

EVALUACIÓN DE LA TURBIEDAD Y LA CONDUCTIVIDAD OCURRIDA EN TEMPORADA SECA Y DE LLUVIA EN EL RÍO COMBEIMA (IBAGUÉ, COLOMBIA)

Óscar Ospina-Zúñiga¹, Georgina García-Cobas², Jorge Gordillo-Rivera², Katerine Tovar-Hernández³

¹Ingeniero civil. Profesor investigador. Correo electrónico: oscar.ospina@campusucc.edu.co

²Ingeniero(a) civil. Profesor(a) investigador

³Estudiante

Programa de Ingeniería Civil, Universidad Cooperativa de Colombia, Ibagué, Colombia

Recibido: 7 de junio del 2015

Aprobado: 15 de octubre del 2015

Cómo citar este artículo: O. Ospina-Arias, G. García-Cobas, J. Gordillo-Rivera, K. Tovar-Hernández, "Evaluación de la turbiedad y la conductividad ocurrida en temporada seca y de lluvia en el río Combeima (Ibagué, Colombia)", *Ingeniería Solidaria*, vol. 12, n.º 19, pp. 19-36, abril 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.16925/in.v12i19.1191>.

Resumen. *Introducción:* resultados del proyecto de investigación "Evaluación de cargas contaminantes en el río Combeima, principal fuente de abastecimiento del acueducto urbano de Ibagué", realizado por la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Ibagué. *Metodología:* se desarrolló una investigación exploratoria que evaluó el comportamiento espacial de la turbiedad y conductividad del río en el 2014, a partir de muestreos de calidad de agua cruda en siete diferentes puntos a lo largo de su cauce. Se llevó a cabo en temporada seca y lluviosa, y su análisis durante el periodo comprendido entre el 2008 y 2012, cuando ocurrieron temporadas secas y lluviosas caracterizadas por los fenómenos naturales de la Niña y el Niño. *Resultados:* en mayo se presentaron los mayores valores del promedio mensual, periodo que corresponde a la primera temporada de lluvias, de manera que es evidente el aumento progresivo promedio anual. La conductividad no evidenció variaciones anuales; se obtuvieron concentraciones admisibles para consumo humano, en las cuales las condiciones climatológicas no incidieron significativamente en su comportamiento, aun a pesar de presentarse valores variados de turbiedad, a la que no está ligada. *Conclusiones:* la empresa IBAL S.A. E.S.P. planteó una solución a mediano plazo a fin de mitigar el efecto de elevada turbiedad en temporada lluviosa, mediante la realización de un estudio, el diseño y la construcción de bocatomas satélites en las fuentes que, dados su caudal y condiciones operativas, resulten favorables para actuar como sistemas sustitutos en aquellos periodos en que sea imperioso el cierre de la actual bocatoma.

Palabras clave: agua, calidad, conductividad, turbiedad.



ASSESSMENT OF MURKY WATER AND ITS CONDUCTIVITY DURING DRY AND RAINY SEASONS IN COMBEIMA RIVER (IBAGUE, COLOMBIA)

Abstract. *Introduction:* these are findings of the research project “Evaluation of pollutant load in Combeima River, main supply source of Ibagué’s urban aqueduct” developed by the Cooperative University of Colombia in Ibagué. *Methodology:* an exploratory research was conducted to evaluate the spatial behavior of murky river water and its conductivity in 2014; the quality samples were collected from unprocessed water in seven different points along the river. The research was performed during dry and rainy seasons, and analyzed during the covered period between 2008 and 2012. The dry and rainy seasons during that time were characterized by natural meteorological events known as *El Niño* and *La Niña*. *Results:* the highest monthly average values were recorded in May, period that matches the first rainy season and that evidences an average yearly increase. The conductivity had no variations during the course of a year. The findings include concentrations allowable for human consumption, in which the weather conditions did not had a significant impact, despite changing values of the murky water, to which it is not linked. *Conclusion:* the company IBAL S.A. E.S.P. proposed a medium-term solution to alleviate the effects of increased murky water during rainy seasons, via the study, design and construction of satellite water intakes at the sources that, given their volume and running conditions, may be beneficial as substitute systems during periods where it’s imperative to close the aqueduct’s water intake.

Keywords: water, quality, conductivity, murky water.

AVALIAÇÃO DA TURBIDEZ E A CONDUTIVIDADE OCORRIDA EM TEMPORADA SECA E DE CHUVA NO RIO COMBEIMA (IBAGUÉ, COLÔMBIA)

Resumo. *Introdução:* resultados do projeto de investigação “Avaliação de cargas contaminantes no Rio Combeima, principal fonte de abastecimento do aqueduto urbano de Ibagué”, realizado pela Universidade Cooperativa de Colômbia, sede Ibagué. *Metodologia:* foi desenvolvida uma investigação exploratória que avaliou o comportamento espacial da turbidez e condutividade do Rio em 2014, a partir de amostragens de qualidade da água bruta em sete diferentes pontos ao longo do seu leito. Foi feita em temporada seca e chuvosa, e sua análise durante o período compreendido entre 2008 e 2012, quando houve temporadas secas e chuvosas caracterizadas pelos fenômenos naturais da *Niña* e o *Niño*. *Resultados:* em maio apresentaram-se os maiores valores da média mensal, período que corresponde à primeira temporada de chuvas, portanto é evidente o aumento progressivo médio anual. A condutividade não evidenciou variações anuais; obtiveram-se concentrações admissíveis para consumo humano, nas quais as condições climatológicas não incidiram significativamente em seu comportamento, apesar de se apresentar valores variados de turbidez, à qual não está ligada. *Conclusões:* a empresa IBAL S.A. E.S.P. propôs uma solução no médio prazo para mitigar o efeito de elevada turbidez em estação das chuvas, mediante a realização de um estudo, o desenho e a construção captações satélites nas fontes que, dados seu caudal e condições operativas, sejam favoráveis para agir como sistemas substitutos nos períodos em que seja imperativo o fechamento da atual captação.

Palavras-chave: água, qualidade, condutividade, turbidez.



1. Introducción

Los procesos erosivos que se presentan en cuencas hidrográficas pueden tener su génesis en fenómenos naturales tales como la sismicidad, la actividad volcánica y la pluviosidad, o bien en la deforestación, la incineración de biomasa y las actividades agropecuarias intensivas, referidas a actividad antrópica, cuyo efecto residual arroja diversos contaminantes sólidos y líquidos que afectan la calidad del agua superficial, así como ponen en riesgo la salud humana [1]. Esta situación es recurrente en muchas fuentes hídricas superficiales localizadas en la región Andina de Colombia, las cuales sirven de abastecimiento para una vasta población urbana, como es el caso de Ibagué, capital del departamento del Tolima. Esta ciudad se abastece principalmente del río Combeima, cuyo caudal tiene un promedio de $4 \text{ m}^3/\text{s}$ [2]. El río Combeima, como principal fuente de abastecimiento para el sistema de acueducto urbano de la ciudad de Ibagué, se caracteriza por presentar en determinadas épocas del año elevadas concentraciones de sólidos. Esta situación afecta la continuidad del suministro de agua potable, hasta el punto de obligar a la empresa prestadora del servicio (IBAL S.A. E.S.P.) a suspenderlo ante la imposibilidad de removerlas con el sistema existente de tratamiento convencional, en muchos casos durante periodos largos y recurrentes. Según el documento CONPES 3570, la cuenca del río Combeima ha sufrido un deterioro acelerado, sobre todo en razón a la ocurrencia del fenómeno torrencial, fenómenos erosivos, movimientos en masa y avalanchas. El incremento en el caudal de la cuenca, sumado a las condiciones de riesgo existentes, afecta la infraestructura de abastecimiento de agua potable [3].

A fin de definir las características de la contaminación presente, se evaluaron los indicadores de turbiedad y conductividad del agua, realizados diariamente durante el periodo 2008-2012, por el laboratorio de Control de Calidad de la empresa IBAL S.A. E.S.P. [4]. Lo anterior mediante muestras tomadas en el sitio de captación del sistema de acueducto, y durante el susodicho periodo en el que se presentaron las últimas oscilaciones climáticas globales denominadas fenómenos de “el Niño” y “la Niña”, caracterizados por temporadas secas y de lluvia, respectivamente. Esto permitió definir la incidencia de este tipo de eventos naturales en las características físicas del cuerpo de agua, así como realizar muestreos de calidad de agua cruda en siete diferentes puntos del río Combeima durante

el 2014, a lo largo de su cauce hasta la bocatoma del sistema de acueducto urbano de Ibagué.

2. Marco teórico

La calidad de diferentes tipos de agua se ha valorado a partir de variables físicas, químicas y biológicas, evaluadas individualmente o en forma grupal. Los parámetros físico-químicos dan una información extensa de la naturaleza de las especies químicas del agua y sus propiedades físicas, ya que son más rápidos y pueden ser monitoreados con mayor frecuencia, en comparación con los métodos biológicos [5]. Para el caso de Ibagué, la recurrente suspensión del servicio de agua obedece básicamente al deterioro de la calidad de esta por elevadas concentraciones de turbiedad, de manera que —de acuerdo con la normativa vigente—, su aumento significativo representa la desintegración de materia orgánica e inorgánica en cantidades excesivas, por lo cual se hace necesario investigar la razón de tal comportamiento [6], considerando además que la calidad del agua es un factor determinante en las condiciones de la salud de las poblaciones [7]. La determinación del contenido aproximado de las partículas en suspensión y diluidas presentes en el agua, son una prueba de su contaminación física. Según el RAS 2000, las partículas en suspensión medidas a partir de la luz reflejada como propiedad óptica del agua, corresponde a la turbiedad [8]. Puede ser causada por diversas materias en suspensión que, según Marín, corresponden a arena, limos, coloides orgánicos, plancton y otros organismos microscópicos [9]. El deterioro de cuencas por contaminación y deforestación altera la calidad del agua y obligan a su suspensión [10], aplicándose ampliamente la turbiedad como criterio de medición rápida, económica y de fácil interpretación para los operadores [11].

