

AUNAR ESFUERZOS PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO, EN EL MARCO DE LA OPERACIÓN DE LA RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO ABURRÁ – MEDELLÍN

CONVENIO 643 DE 2019 – MODIFICACIÓN 1



CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL

INFORME FINAL



MEDELLÍN, ABRIL DEL 2020

**AUNAR ESFUERZOS PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO
SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO, EN EL MARCO DE LA OPERACIÓN DE LA RED
DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO ABURRÁ
– MEDELLÍN**

CONVENIO 643-2019 – MODIFICACIÓN 1

CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL

INFORME FINAL



EJECUTA:



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

1803
<http://www.udea.edu.co/>

UN PROYECTO DE:



MEDELLÍN, ABRIL DEL 2020



AUNAR ESFUERZOS PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HIDRICO SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO, EN EL MARCO DE LA OPERACIÓN DE LA RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA CUENTA HIDROGRÁFICA DEL RÍO ABURRÁ – MEDELLÍN



Aunar esfuerzos para la gestión integral del recurso hídrico superficial y subterráneo, en el marco de la operación de la red de monitoreo ambiental en la cuenca hidrográfica del río Aburrá – Medellín – Convenio 643 de 2019.

Un proyecto del Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Juan David Palacio Cardona, Director

Gustavo Adolfo Londoño Gaviria, Subdirector Ambiental

Ejecuta

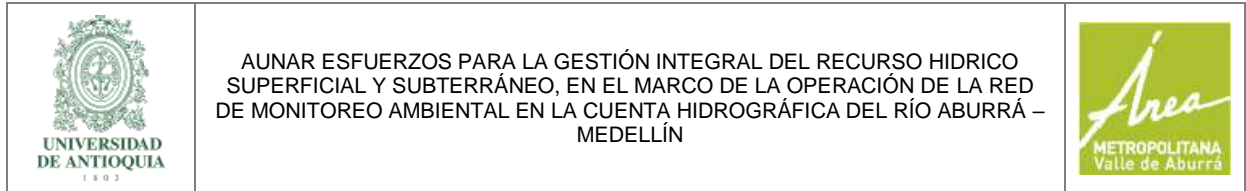
Universidad de Antioquia

John Jairo Arboleda Céspedes

Rector

Equipo de Trabajo:

Lina Claudia Giraldo Buitrago, Coordinación General; Rubén Alberto Agudelo García, Asesor de Coordinación; Carolina Zapata Vanegas, Ingeniera Logístico y de Calidad; Andrés Mauricio Ríos Cifuentes, Asesor Contable; Sandra Eugenia Flórez Hoyos, Asistente Administrativa; John Fredy Carmona Castaño, Ingeniero Sanitario Coordinador Operativo de la Red; Camilo César Castro Jiménez, Especialistas Calidad de Aguas; Alejandra Cifuentes Zapata, Ingeniera de Apoyo Monitoreo; Diana Cristina Atehortúa Rivera, Ingeniera Sanitaria y Ambiental; Carmen Emilsen Duque Arias, Ingeniera Ambiental; Julián David Rojo Hernández, Ingeniero Hidrología; Néstor Jaime Aguirre Ramírez, Asesor Biológico; Andrés Felipe Botero Gutiérrez, Luisa Fernanda López Ramírez, Luisa Fernanda Márquez Orozco; Liliana Paola Molano Tovar; Auxiliares de Ingeniería Agua Superficial; Nixon Arley Aristizábal Niño, Profesional en SIG; Carlos Andrés Jaramillo Osorio, Ingeniero Líder Estaciones Automáticas; Juan Manuel Osorio Zapata, Ingeniero de Apoyo Estaciones Automáticas; Carlos Andrés Ardila Duque, Ingeniero Sanitario; Carlos Alberto Pérez Moncada, Ingeniero Analista de Datos; Dairo León Vanegas Taborda, Juan Carlos Camacho Manco, Auxiliares de Ingeniería Estaciones Automáticas; Andrés Camilo Zapata Moreno, Alejandro Martínez Ayala, Profesionales Gestión de la Plataforma; Alexander Ossa Montoya, Ingeniero de Desarrollo de Interface Estaciones Automáticas; Juan de Dios Delgado Lastra, Asesor Estadístico; Juliana Ossa Valencia, Coordinadora Hidrogeóloga y Profesional para la Interpretación Química e Isotópica del Agua Subterránea; Teresita Betancur Vargas, Asesora Componente Hidrogeología; Cristina Uribe Martínez, Profesional para Modelación Agua Subterránea y Profesional Manejo de Base de Datos Espacial, Ángela Díaz Torres, Asistente



Administrativo; Andrés Felipe Tapias Gutiérrez, David Alejandro Londoño Ramírez, Estudiantes Auxiliares Aguas Subterráneas; Milton Alexis Ramírez Zuluaga, Profesional Líder Plan Comunitario; Eliana Alejandra Uribe Olarte, Yeison Fernando Palacio Campusano, Faber Andrés Sánchez Gutiérrez, Auxiliares Técnicos; Lina Vanesa Guzmán García, Administradora Ambiental y de Recursos Naturales; Juan Esteban Cataño Tobón; Profesional Ambiental; Michelle Rendón Builes, Profesional Apoyo (Biólogo); Luis Fernando López Soto, Comunicador.

Supervisión Área Metropolitana del Valle de Aburrá:

María Yaneth Rúa García

Equipo RedRío: Olga Amparo Velázquez Lozano; Héctor Jaime Vélez Jiménez

Equipo contratista RedRío: Raúl Alexander Cardona Pareja, Jhon Camilo Duque Duque, Yessica Yuliana Bedoya Valencia.

Interventoría COLNET:

María Alejandra Echeverri Arango, Coordinadora; Norberth Ayala Ocampo, Apoyo a la Coordinación Componente Ambiental y Administrativo; Leonardo García, Responsable Componente Operación Agua Superficial; Natalia Quintero Velásquez, Apoyo Estaciones Automáticas y Monitoreo, Sandra Patiño, Responsable Operación Agua Subterráneas; Diana Álvarez, Responsable Componente Comunicaciones; William Fernando Isaza Marulanda, Componente Financiero.

Abril de 2020, Medellín



CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	11
2	JUSTIFICACIÓN	12
3	OBJETIVOS	13
3.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
4	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	14
5	DESCRIPCIÓN DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO	16
6	METODOLOGÍA DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AGUA.....	19
7	RESULTADOS Y ANÁLISIS CAMPAÑA DE MONITOREO AGUA SUPERFICIAL CONVENIO 643 DE 2019 ADICIÓN 1	19
7.1	CAMPAÑA DE MONITOREO MUESTRA COMPLETA 19 DE FEBRERO DE 2020	19
7.1.1	Resultados y análisis de las variables medidas en campo en la campaña de monitoreo de muestra completa del 19 de febrero de 2020	19
7.1.2	Resultados y análisis de las variables fisicoquímicas medidas en la campaña de monitoreo de muestra completa el 19 de febrero de 2020	39
7.1.3	Comparación de resultados de la campaña del 19 de febrero de 2020 con los objetivos de calidad para la cuenca del río Aburrá-Medellín para el periodo 2017-2022 de la Resolución Metropolitana No. 002016 del 26 de octubre de 2012	51
7.1.4	Carga contaminante del río Aburrá-Medellín para la campaña de monitoreo completa del 19 de febrero de 2020	58
7.1.5	Resultados de los índices ICA e ICA Global para la calificación de la calidad de agua en la campaña de monitoreo sobre el río Aburrá-Medellín realizada el 19 de febrero de 2020.....	60
7.1.6	Medición de color ADMI y Triestimar en monitoreo de muestra Completa realizado el 19 de febrero de 2020	67
7.1.7	Resultados de monitoreo componente hidrobiológico campaña de muestra completa 19 de febrero de 2020	75
7.1.8	Índice de Calidad Ecológica para la campaña de muestra completa del 19 de febrero de 2020 ..	85
8	CONCLUSIONES	99
9	RECOMENDACIONES	100
10	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

TABLAS

Tabla 1. Descripción estaciones de monitoreo (AMVA, 2018)	16
Tabla 2. Programación campaña de muestra completa 19 de febrero de 2020	20
Tabla 3. Temperatura ambiente medida cada hora en las estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020	25
Tabla 4. Temperatura del agua medido cada hora en las estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020	25
Tabla 5. pH del agua medido cada hora en las estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020	25
Tabla 6. Oxígeno disuelto medido cada hora en las estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020	26
Tabla 7. Conductividad eléctrica medida cada hora en las estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020	26
Tabla 8. Potencial redox medido cada hora en las estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020	26
Tabla 9. Turbiedad medida cada hora en las estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020	27
Tabla 10. Resultados variables de campo promedio y fisicoquímicas determinadas en laboratorio, tomadas en el río Aburrá – Medellín en la campaña de muestra completa realizada el 19 de febrero de 2020	40
Tabla 11. Objetivos de calidad para el río Aburrá-Medellín Resolución Metropolitana 2016 de 2012 periodo de 5 a 10 años 2017-2022	51
Tabla 12. Comparación de resultados campaña de monitoreo del 19 de febrero de 2020 con los objetivos de calidad del río Aburrá-Medellín Resolución Metropolitana 2016 de 2012 largo plazo 2017-2022	52
Tabla 13. Cargas contaminantes en el río Aburrá-Medellín Campaña 19 de febrero de 2020 ...	58
Tabla 14. Índices de calidad en el río Aburrá-Medellín para la campaña del 19 de febrero de 2020	61
Tabla 15. Color ADMI, triestimar y variables fisicoquímicas de las muestras puntuales en estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020.....	67

Tabla 16. Color ADMI, Triestimular y variables fisicoquímicas de las muestras compuestas en estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020.....	72
Tabla 17. Listado taxonómico de las algas perifíticas registradas en el río Aburrá-Medellín en la campaña de muestra completa realizada el 19 de febrero de 2020.....	76
Tabla 18. Densidad de algas perifíticas por unidad de área (Org/cm ²) en estaciones de monitoreo en el río Aburrá-Medellín en la campaña de muestra completa realizada el 19 de febrero	77
Tabla 19. Índices de Diversidad, Dominancia y Equidad en estaciones de monitoreo río Aburrá-Medellín en la campaña completa realizada el 19 de febrero de 2020	79
Tabla 20. Comunidad de macroinvertebrados acuáticos en las estaciones de monitoreo río Aburrá-Medellín en la campaña completa realizada el 19 de febrero de 2020.....	83
Tabla 21. Valores del índice biótico BMWP/Col en las estaciones de monitoreo río Aburrá-Medellín en la campaña completa realizada el 18 de agosto de 2019.....	84
Tabla 22. Estaciones de monitoreo para el cálculo del ICE	87
Tabla 23. Valores óptimos y de tolerancia de cada uno de los morfotipos de algas perifíticas – 19 de febrero de 2020	89
Tabla 24. Valores por estación del Índice de Calidad Ecológica basado en algas perifíticas – 19 de febrero de 2020	90
Tabla 25. Distribución y clasificación del índice de calidad ecológica basado en algas perifíticas – 19 de febrero de 2020	91
Tabla 26. Correlación entre el ICE basado en algas perifíticas y las variables ambientales incluidas en el análisis ACC – 19 de febrero de 2020.....	92
Tabla 27. Valores óptimos y de tolerancia de cada uno de los morfotipos de macroinvertebrados acuáticos – 19 de febrero de 2020	93
Tabla 28. Valores por estación del Índice de Calidad Ecológica basado en macroinvertebrados acuáticos – 19 de febrero de 2020	95
Tabla 29. Distribución y clasificación del índice de calidad ecológica basado en macroinvertebrados acuáticos – 19 de febrero de 2020	97
Tabla 30. Correlación entre el ICE basado en macroinvertebrados acuáticos y las variables ambientales incluidas en el análisis ACC – 19 de febrero de 2020.....	98

FIGURAS

Figura 1. Temperatura ambiente estaciones río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020.....	28
Figura 2. Temperatura del agua estaciones río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020.....	29
Figura 3. pH del agua estaciones río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020	30
Figura 4. Oxígeno disuelto estaciones río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020.....	31
Figura 5. Conductividad eléctrica estaciones río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020.....	32
Figura 6. Potencial redox estaciones río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020	32
Figura 7. Turbiedad estaciones río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020	33
Figura 8. Variables de campo promedio y fisicoquímicas determinadas en laboratorio, tomadas en el río Aburrá – Medellín en la campaña de muestra completa realizada el 19 de febrero de 2020	45
Figura 9. Objetivo de calidad vs variables fisicoquímicas medidas en la campaña del 19 de febrero de 2020	56
Figura 10. Carga de DBO5, DQO, nutrientes y fracciones de sólidos en las estaciones sobre el eje del río Aburrá-Medellín para la campaña de monitoreo del 19 de febrero de 2020	59
Figura 11. Índices de calidad en el río Aburrá–Medellín para la campaña del 19 de febrero de 2020.....	63
Figura 12. Color ADMI y Triestímulos de las muestras puntuales en estaciones sobre el río Aburrá-Medellín, 19 de febrero de 2020.....	70
Figura 13. Color ADMI y Triestímulos de las muestras compuestas en estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020	73
Figura 14. Comunidad de algas perifíticas en estaciones de monitoreo del río Aburrá-Medellín en la campaña completa realizada el 19 de febrero de 2020.....	78
Figura 15. Contraste de los índices de Diversidad (H'), Equidad (J') y Dominancia (D) en estaciones de monitoreo río Aburrá-Medellín en la campaña completa realizada el 19 de febrero de 2020	79
Figura 16. Familias de Macroinvertebrados acuáticos encontradas en la campaña de monitoreo realizada el 19 de febrero de 2020. (A) Staphylinidae (B) Tubificidae (C) Hydropsychidae (D) Leptophlebiidae (E) Calopterygidae (F) Physidae.....	82

Figura 17. Perfil de los valores óptimos y de tolerancia de los morfotipos de algas perifíticas registradas después del análisis de reescalamiento en asociación con el análisis ACC – 19 de febrero de 2020	90
Figura 18. Distribución del Índice de Calidad Ecológica basado en algas perifíticas – 19 de febrero de 2020	91
Figura 19. Análisis de agrupamiento del índice de calidad ecológica basado en algas perifíticas – 19 de febrero de 2020	92
Figura 20. Perfil de los valores óptimos y de tolerancia de los morfotipos de macroinvertebrados acuáticos registrados después del análisis de reescalamiento en asociación con el análisis RDA – 19 de febrero de 2020	95
Figura 21. Distribución del Índice de Calidad Ecológica basado en macroinvertebrados acuáticos – 19 de febrero de 2020	96
Figura 22. Análisis de agrupamiento del índice de calidad ecológica basado en macroinvertebrados acuáticos – 19 de febrero de 2020	97

FOTOS

Foto 1. Invasión del cauce obras puente Ayurá.....	21
Foto 2. Descarga margen izquierda aguas abajo E5.....	21
Foto 3. Bypass PTAR Aguas Claras.....	22
Foto 4. Registro fotográfico campaña de monitoreo 19 de febrero de 2020.....	24
Foto 5. Algunas algas perifíticas encontradas en la campaña de monitoreo realizada el 19 de febrero de 2020. (A) <i>Cocconeis</i> sp. (B) <i>Oscillatoria</i> sp. (C) <i>Pinnularia</i> sp. (D) <i>Gyrosigma</i> sp....	76

MAPAS

Mapa 1. Índice de Calidad de Corrientes Superficiales ICA (IDEAM) río Aburrá-Medellín campaña del 19 de febrero de 2020	65
Mapa 2. Índice de Calidad de Agua Global ICA Global (RedRío) río Aburrá-Medellín campaña del 19 de febrero de 2020	66



1 INTRODUCCIÓN

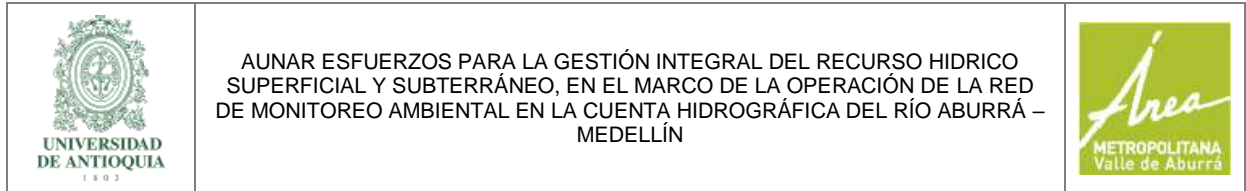
El río Aburrá-Medellín se considera un Hecho Metropolitano desde 1995, por Acuerdo Metropolitano No. 21 de octubre 30 de 1995, lo cual se ratificó en las Directrices Metropolitanas de Ordenamiento Territorial, mediante Acuerdo 015 de 2006. El Río es un Hecho Metropolitano y eje articulador que recorre el Valle de Aburrá, del cual los habitantes metropolitanos son usuarios, de manera directa o indirecta, bien como fuente de abastecimiento para los diferentes usos del sector industrial, minero, comercial y de servicios o como receptor de vertimientos, directos o indirectos a través del operador del servicio de alcantarillado. El río Aburrá-Medellín define el paisaje de la Metrópoli y sus condiciones ambientales que implican una afectación substancial y simultánea en todos los municipios por donde pasa.

En el Acuerdo Metropolitano N° 018 de 2001, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá adoptó legalmente el “Proyecto Metrópoli 2002-2020”, Plan Integral de Desarrollo Metropolitano del Valle de Aburrá –PID–, que luego se modificó en el 2007 con el Plan Metrópoli 2008-2020 “Hacia la integración regional sostenible”, donde los objetivos, las estrategias y los proyectos estratégicos metropolitanos se entienden como el camino para abordar los grandes temas de impacto estratégico para todo el Valle de Aburrá y su área de influencia. Uno de los Proyectos Estratégicos Metropolitanos es el “Desarrollo Sociocultural y Calidad Ambiental” que tiene como objetivo mejorar las condiciones socioculturales y ambientales en el Valle de Aburrá, el cual plantea como una de las acciones en curso recomendadas para la implementación de dicho proyecto estratégico, la de implementar la mitigación control y monitoreo de la contaminación en los recursos naturales de la cuenca del mismo cuerpo de agua.

En el Plan de Gestión 2016-2019 “Territorios Integrados” del Área Metropolitana del Valle de Aburrá”, involucra la Línea Estratégica No. 2, denominada “Calidad Ambiental y Desarrollo Sostenible” que tiene como objetivo: Articular la gestión de la calidad ambiental, la sustentabilidad en el uso y aprovechamiento de recursos naturales por parte de la sociedad metropolitana y el cumplimiento de exigencias ambientales en el Valle de Aburrá. Dentro de esta Línea Estratégica No. 2 se consideró el Programa No. 14, “Gestión Integral del Recurso Hídrico”, que se constituye en el marco para llevar a cabo los proyectos relacionados con el monitoreo del recurso agua.

