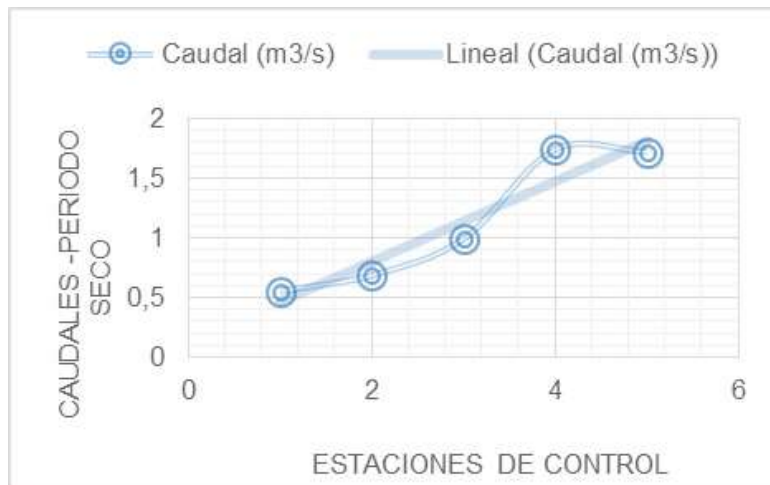


Figura 4. Curva de dispersión caudales medidos en periodo seco.

Considerando el fenómeno meteorológico dado en esta región, se realizó una comparación directa entre las fechas de afectación climática de fenómeno del Niño y el periodo de muestreo para la época de lluvias, en el que posiblemente los resultados atípicos de caudales en el primer periodo de muestreo (3 abril de 2016) se presentaron por los efectos colaterales persistentes del fenómeno de variabilidad climática que incidió sobre la oferta superficial de esta fuente hídrica. Es decir, las lluvias que se presentaron durante el periodo de abril 2016 fueron considerablemente más bajas respecto a las precipitaciones de la misma temporada en años anteriores.

También fue necesario realizar este análisis comparativo entre el comportamiento meteorológico y pluviométrico, ya que se consideró importante exponer este argumento para la interpretación de los niveles de caudales determinados por debajo de la media frente a los resultados publicados por la Asociación Promotora Medioambiental (2008), que utilizando la misma técnica de molinete obtuvo aforos de 1.487-4.264 y 3.35, expresados en m^3/s para las estaciones 1, 4 y 5.

Esto significa que hubo una reducción de caudales de 0.478-1.889-0.639 m^3/s durante el periodo de lluvias 2016 respecto a la misma época (16-29 abril de 2008).

Por otra parte, se analizaron los resultados obtenidos del análisis de un conjunto de variables fisicoquímicas obtenidas a nivel de laboratorio, a fin de evaluar la calidad del agua del río Algodonal. Asimismo, se realizó un análisis estadístico descriptivo detallado con la serie de datos obtenidos, determinando rangos mínimos, medios y máximos por variable, con sus correspondientes variaciones por estación y periodo analizado. La tabla 9 muestra el resumen de resultados:

Tabla 9 . Resumen de análisis estadístico de resultados de parámetros

VARIABLE	MEDIA		DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VARIANZA
	Est.	Error estándar	Est.	Est.
Oxígeno disuelto	7.36	0.24875	0.78662	0.619
Temperatura del agua (°C)	24.99	0.5883	1.8604	3.461
Unidades de pH	7.009	0.14486	0.45807	0.21
Alcalinidad del agua	41.05	1.1455	3.6225	13.123
Aluminio	1.84	0.1418	0.4484	0.201
Color Real en el agua	17	1.5916	5.0332	25.333
Conductividad	56.11	4.662	14.7424	217.339
Cloro	0	0	0	0
Cloruros	9.5835	1.658443	5.244457	27.504
Dureza total	28.34	7.0212	22.2029	492.969
DBO5	1.096	0.23001	0.72736	0.529
DQO5	8.411	1.28455	4.06212	16.501
Floruros	8.64	1.5723	4.972	24.72
Grasas y aceites	4.032	0.50815	1.6069	2.582
Nitratos	1.864	0.19838	0.62734	0.394
Nitritos	0.0472	0.014351	0.045382	0.002
Nitrógeno amoniacal	2.252	0.28034	0.8865	0.786
Ortofosfatos	0.171	0.00795	0.02514	0.001
Sólidos suspendidos totales	19.343	5.5559	17.5694	308.683
Sólidos totales	88.1	4.5251	14.3097	204.767
Sólidos disueltos	58.306	5.1662	16.337	266.899
Turbiedad (NTU)	46.63	6.0168	19.0268	362.02