Existen estudios que dan cuenta del impacto de la acción antrópica manifestada con alteraciones físico-químicas en distintas vertientes, como el caso del río Fonce en el municipio de San Gil, Colombia [12]; el río Cunas en el departamento de Junín, Perú [13]; río Grande de Térraba, Costa Rica [14]; río Cuspire Yalí, Nicaragua [15]; río Paraná en la provincia de Corrientes, Argentina [16]; río Itaya en Iquitos, Perú [17]; río Túnico en el departamento de Izabal, Guatemala [18]; río Choloteca, Honduras [19]; río Amajac en el estado de Hidalgo, México

[20]; ríos Ozogoché, Pichahuiña y Pomacocho en el Parque Nacional Sangay, Ecuador [21]; Río Sucio en el Valle de San Andrés, El Salvador [22]; y el río Duero en Michoacán, México [23]. La turbiedad también ha sido asociada con el riesgo microbiológico potencial en el agua para consumo humano, especialmente en periodos húmedos o de lluvia, según lo define García en su estudio en el río Naranjo [24], así como en el trabajo realizado por Barrantes et al. en la microcuenca del río Purires [25]. Para Luna et al., la presencia de material fácilmente erodable facilitaría la adsorción de las bacterias, afectando la proliferación de los organismos autótrofos al impedir el paso de la luz solar [26]. Chulluncuy describe como un adecuado proceso de coagulación-floculación se verá reflejado con turbiedades bajas que ayudarán a incrementar la eficiencia de los filtros [27]. La desinfección química de un sistema de abastecimiento de agua de bebida que presenta contaminación fecal reducirá el riesgo general de enfermedades, pero no garantizará necesariamente la salubridad del suministro. Por ejemplo, la desinfección con cloro del agua de bebida tiene una eficacia limitada frente a protozoos patógenos, en particular *Cryptosporidium*, y algunos virus. Una turbidez elevada puede proteger a los microorganismos de los efectos de la desinfección, estimular la proliferación de bacterias y generar una demanda significativa de cloro [28, 29]. La turbiedad junto con el color y el olor afectan la estética del agua, de modo que la hacen inaceptable para uso público [30]. La materia en suspensión que origina la turbiedad consiste principalmente en sílice —finamente dividido—, arcilla y limo [31].

La formación de subproductos en la desinfección del agua es el resultado de una reacción entre el agente desinfectante y la materia orgánica natural, constituida en gran parte por sustancias húmicas, la cual está presente naturalmente en el agua cruda. Estos subproductos, tales como trihalometanos (THM) y ácidos halo acéticos, representan un riesgo de salud pública, ya que son considerados potencialmente cancerígenos para el humano [32]. La remoción de turbiedad depende de las características del sistema de tratamiento. Según Kawamura, se recomienda pre-sedimentación para turbiedades del agua cruda superiores a 1000 NTU y establece 3000 NTU como valor máximo de turbiedad para tratamiento convencional [33]. De la turbiedad depende el caudal de agua potabilizado del río Combeima como fuente de abastecimiento de la

ciudad de Ibagué, con capacidad plena hasta 5000 NTU, a partir de la cual va disminuyendo hasta un límite máximo de 10000 NTU [34].

La conductividad es usada como un sustituto de la concentración de sólidos totales disueltos en el agua [35], en la que los iones contribuyen y forman parte de los sólidos totales disueltos [36]. Por lo tanto, define su concentración de sólidos disueltos referidos a sales y residuos orgánicos. La salinidad cuantitativa y los sólidos totales disueltos se miden a través de la conductividad eléctrica de las aguas [37, 38], definida por Padilla et al. como concentración de los iones presentes en el agua [39]. Es sabido que la conductividad del agua disminuye cuando las muestras contaminadas se mezclan con otras sustancias. Por esta razón, el agua potable es un buen conductor de la electricidad dada la presencia del cloro agregado durante la desinfección [40].

3. Metodología

La investigación es de tipo exploratorio. Realiza la descripción piloto de las características del agua cruda presente en el río Combeima, y analiza los parámetros turbiedad y conductividad. El área de estudio corresponde a la cuenca alta del río Combeima, definida aguas arriba del sitio de captación del sistema de acueducto urbano de Ibagué, lo cual corresponde a una superficie aproximada de 184,45 km², ubicada en la parte centro-occidental del departamento del Tolima, sobre el flanco oriental de la cordillera central de Colombia. El río Combeima cuenta con una longitud de cauce de 57,8 km, recorrido que hace desde su nacimiento en el volcán nevado del Tolima a una altura de 5,220 msnm, hasta su desembocadura en el río Coello a una altura de 700 msnm, con un caudal promedio de 4 m³/s. La precipitación media anual es de 1,816 mm y cuenta con una temperatura promedio de 17 °C. La población residente en el área de estudio es aproximadamente de 1071 habitantes, con presencia de población flotante, dado el turismo que caracteriza la cuenca por su riqueza natural [4]. La ubicación geográfica del área de estudio se identifica en la figura 1.

Esta cuenca presenta usos del suelo que en general se refieren al desarrollo de actividades agropecuarias, lo cual comprende algunos cultivos permanentes y en su mayoría de café, además de otra serie de cultivos alternativos. La actividad pecuaria se refiere a porcicultura, avicultura y piscicultura, con presencia dispersa de ganado vacuno

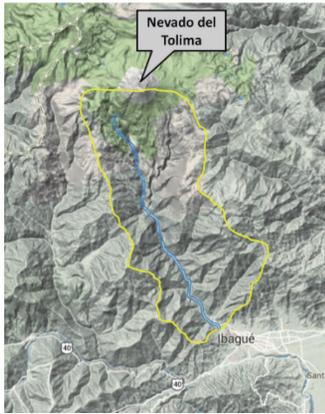


Figura 1. Localización general de la cuenca del río Combeima
Fuente: [41]

en pequeña escala. La presencia de estos sectores productivos contribuye a la generación y emisión de contaminantes sobre los cuerpos de agua, agravada por su extensión hasta el lecho mismo del río, con aporte de contaminación directa o indirecta por medio de residuales en la aplicación de plaguicidas y fertilizantes en el sector agrícola [4].

El turismo es un renglón importante en la economía de la región, dado el aprovechamiento que se le da a la riqueza natural del denominado cañón del Combeima, por el cual se accede al Parque Nacional Los Nevados. El río Combeima presenta características de elevada concentración de sólidos en determinadas épocas del año, lo cual obliga a la entidad prestadora del servicio de acueducto (IBAL S.A. E.S.P.) a suspender el servicio de agua potable en detrimento de su continuidad, con potenciales consecuencias sanitarias en la población urbana de Ibagué. Esto se debe al arrastre de material proveniente de diversas fuentes, que conjugando eventos de carácter natural e intervención antrópica, incorporan al cuerpo de agua sólidos suspendidos, tal como se aprecia en las figuras 2 y 3.

El proceso de remoción de turbiedad se torna crítico cuando presenta valores elevados de concentración, hasta el punto de saturar de sedimentos los desarenadores existentes, requiriéndose la extracción manual y mecánica por parte de operadores de la empresa IBAL S.A. E.S.P., inhabilitando totalmente la operación del sistema de acueducto. De acuerdo con las turbiedades máximas puntuales presentadas en el río Combeima y registradas por la IBAL S.A. E.S.P. durante el periodo comprendido entre el 2009 y el 2012, se presentan concentraciones muy altas que



Figura 2. Arrastre de material con altos niveles de turbiedad del río Combeima en época de lluvia
Fuente: [42]



Figura 3. Limpieza manual de desarenadores por presencia de sedimentos
Fuente: [42]

ponen de manifiesto la degradación del suelo en la cuenca alta, la cual va en incremento según se describe en la figura 4. Para los cuatro registros obtenidos, se trata de valores excesivos de unidades nefelométricas de turbiedad (NTU), para efectos del proceso de potabilización del agua.

La empresa IBAL S.A. E.S.P. registró los cierres de la bocatoma del acueducto ocurridos en este periodo, según se describe en la figura 5, con tendencia al aumento y siendo el 2011 el año más crítico. El tiempo de duración de cada cierre varió por año, según se describe en la figura 6, siendo el más crítico el 2009, cuyo promedio fue de 5,8 horas. Sin embargo, obligó a la suspensión del suministro de agua a la población urbana de Ibagué, que se prolonga más allá del tiempo del cierre de la bocatoma, dadas las implicaciones que tiene nuevamente el llenado de los tanques de almacenamiento y la red de distribución [4].