Otro de los objetivos importantes del Plan Metrópoli 2008-2020 “Hacia la integración regional sostenible” es realizar acciones integrales para conocer las dinámicas del recurso agua en su calidad y cantidad y sus características en diferentes espacios geográficos, intervalos y períodos de tiempo mediante la implementación de sistemas de monitoreo, seguimiento y control del recurso hídrico (agua superficial y subterránea).

El Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH) del río Aburrá-Medellín, liderado por las autoridades ambientales Área Metropolitana del Valle de Aburrá -AMVA, Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia -Corantioquia y Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare - Cornare y adoptado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá a través de la Resolución Metropolitana 2994 de 2019, tiene como propósito mejorar la disponibilidad (calidad y cantidad) del recurso hídrico, tanto del río como de sus afluentes priorizados. Para ello, se plantearon proyectos en torno a tres líneas estratégicas (conservación, protección y/o recuperación del recurso hídrico, cultura del consumo eficiente del agua y gestión territorial), las cuales se articulan con los objetivos específicos de la Política Nacional para la



Gestión del Recurso Hídrico. En ese sentido, la operación de la Red permitirá realizar un seguimiento al avance en la implementación del PORH.

La Entidad, a través de la red de monitoreo ambiental en la cuenca hidrográfica del río Medellín-Aburrá en jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá-RedRío, realiza un seguimiento continuo en términos de espacio y tiempo a la calidad de las aguas del río Aburrá y principales quebradas afluentes, lo que permite analizar, evaluar y planificar el recurso hídrico y tener instrumentos que le permiten, fijar políticas y criterios para una gestión ambiental integral, que conducen al ordenamiento, protección y conservación de la cuenca. Adicionalmente, en cumplimiento con la Política Nacional para la Gestión del Recurso Hídrico y del Decreto 1076 de 2015, es obligatorio para las Autoridades Ambientales realizar un monitoreo permanente sobre la cantidad y calidad del recurso hídrico en su jurisdicción; es por esto por lo que el Área Metropolitana del valle de Aburrá y la Universidad de Antioquia, celebraron el Convenio 643 de 2019, con el fin de continuar a través del proyecto RedRío, generando información fundamental para la Gestión del Recurso Hídrico y la toma de decisiones por parte del Área Metropolitana, los entes territoriales y las otras Corporaciones Ambientales de la región; adicionalmente, es información que se brinda continuamente a los entes de control y la comunidad en general.

Con relación a la Calidad de Agua superficial se contempló dentro de este Convenio 643 de 2019 Adición 1, continuar con los monitoreos sobre el río Aburrá-Medellín, para ello se programó una campaña de monitoreo de tipo Completa en trece (13) estaciones sobre el río Aburrá-Medellín y una (1) estación localizada en el río Porce. En este informe se presentan los resultados obtenidos para las variables de campo y fisicoquímicas medidas en laboratorio, el cálculo de las cargas contaminantes, la evaluación de los objetivos de calidad de acuerdo con la Resolución Metropolitana 2016 de 2012, los índices de calidad (Índice de Calidad General en Corrientes Superficiales - ICA, Índice de Calidad del Agua - ICA Global, Índice Biótico -BMWP /Col e Índice de Calidad Ecológica- ICE) y el componente biológico.

2 JUSTIFICACIÓN

La Red de Monitoreo del Recurso Hídrico Superficial y Subterráneo del Valle de Aburrá – RedRío-, opera desde el año 2003, a través de convenios suscritos con la Universidad de Antioquia. El proyecto RedRío genera información que sirve como insumo para la Gestión Integral del recurso hídrico para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, las Corporaciones Autónomas Regionales y a las secretarías ambientales de los entes territoriales de la región, así como para la toma de decisiones inherentes a su quehacer como Autoridad Ambiental, asimismo, brinda información que sea requerida por los entes de control y la comunidad en general.

El análisis de las características y comportamiento del ciclo del agua en el Valle de Aburrá se ve reflejado a través del monitoreo continuo y sistemático de la calidad y cantidad del agua superficial y subterránea, que se adelanta a través de RedRío. Dicha información, permite tomar decisiones preventivas donde prima entre otras cosas, el análisis de riesgos asociados al recurso hídrico, ante cualquier eventualidad que pueda afectar la calidad de vida de las comunidades. Adicionalmente, dicha información es requerida de forma continua durante el año (especialmente en periodo seco), por tratarse de datos que van a permitir analizar los efectos de los diferentes fenómenos naturales, que pueden llegar a presentarse en el Valle de Aburrá, como lo son los fenómenos del Niño o de la Niña. Tal como lo registra el Instituto de Hidrología, Meteorología y

Estudios Ambientales - IDEAM y los indicadores océano atmosféricos en el Pacífico Tropical, el Valle de Aburrá no es ajeno a este fenómeno, que en gran medida se puede analizar con los datos generados en las campañas de monitoreo del recurso hídrico, que realiza el Área Metropolitana del Valle de Aburrá a través de la operación de la Red complementada con los datos generados en las estaciones del IDEAM y Sistema de Alerta Temprana del valle de Aburrá -SIATA.

Con los datos recolectados y la información obtenida en el desarrollo de la red de monitoreo, se pueden observar los cambios generados sobre el estado del recurso hídrico y sobre el entorno, determinados por el impacto/efecto de la ejecución de obras del Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos- PSMV que viene implementando Empresas Públicas de Medellín y por los proyectos que ejecuta la Entidad v.g. Recuperación de placas del canal del río, remoción de sedimentos, obras de protección y amortiguamiento, sistemas de recolección de aguas residuales a través de sistemas no convencionales, aplicación de Programas de Producción en las industrias y nuevos procesos de desarrollo productivo, Plan Quebradas y próximamente con el PORH y PMAA, entre otros.

Es importante resaltar que la información generada en el monitoreo de la calidad y cantidad del agua superficial y subterránea en el Valle de Aburrá es herramienta clave en el diseño y evaluación de medidas de protección y control de la calidad del agua, tanto superficial como subterránea en el Valle de Aburrá, lo que permite definir escenarios de planificación para la toma de decisiones. En el caso de las aguas superficiales, la información obtenida en las campañas de muestreo es imprescindible para la determinación de los índices de calidad (Índice de Calidad General en Corrientes Superficiales -ICA e ICA Global), establecidos para el río Aburrá – Medellín, la comparación con los objetivos de calidad fijados en la Resolución Metropolitana 2016 de 2012, las cargas contaminantes, el Índice de Biológico- BMWP y adicionalmente como soporte de la estructuración y ejecución del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico -PORH -.

Con los productos obtenidos en la red de monitoreo, se evidencian los cambios generados sobre el recurso hídrico en el tiempo relacionados con la calidad del agua y las condiciones hidrobiológicas, que pueden estar influenciadas por las acciones que se ejecutan en su entorno y sus afluentes. Es importante resaltar que la información resultante del monitoreo de la calidad y cantidad del agua superficial en el Valle de Aburrá es herramienta clave en el diseño y evaluación de medidas de protección y control de la calidad del agua en el Valle de Aburrá, lo que permite definir escenarios de planificación para la toma de decisiones.

3 OBJETIVOS

Analizar la calidad del agua en trece (13) estaciones ubicadas sobre el río Aburrá-Medellín y una (1) sobre el río Porce a partir de variables fisicoquímicas e hidrobiológicas determinadas en la campaña de muestra completa desarrollada en el marco del Convenio 643 de 2019 Adición 1.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la dinámica espacial y temporal de las variables fisicoquímicas e hidrobiológicas en trece (13) estaciones ubicadas sobre el río Aburrá-Medellín y una (1) sobre el río Porce.

- Analizar el color ADMI y triestimar en trece (13) estaciones ubicadas sobre el río Aburrá-Medellín y una (1) sobre el río Porce.
- Evaluar el cumplimiento de los objetivos de calidad definidos para el corto plazo en el río Aburrá-Medellín, establecidos en la Resolución Metropolitana 2016 de 2012.
- Analizar los índices de calidad ICA, ICA Global, ICE y BMWP-Col obtenidos en las campañas de muestra completa realizadas sobre el río Aburrá- Medellin
- Analizar las cargas contaminantes transportadas en trece (13) estaciones ubicadas sobre el río Aburrá-Medellín y una (1) sobre el río Porce.
- Analizar los resultados obtenidos para las principales variables fisicoquímicas e hidrobiológicas y los índices de calidad ICA e ICA Global en trece (13) estaciones ubicadas sobre el río Aburrá-Medellín y una (1) sobre el río Porce respecto a los valores promedio históricos calculados entre 2010-2020.

4 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Aburrá-Medellín se localiza al occidente de Colombia, sobre la vertiente occidental de la cordillera Central, en el centro sur del departamento de Antioquia. Sus límites son: al norte con río Grande y el municipio de Yolombó, al sur con los Altos de Chamuscado y San Miguel, al occidente con los municipios de Amagá, Angelópolis, Heliconia, Ebéjico, San Pedro y Donmatías y finalmente al oriente con los municipios de Montebello, El Retiro, Rionegro, Guarne, San Vicente Ferrer, Concepción y Santo Domingo (CORANTIOQUIA, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, CORNARE, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y C.I. S.A.S, 2018).

La cuenca tiene forma alargada en dirección noreste y con un área total correspondiente a 120,758.6 Ha. La altitud oscila entre 1100 y 3100 m.s.n.m. aproximadamente, elevación media de 1985.4 m.s.n.m. En el territorio pueden encontrarse pendientes entre el 12-25 % consideradas como fuertemente inclinadas y otras ligeramente escarpadas (25-50%), estas corresponden al 28.60 y 44.98% del territorio respectivamente, por otro lado, aquellas pendientes calificadas entre moderadas a fuertemente escarpadas (50-100%) y entre ligeramente planas a moderadamente inclinadas (1-12%) representan el 15.32 y 11.11% de manera correspondiente. Las menores pendientes en la cuenca se presentan en la zona de influencia del río Aburrá-Medellín (CORANTIOQUIA *et al.*, 2018).

La cuenca del río Aburrá-Medellín se compone por 14 municipios, de los cuales seis tienen la totalidad de su territorio dentro de la misma (La Estrella, Sabaneta, Itagüí, Copacabana, Girardota y Barbosa), mientras que los restantes ocho municipios solo una fracción (Caldas, Envigado, Medellín, Bello, Guarne, San Vicente Ferrer, Donmatías y Santo Domingo). Tres Autoridades Ambientales tienen jurisdicción sobre el territorio: el Área Metropolitana del Valle de Aburrá en la zona urbana de los diez (10) municipios que conforman la subregión Valle de Aburrá (12.4%), la Corporación Autónoma Regional de Antioquia-CORANTIOQUIA en el municipio de Donmatías además de las áreas rurales de los diez (10) municipios mencionados previamente (76.1%) y la Corporación Autónoma Regional de las cuencas de los ríos Negro y Nare-CORNARE en los tres (3) municipios restantes (11.5%) (CORANTIOQUIA *et al.*, 2018). La población en el Valle de Aburrá corresponde a 3.72 millones de habitantes (DANE, 2019).



El clima en la cuenca es tropical, lo cual se asocia a su ubicación geográfica. El comportamiento temporal de la precipitación es bimodal, por lo que se presentan al año dos épocas con eventos de lluvia (marzo-junio y septiembre-noviembre), intercaladas por dos periodos secos. En cuanto a la distribución espacial de lluvias, los mayores registros se presentan en la zona norte, cerca al sitio de confluencia entre el río Aburrá-Medellín y río Grande (3.300 mm) y en la zona sur (2.600 mm), entretanto, en el área urbana de los municipios de Bello y Girardota se reportan valores mínimos de 1.450 mm aproximadamente. Los meses de mayo y octubre corresponden a los de mayores precipitaciones, con valores máximos entre 300 y 350 mm, mientras que enero se caracteriza por ser el mes más seco, con valores inferiores a 100 mm. Se destaca que la precipitación en la cuenca también está influenciada por sistemas convectivos locales que generan lluvias de tipo orográfico en los sitios de mayor altitud. El promedio anual estimado para la precipitación en la cuenca es de 2148.8 mm (CORANTIOQUIA *et al.*, 2018).

La temperatura promedio no presenta grandes variaciones entre los meses de máximos y mínimos, dado que la diferencia entre estos oscila entre los 18°C y 22°C para los meses de mayo – junio más calurosos y octubre-noviembre como aquellos con temperaturas más bajas registrados en la cuenca. Al ubicar espacialmente los datos registrados se observó que dichos corresponden para los mínimos a las zonas de mayor altitud sobre la cuenca (nacimientos de las quebradas La García y La Iguañá), mientras que los mayores valores promedio (20.5 °C) se presentan cerca de la zona de confluencia entre el río Aburrá-Medellín y río Grande (CORANTIOQUIA *et al.*, 2018).

Los usos del suelo de mayor relevancia en la cuenca corresponden a agrosilvopastoril (29.98%) y urbano (21.47%), usos asociados a la conservación, forestal protector y pecuario son cercanos al orden de 16.93%, otros usos identificados en la cuenca son dedicados a la producción forestal y minería con ocupaciones del territorio de 15.11% y 14.21 % respectivamente, mientras que las zonas de recreación y agricultura tienen porcentajes de uso del suelo menores al 1%, aquellas coberturas que se identificaron principalmente en la cuenca como agrícolas corresponden al 43.27% del territorio, los bosques y otras áreas seminaturales (32.85%), espacios artificializados (23.49%), por su parte las superficies húmedas y espacios de agua tienen porcentajes de ocupación iguales a 0.06 y 0.32 % (CORANTIOQUIA *et al.*, 2018).

Las actividades económicas principales del sector industrial son: textil, confección, químicos, alimentos, construcción e infraestructura. En el sector comercio y de servicios, estas se desarrollan principalmente en la zona urbana de los municipios ubicados en la zona alta y media de la cuenca. También se llevan a cabo actividades agrícolas como cultivo de maíz, café, caña panelera y frijol, existen otras actividades económicas desarrolladas en la parte baja de la cuenca entre las cuales se destacan las pecuarias (avicultura, porcicultura y bovino de doble propósito) (CORANTIOQUIA *et al.*, 2018).

La cuenca está definida por el río Aburrá-Medellín, el cual posee un orden de Horton correspondiente a 7, índice de sinuosidad de 1.12 (canal rectilíneo, muy baja sinuosidad) y un tiempo de concentración de 29.1 horas. El río recorre la cuenca en sentido sur-norte entre los municipios de Caldas y Bello, y a partir de este último fluye en dirección noreste. Tiene una longitud aproximada de 107.9 Km desde su nacimiento en el municipio de Caldas sobre el Alto de San Miguel a 2.980 m.s.n.m, hasta su confluencia con río Grande a 1.048 m.s.n.m., en el municipio de Santo Domingo, donde su unión da origen al río Porce. En él desembocan más de






200 quebradas afluentes, las cuales presentan diferente grado de intervención antrópica, tanto en la subcuenca como en su cauce (CORANTIOQUIA *et al.*, 2018).






5 DESCRIPCIÓN DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO

En la Tabla 1 se presenta la descripción de las catorce estaciones de monitoreo evaluadas durante el Convenio 643 de 2019 - Adición 1, de las cuales trece (13) estaciones se encuentran ubicadas sobre el río Aburrá-Medellín y un sitio de monitoreo localizado en el río Porce.

Tabla 1. Descripción estaciones de monitoreo (AMVA, 2018)

ESTACIÓN	DESCRIPCIÓN	FOTO
Reserva Alto de San Miguel (E0)	<ul style="list-style-type: none"> -Ubicación: Vereda La Clara, Municipio de Caldas. -Coordenadas: 6°01'49.3" Norte y 75°35'49.3" Oeste, a 2023 msnm. -Observaciones: la estación está localizada aguas abajo del nacimiento del río Aburrá-Medellín, en la Reserva Forestal Protectora Regional Alto de San Miguel, declarada por el Acuerdo 476 del 22 de septiembre de 2016, con la finalidad de garantizar la sostenibilidad de los recursos naturales y los bienes y servicios ambientales que ofrece, entre ellos la oferta hídrica. Previo al punto de monitoreo confluyen las quebradas Santa Isabel, La Vieja, La Moladora y El Tesoro. 	
San Miguel (E1)	<ul style="list-style-type: none"> -Ubicación: Vereda La Clara, Municipio de Caldas. -Coordenadas: 6°2'56.8" Norte y 75°37'10.9" Oeste, a 1830 msnm. -Observaciones: en la zona hay explotación no controlada de material aluvial, uso recreativo de tipo primario y secundario, actividades pecuarias, extracción de madera y descargas puntuales de aguas residuales domésticas provenientes de las viviendas localizadas en el área. Aguas arriba del sitio de monitoreo tributa la quebrada La Mina. En este sitio se localiza una estación automática, la cual realiza un seguimiento continuo y en tiempo real a diversas variables fisicoquímicas. 	
Primavera (E2)	<ul style="list-style-type: none"> -Ubicación: Municipio de Caldas. -Coordenadas: 6°4'5.0" Norte y 75°37'54.0" Oeste, a 1774 msnm. -Observaciones: Aguas arriba tributan las quebradas La Clara y La Salada, además de descargas aguas residuales de viviendas aledañas y una escombrera ubicada cerca del sitio de monitoreo. 	
Ancón Sur (E3)	<ul style="list-style-type: none"> -Ubicación: Municipio de la Estrella. -Coordenadas: 6°9'11.0" Norte y 75°37'38.4" Oeste, a 1604msnm. -Observaciones: Localizada frente a la estación la Estrella del Metro. En este sitio, el río tiene lecho rocoso, el canal es rectificadado y los taludes son en concreto. Se realiza monitoreo automático y en tiempo real de variables fisicoquímicas. Allí han llegado las aguas residuales provenientes de Caldas y una parte de La Estrella y Sabaneta, además de los aportes de las quebradas La Valeria, La Miel, La Culebra, La Grande y La Estrella, y de diversas industrias ubicadas en el sur de la cuenca. 	