Con este análisis estadístico se logra comprender el comportamiento y variaciones de las variables fisicoquímicas analizadas por serie de datos durante los dos periodos evaluados en cada una de las estaciones de control, tal como se evidencia en las figuras 5 y 6.

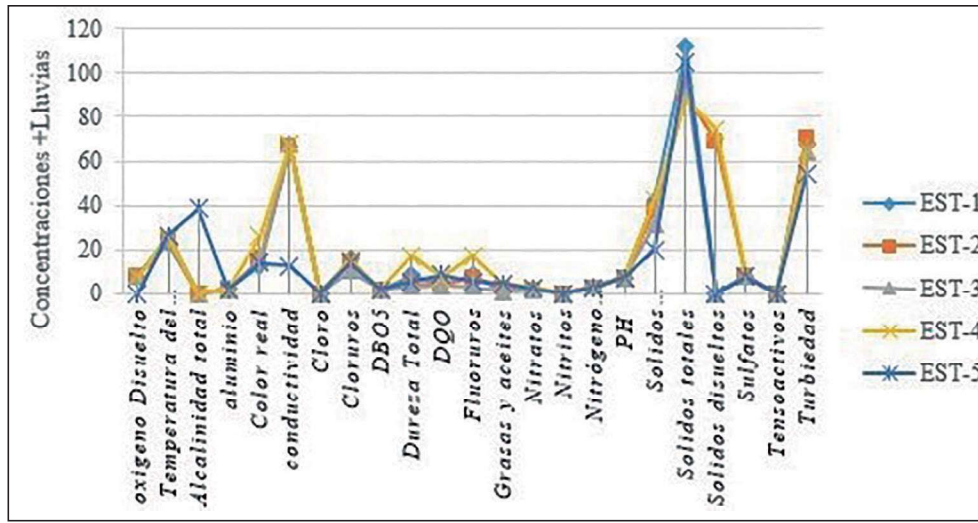


Figura 5. Resultados fisicoquímicos evaluados en las cinco estaciones (E) en época de Invierno.

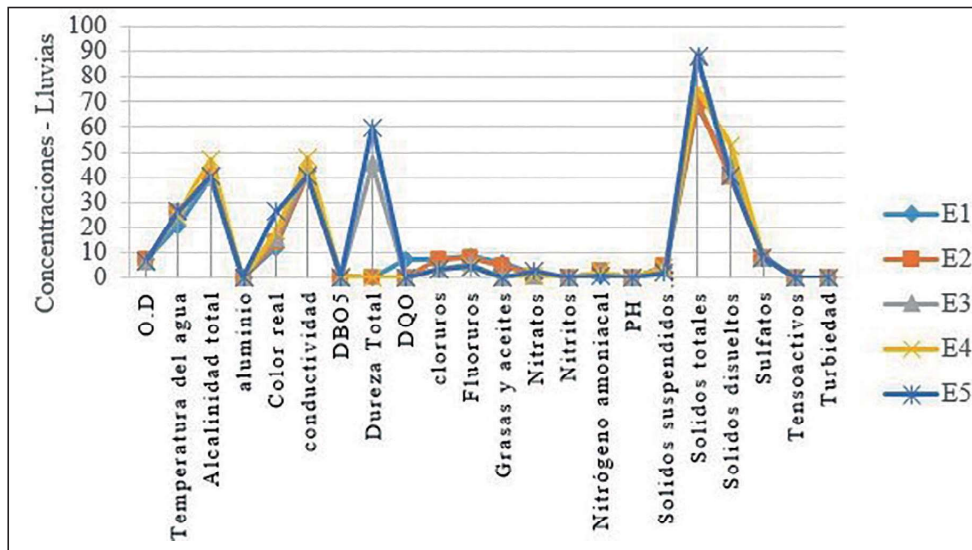


Figura 6. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos en época de tiempo seco.