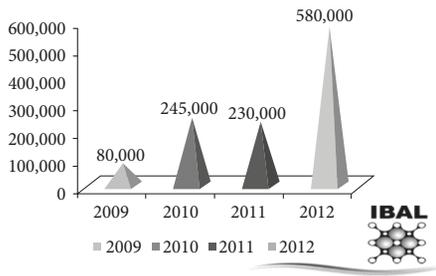


Figura 4. Turbiedad máxima presentada del 2009 al 2012 en el río Combeima

Fuente: [42]

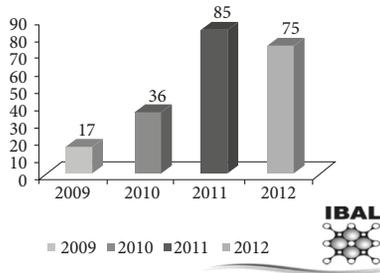


Figura 5. Número de eventos que ocasionaron el cierre de la bocatoma en el río Combeima

Fuente: [42]

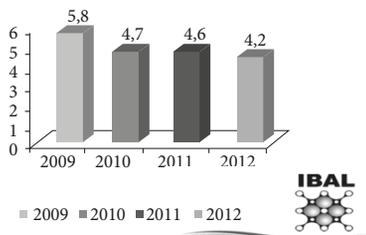


Figura 6. Duración promedio del cierre de la bocatoma en el río Combeima

Fuente: [42]

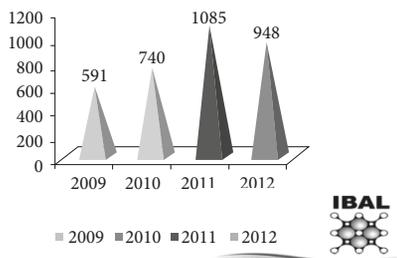


Figura 7. Precipitación promedio anual

Fuente: [42]

Las precipitaciones promedio anual presentadas en este periodo, según se indica en la figura 7, muestran incremento anual con mayor valor para el 2011, lo cual coincide con el comportamiento del número de cierres de la bocatoma del acueducto.

Siendo la turbiedad indicador de sólidos suspendidos y la conductividad de sustancias disueltas, durante el periodo comprendido entre el 2008 y el 2012, la empresa IBAL S.A. E.S.P. registró los valores diarios de estos indicadores en el río Combeima, mediante muestras tomadas en la bocatoma del acueducto urbano. Esto permite realizar la evaluación de la contaminación que ello ocasionó durante el periodo descrito, así como el análisis respecto al comportamiento de la turbiedad y conductividad en temporada seca y de lluvia, junto con la ocurrencia de los fenómenos naturales del Niño y la Niña. En el 2014 se establecieron siete puntos de muestreo desde la parte alta del río —donde no está sometido a intervención antrópica—, hasta la bocatoma del sistema de acueducto urbano de Ibagué. Los registros de precipitación en la cuenca alta del río Combeima se obtuvieron del IDEAM, durante el periodo comprendido entre el 2008 y el 2012, y corresponden a valores promedios mensuales (mm). Se escogió la estación pluviográfica localizada en el corregimiento de Juntas (quebrada Las Perlas), a 1765 msnm, por ser la más representativa respecto a la lluvia que ocurrió en la zona de estudio [4], cuyos resultados se describen en la tabla 1.

Esta estación no registra algunos valores de precipitación correspondientes a los años 2008 y 2009, así como la totalidad del 2010. La información allí contenida permite definir los meses más lluviosos en promedio, de manera que se puede realizar un comparativo con relación a los indicadores de turbiedad y conductividad. Durante el periodo 2008-2012 ocurrieron los fenómenos naturales del Niño y la Niña, que inciden en las temporadas seca y lluviosa, lo cual permite hacer la correlación respecto al comportamiento de la turbiedad y conductividad presentada en el río Combeima. El fenómeno del Niño se da por la presencia de aguas anormalmente cálidas en la costa occidental de Suramérica, durante un periodo mayor a tres meses consecutivos. Se manifiesta en Colombia con reducción de lluvias y diferentes periodos de sequías importantes en varias regiones del país. El fenómeno de la Niña ocurre cuando los vientos alisios se intensifican y

Tabla 1. Valores mensuales de precipitación en la estación Juntas, municipio de Ibagué

IDEAM - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES														SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL AMBIENTAL		
FECHA DE PROCESO: 2014/07/17			VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (ms)										ESTACIÓN: 21210020 JUNTAS LAS			
LATITUD 0433 N			TIPO EST PG			DEPTO TOLIMA			MUNICIPIO IBAGUÉ			FECHA-INSTALACIÓ 1971-AGO				
LONGITUD 7519 W			ENTIDAD 01 IDEAM			CORRIENTE QDA PERLAS			FECHA-SUSPENSIÓN							
ELEVACIÓN 1765 m.s.n.m			REGIONAL 10 TOLIMA													
AÑO	EST	ENT	ENERO*	FEB*	MARZO*	ABRIL*	MAYO*	JUNIO*	JULIO*	AGOST*	SEPT*	OCT*	NOV*	DICIE*	VR ANUAL*	
2000	1	01	100.9	80.5	157.2	102.7	291.1	161.3	92.4	214.3	258.7	156.3	85.1	54.9	1755.4	
2001	1	01	47.6	79.1	112.1	122.0	172.1	96.8	198.6	28.9	225.7	58.3	99.5	41.5	1282.2	
2002	1	01	24.4	63.5	138.5	176.6	113.6	122.3	114.0	81.3	115.4	164.6	82.5	65.5	1262.2	
2003	1	01	13.1	63.6	134.7	208.4	218.6	187.3	121.8	293.0	157.5	187.0	99.5	75.2	1859.7	
2004	1	01	70.7	67.6	102.2	136.6	215.5	99.6	290.8	80.4	165.9	172.9	117.8	62.4	1582.4	
2005	1	01	86.6	69.0	65.1	139.7	214.1	92.0	73.3	211.2	113.4	162.4	124.3	66.7	1417.8	
2006	1	01	65.5	57.5	131.2	188.5	208.0	180.1	91.9	87.3	259.6	92.9	131.4	50.2	1544.1	
2007	1	01	32.2	13.6	112.9	211.4	233.7	154.5	124.5	127.5			*	146.4	1156.7	
2008	1	01	52.3	56.4	25.1	67.6	168.2	213.2	193.0	90.5	49.4	151.6			1067.3	
2009	1	01			125.8	141.0	62.6	204.7	103.1	73.0					710.2	
2011	1	01	48.8	93.4	163.0	176.0	179.6	77.0	108.5	83.6	153.4	218.8	211.3	84.3	1597.7	
2012	1	01	85.9	70.9	131.7	147.8	220.9	170.1	121.5	130.4	51.0	184.1	71.6	42.8	1428.7	
2013	1	01	12.4	134.4	152.2	84.1	185.3	108.2	59.7						736.3	
Medios			53.4	70.8	127.1	146.3	191.0	143.6	130.2	125.1	155.0	154.9	113.7	69.0	1480.1	
Máximos			100.9	134.4	234.7	211.4	291.1	213.2	290.8	293.0	259.6	218.8	211.3	146.4	293.0	
Mínimos			12.4	13.6	25.1	67.6	62.6	77.0	59.7	28.9	49.4	58.3	71.6	41.5	12.4†***	
** CONVENCIONES **																
EST = ESTADO DE LA INFORMACIÓN						** AUSENCIAS DE DATO **						** ORÍGENES DE DATO **				

Fuente: [4]

quedan en la superficie las aguas profundas más frías del Pacífico ecuatorial, y disminuye la temperatura superficial del mar. Se caracteriza en Colombia por presentarse altas precipitaciones. La Administración Nacional Oceánica y Ambiental (NOAA), agencia científica del Departamento de Comercio de los Estados Unidos, registró los fenómenos del Niño y la Niña así: el primero ocurrió desde agosto del 2009 a mayo de 2010, en el periodo en estudio (2008–2012); el segundo se presentó en cuatro ocasiones en dicho periodo, correspondientes a las fechas comprendidas entre septiembre del 2007 a julio del 2008, enero a abril del 2009, agosto del 2010 a mayo del 2011 y octubre del 2011 a abril del 2012 [43].

4. Resultados

La ocurrencia de los fenómenos del Niño y la Niña en Colombia está asociada con sequías y altas precipitaciones, respectivamente. Para el caso de la cuenca alta del río Combeima, se correlacionó con los registros de precipitación mensual del IDEAM para los años 2008, 2009, 2001 y 2012, como se

indica en la figura 8. No se consideró el año 2010 por falta de registros de precipitación. Para esta cuenca, el fenómeno de la Niña, al inicio del 2008, se manifestó con baja precipitación y solo se acentuó en los últimos tres meses, correspondientes a mayo, junio y julio. Esto indica que para la zona en estudio y durante el tiempo de duración del evento natural, no se obtuvieron precipitaciones constantes mensuales altas. Para el 2009 se tiene información incompleta de precipitación, pero puede colegirse que en el mes de junio se presentó alta precipitación promedio mensual por fuera del evento natural ocurrido (la Niña), con valor similar al año anterior en el que estuvo influenciado por este tipo de fenómeno, lo cual es indicador de que las altas precipitaciones no estuvieron necesariamente ligadas a dicho fenómeno natural. El fenómeno de la Niña ocurrido en el 2011 coincide con las mayores precipitaciones mensuales, pero en los tres primeros meses del 2012 se manifestó con baja precipitación, y solo se acentuó en los últimos dos meses, correspondientes a marzo y abril. Lo anterior reitera cómo no implicó precipitaciones mensuales altas para la zona en estudio y durante el tiempo de duración del evento natural.