ESTACIÓN	DESCRIPCIÓN	FOTO
Antes de San Fernando (E5)	<ul style="list-style-type: none"> -Ubicación: Estación Ayurá del Metro de Medellín. -Coordenadas: 6°11'11.8" Norte y 75°35'8.6" Oeste, a 1520 msnm. -Observaciones: Aguas arriba ingresan las quebradas La Ospina, La Doctora, La Mina, La Limona y Doña María, también la carga contaminante de los municipios de Caldas, La Estrella, Sabaneta, Envigado e Itagüí. 	
Después de San Fernando (E6)	<ul style="list-style-type: none"> -Ubicación: Puente de la Aguacatala, Municipio de Medellín. -Coordenadas: 6°11'43.0" Norte y 75°34'53.5" Oeste, a 1510 msnm. -Observaciones: Aguas arriba del sitio de monitoreo, sobre la margen izquierda, se localiza el efluente de aguas residuales tratadas proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales- PTAR San Fernando, mientras que en la margen derecha se encuentra la quebrada La Ayurá. 	
Aula Ambiental (E8)	<ul style="list-style-type: none"> -Ubicación: Aula Ambiental, Municipio de Medellín. -Coordenadas: 6°15'51.8" Norte y 75°34'20.5" Oeste, a 1464 msnm. -Observaciones: la estación mide de forma continua y en tiempo real variables fisicoquímicas automáticamente. El río está afectado por las quebradas La Presidenta, La Jabalcona, La Aguacatala, La Altavista, La Guayabala, La Iguaná, La Hueso, La Picacha, Santa Elena, además de vertimientos directos de aguas residuales de origen industrial. Aguas arriba existen varios resaltos hidráulicos, entre ellos el vertedero ubicado a la altura de la Plaza de Mercado La Minorista, llamado "salto de agronomía", los cuales favorecen a la disipación de energía y la reaireración del agua. 	
Puente Acevedo (E9)	<ul style="list-style-type: none"> -Ubicación: Paralela a la estación Acevedo del Metro de Medellín. -Coordenadas: 6°18'25.0" Norte y 75°33'25.3" Oeste, a 1433 msnm. -Observaciones: Aguas arriba existe explotaciones areneras ocasionales, inadecuada disposición de residuos sólidos, vertimiento de aguas residuales y los aportes de las quebradas afluentes El Molino, La Bermejala y La Rosa. 	
Puente Machado (E11)	<ul style="list-style-type: none"> -Ubicación: Municipio de Bello. -Coordenadas: 6°20'9.1" Norte y 75°32'16.2" Oeste, a 1424 msnm. -Observaciones: Río influenciado por las quebradas La García, La Madera, La Loca y El Hato, como también por descargas de aguas residuales provenientes del municipio de Bello. Aguas arriba del sitio de monitoreo, sobre la margen izquierda, se localiza el bypass de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales -PTAR Aguas Claras. En este sitio el río no se encuentra rectificad ni canalizado. 	

ESTACIÓN	DESCRIPCIÓN	FOTO
Niquía (E21)	<p>-Ubicación: Municipio de Bello.</p> <p>-Coordenadas: 6°20'17.3" Norte y 75°31'32.4" Oeste, a 1410 msnm.</p> <p>-Observaciones: Aguas arriba se localiza la descarga de las aguas residuales tratadas provenientes de la PTAR Aguas Claras, asimismo, desemboca la quebrada La Rodas. Industrias cercanas a la estación de monitoreo donde se extrae y procesa materiales de playa.</p>	
Ancón Norte (E12)	<p>-Ubicación: Municipio de Copacabana.</p> <p>-Coordenadas: 6°17'2.6" Norte y 75°34'3.1" Oeste, a 1397 msnm.</p> <p>-Observaciones: Aguas arriba descargan las quebradas Piedras Blancas, El Chuscal, La Tolda y Guasimal, también hay descarga de aguas residuales del municipio de Copacabana.</p>	
Parque de las Aguas (E14)	<p>-Ubicación: Municipio de Barbosa.</p> <p>-Coordenadas: 6°24'17.56" Norte y 75°25'14.63" Oeste, a 1332 msnm.</p> <p>-Observaciones: En este punto han llegado las quebradas El Salado, La Fulgencia, La Correa, La Ferrería y Platanito. Aguas arriba hay una cantera y aguas abajo ingresan al río las aguas de la Central Hidroeléctrica La Tasajera, las cuales contribuyen a diluir los contaminantes transportados por el río.</p>	
Papelsa (E16)	<p>-Ubicación: Municipio de Barbosa.</p> <p>-Coordenadas: 6°26'46.4" Norte y 75°19'53.3" Oeste, a 1260 msnm.</p> <p>-Observaciones: Aguas arriba desembocan las quebradas La López, Castillal, La Quebra y Ovejas entre otras; también se reciben descargas de aguas residuales del municipio de Barbosa y de industrias cercanas.</p>	
Puente Gabino (E20)	<p>-Ubicación: Corregimiento de Porce, Municipio Santo Domingo.</p> <p>-Coordenadas: 6°33'34.3" Norte y 75°12'20.8" Oeste, a 1056 msnm.</p> <p>-Observaciones: Estación ubicada sobre en el río Porce, posterior a la confluencia entre el río Aburrá-Medellín y río Grande. Aguas arriba del sitio de monitoreo confluyen las quebradas La Jagua, San Pedro, Aguas Claras, Piedra Gorda, Arenales, Los Morros y La Santiago. Uso de suelo para ganadería y agricultura, explotación de oro en la zona.</p>	

6 METODOLOGÍA DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AGUA

La metodología para realizar el monitoreo de calidad de aguas superficiales en sus componentes manual y automático, desarrollados en la red de monitoreo ambiental del río Aburrá-Medellín RedRío, se presentan en el Manual de Monitoreo-Convenio 643 de 2019, entregado como anexo en este convenio. Los procedimientos descritos en ese manual tuvieron como soporte el Protocolo de Monitoreo del Agua publicado por el IDEAM e Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés-INVEMAR en el año 2018.

7 RESULTADOS Y ANÁLISIS CAMPAÑA DE MONITOREO AGUA SUPERFICIAL CONVENIO 643 DE 2019 ADICIÓN 1

A continuación, se presentan los resultados y análisis de la campaña de muestreo, desarrollada durante el Convenio 643 de 2019 - Adición 1, correspondiente a una campaña de muestra completa. Los análisis se desarrollaron sobre los resultados fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos en campo y en laboratorio, dónde se incluyen la comparación con los Objetivos de Calidad establecidos en la Resolución Metropolitana 2016 de 2012, cargas contaminantes, Índices de Calidad (ICA, ICA Global e ICE) y análisis biológico.

En el presente informe se evaluaron los objetivos de calidad correspondientes al largo plazo (2017-2022) de la Resolución Metropolitana 2016 de 2012. Se resalta que en el Artículo 5 de la Resolución Metropolitana 2994 de 2019, en la cual se adopta el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico, se fijan objetivos de calidad para el río Aburrá-Medellín en el periodo 2019-2030, sin embargo, en el Artículo 7 se establece un régimen de transición para estos objetivos de calidad. De acuerdo con el Artículo 7, los objetivos de calidad adoptados en el Artículo 5 regirán a partir del 1 de enero de 2022 a 2030 para las jurisdicciones del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare, mientras que para la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia regirá a partir del 1 de enero de 2024 a 2030.

7.1 CAMPAÑA DE MONITOREO MUESTRA COMPLETA 19 DE FEBRERO DE 2020

7.1.1 Resultados y análisis de las variables medidas en campo en la campaña de monitoreo de muestra completa del 19 de febrero de 2020

La campaña de muestra completa se realizó el 19 de febrero de 2020 en catorce (14) estaciones de monitoreo, de las cuales, trece (13) estaciones se ubicaron sobre el río Aburrá-Medellín y un sitio de monitoreo se localizó en el río Porce. La jornada se desarrolló entre las 6:00 y 18:00 horas. La programación de la campaña de monitoreo se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Programación campaña de muestra completa 19 de febrero de 2020

ESTACIÓN	PERSONAL	EQUIPOS
Reserva Alto de San Miguel (E0)	Emiliano Quintero-Joan Villa	Multiparámetro
San Miguel (E1)	Liliana Molano-Eliana Uribe	IQ
Primavera (E2)	Andrés Botero -Valentina Ossa	Multiparámetro
Ancón Sur (E3)	Carlos Ardila-Luz Ángela Aldana	IQ
Antes de San Fernando (E5)	Oscar Cossio, Juan Carlos Camacho, Yeison Palacio	Multiparámetro
Después de San Fernando (E6)	Rafael Meza, Jessica Álvarez	Multiparámetro
Aula Ambiental (E8)	Alejandra Cifuentes-Javier Ramírez-Nicolle Serna	IQ
Puente Acevedo (E9)	Luisa Márquez -Jesús David Valencia-Alejandro Rendón	Multiparámetro
Puente Machado (E11)	Daniel Rúa-Jaime Grecco, Natalia Pérez	Multiparámetro
Niquía (E21)	Luisa Ramírez -Yesica Franco	Multiparámetro
Ancón Norte (E12)	Juan Manuel Osorio-María Camila Ortiz	IQ
Parque de Las Aguas (E14)	Dairo Vanegas, Santiago Osorio	Multiparámetro
Papelsa (E16)	Vicente Hurtado-Alexis Quintero	Multiparámetro
Puente Gabino (E20)	John Fredy Carmona - Rosario Correa	Multiparámetro

Durante la campaña de monitoreo no se presentaron eventos de precipitación en la cuenca y tampoco se registraron lluvias previas al desarrollo de la campaña, acorde al reporte entregado por SIATA (Sistema de Alerta Temprana-SIATA, 2020) y a las condiciones evidenciadas en campo, obteniendo una clasificación de caudal Bajo para esta campaña, acorde al registro histórico de caudales aforados en la red, el cual se detalla en el informe ejecutivo de Calidad de Agua Superficial (Área Metropolitana del Valle de Aburrá-AMVA, 2020). Por otra parte, no se presentaron dificultades con los equipos o en el proceso de toma de muestra, por lo tanto, se realizaron las mediciones y se tomaron las muestras fisicoquímicas e hidrobiológicas en su totalidad con los procedimientos establecidos en el Manual de Monitoreo-del Convenio 643 de 2019.

Se destaca que aguas abajo de la estación Antes de San Fernando (E5) se estaban ejecutando obras de infraestructura (Foto 1), relacionadas con la construcción del puente Ayurá, las cuales no se estaban desarrollando en la última campaña de monitoreo y consisten en la instalación de bolsas rellenas de arena para desviar el agua del cauce y poder tener espacio para realizar la construcción de las columnas sobre la margen derecha del río que soportan el puente, mientras que sobre la margen izquierda se instalaron rocas sobre el cauce para permitir la salida de una descarga (Foto 2), no obstante, durante la jornada no se evidenció la ejecución de obras en estos puntos y sólo se observó la reducción del área mojada y ocupación de cauce.



Foto 1. Invasión del cauce obras puente Ayurá



Foto 2. Descarga margen izquierda aguas abajo E5

Aguas arriba de la estación Puente Machado (E11), sobre la margen izquierda, se observó descarga de aguas residuales, procedentes del bypass de la PTAR Agua Claras. Este vertimiento se registró entre las 9:00 y 17:00 horas (Foto 3).



Foto 3. Bypass PTAR Aguas Claras

En la Foto 4 se muestra parte del registro fotográfico tomado durante la campaña de monitoreo realizada el 19 de febrero de 2020, en las diferentes estaciones de muestreo, donde se evidencian las actividades de toma de muestra de agua y el monitoreo hidrobiológico. En la carpeta anexa al informe, se presenta el registro fotográfico completo de las diferentes estaciones de muestreo, tomado por el personal durante el desarrollo de actividades durante la campaña de monitoreo.



a. Reserva Alto de San Miguel (E0)



b. San Miguel (E1)



c. Primavera (E2)



d. Ancón Sur (E3)



e. Antes de San Fernando (E5)



f. Después de San Fernando (E6)



g. Aula Ambiental (E8)



h. Puente Acevedo (E9)



i. Puente Machado (E11)



j. Niquía (E21)



k. Ancón Norte (E12)



l. Parque de las Aguas (E14)



m. Papelsa (E16)



n. Puente Gabino (E20)

Foto 4. Registro fotográfico campaña de monitoreo 19 de febrero de 2020

Los valores de las variables de monitoreo temperatura ambiente (Tabla 3 y Figura 1), temperatura del agua (Tabla 4 y Figura 2), pH del agua (Tabla 5 y Figura 3), oxígeno disuelto (Tabla 6 y Figura 4), conductividad eléctrica (Tabla 7 y Figura 5), potencial de óxido reducción (Tabla 8 y Figura 6) y turbiedad del agua (Tabla 9 y Figura 7), medidas en campo cada hora en trece (13) estaciones de monitoreo localizadas sobre el río Aburrá-Medellín y un (1) sitio de monitoreo ubicado sobre el río Porce se presentan a continuación. Es importante anotar que en la estación de monitoreo

Reserva Alto de San Miguel, sólo se realizaron dos mediciones puntuales de las variables de campo y se tomó una muestra puntual a las 12:00 horas para el análisis de variables fisicoquímicas, de modo que estos resultados no se presentan en las figuras, adicionalmente, las variables de potencial de óxido reducción y turbiedad, sólo se miden en cuatro estaciones de monitoreo, de las cuales tres son automáticas (E1, E3 y E8) y la otra corresponde a E12, donde se cuenta con un equipo multiparamétrico IQ-Net.

Tabla 3. Temperatura ambiente medida cada hora en las estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020

PUNTO MONITOREO		HORAS DE MONITOREO - TEMPERATURA AMBIENTE (°C)													
ESTACION	CÓDIGO	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	
Reserva Alto de San Miguel	E0			14.00				24.00							
San Miguel	E1	12.00	13.00	17.00	21.00	22.00	25.00	25.00	27.00	26.00	25.00	24.00	22.00	22.00	
Primavera	E2	13.00	14.00	19.00	21.00	23.00	25.00	25.00	27.00	26.00	25.00	23.00	22.00	22.00	
Ancón Sur	E3	14.00	16.00	23.00	24.00	25.00	26.00	27.00	29.00	29.00	29.00	28.00	27.00	26.00	
Antes de San Fernando	E5	20.00	20.00	24.00	23.00	25.00	27.00	26.00	27.00	26.00	28.00	29.00	29.00	26.00	
Después de San Fernando	E6	21.00	22.00	22.00	22.00	25.00	27.00	29.00	29.00	28.00	28.00	29.00	29.00	28.00	
Aula Ambiental	E8	21.00	23.00	24.00	24.00	26.00	29.00	30.00	30.00	31.00	31.00	31.00	30.00	29.00	
Puente Acevedo	E9	20.00	21.00	23.00	25.00	28.00	31.00	33.00	33.00	34.00	33.00	33.00	32.00	30.00	
Puente Machado	E11	20.00	22.00	24.00	25.00	27.00	29.00	30.00	32.00	31.00	32.00	31.00	30.00	29.00	
Niquía	E21	21.00	20.00	24.00	25.00	27.00	29.00	31.00	33.00	33.00	33.00	32.00	30.00	28.00	
Ancón Norte	E12	19.00	18.00	22.00	25.00	26.00	29.00	30.00	33.00	33.00	32.00	33.00	32.00	30.00	
Parque de las Aguas	E14	18.00	18.00	24.00	25.00	30.00	30.00	31.00	32.00	31.00	32.00	30.00	30.00	29.00	
Papelsa	E16	18.00	20.00	21.00	26.00	28.00	30.00	31.00	31.00	32.00	32.00	32.00	30.00	29.00	
Puente Gabino	E20	21.00	21.00	22.00	24.00	30.00	31.00	32.00	33.00	34.00	34.00	33.00	32.00	30.00	

Tabla 4. Temperatura del agua medido cada hora en las estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020

PUNTO MONITOREO		HORAS DE MONITOREO - TEMPERATURA AGUA (°C)													
ESTACION	CÓDIGO	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	
Reserva Alto de San Miguel	E0			14.40				17.20							
San Miguel	E1	15.80	15.70	15.90	16.90	18.00	19.70	21.50	22.40	22.60	21.50	21.00	20.30	20.30	
Primavera	E2	15.00	14.80	16.50	17.60	19.40	21.60	21.60	21.70	22.40	22.40	21.50	20.90	20.50	
Ancón Sur	E3	17.50	17.40	17.50	18.10	18.70	19.60	20.60	27.00	23.20	23.30	23.60	23.20	22.30	
Antes de San Fernando	E5	19.00	18.70	19.50	20.30	20.90	23.60	25.30	25.20	25.10	25.90	24.80	24.60	24.30	
Después de San Fernando	E6	21.50	22.10	22.40	22.50	23.00	24.10	25.30	25.60	26.20	26.50	26.70	26.20	26.60	
Aula Ambiental	E8	21.10	21.10	21.20	21.50	22.30	23.30	24.40	24.70	25.30	25.40	25.20	25.50	24.60	
Puente Acevedo	E9	21.00	20.40	20.60	21.50	22.50	23.50	24.60	25.10	26.40	25.10	25.60	25.30	25.00	
Puente Machado	E11	20.70	20.70	22.00	24.00	23.40	25.00	27.00	27.00	27.20	27.50	26.80	25.80	25.40	
Niquía	E21	21.50	21.30	22.00	23.00	24.90	27.00	26.90	27.70	27.70	28.70	28.40	27.10	26.00	
Ancón Norte	E12	21.62	21.42	21.37	21.74	22.48	23.54	24.22	25.01	25.51	25.83	26.30	26.30	26.25	
Parque de las Aguas	E14	22.40	22.10	23.80	23.00	24.40	24.10	25.60	25.10	25.30	26.30	25.90	26.10	25.80	
Papelsa	E16	20.20	20.10	20.70	21.50	22.40	23.20	24.60	27.80	31.40	24.70	25.40	25.80	24.20	
Puente Gabino	E20	21.00	21.00	21.10	21.90	23.30	23.40	23.70	24.90	25.40	26.30	24.90	24.80	24.20	

Tabla 5. pH del agua medido cada hora en las estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020

PUNTO MONITOREO		HORAS DE MONITOREO - pH (U. de pH)													
ESTACION	CÓDIGO	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	
Reserva Alto de San Miguel	E0			6.79				6.72							
San Miguel	E1	7.59	7.59	7.62	7.68	7.72	7.71	7.72	7.69	7.71	7.68	7.68	7.64	7.64	
Primavera	E2	7.18	7.20	7.13	7.29	7.16	7.28	7.30	7.14	7.08	7.18	7.20	7.23	7.12	