Según información estadística (ver más adelante tabla 11), se observa un comportamiento general de las variables en cada estación de control, monitoreadas según régimen de lluvias. No obstante, la variable temperatura del agua presentó variaciones que oscilan entre 20.9 °C y 26.6 °C, alcanzando un valor máximo en la estación n°1 en el periodo seco.

El pH no presentó variación de acuerdo al resultado arrojado por la varianza (0.21). Los registros de valores mínimos y máximos en el periodo de lluvias estuvieron entre 6.3 en la E3 y 7.6 en la E1. Esto significa que aun en el periodo seco, en el que se espera mayor incidencia de la ionización en el agua, se registró un agua con un pH en rango neutro, es decir, un rango normal para fuentes de agua superficial, razón que justifica el desarrollo y sostenimiento de procesos bioecológicos eficientes.

En lo que respecta a la conductividad, se observó que se dieron valores más altos en la E5 (estación la cabaña), con valores de 79.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que en la E2 se reportaron valores más bajos de 40.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que lleva a ratificar que, de acuerdo a estos resultados, este comportamiento de variables del río es típico de ríos de montaña (Cantera, Carvajal y Castro, 2009).

Por su parte, los sólidos suspendidos totales (SST) fue la variable que arrojó una elevada variación entre las estaciones, tuvo valores entre 2.0 mg SST/L en E5 y 42.4 mg SST/L en E1 y E5; pero estos resultados se consideran dentro de lo normal de acuerdo con la ubicación altitudinal de las estaciones E1 y E5, pues allí se dieron valores altos de conductividad y de sólidos totales debido al escurrimiento superficial presentado en este periodo analizado y a la acumulación de sedimentos.

Según los resultados de dureza del agua obtenidos, se estableció que el río tiene agua blanda. El valor máximo fue de 60 mg CaCO_3/L en la E5 y un valor mínimo de 3.5 mg CaCO_3/L en la E3. Estos resultados se encuentran dentro del rango de 0-75 mg CaCO_3/L , lo que significa que es un agua óptima para fines sanitarios, pues un resultado de dureza de hasta 25 mg CaCO_3/L es típico de aguas medianamente productivas.

De hecho, se evidencia una variación según resultados del periodo de lluvias y de menos lluvias (3.5-45 mg CaCO_3/L), con una media aritmética de 28.34 mg CaCO_3/L ; valor numérico que traduce un comportamiento de dureza del agua en la E3, que se ubica en el rango de clasificación como aguas muy productivas (>25 mg CaCO_3/L).

En todos los casos anteriores, los valores de estos parámetros se consideran normales de acuerdo a lineamientos de calidad del agua para fuentes superficiales, según consta en la normatividad vigente.

La variable del oxígeno disuelto (OD) arrojó valores medios, que oscilaron entre 6.3 mg/L en la E3 y 8.35 mg/L en la E1, lo que significa que se dio una baja variación tanto en el muestreo en periodo de lluvias como el seco. El promedio entre las estaciones fue de 7.36 mg/L, esto significa que el OD se considera de óptima calidad, lo que es un indicador de que el río Algodonal tiene una propiedad de autodepuración (de oxigenación).

Por otra parte, en la variable DBO y DQO se evidenció variaciones en comparación con los dos periodos. Esto arrojó valores altos en temporada de lluvias, sobre todo en la E5, con valores de 1.85 mg O_2/L y 8.6 mg O_2/L , mientras que en la E1 mostró valores menores de 1.65 mg O_2/L y 4.3 mg O_2/L . Sin embargo, la E2 registró para la DQO un valor de 4.15 mg O_2/L . En la temporada seca se presentaron valores altos, sobre todo en la E4, con picos de 0.78 mg O_2/L y 14.67 mg O_2/L .