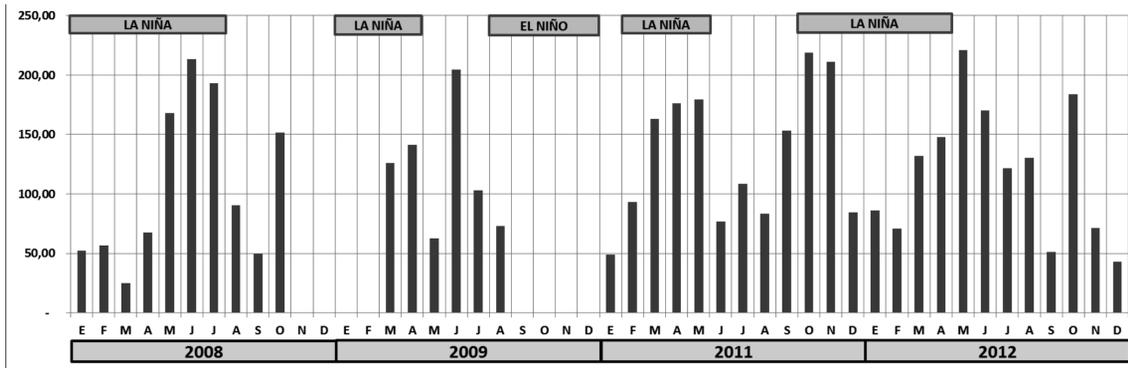


Figura 8. Correlación entre precipitación mensual y fenómenos de la Niña y el Niño ocurridos en los años 2008, 2009, 2011 y 2012

Fuente: [4]

Según el Departamento Nacional de Estadísticas de Colombia (DANE), el fenómeno de la Niña entre el 2010 y el 2011 se fortaleció y obtuvo su madurez en el trimestre noviembre-diciembre del 2010 y enero del 2011, alcanzando categoría fuerte [44]. Para el caso de la cuenca en estudio, este patrón no sucedió y precisamente en este trimestre decayó el promedio mensual de precipitación. Para el 2012, en los meses de junio y julio se presentó alta precipitación promedio mensual por fuera del evento natural ocurrido (la Niña), con valor similar a la máxima obtenida en el 2011, el cual estuvo influenciado por este fenómeno. Se reiteró con ello que para esta cuenca las altas precipitaciones no estuvieron necesariamente ligadas al fenómeno. Del registro de precipitación evaluado puede definirse que la precipitación en la cuenca alta del río Combeima tiende a presentar, en general, dos picos altos durante cada año, evidenciándose el primero en los meses de junio y julio, y el segundo en octubre y noviembre. Para el caso del año 2011, esta tendencia varió y el primero se presentó en los meses de abril y mayo, probablemente influenciado por la ocurrencia del primer fenómeno de la Niña de ese año.

De acuerdo con los registros de turbiedad promedio diaria realizada en la bocatoma del sistema de acueducto urbano de Ibagué durante el periodo comprendido entre el 2008 y el 2012, se calcularon los promedios mensuales para cada año, así como el general correspondiente a cada mes para el periodo en estudio [4], según se describe en la figura 9. Las variaciones ocurren en general dependiendo de la temporada del año, presentando mayores valores de turbiedad en aquellos meses con prevalencia de lluvias que contribuyen por escorrentía superficial

al arrastre de sedimentos al río Combeima. Es posible considerar que, para el periodo en estudio, los meses de abril, mayo, junio y julio aportan mayores concentraciones de turbiedad al cuerpo de agua durante el año, siendo los de mayor exigencia para la empresa prestadora del servicio (IBAL S.A. E.S.P.) para su remoción, mediante su sistema de tratamiento convencional.

Si se analiza la máxima turbiedad promedio mensual obtenida durante este periodo, según se describe en la figura 10, se obtienen valores que oscilan entre 972 NTU (mayo de 2011), y 191 NTU (agosto de 2010); considerándose que para el primero pudo influenciar la ocurrencia del fenómeno de la Niña 2010-2011, el cual culminó precisamente en el mes de mayo de 2011, caracterizado por su efecto devastador en Colombia. La cuenca alta del río Combeima no fue ajena a esta acción natural, la cual pudo impactar en las condiciones morfológicas de la cuenca con denudación de suelo, el cual liberó una masa considerable de sedimentos que fueron depositados en el río por la escorrentía de las lluvias ocurridas.

La menor turbiedad máxima mensual ocurrió en agosto del 2010. Se presentó en tiempo seco pero sin presencia de alguno de los fenómenos naturales, y en especial del Niño. Al calcular el promedio anual para el periodo en estudio, se obtiene que en el 2011 se presentó la mayor turbiedad, según se describe en la figura 11. Esto evidencia el impacto que ocasionó la ocurrencia de los dos fenómenos de la Niña (2010-2011 y 2011-2012), en la cuenca alta del río Combeima. Ello se reflejó en el mayor número de cierres de la bocatoma del acueducto de Ibagué, según se describe en la figura 3.

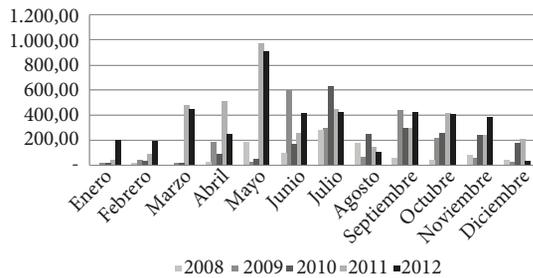


Figura 9. Turbiedad promedio mensual para el periodo 2008-2012, en la bocatoma del acueducto urbano de Ibagué

Fuente: [4]

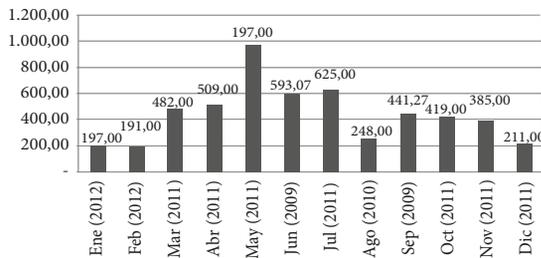


Figura 10. Turbiedad promedio mensual máxima para periodo 2008-2012, en la bocatoma del acueducto urbano de Ibagué

Fuente: [4]

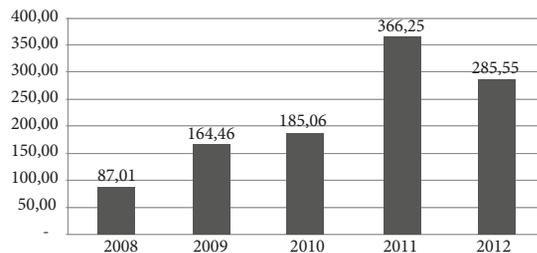


Figura 11. Turbiedad promedio anual para periodo el 2008-2012, en la bocatoma del acueducto urbano de Ibagué.

Fuente: [4]

Con la precipitación mensual registrada en la cuenca alta del río Combeima durante el periodo en estudio, con excepción del 2010 [4], se realizó la correlación con la turbiedad promedio mensual para el 2008, 2009, 2011 y 2012, según se indica en las figuras 12, 13, 14 y 15, respectivamente.

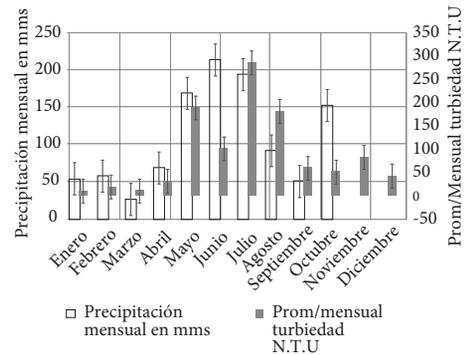


Figura 12. Relación entre precipitación mensual y turbiedad promedio mensual para el 2008

Fuente: [4]

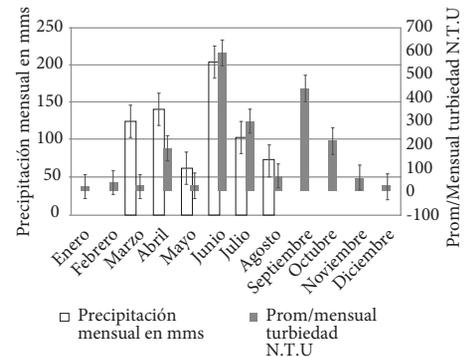


Figura 13. Relación entre precipitación mensual y turbiedad promedio mensual para el 2009

Fuente: [4]

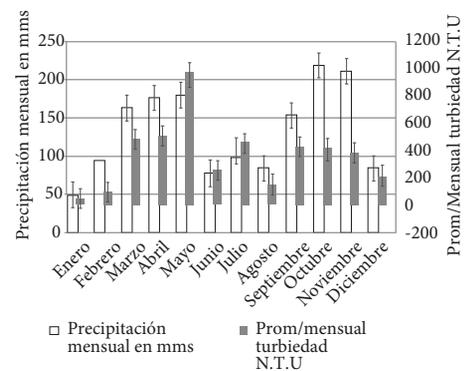


Figura 14. Relación entre precipitación mensual y turbiedad promedio mensual para el 2011

Fuente: [4]