Ancón Sur	E3	7.92	7.94	7.99	8.04	8.04	8.02	8.01	7.93	7.95	7.94	7.91	7.89	7.87
Antes de San Fernando	E5	7.66	7.56	7.66	7.67	7.65	7.65	7.71	7.61	7.60	7.64	7.53	7.58	7.48
Después de San Fernando	E6	7.54	7.52	7.52	7.35	7.39	7.44	7.44	7.44	7.47	7.24	7.50	7.47	7.49
Aula Ambiental	E8	7.87	7.90	7.93	7.82	7.81	7.78	7.40	7.71	7.66	7.71	7.68	7.74	7.75
Puente Acevedo	E9	7.66	7.65	7.68	7.60	7.55	7.66	7.50	7.53	7.51	7.51	7.61	7.48	7.48
Puente Machado	E11	7.64	7.65	7.33	7.33	7.44	7.45	7.43	7.51	7.40	7.47	7.45	7.44	7.45
Niquía	E21	7.57	7.57	7.58	7.27	7.35	7.09	6.94	7.06	7.10	7.08	7.14	7.23	7.33
Ancón Norte	E12	7.61	7.61	7.61	7.62	7.63	7.53	7.54	7.56	7.55	7.52	7.54	7.52	7.52
Parque de las Aguas	E14	7.44	7.44	7.46	7.45	7.40	7.44	7.43	7.45	7.46	7.49	7.26	7.30	7.49
Papelsa	E16	7.53	7.54	7.53	7.45	7.46	7.40	7.34	7.30	7.35	7.38	7.40	7.39	7.44
Puente Gabino	E20	7.50	7.49	7.48	7.46	7.44	7.49	7.46	7.51	7.46	7.44	7.48	7.48	7.50

Tabla 6. Oxígeno disuelto medido cada hora en las estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020

PUNTO MONITOREO		HORAS DE MONITOREO - OXÍGENO DISUELTUO (mg/l)												
ESTACION	CODIGO	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
Reserva Alto de San Miguel	E0			8.02				7.46						
San Miguel	E1	7.62	7.65	7.69	7.57	7.42	7.19	6.88	6.64	6.67	6.73	6.85	6.88	6.90
Primavera	E2	8.22	8.22	7.84	7.73	7.36	7.11	7.14	6.94	6.97	6.92	7.10	7.27	7.29
Ancón Sur	E3	7.34	7.05	7.22	7.18	6.99	6.90	6.73	5.62	5.86	6.12	5.91	5.33	5.56
Antes de San Fernando	E5	7.37	7.26	6.86	6.76	6.57	6.40	6.32	6.12	6.05	6.06	5.96	5.83	6.02
Después de San Fernando	E6	6.73	6.79	5.53	5.81	5.79	6.36	5.64	5.43	5.48	5.04	5.73	5.73	5.79
Aula Ambiental	E8	4.80	4.72	3.84	3.65	3.60	3.42	3.08	2.31	1.69	2.35	2.00	1.77	2.07
Puente Acevedo	E9	4.41	3.79	2.94	2.69	1.75	1.55	1.26	0.97	1.24	1.16	1.38	1.56	1.97
Puente Machado	E11	4.79	3.66	2.96	1.88	2.14	1.73	1.92	1.87	1.24	2.06	1.06	1.46	1.94
Niquía	E21	3.34	2.75	2.19	0.69	0.79	0.56	0.20	0.49	0.15	0.34	0.36	0.50	0.27
Ancón Norte	E12	2.85	2.80	2.75	1.83	1.38	0.51	0.39	0.26	0.05	0.05	0.02	0.05	0.04
Parque de las Aguas	E14	0.93	0.70	1.06	1.08	1.49	1.23	1.81	1.63	1.21	0.67	0.35	0.44	0.47
Papelsa	E16	7.16	7.22	7.06	6.96	6.86	6.73	6.56	6.34	5.76	6.63	6.62	6.42	6.49
Puente Gabino	E20	6.91	7.01	7.06	6.98	6.69	6.97	6.83	6.85	6.61	6.50	6.92	6.81	6.96

Tabla 7. Conductividad eléctrica medida cada hora en las estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020

PUNTO MONITOREO		HORAS DE MONITOREO - CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (µS/cm)												
ESTACION	CÓDIGO	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
Reserva Alto de San Miguel	E0			27.20				27.90						
San Miguel	E1	34.00	35.00	34.00	35.00	36.00	36.00	38.00	39.00	39.00	38.00	38.00	38.00	38.00
Primavera	E2	67.70	67.70	66.80	68.10	68.60	69.70	70.10	71.10	69.00	69.00	68.10	68.20	69.90
Ancón Sur	E3	124.00	174.00	147.00	148.00	163.00	170.00	199.00	198.00	195.00	192.00	206.00	219.00	233.00
Antes de San Fernando	E5	231.00	226.00	331.00	288.00	242.00	260.00	241.00	244.00	241.00	253.00	255.00	249.00	247.00
Después de San Fernando	E6	492.00	540.00	617.00	677.00	626.00	580.00	610.00	578.00	569.00	509.00	562.00	562.00	531.00
Aula Ambiental	E8	493.00	532.00	535.00	528.00	571.00	585.00	647.00	609.00	591.00	594.00	585.00	590.00	580.00
Puente Acevedo	E9	523.00	527.00	532.00	549.00	533.00	536.00	569.00	587.00	607.00	605.00	576.00	577.00	576.00
Puente Machado	E11	564.00	567.00	571.00	570.00	589.00	628.00	638.00	645.00	641.00	652.00	690.00	647.00	639.00
Niquía	E21	597.00	611.00	636.00	673.00	673.00	682.00	673.00	684.00	690.00	694.00	720.00	723.00	701.00
Ancón Norte	E12	587.00	586.00	573.00	595.00	632.00	679.00	696.00	710.00	727.00	721.00	740.00	745.00	750.00
Parque de las Aguas	E14	864.00	878.00	873.00	857.00	816.00	805.00	794.00	777.00	776.00	839.00	867.00	865.00	865.00
Papelsa	E16	324.00	314.00	298.00	282.00	268.00	271.00	265.00	260.00	266.00	262.00	279.00	296.00	295.00
Puente Gabino	E20	299.00	300.00	308.00	295.00	295.00	292.00	289.00	287.00	285.00	273.00	283.00	274.00	277.00

Tabla 8. Potencial redox medido cada hora en las estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020

PUNTO MONITOREO		HORAS DE MONITOREO - POTENCIAL REDOX (mV)												
ESTACION	CÓDIGO	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
San Miguel	E1	420.00	418.00	411.00	397.00	382.00	382.00	369.00	374.00	371.00	381.00	388.00	390.00	397.00
Ancón Sur	E3	315.00	299.00	343.00	312.00	302.00	323.00	340.00	321.00	418.00	426.00	433.00	434.00	441.00
Aula Ambiental	E8	45.00	37.00	27.00	31.00	36.00	33.00	20.00	-17.00	-28.00	-49.00	-57.00	-70.00	-84.00



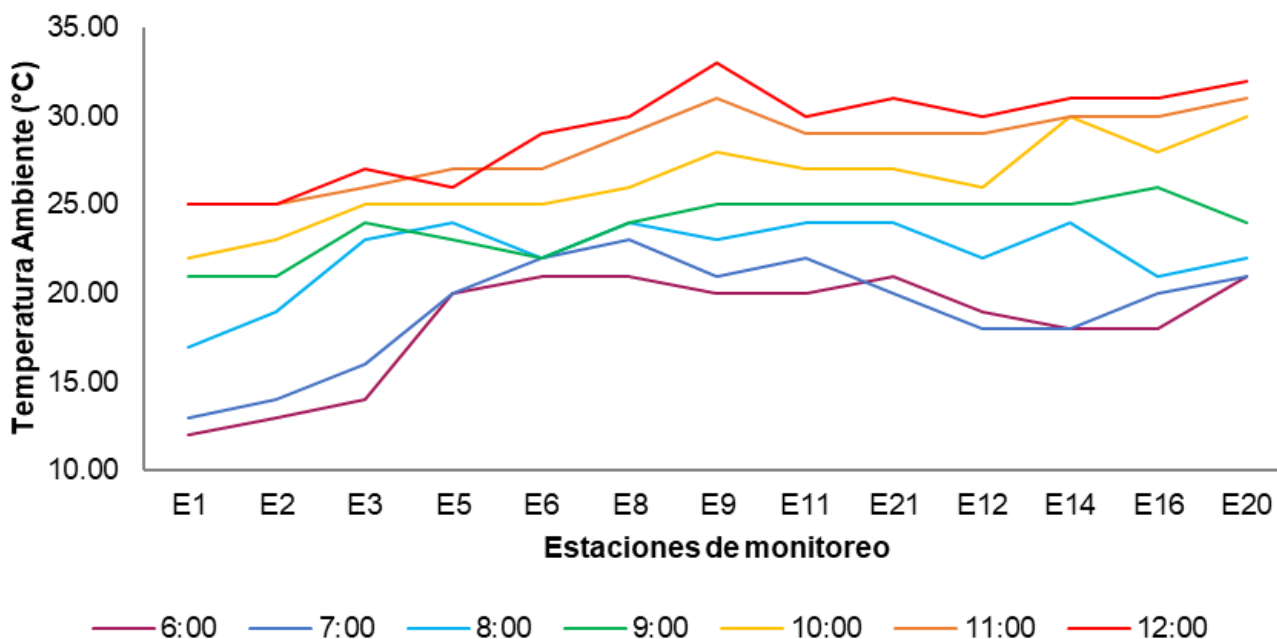
AUNAR ESFUERZOS PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HIDRICO SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO, EN EL MARCO DE LA OPERACIÓN DE LA RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA CUENTA HIDROGRÁFICA DEL RÍO ABURRÁ – MEDELLÍN



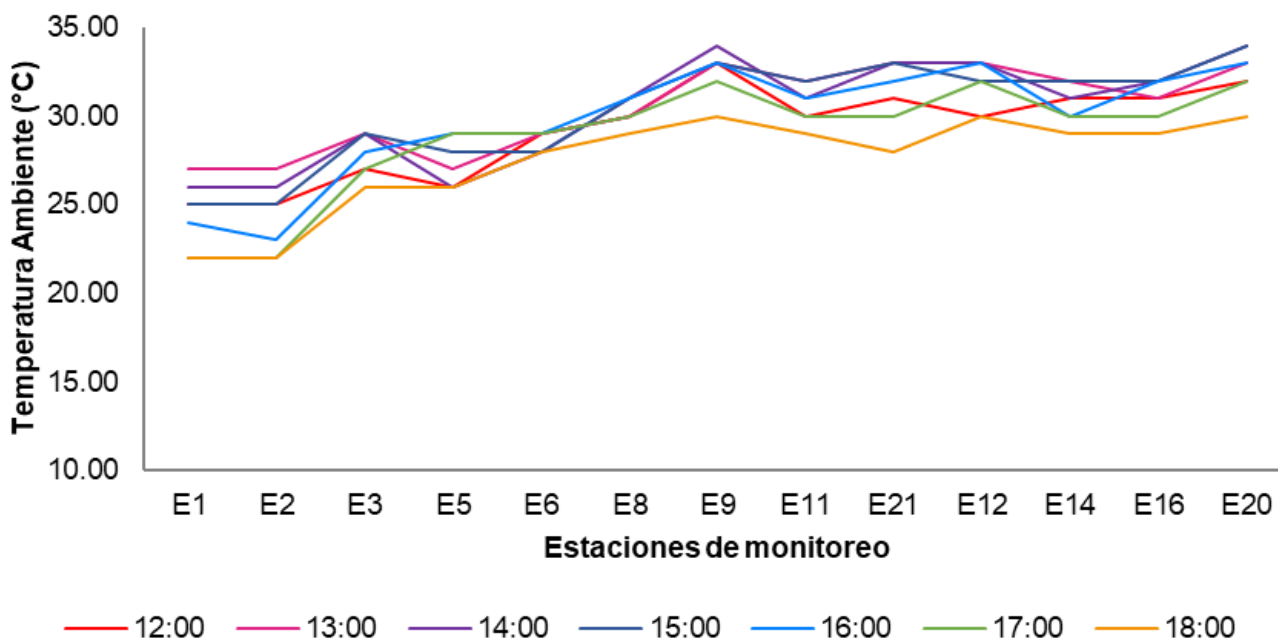
Ancón Norte	E12	26.02	37.49	45.25	50.50	55.12	35.83	-15.51	0.83	-8.52	-26.47	-39.29	-38.26	-36.34
-------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	------	-------	--------	--------	--------	--------

Tabla 9. Turbiedad medida cada hora en las estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020

PUNTO MONITOREO		HORAS DE MONITOREO - TURBIEDAD (NTU)												
ESTACION	CÓDIGO	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
San Miguel	E1	4.60	3.42	3.73	4.10	4.40	4.50	6.00	6.20	7.20	7.50	6.80	7.20	7.30
Ancón Sur	E3	26.20	28.20	30.30	34.30	33.10	34.40	34.50	68.00	43.00	43.00	38.00	34.00	27.40
Aula Ambiental	E8	33.60	48.00	76.00	80.00	86.00	85.00	93.00	100.00	83.00	78.00	82.00	71.00	65.00
Ancón Norte	E12	135.36	122.74	91.37	96.13	89.68	164.85	198.66	179.97	187.56	186.18	224.16	254.39	279.04

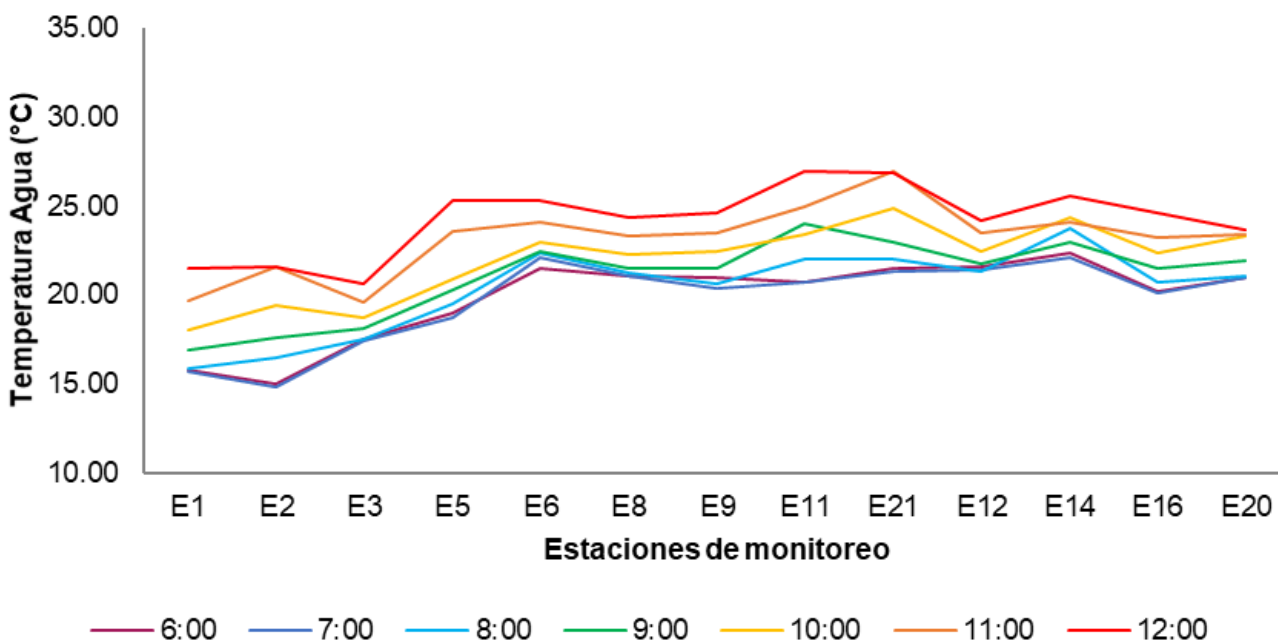


a. Temperatura ambiente entre las 6:00 y 12:00 horas

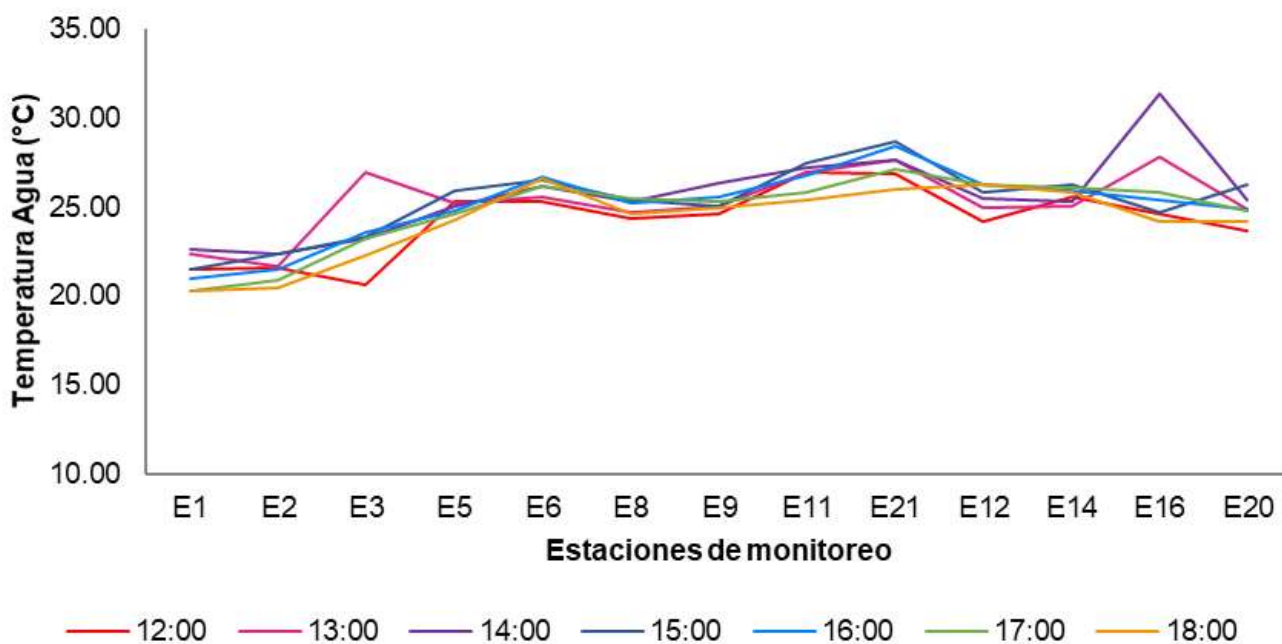


b. Temperatura ambiente entre las 12:00 y 18:00 horas

Figura 1. Temperatura ambiente estaciones río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020