Los resultados demuestran que el río Algodonal a lo largo de su recorrido tiene la capacidad de autodepuración, a pesar de recibir descargas de materia orgánica en gran parte de su recorrido.

Se concluye con base en lo expuesto que todas las variables analizadas y evaluadas están dentro de los rangos de los valores máximos permisibles, establecidos en la Resolución n.º 0631 de 2015 y en correspondencia a lo establecido en el orden internacional, como la Organización Mundial de la Salud (2011) en la 4.ª edición de las guías para la calidad del agua potable.

Asimismo, en cuanto a la valoración de la calidad del agua del río Algodonal, a partir de la determinación de índices de contaminación y de calidad y con base en los promedios y a la escala de valoración y juicio se afirma que el nivel de calidad del agua del tramo es de buena calidad. La tabla 10 promedia los resultados de cinco índices de contaminación evaluados en las cinco estaciones sobre el tramo objeto de estudio y durante temporada de lluvias y temporada seca.

Tabla 10. Relación de resultados de índices de contaminación río Algodonal

ICOMO 1	0.061		Rango 0-0.2	0.016		Rango 0-0.2	0.071		Rango 0-0.2	0.016		Rango 0-0.2	0.014		Rango 0-0.2
ICOMO2	0.095	0.078	NINGUNO	0.144	0.08	NINGUNO	0.162	0.1165	NINGUNO	0.12	0.068	NINGUNO	0.161	0.0875	NINGUNO
ICOSUS 1	0.316	0.25	Rango 0.2-0.4	0.25	0.22	Rango 0.2-0.4	0.271	0.2575	Rango 0.2-0.4	0.244	0.2245	Rango 0.2-0.4	0.295	0.2695	Rango 0.2-0.4
ICOSUS2	0.184		BAJO	0.19		BAJO	0.244		BAJO	0.205		BAJO	0.244		BAJO
ICOTEM P 2	NA			NA			0.302	0.302	BAJO	NA			NA		
ICOpH 1	0.002		Rango 0-0.2	0.002		Rango 0-0.2	0.003		Rango 0-0.2	0.004		Rango 0-0.2	0.002		Rango 0-0.2
ICOpH 2	0.001	0.0015	NINGUNO	0.001	0.0015	NINGUNO	0.11	0.056	NINGUNO	0.005	0.0045	NINGUNO	0.008	0.005	NINGUNO

Nota. La leyenda se interpreta como el nivel de contaminación o como indicador de calidad, así: azul: baja contaminación o agua de muy buena calidad, y verde: baja contaminación o agua de buena calidad.

A continuación se resume un comparativo de promedios dados entre cada estación y por periodo analizado:


Tabla 11. Resumen de promedios de índices de contaminación

I.C	PROMEDIO POR ESTACIÓN									
	E 1		E 2		E 3		E 4		E 5	
	(+LI)	(-LI)	(+LI)	(-LI)	(+LI)	(-LI)	(+LI)	(-LI)	(+LI)	(-LI)
ICOMI	0.051	0.033	0.051	0.032	0.052	0.033	0.052	0.038	0.064	0.044
ICOSUS	0.316	0.184	0.25	0.19	0.271	0.244	0.244	0.205	0.295	0.244
ICOMO	0.061	0.095	0.016	0.144	0.071	0.162	0.016	0.12	0.014	0.161
ICOpH	0.002	0.001	0.002	0.001	0.003	0.11	0.004	0.005	0.002	0.008
ICOTemp	NA		NA		0.302		NA		NA	

Nota. La sigla N/A se refiere a que no aplica, ya que fue medido con base en la temperatura del vertimiento en la (E3).