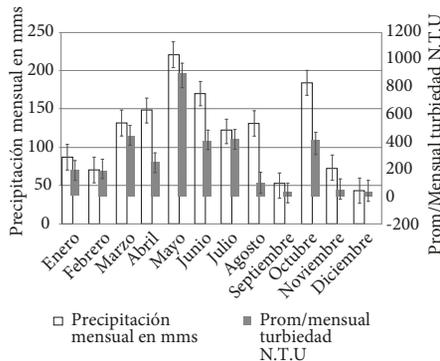


Figura 15. Relación entre precipitación mensual y turbiedad promedio mensual para el 2012

Fuente: [4]

Con la correlación realizada se obtiene que los meses con mayor turbiedad mensual están relacionados con alta precipitación mensual, lo cual evidencia la acción de arrastre de sedimentos que ejerce la escorrentía superficial por lluvia. Sin embargo, para algunos meses en los que se presentó alta precipitación mensual no siempre coincidió con elevada turbiedad mensual, como ocurrió en junio y octubre del 2008, marzo y abril del 2009, octubre y noviembre del 2011, así como en agosto y octubre del 2012. Esto pudo obedecer a que algunas precipitaciones no comprometen toda el área de la cuenca alta del río Combeima, donde existen algunas zonas con procesos erosivos manifiestos que, al entrar en contacto con agua lluvia, liberan sedimentos para ser depositados en la fuente hídrica. El registro de lluvias promedio mensual puede ser alto, pero es probable que no repercutieron en estas áreas vulnerables y, por tanto, no afectaron la turbiedad en el cuerpo de agua. Así, la incidencia de la alta turbiedad presentada en la bocatoma del acueducto urbano de Ibagué está ligada a dos factores básicos: precipitación alta y con ocurrencia en áreas vulnerables de la cuenca donde esté expuesta la masa de suelo (procesos erosivos).

En la investigación realizada en el 2014, en la cual se establecieron siete puntos de muestreo a lo largo del río Combeima —según se describe en la figura 16—, se determinó el comportamiento de la turbiedad en temporada seca y de lluvia, como se señala en la figura 17. El primer punto corresponde a la parte alta del río donde no se da intervención antrópica, y el último punto se ubicó en la bocatoma del acueducto de Ibagué [4].

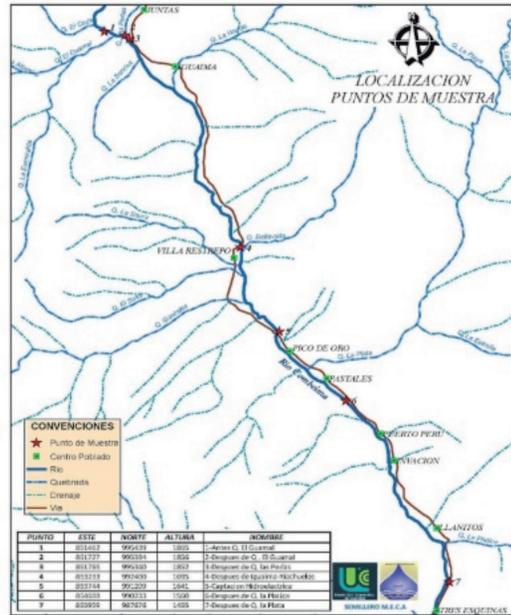


Figura 16. Localización de puntos de muestreo en el río Combeima

Fuente: [4]

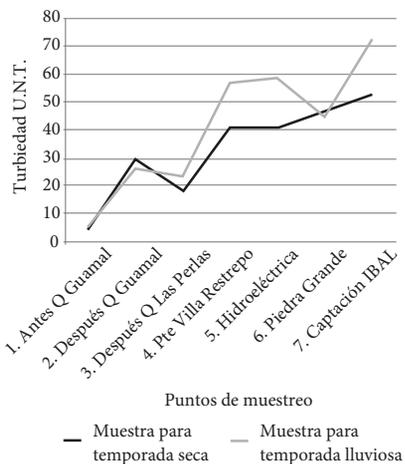


Figura 17. Comportamiento de la turbiedad a lo largo del río Combeima en el 2014

Fuente: [4]

Los resultados obtenidos reflejan el comportamiento similar que la turbiedad tiene a lo largo del río para las dos temporadas evaluadas, cuya tendencia general es a aumentar aguas abajo. Esto permitió la ubicación de las áreas vulnerables que, ante el efecto de la lluvia, contribuyen con incrementos

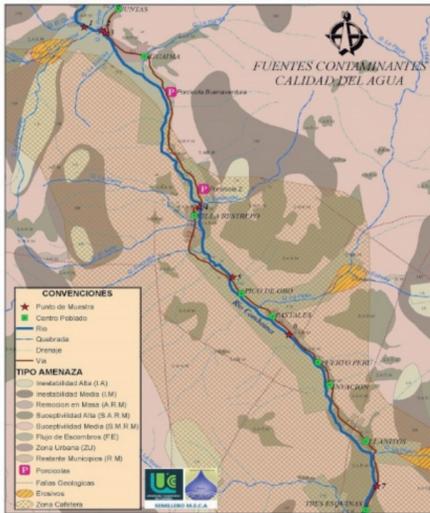


Figura 18. Identificación de áreas con procesos erosivos en el río Combeima

Fuente: [4]

de turbiedad en la fuente hídrica. Su localización se define en la figura 18 como áreas con procesos erosivos, localizadas en las sub-cuencas de las quebradas Guamal, la Plata y la Platica, todas ellas afluentes del río Combeima. Revisadas las fechas de ocurrencia de procesos erosivos relevantes en la cuenca alta del río Combeima y registrados desde 1956, se trata de eventos recurrentes que obedecen a las características geomorfológicas de la cuenca, detonados naturalmente y por potencial intervención antrópica. De acuerdo con el registro histórico contenido en el documento CONPES 3570 del 2009, la quebrada La Plata presentó una avalancha en junio de 1977, y junto con La Platica presentaron flujo de lodos, deslizamientos e inundaciones en julio de 1987. La quebrada Guamal presentó en julio de 1990 deslizamiento, flujo de lodos y avalanchas; en agosto del 2008, deslizamiento de tierras [3]. Considerando estos tres afluentes como los principales aportantes de turbiedad al río Combeima, el registro histórico indica cómo la vulnerabilidad de sus sub-cuencas a procesos erosivos relevantes correspondió a las lluvias ocurridas en el trimestre de junio, julio y agosto. La quebrada Guamal reviste mayor interés por su especial comportamiento ante el aporte de turbiedad al río Combeima, especialmente en temporada lluviosa, momento en que desemboca con un caudal promedio de 40 L/s, de manera que es considerada por la empresa IBAL S.A. E.S.P. como la más relevante [2].



Figura 19. Desembocadura de la quebrada Guamal con elevada turbiedad en el río Combeima

Fuente: [42]



Figura 20. Desembocadura de la quebrada Guamal con elevada turbiedad en el río Combeima

Fuente: [42]

La depositación de sedimentos y condiciones de turbiedad en el río Combeima ocasionado por esta quebrada, puede notarse en la figura 19 que corresponde al sitio de su desembocadura, en la que contrasta con la turbiedad de este río. Según el registro reportado en el CONPES 3570, en esta sub-cuenca ocurrió un proceso erosivo de gran magnitud en agosto del 2008 [3], en el cual se presentó el fenómeno de la Niña, y cuyo impacto conjugado a eventos anteriores logró depositar en su desembocadura una considerable masa de suelo que modificó la morfología del lecho del río en ese sector, desviando su cauce varios metros. En la figura 20 se puede observar una vista general del depósito de

material erosionado que escurrió a lo largo de la quebrada Guamal. Esta exposición de material incidió en las condiciones de turbiedad en los años subsiguientes, detonado por lluvias que lo arrastró aguas abajo y cuyo impacto perdurará por mucho tiempo.

La conductividad obtenida en el periodo de estudio se graficó en la figura 21, en la cual se pueden apreciar los cambios promedios mensuales a lo largo de los cinco años evaluados, y cuya tendencia general es a presentar valores similares sin marcada diferencia para cada año. A grandes rasgos, se puede deducir que las condiciones climatológicas de la cuenca alta del río Combeima no incidieron significativamente en el comportamiento de la conductividad, aun a pesar de presentarse valores variados de turbiedad. Si se analizan los valores extremos de conductividad promedio mensual obtenida durante este periodo —según se describe en la figura 22—, se obtienen valores que oscilan entre 343 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (marzo del 2010), y 243 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (junio del 2010); de manera que resulta característico el primer semestre del 2010, ya que presenta los máximos valores correspondientes a esos meses, tiempo durante el cual no se presentó ninguno de los dos fenómenos. El menor valor no coincide con alguno de los dos fenómenos, y se presentó en temporada de lluvia.

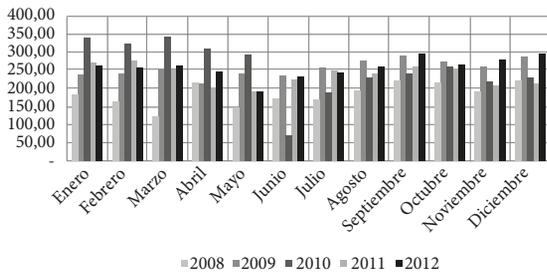


Figura 21. Conductividad promedio mensual en el río Combeima: periodo 2008-2012
Fuente: [4]

Según el valor máximo permisible de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ establecido por la Resolución 2115 de 2007, los resultados obtenidos para el periodo de estudio están por debajo de este parámetro, lo cual evidencia la baja presencia de sustancias diluidas en el agua del río Combeima. Al calcular el promedio anual, se obtiene que en el 2010 se presentó la mayor conductividad, según se describe en la figura 23, lo cual corrobora la incidencia del primer semestre de ese año respecto a la máxima promedio.