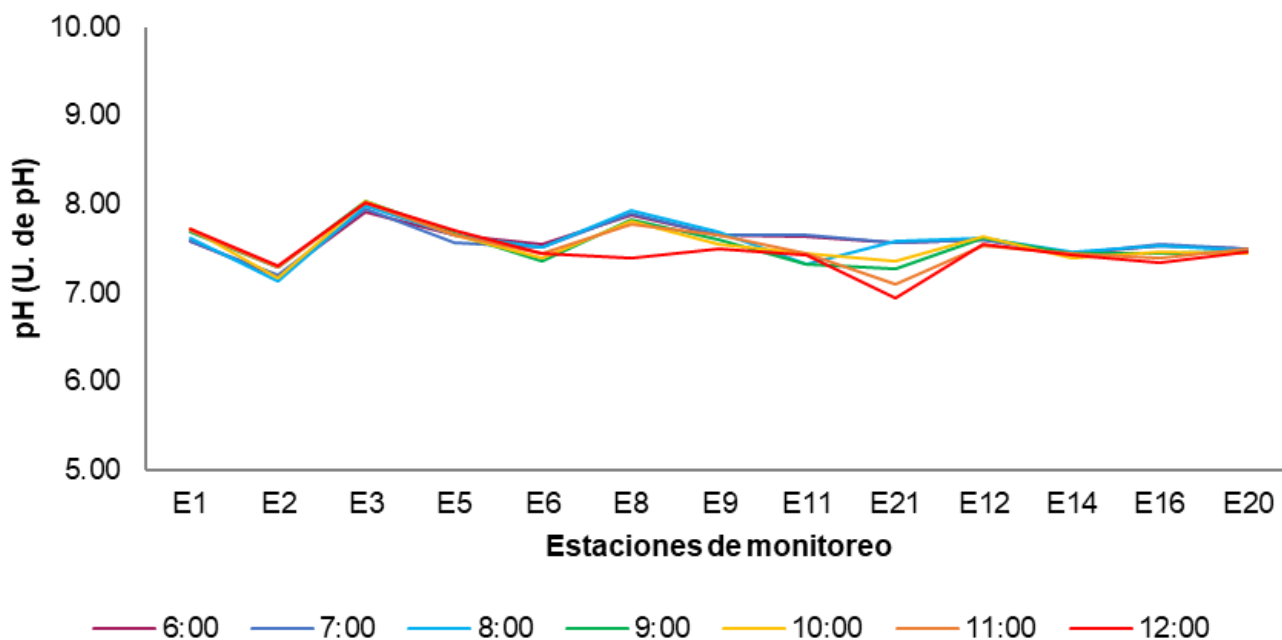


a. Temperatura del agua entre las 6:00 y 12:00 horas



b. Temperatura del agua entre las 12:00 y 18:00 horas

Figura 2. Temperatura del agua estaciones río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020



a. pH entre las 06:00 y 12:00 horas

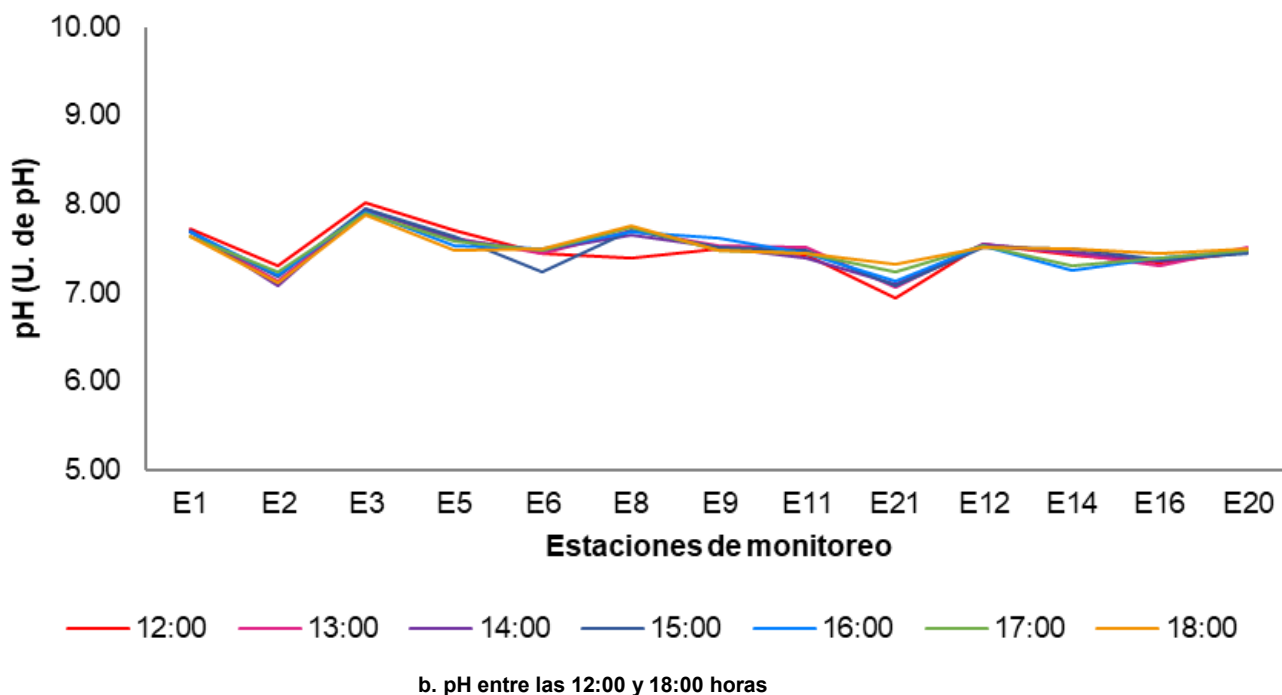
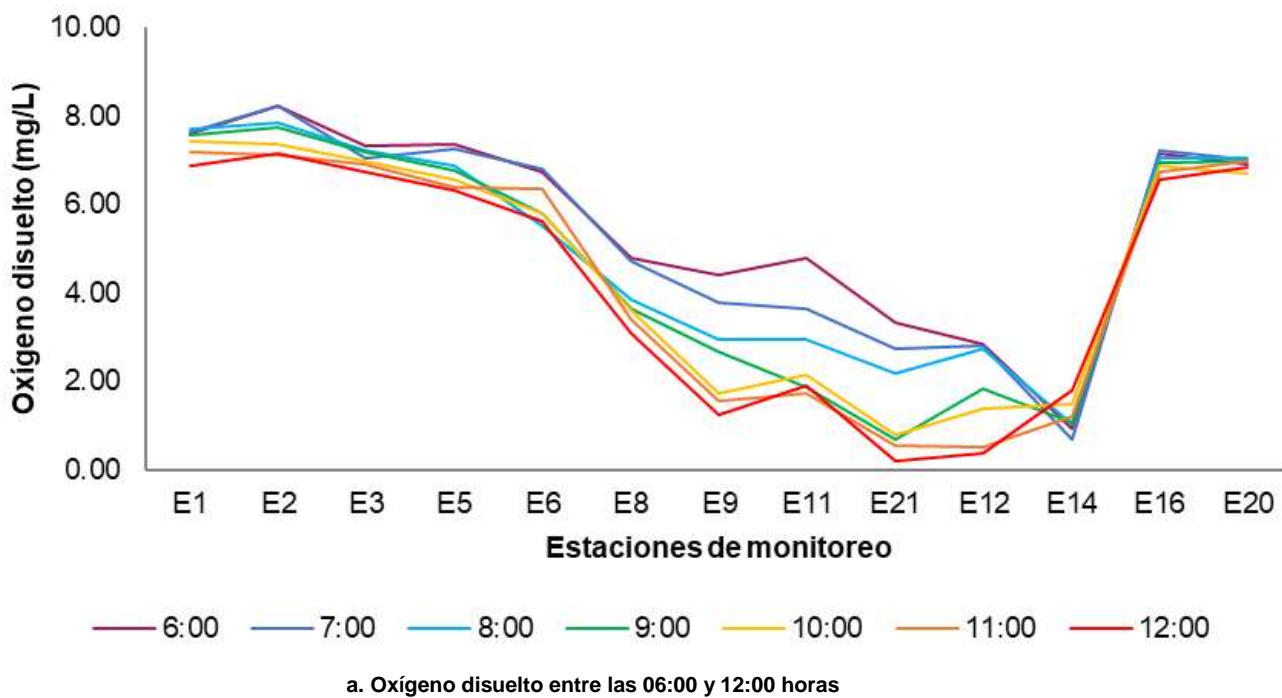
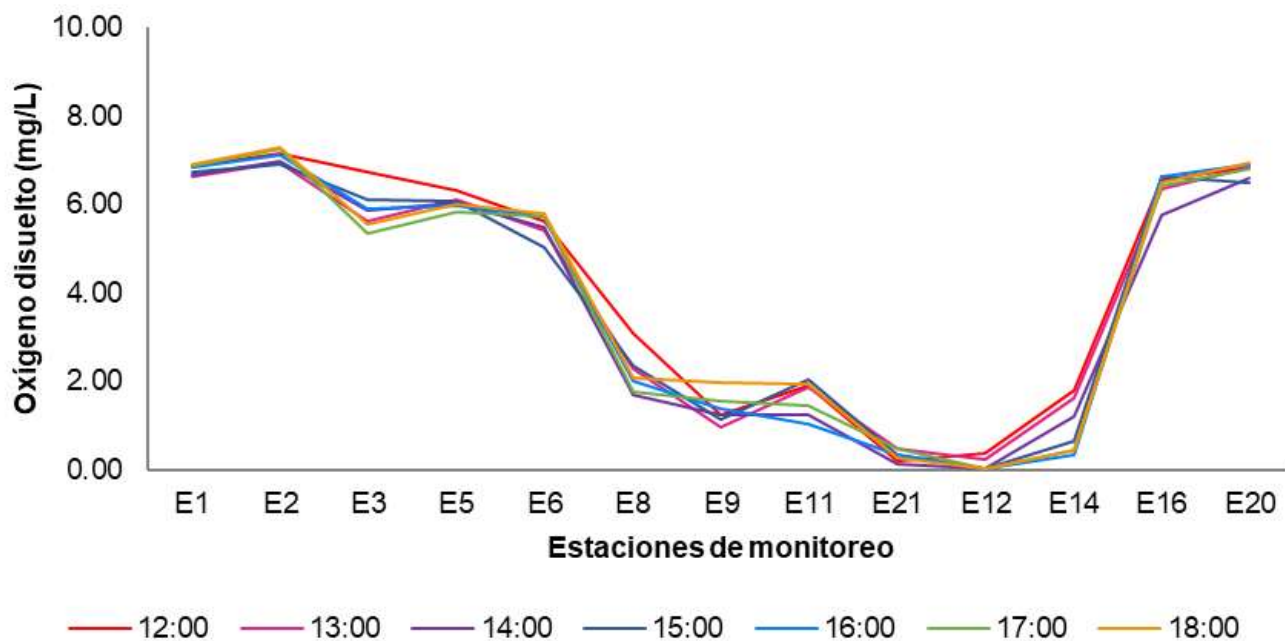


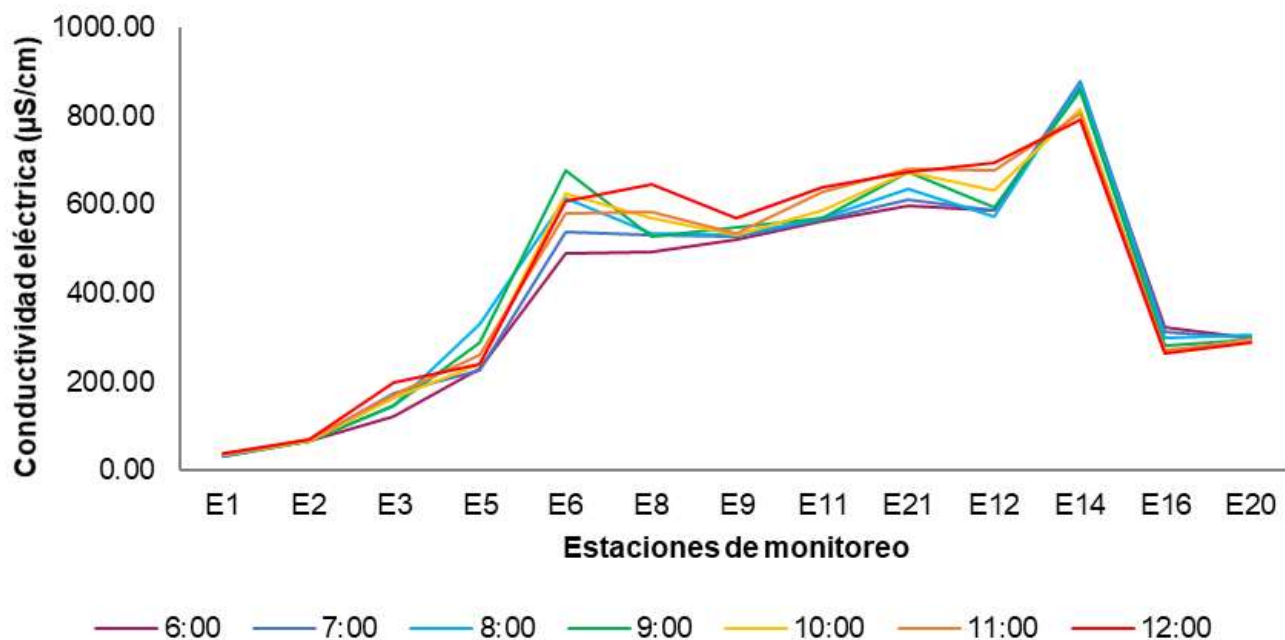
Figura 3. pH del agua estaciones río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020



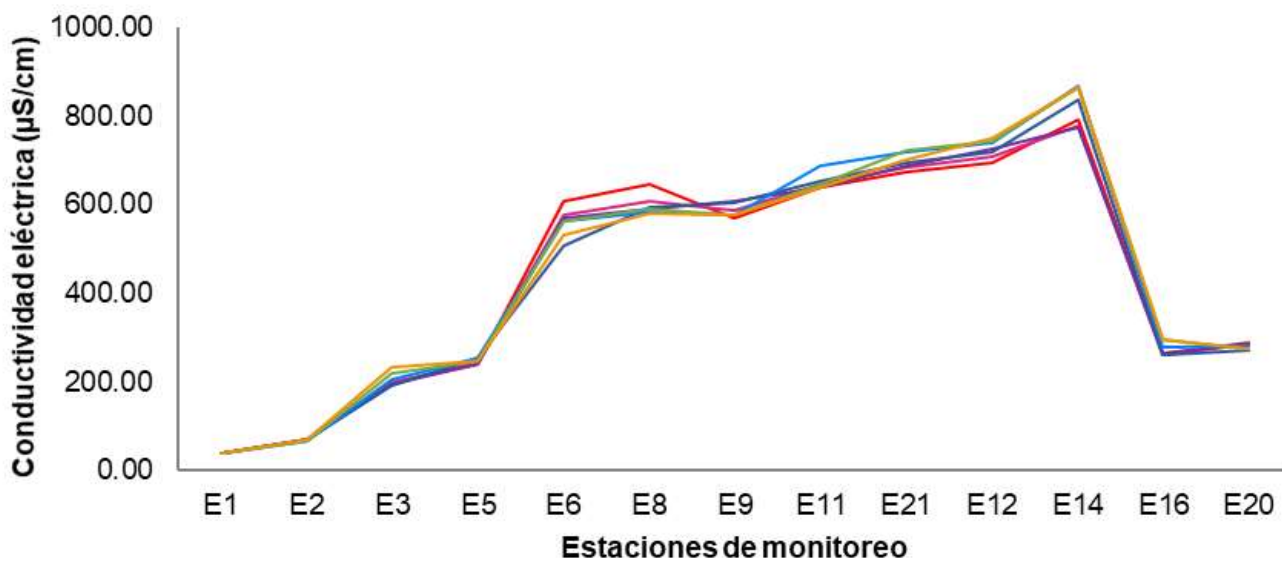


b. Oxígeno disuelto entre las 12:00 y 18:00 horas

Figura 4. Oxígeno disuelto estaciones río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020



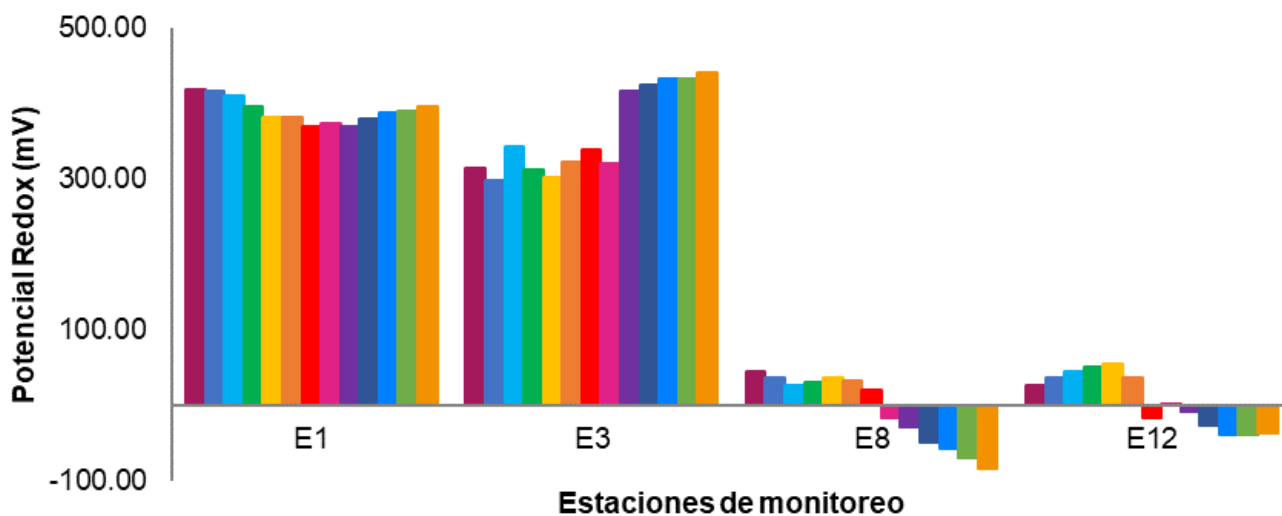
a. Conductividad eléctrica entre las 06:00 y 12:00 horas



— 12:00 — 13:00 — 14:00 — 15:00 — 16:00 — 17:00 — 18:00

b. Conductividad eléctrica entre las 12:00 y 18:00 horas

Figura 5. Conductividad eléctrica estaciones río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020



■ 6:00 ■ 7:00 ■ 8:00 ■ 9:00 ■ 10:00 ■ 11:00 ■ 12:00 ■ 13:00 ■ 14:00 ■ 15:00 ■ 16:00 ■ 17:00 ■ 18:00

Figura 6. Potencial redox estaciones río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020

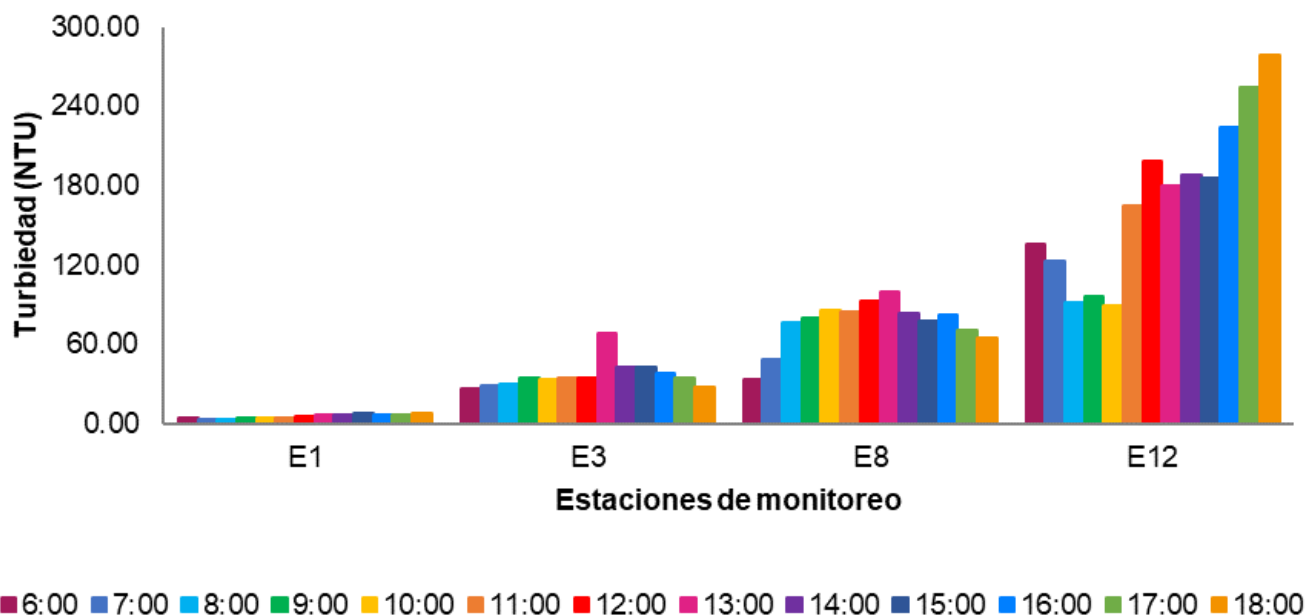


Figura 7. Turbiedad estaciones río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020

A continuación, se presentan los análisis de los resultados de las variables medidas en campo durante la campaña de monitoreo desarrollada el 19 de febrero, las cuales se tomaron acorde a los procedimientos del Manual de Monitoreo de Agua Superficial del proyecto RedRío, en 14 estaciones de muestreo, de las cuales 13 se ubican sobre el río Aburrá-Medellín y una sobre el río Porce. En los análisis se resaltan los principales cambios de las variables de campo tomadas en las diferentes estaciones de muestreo y se indicará si se presentó alguna novedad en las condiciones de la calidad del agua relacionada con dichos resultados.