Con base en esto se relaciona la escala de valoración y evaluación de los índices de contaminación calculados para la evaluación de nivel de calidad del agua del tramo del río Algodonal:

Tabla 12. Rango de evaluación de los ICOs y convenciones

CONTAMINACIÓN	RANGO	INDICADOR DE CALIDAD	COLOR
Ninguna	0-0.2	Muy buena	
Baja	0.2-0.4	Buena	
Media	0.4-0.6	Media	
Alta	0.6-0.8	Mala	
Muy Alta	0.8-1.0	Pésima	

Fuente: Ramírez, Restrepo y Viña (1997).

Considerando los resultados de los índices de contaminación, se realizó un análisis estadístico para la comprensión de sus variaciones y comportamiento de la calidad del agua en cada una de las estaciones y por periodo estudiado.

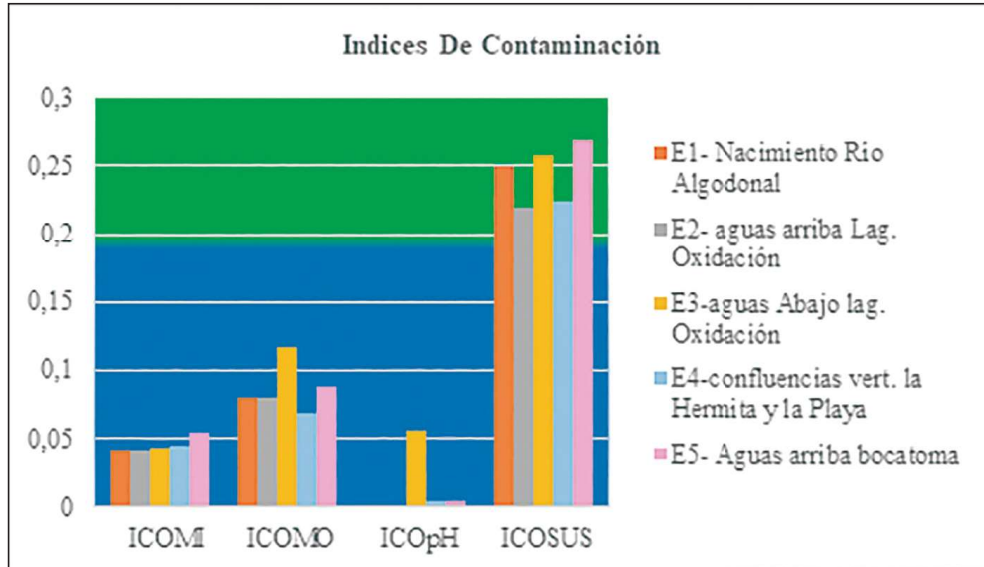


Figura 7. Resultados de índices de contaminación.

Según la figura 7, no se presentó contaminación por mineralización debido a los cambios significativos en el pH, consecuencia de la eutrofización del sistema, ni por contaminación por presencia de materia orgánica, gracias a la capacidad de autodepuración que tiene el río.

Sin embargo, se presentó una baja contaminación por sólidos suspendidos, ocasionada posiblemente por el vertimiento de aguas residuales que modificaron el equilibrio iónico del agua y por las lluvias atípicas que se presentaron.

Específicamente, en el primer periodo analizado se presentó un nivel bajo de contaminación por sólidos suspendidos debido a la escorrentía superficial derivada de las lluvias, y en el segundo periodo, debido a los caudales bajos, propios de la época seca del año.

La tabla 9 evidencia que el vertimiento de la laguna de estabilización del municipio de Abrego genera un nivel bajo de contaminación al río Algodonal, lo que es atribuido al cambio de temperatura que se da en el agua al entrar el vertimiento en contacto con el sistema hídrico, puntualmente en la estación n.º 3 (aguas abajo de la laguna de oxidación).

En términos de calidad, el río Algodonal en el tramo estudiado presentó condiciones de muy buena calidad del agua en todas las estaciones de muestreo si se consideran únicamente variables relacionadas a procesos de mineralización, cambios de pH y concentración de materia orgánica.