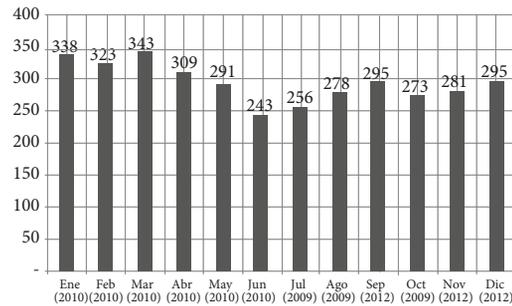


Figura 22. Conductividad máxima mensual en el río Combeima: periodo 2008-2012
Fuente: [4]

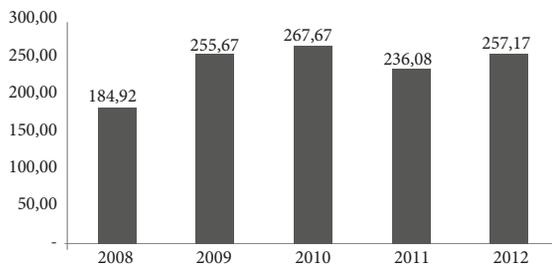


Figura 23. Conductividad promedio anual en el río Combeima: periodo 2008-2012
Fuente: [4]

Con la precipitación mensual registrada durante el periodo en estudio, con excepción del 2010 [3], se realizó la correlación con la conductividad promedio mensual para el 2008, 2009, 2011 y 2012, según se indica en la figura 24.

Se puede deducir que la conductividad promedio mensual máxima no estuvo ligada a alta o baja precipitación mensual, presentado variaciones que no obedecieron al comportamiento de la lluvia. Sin embargo, existió tendencia a presentarse los valores de conductividad promedio mensual mínimos en tiempo de mayor precipitación mensual, lo cual pudo ocurrir por el aumento del caudal del río que disminuyó la concentración de sólidos disueltos. La relación entre la turbiedad y la conductividad se realizó para cada año del periodo evaluado, según se indica en la figura 25. El incremento de sólidos suspendidos y coloidales que reflejan aumento de turbiedad en el cuerpo de agua por efecto de la lluvia no necesariamente implicó mayor presencia de conductividad (lo cual caracteriza sustancias diluidas en el agua). El comportamiento de la

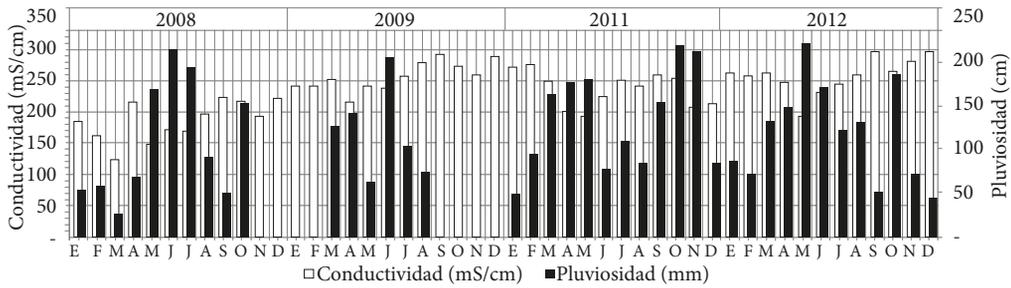


Figura 24. Relación conductividad y precipitación mensual en el río Combeima: 2008, 2009, 2011 y 2012

Fuente: [4]

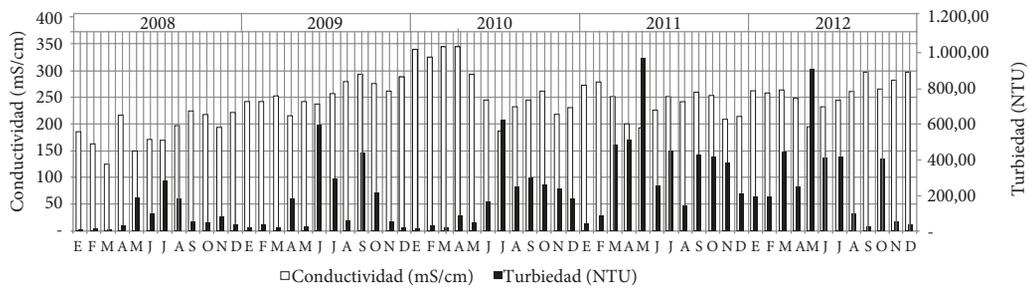


Figura 25. Relación conductividad y turbiedad promedio mensual en el río Combeima: periodo 2008-2012

Fuente: [4]

conductividad mensual no presentó una tendencia definida con relación a la turbiedad, de manera que es posible inferir como los cambios que sufrió no dependieron de la mayor o menor depositación de sedimentos que modificaron la turbiedad.

En el 2014, se establecieron siete puntos de muestreo a lo largo del río Combeima, y se determinó el comportamiento de la conductividad en temporada seca y de lluvia, tal como se indica en la figura 26.

Los resultados obtenidos reflejan el comportamiento similar que la conductividad tiene a lo largo del río para las dos temporadas evaluadas, cuya tendencia general fue a disminuir aguas abajo, siendo menor para la temporada lluviosa en comparación con la seca. Esto sugiere que el aumento de caudal del río Combeima contribuye en la disminución de la conductividad, como se había deducido a partir de los resultados comparativos del periodo 2008-2012. La conductividad inicial del río antes de sufrir descargas por intervención antrópica, obtenida en el punto de muestreo 1, es mayor con relación al final del tramo evaluado ubicado en la bocatoma del acueducto urbano (punto de

muestreo 7), de modo que pudo contribuir en ello el aporte de caudal de los distintos afluentes que concurren, así como la probabilidad de que algunos de ellos presenten valores de conductividad menores al río.

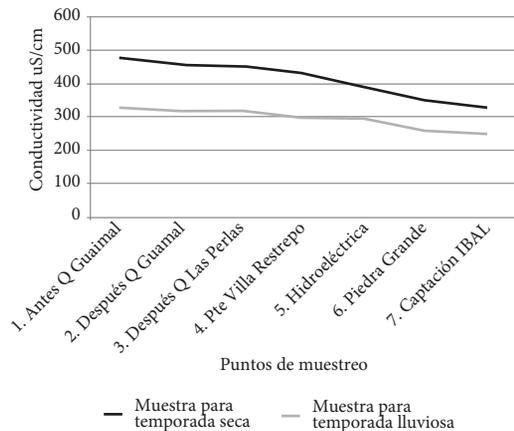


Figura 26. Comportamiento de la conductividad a lo largo del río Combeima, en temporada seca y lluviosa: 2014

Fuente: [4]

5. Conclusiones

El río Combeima como fuente de abastecimiento para el acueducto urbano de Ibagué, durante el periodo en estudio, presentó en general condiciones desfavorables de turbiedad, especialmente cuando se presentó temporada de lluvia. Esto no ocurre con la conductividad, que para efectos de consumo humano no representó riesgo en ninguna de las temporadas. La turbiedad evaluada presentó marcadas oscilaciones que muestran las condiciones de vulnerabilidad a las que estuvo expuesta la cuenca alta del río Combeima, producto de procesos erosivos cuya génesis se dio por la dinámica natural y por actividades antrópicas lesivas, desde las cuales se liberaron sedimentos con características de sólidos en suspensión y coloides, arrastrados al cuerpo de agua por la escorrentía del agua lluvia, tal como lo señalan Anta et al. con respecto a la correlación entre sólidos en suspensión totales y sólidos totales con la turbiedad [45]. El fenómeno de la Niña puede llevar en algunos casos a incrementar la precipitación en dicha cuenca, sumándose al aumento de turbiedad.

Las características geomorfológicas de la cuenca alta del río Combeima la hacen susceptible a la ocurrencia de procesos erosivos que comprometen su suelo, exponiéndolo al efecto de escorrentía de la lluvia para su degradación y depositación en el cuerpo de agua. Si a ello se suma el fenómeno de la Niña, el potencial efecto sísmico que caracteriza la zona de influencia del volcán Machín, la cual está adjunta a la cuenca, así como las actividades antrópicas lesivas, especialmente por la deforestación y producción agrícola, aumentan el riesgo de ocurrencia de deslaves. La actividad antrópica con mayor incidencia en la afectación del suelo en esta cuenca es la agricultura, siendo la principal actividad económica familiar, aupada en condiciones climatológicas, suelo fértil y altimetría que lo permite. En su desarrollo se ha venido deforestando la cuenca para ampliar el área cultivable, en la que el café es el principal producto y es de carácter permanente.

La conductividad obtenida en el río Combeima presenta valores relativamente bajos, lo cual obedece a poco contenido de compuestos ionizables en el agua, tanto en temporada de lluvia como seca, presentándose en esta última las mayores concentraciones sin oscilar significativamente en el tiempo (tiende a disminuir cuando se presenta

temporada de lluvia por el incremento del caudal del río, siendo el agua de lluvia un bajo aportante de conductividad) [46, 47]. Este comportamiento es similar al obtenido en las investigaciones de Morell et al., respecto al río San Juan, Cuba [48]; Flóres en la subcuenca del río Viejo, Nicaragua [49]; y Garbagnati et al., con relación al río Grande en San Luis, Argentina [50]. Las sustancias disueltas que la ocasionan en el agua pueden provenir de fertilizantes del sector agrícola y aguas residuales domésticas, como lo definen Carbone et al., respecto a su incidencia en aumentos puntuales de conductividad en el sistema fluvial arroyo Claromecó, Argentina [51].