Se destaca que en la estación Reserva Alto de San Miguel (E0) se realizaron mediciones a las 8:00 y 12:00 horas y se tomó una muestra puntual a las 12:00 horas para el análisis de variables fisicoquímicas, de modo que estos resultados no se presentan en las figuras. En cuanto a las variables potencial redox y turbiedad, es importante mencionar que estas solamente se midieron en las estaciones San Miguel (E1), Ancón Sur (E3) Aula Ambiental (E8) y Ancón Norte (E12), de las cuales E1, E3 y E8 son automáticas y tienen instalado un equipo multiparamétrico IQ-Net, que mide dichas variables.

En la estación Reserva Alto de San Miguel (E0) se registraron valores para la temperatura ambiente y del agua correspondientes a 14.00 y 14.40 °C respectivamente a las 8:00 horas, entretanto, los datos reportados para el pH del agua, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica fueron 6.79 U. de pH, 8.02 mg/L y 27.20 μ S/cm. En cuanto a los registros medidos a las 12:00 horas en este sitio de monitoreo, la temperatura ambiente y la del agua presentaron valores de 24.00 °C y 17.20 °C, respectivamente, mientras que el pH del agua, la concentración de oxígeno disuelto y la conductividad eléctrica correspondió a 6.72 U. de pH, 7.46 mg/L y 27.90 μ S/cm. El conjunto de datos registrado en E0 evidenciaron una baja variabilidad en el pH del agua, la



concentración de oxígeno disuelto y la conductividad eléctrica, asociado a la baja intervención antrópica en el área de influencia del sitio de monitoreo. El incremento observado en las variables temperatura ambiente y temperatura del agua se vinculó con el estado del tiempo seco y soleado reportado durante la campaña.

Para las estaciones de muestreo ubicadas aguas abajo de la estación E0, la temperatura ambiente presentó un comportamiento creciente entre las 6:00 y 14:00 horas (Tabla 3, Figura 1), donde los valores máximos se registraron entre las 12:00 y 14:00 horas. Al finalizar la campaña se presentó una disminución en la temperatura ambiente. El comportamiento observado para la temperatura ambiente se relacionó con el ciclo de radiación solar, asimismo, estuvo influenciado por el estado del tiempo soleado y despejado observado durante el desarrollo la campaña de monitoreo, la cual se realizó en condiciones hidroclimatológicas de época seca de en la cuenca y por tanto una clasificación de caudal bajo (SIATA, 2020). El valor mínimo para la temperatura ambiente (12.00 °C) se registró en la estación San Miguel (E1) a las 6:00 horas, mientras que el valor máximo correspondió a 34.00 °C y se reportó en las estaciones Puente Acevedo (E9) y Puente Gabino entre las 13:00 y 15:00 horas.

Se destaca que en las estaciones localizadas en la zona norte de la cuenca se registraron las mayores temperaturas ambiente, lo cual se relaciona con la altura sobre el nivel del mar a la cual se ubica la estación de monitoreo (Wallace y Hobbs, 2006). Es importante mencionar que los registros correspondientes a los sitios localizados en la zona urbana (entre las estaciones Ancón Sur-E3 y Niquía-E21) también pudieron verse influenciados por el fenómeno de islas urbanas, el cual se percibe en el Valle de Aburrá (Soto-Estrada, 2019). Por otro lado, se destaca que en los lugares donde se registraron menores valores para la temperatura ambiente se tiene presencia de boscosidad, o superficies verdes (pastizales, bosque, rastrojo, entre otros), como es el caso de San Miguel (E1) y Primavera (E2), puesto que estos facilitan la disminución de temperatura debido a los procesos asociados a la vegetación como la evapotranspiración.

En cuanto a la temperatura del agua (Tabla 4, Figura 2), se destaca que esta variable presentó una tendencia similar a la temperatura ambiente. Lo anterior se relaciona con la radiación solar incidente sobre la corriente, la cual se asocia tanto con el ciclo de radiación solar como con la capacidad calórica del agua. Los menores registros se reportaron en las estaciones San Miguel (E1) y Primavera (E2), donde el valor mínimo (14.80 °C) se presentó en E2 a las 7:00 horas. Entretanto, los mayores registros para esta variable correspondieron a las estaciones Puente Machado (E11) y Niquía (E21), el valor máximo reportado fue de 28.70 °C a las 15:00 horas en E21. Se destaca que en la estación Ancón Sur (E3) a las 13:00 horas se registró una temperatura del agua correspondiente a 27.00 °C, la cual posiblemente se vinculó a un vertimiento de origen industrial, no obstante, no se observó cambio en la coloración del agua, que evidenciara el paso de este.

El pH del agua presentó un comportamiento uniforme en las estaciones localizadas sobre el río Aburrá-Medellín y Porce (Tabla 5, Figura 3). El valor mínimo (6.94 U. de pH) se registró en la estación Niquía (E21) a las 12:00 horas, mientras que el valor máximo correspondió a 8.04 U. de pH y se reportó en la estación Ancón Sur (E3) a las 9:00 y 10:00 horas. La baja variabilidad observada en el pH del agua puede asociarse a los vertimientos de agua doméstica e industrial realizados sobre quebradas afluentes y el río Aburrá-Medellín, sumado a la capacidad



amortiguadora de la corriente para neutralizar bases y ácidos provenientes de dichos vertimientos.

El oxígeno disuelto presentó una tendencia decreciente entre las estaciones San Miguel (E1) y Parque de las Aguas (E14), entretanto, en las estaciones Papelsa (E16) y Puente Gabino (E20) se incrementó su concentración (Tabla 6, Figura 4). Los mayores cambios en esta variable a lo largo del río se presentaron en los tramos E6-E8 y E14-E16. Durante la campaña se registraron valores que oscilaron entre 0.02 y 8.22 mg/L, que corresponden al mínimo y máximo reportados en las estaciones Ancón Norte (E12) a las 16:00 horas y Primavera (E2) a las 6:00 y 7:00 horas respectivamente.

En las estaciones San Miguel (E1) y Primavera (E2) se presentaron las mayores concentraciones de oxígeno disuelto, las cuales fluctuaron entre 6.61 mg/L (13:00 horas en E1) y 8.22 mg/L (6:00 horas en E2). El conjunto de datos registrado para esta variable en E1 y E2 se vincula a varios factores entre los que se destacan la altura sobre el nivel del mar a la cual se ubican los sitios de monitoreo, que incide en la solubilidad de este gas en el agua y por tanto en los valores de su concentración, adicionalmente, la poca carga contaminante aportada a la corriente, sujeta a oxidarse y demandar oxígeno disuelto de la columna de agua, debido a la baja intervención antrópica en el área de influencia de las estaciones y las condiciones hidráulicas del cauce que favorecen el intercambio gaseoso entre el cuerpo de agua y la atmósfera.

El comportamiento observado para el oxígeno disuelto entre las estaciones Ancón Sur (E3) y Parque de las Aguas (E14) se vinculó a la demanda de este, para degradar la materia orgánica e inorgánica parcialmente oxidada aportada a través de vertimientos de aguas residuales realizados al río, provenientes principalmente de la zona urbana de la cuenca. Entre los principales vertimientos directos se destacan la Descarga de la PTAR San Fernando (D1) entre E5 y E6, la Descarga de la PTAR Aguas Claras (D6) entre E11 y E21 y el bypass asociado a esta última, ubicado aguas arriba de E11; además de los vertimientos realizados por industrias en los municipios de Caldas, La Estrella, Sabaneta, Medellín, Bello, Copacabana y Girardota; sumado a las cargas contaminantes aportadas por quebradas como La Mina (Q25), La Hueso (Q9), Santa Elena (Q10), La Rosa (Q12), La García (E10), entre otras.

Se destaca que en el tramo comprendido entre E6 y E8 se registró la disminución del oxígeno disuelto más drástica en el río, de acuerdo con las concentraciones medidas en la estación Aula Ambiental (E8) que oscilaron entre 1.69 mg/L (8:00 horas) y 3.96 mg/L (17:00 horas). Lo anterior, se relaciona con las sustancias susceptibles a oxidarse aportadas por quebradas como Altavista (Q8), La Picacha (Q20), La Hueso (Q9), La Iguañá (Q11) y Santa Elena (Q10), las cuales generan una demanda de oxígeno de la columna de agua para la oxidación química y biológica para su degradación, generado así una disminución en la concentración de oxígeno disuelto en este tramo del río. Se resalta también que en este tramo se localizan saltos hidráulicos que favorecen el aumento en la concentración de oxígeno disuelto en la corriente, no obstante, la carga contaminante sujeta a oxidarse aportada al río entre E6 y E8 es tan alta, que no alcanza a recuperar las concentraciones medidas aguas arriba.

Se resalta también que en el tramo entre las estaciones E8-E12 durante la campaña de monitoreo, se presentaron los valores más críticos de oxígeno disuelto en el río predominando concentraciones hipóxicas (inferiores a 2.00 mg/L) durante la jornada de monitoreo, los cuales



fluctuaron entre 0.02 mg/L (reportado en E12 a las 16:00 horas) y 4.80 mg/L (reportado en E8 a las 6:00 horas). Este comportamiento se relaciona con el aumento en la temperatura del agua, condición que genera una reducción en la solubilidad de la variable en la columna de agua, como también con un aumento en la carga contaminante aportada al río, la cual proviene del centro de la cuenca en la cual se ubican los municipios más urbanizados (Medellín y Bello), además de la carga contaminante acumulada proveniente de los municipios localizados en el sur (Itagüí, Caldas, La Estrella, Sabaneta, Envigado) y parte del norte de la cuenca (Copacabana y Girardota). En el tramo comprendido entre las estaciones E12 y E14, es importante resaltar el ascenso en las concentraciones de oxígeno disuelto respecto a las estaciones ubicadas aguas arriba, asociado a la alta turbulencia generada por un cambio en las condiciones hidráulicas, debidas al incremento en la pendiente y presencia de rocas que favorecen el intercambio gaseoso entre la corriente y la atmósfera.

En el tramo Parque de las Aguas (E14) y Papelsa (E16) se registró un incremento considerable en la concentración de oxígeno disuelto en el río, que osciló entre 4.55 mg/L (14:00 horas) y 6.52 mg/L (7:00 horas). Lo anterior, debido principalmente al ingreso de aguas procedentes de la quebrada Ovejas (Q30) y la descarga de la central hidroeléctrica La Tasajera, las cuales presentan altas concentraciones de oxígeno, que contribuyen al balance de oxígeno disuelto en el tramo, generando además dilución de la masa de agua, debido a que la primera presenta una baja intervención antrópica y la segunda es el efluente de aguas turbinadas para la generación de energía. La concentración de oxígeno disuelto en la estación Puente Gabino (E20) fluctuó entre 6.50 mg/L (15:00 horas) y 7.06 mg/L (8:00 horas), vinculada a la confluencia entre el río Aburrá-Medellín y río Grande, sumado a quebradas afluentes de buena calidad ubicadas en la zona, donde la densidad poblacional es baja y a la alta turbulencia presentada en algunos tramos del río en esta zona, que contribuye a la reaireación de la columna de agua.

Teniendo en cuenta las variaciones temporales del oxígeno disuelto durante la campaña de monitoreo, el conjunto de datos registrado para el oxígeno disuelto presentó una mayor dispersión en horas de la mañana respecto a la tarde, lo cual es una respuesta a la dinámica antrópica en la cuenca. En el intervalo de tiempo comprendido entre las 12:00 y 18:00 horas se presentaron menores concentraciones de oxígeno disuelto en las estaciones monitoreadas, periodo en el cual también se reportaron mayores valores para la conductividad eléctrica, comportamiento que evidencia que en las horas de la tarde, se presentó un mayor transporte de carga contaminante en el río, generando una mayor demanda de oxígeno disuelto de la columna de agua para la oxidación de la materia orgánica e inorgánica, reflejada en la reducción del oxígeno disuelto.

Las mayores concentraciones de oxígeno disuelto se registraron entre las 6:00 y 7:00 horas en la mayoría de las estaciones de monitoreo, asociado al transporte de una menor carga contaminante sujeta a oxidarse, puesto que en este intervalo de tiempo también se reportaron los menores valores para la conductividad eléctrica, que indica una menor recepción de vertimientos de aguas residuales sobre el río Aburrá-Medellín. Se destaca que en la estación Parque de las Aguas (E14) entre las 6:00 y 7:00 horas se reportaron concentraciones de oxígeno disuelto de 0.93 y 0.70 mg/L, respectivamente, las cuales se caracterizaron por estar entre los menores registros para este sitio durante la jornada. Lo anterior estuvo acompañado de un cambio de color, de café claro a oscuro en la corriente, el cual se pudo asociar a vertimientos de aguas residuales industriales descargados cerca de la zona de muestreo, o al transporte de una masa de agua

afectada por vertimientos producidos en horas de la madrugada aguas arriba, puesto que en este intervalo la conductividad eléctrica incrementó de 864.00 a 878.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

El conjunto de datos mostrado en la Tabla 7 y Figura 5 corresponde a las mediciones de conductividad eléctrica registradas durante la campaña de monitoreo. En términos generales, la conductividad eléctrica aumentó entre las estaciones Reserva Alto de San Miguel (E0) y Parque de las Aguas (E14), mientras que en las estaciones Papelsa (E16) y Puente Gabino (E20) se observó un comportamiento estable con valores más bajos que los medidos aguas arriba. La conductividad eléctrica en las estaciones monitoreadas osciló entre 34.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (reportado a las 6:00 horas en E1) y 878.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (reportado a las 7:00 horas en E14). El incremento más pronunciado en la conductividad eléctrica durante la campaña de muestreo se registró en el tramo E5-E6, mientras que entre E14 y E16 se presentó una disminución drástica en esta variable.

Los menores valores para la conductividad eléctrica se registraron en el tramo San Miguel (E1) y Primavera (E2), donde fluctuó entre 34.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (reportado a las 6:00 horas en E1) y 71.10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (reportado a las 13:00 horas en E2). Lo anterior, se vincula al material disuelto proveniente principalmente de las aguas residuales domésticas aportadas al río, procedente de las viviendas ubicadas en la zona y a afluentes como la quebrada La Mina y La Salada, los cuales además de viviendas ubicadas en las márgenes de las subcuencas, se les suman predios de uso industrial.

Posteriormente, entre las estaciones Ancón Sur (E3) y Parque de las Aguas (E14), los valores de conductividad se incrementaron considerablemente y fluctuaron entre 124.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (reportado a las 6:00 horas en E3) y 878.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (reportado a las 7:00 horas en E14), asociado a la influencia de la zona urbana de la cuenca. Lo anterior, se debe a la fracción disuelta aportada por los vertimientos de aguas residuales domésticas y no domésticas realizadas sobre el río, como también a los tributarios sobre los cuales también se descargan aguas residuales. De acuerdo con los resultados obtenidos en la campaña de quebradas realizada en el marco del Convenio 643 de 2019 el 29 de agosto de 2019, las quebradas con mayores valores en la conductividad eléctrica que tributan en este tramo son La Mina (Q25), Altavista (Q8), La Picacha (Q20), La Hueso (Q9), La Iguañá (Q11), Santa Elena (Q10), La Rosa (Q12), La Madera (Q14) y La García (E10).

Se destaca en el tramo E3-E14 el efecto de la Descarga de la PTAR San Fernando (D1), la cual generó un fuerte incremento en la conductividad eléctrica entre E5 y E6, debido a que en la planta no se implementan procesos específicos para la remoción de sustancias disueltas, de modo que el efluente presenta altos valores en la conductividad eléctrica como se ha reportado en campañas de quebradas afluentes previas, como es el caso de la jornada de monitoreo realizada el 28 de agosto de 2019, presentada en el informe final de calidad de agua superficial en el marco del Convenio 643 de 2019 antes de Adición, en la cual se registró una conductividad eléctrica promedio en D1 correspondiente a 1114.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Este comportamiento también se observó entre E11-E21, en el cual también se localiza la Descarga de la PTAR Aguas Claras (D6) y el bypass de la misma, sin embargo, el cambio entre estaciones de esta variable no fue tan significativo, debido a que el río a esta altura presenta valores de conductividad eléctrica elevados. Según los registros tomados durante la campaña de quebradas y vertimientos principales realizada el 29 de agosto de 2019 en D6, la conductividad eléctrica promedio fue de 1252.91 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se resalta también que en la estación Después de San Fernando (E6) se



registraron las mayores fluctuaciones en la conductividad eléctrica durante la campaña de monitoreo, con valores entre 497.00 y 677.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$, entre 06:00 y 09:00 horas.