Estos resultados presentan una evolución en la calidad del agua respecto a los resultados obtenidos en las diferentes estaciones definidas a lo largo del río Algodonal en el monitoreo realizado por la Asproma (2008), que encontró niveles de contaminación por materia orgánica muy alto, por lo que se caracterizó como un agua de pésima calidad en los puntos de La Hamaca (km 23), Guayabal, San Luis y aguas arriba de la confluencia del río Algodonal.

Asimismo, se encontraron niveles muy bajos de contaminación por sólidos suspendidos, excepto en el punto La Hamaca, es decir, cercanos al punto E3, lo que indica una tendencia sostenida de contaminación aguas abajo de la laguna de estabilización de abrego.

De hecho, pese a la capacidad de autodepuración que tiene el río, la condición de baja contaminación por sólidos suspendidos (que se repite en todas las estaciones) significa que esta autodepuración no es suficiente para que el río se recupere completamente del aporte constante de los vertimientos de aguas residuales y doméstica, constituyéndose esta situación en un objetivo de calidad que amerita futuras estrategias de gestión orientadas a generar una regresión o estabilización de la tendencia a un desequilibrio iónico, así como exige mejorar la integridad en la dinámica natural del cauce.

CONCLUSIONES

Con esta investigación se constata la reducción de caudales de esta fuente, ya que los caudales medidos estuvieron por debajo de los registros mínimos obtenidos para el mismo periodo en el año 2008, según resultados de la investigación de la Asociación Promotora Medioambiental (2008). Esta situación fue generada posiblemente por la variabilidad climática dada en los últimos años en esta zona, lo que ha afectado el régimen de lluvias, además de los efectos ocasionados por el fenómeno del Niño en 2016, que alteraron las condiciones hidráulicas del río Algodonal en el tramo estudiado. Así, la oferta superficial del río Algodonal a 2016 se redujo al 50% en comparación con la oferta superficial del año 2008.

El análisis de variables fisicoquímicas presentó un comportamiento estable en cada periodo analizado y por cada estación. Sin embargo, se presentaron resultados inferiores a los rangos permisibles en temporada de lluvias, debido a la dilución natural de contaminantes que se produce por el incremento en el nivel de caudal. Por otra parte, la composición fisicoquímica y microbiológica del agua del río Algodonal es apta para consumo humano previo tratamiento, según los resultados del análisis comparativo entre los valores arrojados de las variables fisicoquímicas de calidad del agua con los rangos permisibles establecidos en la norma vigente en Colombia.

Según los resultados de los índices de contaminación propuestos por Ramírez, Restrepo y Viña (1997), el agua del río Algodonal no presenta “ninguna contaminación”, ni por materia orgánica, ni por mineralización, ni mucho menos por eutrofización, pues los resultados obtenidos de ICOMO, ICOMI e ICOPH constatan que el agua es de buena calidad. Sin embargo, según el estudio, se evidencia una baja contaminación (buena calidad del agua) por sólidos suspendidos (ICOSUS) en todas las estaciones en el periodo seco. Comportamiento que indica que las condiciones fisicoquímicas del agua son adecuadas para soportar los ecosistemas acuáticos de esta fuente hídrica.

Referencias

- Asociación Promotora Medioambiental. (2008). *Monitoreo de la calidad y cantidad del agua del río Algodonal, Tejo y Frío*. Ocaña, Colombia: Publicaciones Ambientales.
- Cantera, K., Carvajal, E., y Castro, H. (2009). *Caudal ambiental. Conceptos, experiencias y desafíos* (1.ª ed.). Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental. (2007). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Algodonal POMCHRA*. Ocaña, Colombia: Corponor.
- Environment Protection Agency. (2013). *Office of water. National recommended water quality criteria-correction*. EE. UU.: USEPA.
- Fernández, N., Ramos, G., y Solano, F., (2004). Una herramienta informática para el análisis y valoración de la calidad del agua. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 2(2), 88-97.
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª Ed.). México: Mc Graw Hill Education.