Los distintos afluentes contribuyen en su disminución dado el comportamiento espacial determinado mediante muestras de agua. Cuando se incrementa la turbiedad al entrar en contacto el agua de lluvia con el suelo proveniente de procesos erosivos, no influye en mayor conductividad, lo cual permite inferir que al agua se incorporan principalmente sólidos en suspensión y coloidales, lo cual se da bajo el aporte de sustancias en dilución. Valores altos de turbiedad como el presentado en el 2012, cuando se registró hasta 580 000 NTU [42], reflejan el riesgo a que está expuesto el sistema de acueducto urbano de Ibagué por pérdida de continuidad, obligando a la empresa IBAL S.A. E.S.P. a incurrir en mayores costos para la adquisición de insumos químicos que garanticen la potabilización del agua. La tendencia manifiesta de aumentar su turbiedad promedio en el tiempo puede superar la capacidad instalada del sistema de tratamiento convencional existente, comprendido por coagulación-floculación, sedimentación, filtración y desinfección, obligando a incorporar tratamientos complementarios como pre-oxidación que, según Rodríguez et al. [32], es un proceso de tratamiento determinante para la formación de los subproductos de la desinfección (e. g., trihalometanos), con consecuencias lesivas a la salud humana.

El deslave ocurrido en agosto de 2008 en la sub-cuenca de la quebrada Guamal, considerada por la empresa IBAL S.A. E.S.P. como el principal afluente que lleva al aumento de la turbiedad hasta valores inmanejables para el tratamiento convencional existente [2], reviste características especiales dada la magnitud del evento que comprometió el lecho del río por la depositación de un alto volumen de sedimentos, lo cual conllevó la modificación de la turbiedad en la fuente hídrica a partir de su ocurrencia. Ello se evidenció en el aumento

de los cierres de la bocatoma, afectando la continuidad del servicio de agua potable hasta el día de hoy. Es probable la potencial ocurrencia de eventos de similar magnitud, que conjugados a los existentes pueden poner en alto riesgo el abastecimiento al sistema de acueducto urbano de Ibagué, afectando no solo la continuidad del servicio sino la calidad del agua, como se anotó anteriormente.

La empresa IBAL S.A. E.S.P. planteó una solución a mediano plazo con el fin de mitigar el efecto de elevada turbiedad en temporada lluviosa, mediante la realización de un estudio, el diseño y la construcción de bocatomas satélites, en las fuentes que por caudal y condiciones operativas resulten favorables para actuar como sistemas sustitutos, en los periodos en que sea imperioso el cierre de la actual bocatoma [52]. Esta solución es factible dado el comportamiento espacial de la turbiedad en el río, y en el cual algunos de sus afluentes contribuyeron en mejorar las condiciones físicas de la fuente hídrica, aun en temporada lluviosa.

6. Agradecimientos

Por el apoyo brindado a la investigación, los autores expresan su agradecimiento al personal profesional y técnico del Laboratorio de Control de Calidad de la empresa IBAL S.A. E.S.P.

Referencias

- [1] Ó. Ospina, *El riesgo del agua superficial*. Ibagué, Colombia: Óscar Efrén Ospina Zúñiga, 2013.
- [2] Superintendencia de Servicios Públicos, “Informe ejecutivo de gestión Empresa Ibaguerena de Acueducto y Alcantarillado, IBAL, S.A E.S.P – Oficial”, Superintendencia Delegada para Acueducto, Alcantarillado y Aseo, Dirección Técnica de Acueducto y Alcantarillado Bogotá, septiembre de 2013.
- [3] Consejo Nacional de Política Económica y Social República de Colombia. (2009, feb. 10). *CONPES 3570 Estrategias de mitigación del riesgo en la cuenca del río Combeima para garantizar el abastecimiento de agua en la ciudad de Ibagué*, Bogotá: Departamento Nacional de Planeación.
- [4] G. García, J. Gordillo, K. Tovar y O. Ospina, “Modelo MECA-Evaluación de cargas contaminantes en la cuenca alta del río Combeima”, tesis de pregrado, Univ. Coop. de Col., Ibagué, Colombia, 2014.
- [5] N. Samboni, Y. Carvajal y J. Escobar, “Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua”, *Rev. Ing. e Inv.*, vol. 27, n.º 3, pp. 172-181, dic. 2007. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v27n3/v27n3a19.pdf>
- [6] Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). *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*, Bogotá.
- [7] K. Briñez, J. Guarnizo y S. Arias, “Calidad del agua para consumo humano en el departamento del Tolima”, *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, vol. 30, n.º 2, pp. 175-182, 2012. [En línea]. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/120/12023918006.pdf>
- [8] Ministerio de Desarrollo Económico. (2000, nov. 17). *Resolución 1096 de 2000. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS*, Bogotá.
- [9] R. Marín, *Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos. Tratamiento y control de calidad de aguas*, Madrid: Ediciones Díaz de Santos s.a., 2003. [En línea]. Disponible en: https://books.google.com.co/books?id=k8blxwjzYUC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- [10] C. Montoya, D. Loaiza, P. Torres, C. Cruz y J. Escobar, “Efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de procesos convencionales de potabilización”, *Rev. EIA*, n.º 16, p. 137-148, dic. 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n16/n16a11.pdf>.
- [11] G. Burlingame, M. Pickel y J. Roman, “Practical application of turbidity monitoring”, *Journal AWWA*, vol. 90, n.º 8, ag. 1998. [En línea]. Disponible en: <file:///C:/Users/Docente/Downloads/water-net.0048193.pdf>
- [12] W. Guerrero, F. Vargas y P. Fuquen, “Calidad físico química del agua del río Fonce, una mirada desde conceptos especializados”, *Rev. Mat. Tec.*, ed. 4, dic. 2012. [En línea]. Disponible en: <file:///C:/Users/Docente/Downloads/13-57-1-PB.pdf>
- [13] M. Villanueva y R. Pantoja, “Impactos antropogénicos en la calidad del agua del río Cunas”, *Apunt. Cien. Soc.*, vol. 2, n.º 2, 2012. [En línea]. Disponible en: <file:///C:/Users/Docente/Downloads/54-212-1-PB.pdf>
- [14] G. Umaña y M. Springer, “Variación ambiental en el río Grande de Térraba y algunos de sus afluentes, Pacífico sur de Costa Rica”, *Rev. Biol. Trop.* vol. 54, sup. 1, pp. 265-272, sep. 2006. [En línea]. Disponible