En el tramo Parque de las Aguas (E14) y Papelsa (E16) se presentó una importante disminución en la conductividad eléctrica en el río, que osciló en esta última estación entre 260.00 (13:00 horas) y 324.00 (06:00 horas) respectivamente. La disminución observada de esta variable en este tramo se asocia principalmente a la dilución de sustancias iónicas transportadas por la corriente, debido a los aportes de agua procedentes principalmente de la descarga de la central hidroeléctrica la Tasajera, además de la quebrada Ovejas (Q30); debido a que los resultados obtenidos en los aforos realizados por SIATA para la presente campaña de monitoreo, los caudales obtenidos en la descarga de la central hidroeléctrica la Tasajera y E14 correspondieron a 16.32 y 18.61 m^3/s respectivamente. La conductividad eléctrica en la estación Puente Gabino (E20) presentó bajas variaciones a lo largo de la campaña de muestreo y osciló entre 273.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (15:00 horas) y 308.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (8:00 horas), asociado principalmente a que en la zona la intervención antrópica es baja y el río Aburrá-Medellín, además de presentar en este último tramo un cauce natural, la confluencia de quebradas afluentes de buena calidad y río Grande, ayudan a diluir la carga contaminante transportada por la corriente y a estabilizar el comportamiento de las diferentes variables.

El potencial redox presentó un comportamiento decreciente entre las estaciones San Miguel (E1) y Ancón Norte (E12) que osciló entre -84.00 y 441.00 mV, donde el valor mínimo se observó en Aula Ambiental a las 18:00 horas, mientras que el valor máximo se registró en Ancón Sur (E3) a las 18:00 horas (Tabla 8, Figura 6). El potencial redox en las estaciones San Miguel (E1) y Ancón Sur (E3) fluctuó entre 299.00 y 441.00 mV en el transcurso de la jornada de monitoreo. Lo anterior indica que en este tramo se presentó un ambiente oxidante, asociado a la concentración de oxígeno disuelto en el río, el cual fluctuó entre 5.33 mg/L (E3) y 7.69 mg/L (E1). Se destaca además que en E3 se presentó un aumento en el potencial de óxido reducción después de las 14:00 horas, lo que puede estar asociado con vertimientos de origen industrial que tienen sustancias oxidantes.

En cuanto a las estaciones Aula Ambiental (E8) y Ancón Norte (E12), se destaca que en horas de la mañana se registró un ambiente oxidante, donde el potencial redox fluctuó entre 20.00 mV (12:00 horas) y 45.00 mV (6:00 horas) en E8 y entre -15.51 mV (12:00 horas) y 55.12 mV (10:00 horas) en E12. Posterior a las 12:00 horas se presentó un ambiente reductor hasta el final de la jornada, donde el conjunto de datos registrado para el potencial redox osciló entre -84.00 mV (18:00 horas) y -17.00 mV (13:00 horas) en E8 y entre -39.29 mV (16:00 horas) y 0.83 mV (13:00 horas) en E12. El comportamiento observado para el potencial redox en el transcurso de la jornada para E8 y E12 se puede asociar a la disminución paulatina de la concentración de oxígeno disuelto en la corriente, resultado de la acumulación de contaminantes aportados al río y el oxígeno demandado para degradarlos.

La turbiedad osciló entre 3.42 y 279.04 NTU, registrados en las estaciones E1 a las 7:00 horas y E12 a las 18:00 horas respectivamente. De manera general, los valores de turbiedad aumentaron entre E1 y E12 (Tabla 9 y Figura 7). En la estación San Miguel (E1) se presentaron los menores registros para esta variable, los valores oscilaron entre 3.42 y 7.50 NTU, con el mínimo a las 07:00 horas y el máximo a las 15:00 horas. Dichos valores se asocian a la baja intervención antrópica en la zona de influencia de E1, donde los sólidos suspendidos provienen de la erosión

natural del cauce como de la fracción suspendida asociada a las aguas residuales vertidas sobre la corriente, provenientes de las viviendas localizadas en la vereda La Clara.

Entretanto, la turbiedad en la estación Ancón Sur (E3) aumentó respecto a E1 y osciló entre 26.20 y 68.00 NTU, donde el valor mínimo se registró a las 6:00 horas y el máximo a las 13:00 horas. Este incremento se puede relacionar con la fracción suspendida aportada por las aguas residuales de origen doméstico e industrial provenientes de los municipios de Caldas, La Estrella y Sabaneta; igualmente, a la confluencia de las quebradas La Miel(Q2), La Valeria(Q1) y La Grande(Q5).

En la estación Aula Ambiental (E8), la turbiedad presentó valores entre 33.60 y 100.00 NTU; que se midieron a las 06:00 y 13:00 horas respectivamente. Los valores registrados en E8 se asociaron a los vertimientos de aguas residuales de origen doméstico e industrial, igualmente a la descarga de las quebradas Altavista (Q8), La Picacha (Q20), La Hueso (Q9), La Iguañá (Q11) y Santa Elena (Q10), entre otras. Se resaltan Q8, Q20 y Q9 entre las demás por el alto contenido de sólidos suspendidos provenientes de la industria minera, que se realiza en la parte alta de estas subcuencas.

Finalmente, la estación Ancón Norte (E12) registró valores superiores a 80.00 UNT, donde el valor mínimo correspondió a 89.68 UNT y se observó a las 10:00 horas, mientras que el máximo fue de 279.04 NTU medido a las 18:00 horas. Esto se debe al aporte de sólidos suspendidos y procesos erosivos en las márgenes del río, junto a la acumulación de las aguas residuales tratadas y sin tratar provenientes de los diferentes municipios ubicados aguas arriba de la estación de muestreo (Copacabana, Bello, Medellín, Itagüí, Envigado, Sabaneta, La Estrella y Caldas), sumado a la influencia de quebradas afluentes como El Hato (Q14) y La García (E10), en las cuales se realizan actividades de minería, relacionadas con materiales para la construcción, en la parte alta de las subcuencas.

7.1.2 Resultados y análisis de las variables fisicoquímicas medidas en la campaña de monitoreo de muestra completa el 19 de febrero de 2020

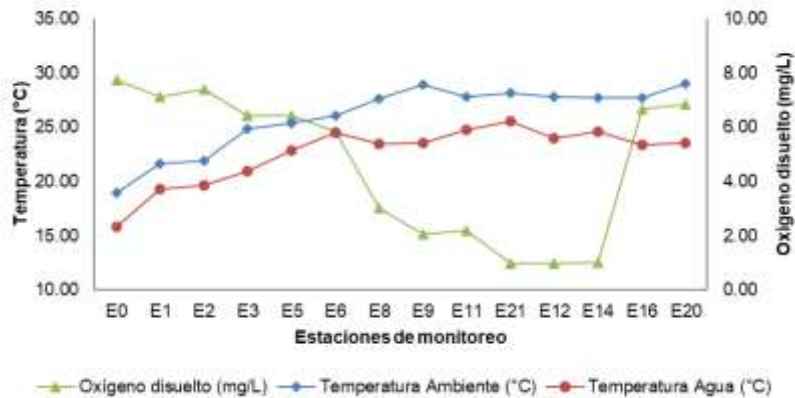
El conjunto de datos mostrado en la Tabla 10 y las gráficas con los perfiles presentados en la Figura 8, corresponde a los resultados obtenidos para las variables fisicoquímicas evaluadas durante la campaña de monitoreo de tipo completa, realizada el 19 de febrero de 2020 en trece (13) estaciones sobre el río Aburrá-Medellín y una (1) en el río Porce. Se destaca que la información presentada para las variables medidas en campo (temperatura ambiente, temperatura del agua, pH de agua, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, potencial redox y turbiedad), corresponde a los valores promedio determinados entre las 6:00 y 18:00 horas. Entretanto, los datos medidos para las variables fisicoquímicas restantes se tomaron a partir de muestras compuestas y puntuales (grasas y aceites y coliformes totales y *E. coli*). Los caudales aforados por SIATA en durante esta campaña son presentados en la Tabla 10 (SIATA, 2020), fueron procesados teniendo en cuenta el registro histórico de caudales aforados en la red y se obtuvo una clasificación de caudal Bajo; este procesamiento se detalla en el informe ejecutivo de Calidad de Agua Superficial (AMVA, 2020).

Tabla 10. Resultados variables de campo promedio y fisicoquímicas determinadas en laboratorio, tomadas en el río Aburrá – Medellín en la campaña de muestra completa realizada el 19 de febrero de 2020

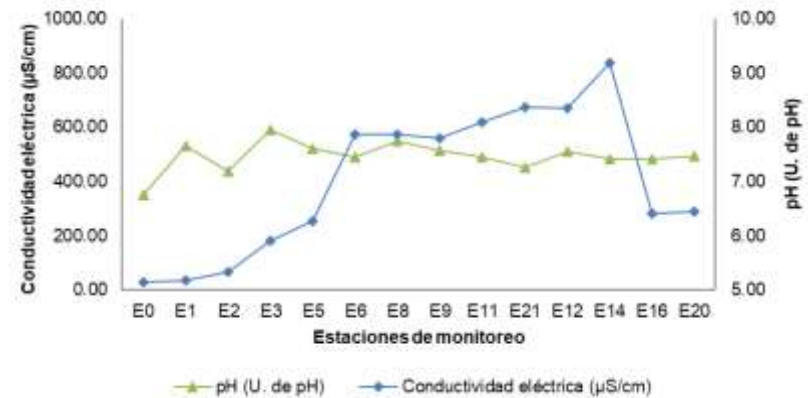
VARIABLE	ESTACIONES DE MUESTREO													
	RESERVA ALTO DE SAN MIGUEL	SAN MIGUEL	PRIMAVERA	ANCÓN SUR	ANTES DE SAN FERNANDO	DESPUÉS DE SAN FERNANDO	AULA AMBIENTAL	PUENTE ACEVEDO	PUENTE MACHADO	NIQUIÁ	ANCÓN NORTE	PARQUE DE LAS AGUAS	PAPELSA	PUENTE GABINO
	E0	E1	E2	E3	E5	E6	E8	E9	E11	E21	E12	E14	E16	E20
Temperatura Ambiente (°C)	19.00	21.62	21.92	24.85	25.39	26.08	27.62	28.92	27.85	28.15	27.85	27.69	27.69	29.00
Temperatura Agua (°C)	15.80	19.35	19.69	20.92	22.86	24.52	23.51	23.59	24.81	25.55	23.97	24.61	23.36	23.53
pH (U. de pH)	6.76	7.67	7.19	7.96	7.62	7.45	7.75	7.57	7.46	7.26	7.57	7.42	7.42	7.48
Oxígeno disuelto (mg/L)	7.74	7.13	7.39	6.45	6.43	5.84	3.02	2.05	2.21	0.97	1.00	1.01	6.68	6.85
Conductividad eléctrica (µS/cm)	27.55	36.77	68.77	182.15	254.46	573.31	572.31	561.31	618.54	673.62	672.39	836.62	283.08	289.00
Potencial Redox (mV)		390.77		362.08			-5.85				6.67			
Turbiedad (NTU)		5.61		36.49			75.43				170.01			
Color verdadero (UPC)	<10.00	<10.00	<10.00	17.28	22.28	52.46	102.03	47.29	49.48	74.72	87.68	74.24	61.31	55.95
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	<5.00	<5.00	<5.00	30.00	36.00	31.00	107.00	107.00	342.00	328.00	242.00	196.00	79.00	104.00
Sólidos totales (mg/L)	30.00	48.00	68.00	159.00	197.00	358.00	498.00	417.00	637.00	651.00	576.00	584.00	230.00	212.00
Sólidos volátiles totales (mg/L)	<25.00	29.00	<25.00	50.00	66.00	83.00	144.00	122.00	165.00	106.00	138.00	114.00	30.00	41.00
Sólidos disueltos totales (mg/L)	25.00	43.00	57.00	129.00	161.00	327.00	391.00	310.00	295.00	323.00	334.00	388.00	151.00	108.00
Sólidos fijos totales (mg/L)	<25.00	<25.00	49.00	109.00	131.00	275.00	354.00	295.00	472.00	545.00	438.00	470.00	200.00	171.00
Sólidos sedimentables (ml/L-h)	<0.10	<0.10	<0.10	2.00	2.00	0.80	3.00	2.00	6.00	6.00	5.00	3.50	0.90	0.80
DBO5 (mg/L)	<3.04	<3.04	<3.04	30.00	30.20	31.20	125.00	59.30	120.00	100.00	78.90	53.80	10.10	7.01

VARIABLE	ESTACIONES DE MUESTREO													
	RESERVA ALTO DE SAN MIGUEL	SAN MIGUEL	PRIMAVERA	ANCÓN SUR	ANTES DE SAN FERNANDO	DESPUÉS DE SAN FERNANDO	AULA AMBIENTAL	PUENTE ACEVEDO	PUENTE MACHADO	NIQUÍA	ANCÓN NORTE	PARQUE DE LAS AGUAS	PAPELSA	PUENTE GABINO
	E0	E1	E2	E3	E5	E6	E8	E9	E11	E21	E12	E14	E16	E20
DQO (mg/L)	<10.00	<10.00	<10.00	58.90	54.20	61.60	224.00	110.00	209.00	192.00	168.00	121.00	24.80	13.10
Grasas y/o aceites (mg/L)	<8.00	<8.00	<8.00	8.00	9.00	16.00	29.00	16.00	19.00	18.00	13.00	<8.00	<8.00	<8.00
SAAM (mg/L)	<0.10	<0.10	0.18	1.22	1.28	1.48	2.48	2.48	2.69	2.12	1.89	0.77	0.23	0.14
Fósforo total (mg P/L)	<0.05	0.05	0.09	0.81	1.33	1.17	3.13	2.26	2.84	4.12	3.65	2.83	0.73	0.78
Fosfato (mg P/L)	<0.05	<0.05	0.06	0.42	0.49	0.62	2.14	1.79	0.82	1.67	1.43	0.99	0.39	0.37
Fósforo orgánico (mg P/L)	<0.05	<0.05	<0.05	0.34	0.61	0.21	0.95	0.43	1.79	2.14	1.58	1.70	0.32	0.39
Nitratos (mg N/L)	0.13	0.33	0.31	0.15	0.21	1.90	<0.11	<0.11	<0.11	<0.11	<0.11	0.38	0.39	0.74
Nitritos (mg N/L)	<0.03	<0.03	<0.03	0.09	0.17	1.05	<0.03	0.13	0.09	0.06	0.03	0.15	0.14	0.23
Nitrógeno orgánico (mg N/L)	<1.00	<1.00	<1.00	3.58	4.95	4.90	9.30	8.70	8.40	8.40	7.40	4.40	1.63	1.74
Nitrógeno total Kjeldahl (mg N/L)	<1.00	<1.00	<1.00	7.14	10.00	17.30	24.90	22.60	23.80	32.60	30.20	25.00	8.40	7.94
Cadmio (mg Cd/L)	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Cobre (mg Cu/L)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Cromo (mg Cr/L)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Mercurio (mg Hg/L)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Níquel (mg Ni/L)	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.03	0.02	0.08	0.07	0.06	0.06	<0.02	<0.02
Plomo (mg Pb/L)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.02	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Escherichia Coli (NMP/100mL)	1.600E+01	1.400E+03	2.480E+04	6.700E+05	1.200E+06	1.270E+06	9.100E+06	3.000E+06	3.300E+06	4.400E+06	8.000E+06	3.000E+05	9.000E+04	1.200E+05

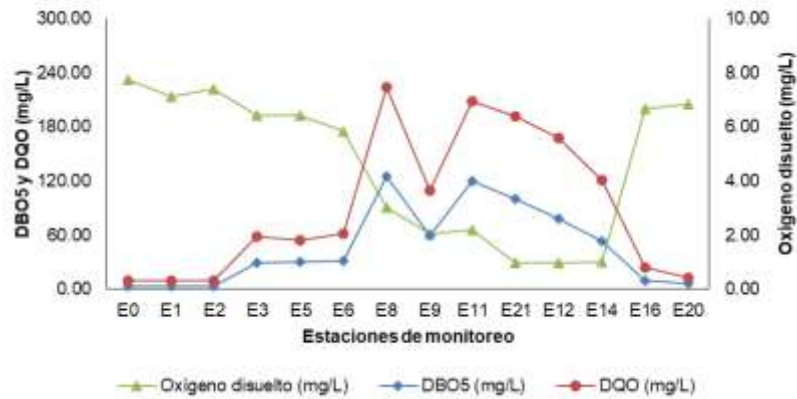
VARIABLE	ESTACIONES DE MUESTREO													
	RESERVA ALTO DE SAN MIGUEL	SAN MIGUEL	PRIMAVERA	ANCÓN SUR	ANTES DE SAN FERNANDO	DESPUÉS DE SAN FERNANDO	AULA AMBIENTAL	PUENTE ACEVEDO	PUENTE MACHADO	NIQUÍA	ANCÓN NORTE	PARQUE DE LAS AGUAS	PAPELSA	PUENTE GABINO
	E0	E1	E2	E3	E5	E6	E8	E9	E11	E21	E12	E14	E16	E20
Coliformes totales (NMP/100mL)	3.450E+03	1.840E+04	9.800E+04	2.910E+06	3.400E+06	5.480E+06	2.760E+07	1.480E+07	1.480E+07	1.790E+07	1.800E+07	9.000E+05	3.400E+05	5.400E+05
Caudal (m³/s)	0.28	0.52	1.32	3.26	3.59	4.82	6.22	8.17	12.01	12.04	17.90	18.61	39.87	55.96
Clasificación caudal (Adim)	Bajo													