- en: <http://www.ots.ac.cr/rbt/attachments/suppls/sup54-1%20EACR%201V/Umana-Variacion%20ambiental.pdf>
- [15] M. Rugama y R. Save, "Efecto vertido aguas mieles en calidad físico-química del agua microcuenca Río Cuspire Yalí, Nicaragua", *Rev. Cient. de FAREM-Esteli, Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano*, vol. 2, n.º 7, jul.-sep. 2013. [En línea]. Disponible en: <file:///C:/Users/Docente/Downloads/101-375-1-PB.pdf>.
- [16] J. Ruiz, D. Fechner, A. Moresi y F. Vázquez, "DBO5 y otros parámetros fisicoquímicos como indicadores de contaminación. Río Paraná, Costa Corrientes Capital, Argentina". *FACENA*, vol. 26, pp. 3-14, 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.exa.unne.edu.ar/revisfacena/26/3-14.pdf>
- [17] C. Cerdeña, W. Reyes y A. Vásquez, "Contaminación de las aguas del río Itaya por las actividades portuarias en el Puerto Masusa, Iquitos, Perú", *Ciencia amazónica*, vol. 4, n.º 1, pp. 100-105, [En línea]. Disponible en: <file:///C:/Users/Docente/Downloads/DialnetContaminacionDeLasAguasDelRioItayaPorLasActividade-5072951.pdf>
- [18] J. Robledo, A. Vanegas y N. García, "Calidad del agua del río Túnico como respuesta al uso del suelo", *Rev. Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 23, n.º 3, pp. 41-45, jul.-ag.-sep 2014. [En línea]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v23n3/rcta07314.pdf>
- [19] B. Ponce, "Análisis de la contaminación del río Choluteca y sus efectos sobre la población a su paso por Tegucigalpa", *Rev. Ciencia y tecnología*, n.º 2, segunda época, pp. 19-37, sep. 2008. [En línea]. Disponible en: <http://lamjol.info/index.php/RCT/article/viewFile/1816/1621>
- [20] J. Álvarez, J. Panta, C. Ayala y E. Acosta, "Calidad Integral del Agua Superficial en la Cuenca Hidrológica del Río Amajac", *Información Tecnológica*, vol. 19, n.º 6, pp. 21-32, 2008. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v19n6/art04.pdf>
- [21] J. Coello, R. Ormaza, A. Déley, C. Recalde y A. Ríos, "Aplicación del ICA-NSF para determinar la calidad del agua de los ríos Ozogoché, Pichahuíña y Pomacocho-Parque Nacional Sangay-Ecuador", Univ. Nal. de Chimborazo, Instituto de Ciencia, Innovación, Tecnología y Saberes, Riobamba, Ecuador. 2014. [En línea]. Disponible en: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:ZOZqd4ZHXCs-J:revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/user/setLocale/es_ES%3Fsource%3D%-252Findex.php%252Fiigeo%252Farticle%252Fview%252F5855+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=co.
- [22] A. García, "La calidad del agua del Río Sucio en la Zona del Valle de San Andrés", *Rev. Tecnológica*, vol. 4, n.º 4, pp. 46-50, 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.itca.edu.sv/images/stories/portadas/revista-tecnologica-vol-4-2011.PDF>.
- [23] J. Silva, R. Moncayo, S. Ochoa, F. Estrada, G. Cruz, C. Escalera, F. Villalpando, J. Nava, A. Ramos y M. López, "Calidad química del agua subterránea y superficial en la cuenca del río Duero, Michoacán", *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. iv, n.º 5, pp. 127-146, nov.-dic. 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v4n5/v4n5a9.pdf>.
- [24] Y. García, "Calidad con fines humanos de las aguas de la Cuenca río Naranjo, municipio Majibacoa, provincia Las Tunas", *Innovación Tecnológica* vol. 21, n.º 2, abr.-jun. 2015. [En línea]. Disponible en: <http://innovaciontec.idict.cu/index.php/innovacion/article/view/435/436>.
- [25] K. Barrantes, L. Chacón, M. Solano y R. Achí, "Contaminación fecal del agua superficial de la microcuenca del río Purires, Costa Rica, 2010-2011", *Rev. de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, n.º 33, pp. 40-45, 2013. [En línea]. Disponible en: http://www.researchgate.net/profile/Kenia_Barrantes/publication/262712886-Contaminacin_fecal_del_agua_superficial_de_la_Microcuenca_del_Ro_Purires_Costa_Rica_20102011/links/0deec538887ad0dc6a000000.pdf
- [26] D. Luna, M. Salusso y L. Moraña, "Procesos de Autodepuración en Ríos y Embalses del Noroeste Argentino (Salta y Tucumán)", Congreso Regional de Ciencia y Tecnología NOA 2002, Univ. Nal. Salta, 2002. [En línea]. Disponible en: <http://www.editorial.unca.edu.ar/Publicacione%20on%20line/CD%20INTERACTIVOS/NOA2002/Proceso%20Autodepuracion%20Rios.pdf>.
- [27] N. Chulluncuy, "Tratamiento de agua para consumo humano", *Ingeniería Industrial*, n.º 29, pp. 153-170, 2011. [En línea]. Disponible en: http://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria_industrial/article/viewFile/232/208
- [28] Organización Mundial de la Salud, *Guías para la calidad del agua potable*, Ginebra: 2004. [En línea]. Disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3sp.pdf
- [29] L. Marcó, R. Azario, C. Metzler y M. García, "La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadoras a partir de fuentes superficiales", *Hig. Sanid. Ambient*, n.º 4, pp. 72-82, 2004. [En línea]. Disponible en: [http://salud-publica.es/secciones/revista/revistaspdf/bc510156890491c_Hig_Sanid.Ambient.4.72-82\(2004\).pdf](http://salud-publica.es/secciones/revista/revistaspdf/bc510156890491c_Hig_Sanid.Ambient.4.72-82(2004).pdf)
- [30] D. Trujillo, L. Duque, J. Arcila, A. Rincón, S. Pacheco y O. Herrera, "Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano", *Rev. Ion.*, vol. 27, n.º 1, pp. 17-34. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rion/v27n1/v27n1a03.pdf>

- [31] J. Flórez, H. Rengifo y O. Ospina, “Análisis experimental de la distribución de caudal en los sedimentadores en una planta de tratamiento de agua potable”, *Ingenium*, vol. 9, n.º 23, pp. 37-48, 2015, [En línea]. Disponible en: http://revistas.usc.edu.co/index.php/Ingenium/article/view/500/427#.ViErCOx_Oko
- [32] M. Rodríguez, G. Rodríguez, J. Serodes y R. Sadiq, “Subproductos de la desinfección del agua potable: Formación, aspectos sanitarios y reglamentación”, *Interciencia*, vol. 32, n.º 11, pp. 749-756, nov. 2007. [En línea]. Disponible en: <http://redalyc.org/www.redalyc.org/articulo.oa?id=33901105>
- [33] Kawamura, S, *Integrated design and operation of water treatment facilities*, New York: John Wiley & Sons, 2000.
- [34] Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado IBAL S.A. E.S.P. *Informe de Gestión 2011*. [En línea]. Disponible en: http://www.ibal.gov.co/ibal/plan_gestion_2011.pdf
- [35] O. Delgadillo, A. Camacho, L. Pérez y M. Andrade, *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la gestión y uso del agua*, Universidad Mayor de San Martín, Cochabamba, Bolivia, 2010.
- [36] R. Hernández, M. Ortega, J. Sánchez, R. Alvarado y M. Aguilera, “Ocurrencia nictimeral del fitoplankton en la época de lluvias en el lago tropical profundo de Tacámbaro, Michoacán, México”, *Biológicas*, n.º 11, pp. 48-55, 2009. [En línea]. Disponible en: <http://biologicas.umich.mx/index.php/biologicas/article/view/54/54>
- [37] D. Carreras, T. Crisanto, H. Ortega, J. Ramírez, D. Espinosa, C. Ramírez, V. Ruiz, M. Velázquez y E. Sánchez, “Salinidad cuantitativa y cualitativa del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde, México”, *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. VI, n.º 2, mar.-abr. 2015, pp. 69-83. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v6n2/v6n2a5.pdf>
- [38] G. Roldán y J. Ramírez, *Fundamentos de limnología neotropical*. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2008.
- [39] T. Padilla, N. García y W. Pérez. “Caracterización físico-química y bacteriológica, en dos épocas del año, de la subcuenca del río Quiscab, Guatemala”, *Rev. Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 19, n.º 3, 2010. [En línea]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v19n3/rcta08310.pdf>
- [40] A. García, L. Bravo y G. Campos, Acción antimicrobiana de la pterigospermina de moringa olífera sobre los contaminantes del agua y su efecto en el pH, turbidez y crecimiento microbiano. Acción antimicrobiana sobre contaminantes. *REFI UPN*, vol. 3, n.º 1, pp. 11-19, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://refi.upn.edu.pe/index.php/refi/article/view/47/84>
- [41] Google Maps. [En línea]. Disponible en: <https://www.google.com.co/maps/@4.5181653,-75.2618959,11.5z/data=!5m1!1e4>. Mar. 2015.
- [42] Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado IBAL S.A. E.S.P., *Futuro y realidad del recurso hídrico en la ciudad de Ibagué*. [En línea]. Disponible en: http://www.ibal.gov.co/ARCHIVOS%20TALLER%20PDF/ING_CARLOS_JOSE_CORRAL_ALBARELLO.pdf
- [43] Climate Prediction Center NOAA. [En línea]. Disponible en: http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml. Mar. 2015.
- [44] Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), *Reporte final de áreas afectadas por inundaciones 2010-2011*, agosto 30 de 2011. [En línea]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/files/noticias/Reunidos_presentacion_final_areas.pdf
- [45] J. Anta, J. Cagiao, J. Suárez y E. Peña, “Análisis de la movilización de sólidos en suspensión en una cuenca urbana separativa mediante la aplicación del muestreo en continuo de la turbidez”, *Ingeniería del Agua*, vol. 16, n.º 3, sept. 2009. [En línea]. Disponible en: <file:///C:/Users/Docente/Downloads/2952-8315-1-PB.pdf>
- [46] O. Ospina-Zúñiga y H. Ramírez-Arcila, “Evaluación de la calidad del agua de lluvia para su aprovechamiento y uso doméstico en Ibagué, Tolima, Colombia”, *Ingeniería Solidaria*, vol. 10, n.º 17, pp. 129-142, en.-dic., 2014.
- [47] O. Ospina y Y. Moyano, “Evaluación del aprovechamiento para consumo humano del agua de lluvia en una microcuenca urbana de Ibagué, Tolima, Colombia”, *Ingenium*, n.º 9, vol. 24, pp. 11-22, 2015.
- [48] A. Morell, P. Bergues y E. Portuondo, “Valoración de los parámetros físico-químicos de las aguas del río San Juan en los períodos húmedo y seco de 2014”, *Ciencia en su PC*, n.º 1, en.-mar., pp. 1-12, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://cienciapc.idict.cu/index.php/cienciapc/article/view/352/840>
- [49] S. Flores, “Calidad Físico-Química de las Aguas Superficiales de la Subcuenca del Río Viejo”, *Revista Universidad y Ciencia*, vol. 6, n.º 9, jul.-dic. 2012. [En línea]. Disponible en: <http://www.lamjol.info/index.php/UYC/article/view/1950>
- [50] M. Garbagnati, P. González, R. Antón y M. Mallea, “Características físico-químicas, capacidad buffer y establecimiento de la línea base ambiental del Río Grande, San Luis, Argentina”, *Austral*, vol. 15, pp. 59-71, jun. 2005. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1667-782X2005000100007

- [51] M. Carbone, B. García, J. Marcovechio, M. Piccolo, y G. Perillo, "Impacto antrópico en la calidad del agua superficial de la cuenca media del arroyo Claromecó, Argentina", *Cuadernos de Investigación Geográfica*, vol. 2, n.º 39, pp. 391-404, 2013. [En línea]. Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4281728>
- [52] Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado IBAL S.A. E.S.P., *Postulación de soluciones a la problemática del agua en Ibagué*. [En línea]. Disponible en: <http://www.ibal.gov.co/ibal/soluciones2012.pdf>