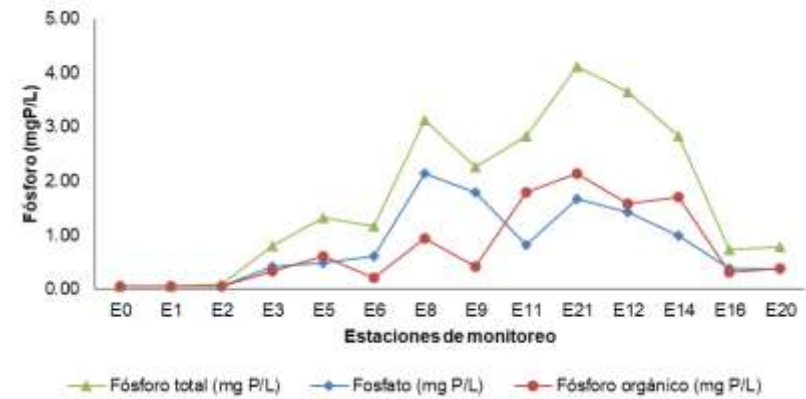
a. Temperatura ambiente, temperatura del agua y oxígeno



b. Conductividad eléctrica y pH



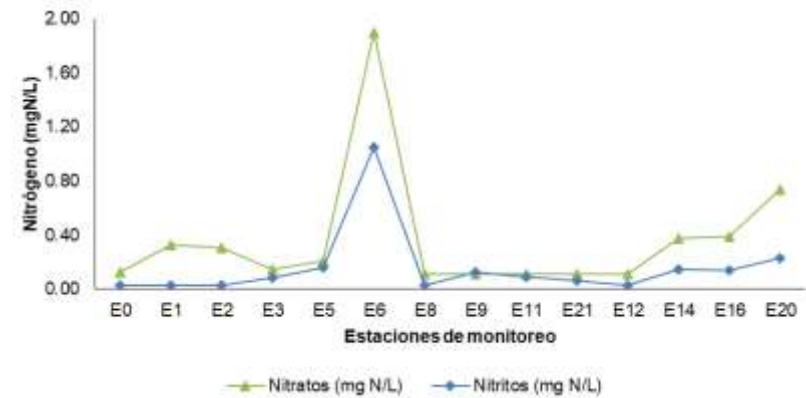
c. DBO5, DQO y oxígeno disuelto



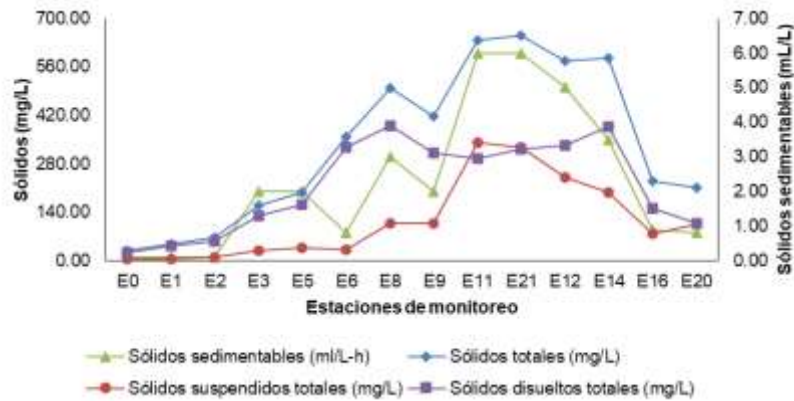
d. Fósforo total, fosfatos y fósforo orgánico



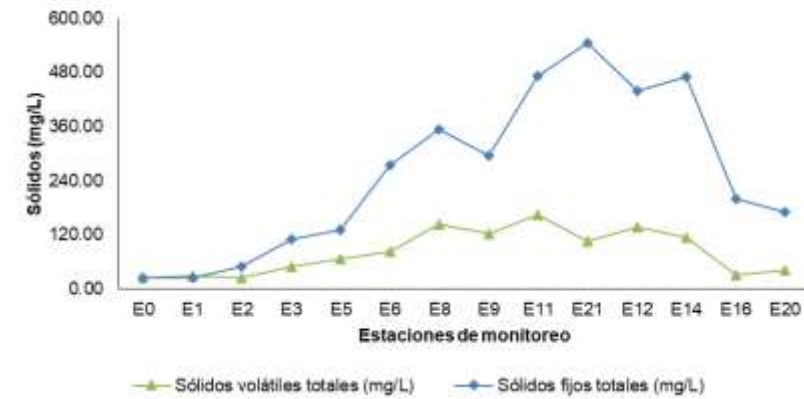
e. NTK y nitrógeno orgánico



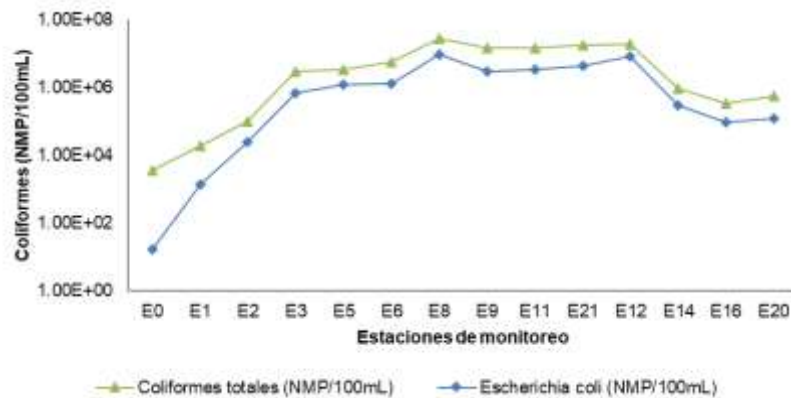
f. Nitratos y nitritos



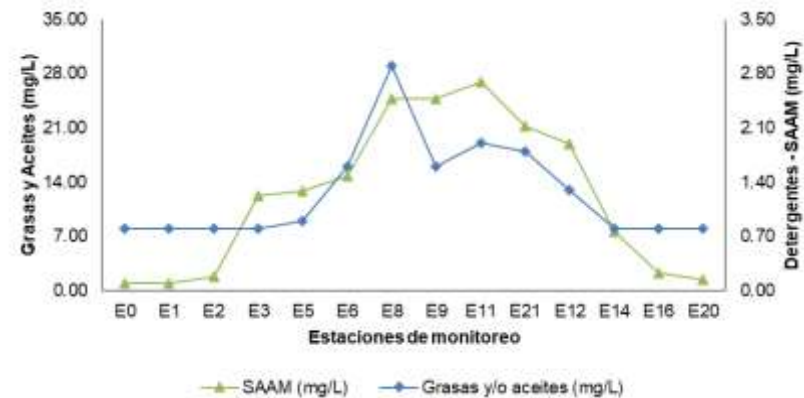
g. Sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales y sólidos sedimentables



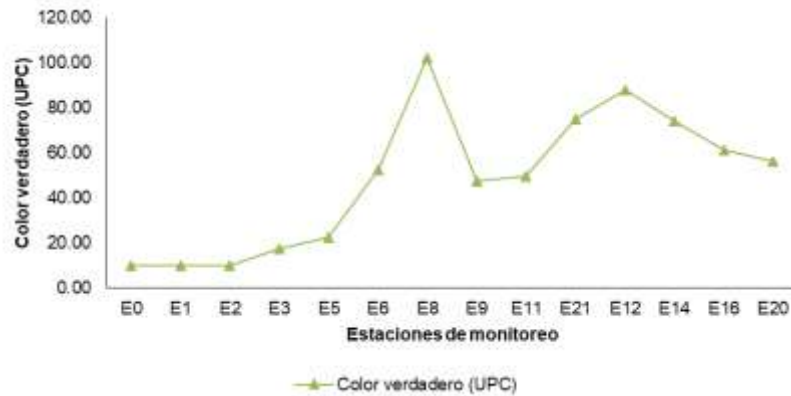
h. Sólidos volátiles totales y sólidos fijos totales



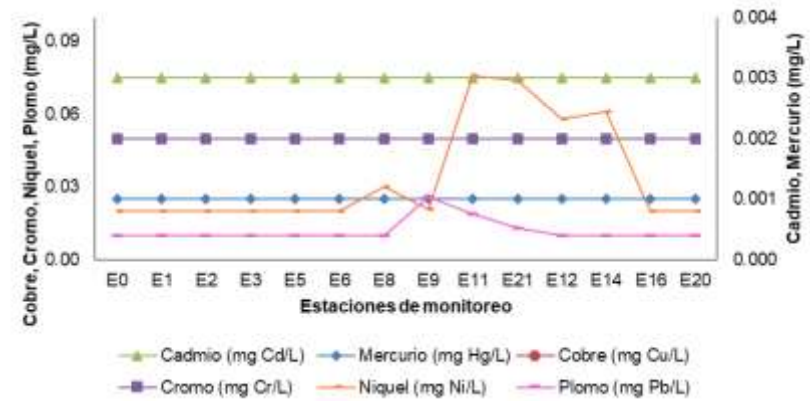
i. Coliformes totales y E. coli



j. Detergentes (SAAM), grasas y aceites



k. color verdadero



l. Cobre, cromo, cadmio, cromo, níquel, mercurio y plomo

Figura 8. Variables de campo promedio y fisicoquímicas determinadas en laboratorio, tomadas en el río Aburrá – Medellín en la campaña de muestra completa realizada el 19 de febrero de 2020

A continuación, se presentan los análisis de los valores promedio obtenidos en las variables de campo y los resultados de laboratorio de las variables fisicoquímicas medidas en las muestras compuesta y puntual, tomadas durante el desarrollo de la campaña de muestreo, realizada el 19 de febrero de 2020, en 14 estaciones de muestreo, de las cuales 13 se encuentran sobre el río Aburrá -Medellín y una sobre el río Porce.

La temperatura ambiente promedio (Figura 8 a) osciló entre 21.62 y 29.00 °C, donde el valor mínimo se registró en la estación San Miguel (E1) y el máximo en Puente Gabino (E20). Los resultados en E1 se relacionan con la altitud (1830 msnm) y la alta presencia de vegetación que incide en la disminución de la temperatura ambiente debido al proceso de la evapotranspiración, entretanto, en E20, aunque se cuenta con presencia de superficies verdes, las altas temperaturas se asociaron a su altura sobre el nivel del mar (1056 msnm) en la parte baja de la cuenca. Se resalta que en la estación Reserva Alto de San Miguel (E0) se registraron valores de temperatura media de 19 °C, a partir de los registros puntuales tomados a las 8:00 y 12:00 horas, que tuvieron unos valores de 14 °C y 24 °C respectivamente.

En general, la condición hidroclimatológica de época seca en la cuenca en la cual se realizó la campaña de monitoreo, influyó en los resultados obtenidos para esta variable, asimismo, factores como la altitud sobre el nivel del mar de los sitios de monitoreo, la radiación solar incidente y la capacidad calórica del agua. Se destaca que los registros obtenidos para la temperatura ambiente entre las estaciones E3 y E21, localizadas en la zona urbana, posiblemente estuvieron influenciados por el fenómeno de islas urbanas. En cuanto a la temperatura del agua (Figura 8 a), el menor valor promedio (19.35 °C) se registró en San Miguel mientras que el mayor valor promedio (25.55 °C) se reportó en Niquía (E21). La temperatura del agua promedio registrada en E0 correspondió a 15.0 °C, obtenida a partir de los registros puntuales tomados a las 8:00 y 12:00 horas. Se resalta que el conjunto de datos promedio registrado para la temperatura del agua presentó una tendencia similar a la media de la temperatura ambiente.

El oxígeno disuelto promedio (Figura 8 a) evidenció un comportamiento decreciente entre las estaciones E0 y E14. Los valores máximos registrados para esta variable se presentaron en el tramo E0-E2, donde las concentraciones oscilaron entre 7.13 mg/L (E1) y 7.74 mg/L (E0). Los datos reportados entre E0 y E2 se asocian a la altura sobre el nivel del mar a la cual se ubican los sitios de monitoreo, que favorece la solubilidad del OD en la columna del agua, así como, a las condiciones hidráulicas de la corriente, puesto que los cambios en la pendiente incrementan la turbulencia del agua, favoreciendo el intercambio gaseoso entre la atmósfera y el cuerpo de agua. Por otro lado, la baja intervención antrópica en la zona, la cual se refleja en un bajo aporte de materia orgánica al río también influye en las concentraciones de oxígeno disuelto. Los cambios presentados en esta variable también pueden asociarse a la variación en la temperatura del agua que influye directamente en la disolución del oxígeno.

Posteriormente, entre las estaciones Ancón Sur (E3) y Parque de las Aguas (E14) se evidenció una tendencia decreciente en la concentración de oxígeno disuelto. En este tramo, la mayor concentración se registró en E3 (6.45 mg/L), mientras que la menor se presentó en E21 (0.97 mg/L), no obstante, en las estaciones E12 y E14 se reportaron valores promedio cercanos correspondientes a 1.00 y 1.01 mg/L respectivamente. El decrecimiento observado para esta variable en este tramo se relaciona con la oxidación de la materia orgánica e inorgánica aportada por las aguas residuales vertidas al río dónde se destacan la Descarga de la PTAR San Fernando



(D1), el bypass y el efluente de la PTAR Aguas Claras (D6), sumado a los aportes de carga contaminante de diferentes quebradas afluentes como La Mina (Q25), Altavista (Q8), La Hueso (Q9), Santa Elena (Q10), La Rosa (Q12), La García (E10), entre otras.

Es importante resaltar que la disminución más pronunciada en la concentración de oxígeno disuelto se registró en el tramo entre E6 y E8, asociado a la demanda de oxígeno química y biológica para degradar los aportes de materia orgánica e inorgánica sujeta a oxidarse provenientes de D1 y de afluentes como Q8, Q20, Q9 y Q10, entre otras. Las menores concentraciones promedio de oxígeno disuelto se reportaron entre E8 y E14, asociado a la alta carga contaminante aportada por los municipios más densamente poblados de la cuenca, se resalta además que la baja pendiente y los bajos caudales transportados por el río, debido a la época seca que inciden en la ocurrencia de menor turbulencia en la corriente entre E8 y E14, no favoreció la oxigenación del río.

En el tramo comprendido entre las estaciones Parque de las Aguas (E14) y Papelsa (E16) se registró un incremento pronunciado en el valor promedio de esta variable de 1.01 a 6.68 mg/L, respectivamente, asociado al ingreso de aguas con mayores concentraciones de oxígeno disuelto, como la descarga de la central hidroeléctrica La Tasajera y la quebrada Ovejas. En la estación Puente Gabino (E20) se registró una concentración promedio de 6.85 mg/L asociada a la confluencia entre río Grande y el río Aburrá-Medellín, sumado las condiciones hidrodinámicas en este tramo de alta turbulencia que favorecen la reaireación del cuerpo de agua y la afluencia de quebradas de buena calidad, debido a la baja densidad poblacional ubicada en la zona.

El pH del agua promedio (Figura 8 b) presentó un comportamiento uniforme en los sitios de monitoreo evaluados durante la campaña de muestreo, osciló entre 7.19 y 7.96 U. de pH, reportados en Primavera (E2) y Ancón Sur (E3) respectivamente. En E0 se registró un valor promedio de 6.76 U. de pH. Lo anterior, se relaciona con la capacidad amortiguadora de la corriente para neutralizar vertimientos ácidos o básicos, como también, con el pH de los vertimientos realizados sobre el río y sus afluentes.

La conductividad eléctrica (Figura 8 b) presentó una tendencia creciente entre las estaciones Reserva Alto de San Miguel (E0) y Parque de las Aguas (E14), en las cuales se registraron valores promedio correspondientes a 27.55 y 836.62 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Lo anterior, se asocia a los iones aportados al río y sus afluentes a través de aguas residuales de tipo doméstico y no doméstico, donde el mayor incremento se reportó entre E5 y E6, asociado a la Descarga de la PTAR San Fernando (D1). Se destaca que en el tramo E8-E12 se presentó una baja variabilidad en la conductividad eléctrica, asociada a los altos valores reportados para esta variable en vertimientos y en quebradas afluentes aguas arriba de E8, por lo que los aportes registrados aguas abajo no representan un aporte importante en la carga de iones que refleje un cambio significativo a la altura de E12. En E14 se observó un aumento que puede estar vinculado a vertimientos de origen industrial, debido a la gran cantidad de industrias asentadas en este tramo que vierten sus aguas residuales tratadas y sin tratar directa o indirectamente a la corriente, como también, a los aportes provenientes del municipio de Girardota. Aguas abajo de E14 se presentó una disminución en la conductividad eléctrica, vinculada a procesos de dilución asociados al ingreso de la descarga de la central hidroeléctrica La Tasajera, a quebradas con baja intervención antrópica como la quebrada Ovejas (Q30) y río Grande.



La turbiedad promedio (Tabla 10) describió una tendencia creciente entre E1 y E12, asociado a los aportes de material en suspensión. En las estaciones Aula Ambiental (E8) y Ancón Norte (E12) se registraron los resultados promedio más altos, correspondientes a 75.43 y 170.1 NTU respectivamente. Se destaca que, durante la presente campaña, realizada durante la época seca en la cual se registra una disminución en las precipitaciones, se presentó una disminución en el caudal que genera una menor velocidad en la corriente, lo cual favorece la sedimentación de material en suspensión, sumado a la reducción de sólidos aportados a escala de cuenca, por procesos de escorrentía superficial que son arrastrados y transportados a la corriente.

El potencial redox promedio (Tabla 10) evidenció que en las estaciones San Miguel (E1) y Ancón Sur (E3) se presentó un ambiente oxidante, con valores promedio correspondientes a 390.77 y 362.08 mV respectivamente. Entretanto, en las estaciones Aula Ambiental (E8) y Ancón Norte (E12) se registraron valores promedio de -5.85 y 6.67 mV, estaciones en las que se registraron condiciones oxidantes en la mañana y reductoras en la tarde. Lo anterior, se relaciona con la concentración de oxígeno disuelto en la corriente, cuyo valor promedio en E1 fue de 7.13 mg/L, mientras que en E3 fue de 6.45 mg/L, entretanto, en las estaciones E8 y E12 correspondió a 3.02 y 1.00 mg/L.

En cuanto a las variables medidas en el laboratorio, se destaca que estas en general presentaron un comportamiento creciente a lo largo del río, donde los valores mínimos se registraron en el tramo E0-E2, mientras que los valores máximos se reportaron entre las estaciones E6 y E14 (Tabla 10 y Figura 8). Se destaca que metales pesados como el cadmio, cobre, cromo y el mercurio, presentaron concentraciones inferiores a los límites de cuantificación de los métodos implementados para su medición en los catorce (14) sitios de monitoreo evaluados. No obstante, metales como el níquel y el plomo registraron valores entre 0.02 y 0.08 mgNi/L en el tramo E8-E14 y entre 0.01 y 0.03 mgPb/L entre E9 y E21. Estas concentraciones se vinculan a vertimientos de aguas residuales realizados al río o a sus afluentes provenientes de diferentes tipos de industrias (galvanizado, metalúrgica y química, entre otras).

Asociado a la baja intervención antrópica en el tramo comprendido entre E0-E2, la mayoría de las variables presentaron niveles inferiores al límite de cuantificación de los métodos usados en el laboratorio, como es el caso de la DBO₅, DQO, SAAM, grasas y aceites, color verdadero y algunas especies de fósforo y nitrógeno y las fracciones de sólidos suspendidos, volátiles, fijos y sedimentables (Tabla 10 y Figura 8). En E0 se registraron concentraciones de 30.00 mg/L para los sólidos totales, 25.00 mg/L para los sólidos disueltos totales, 0.13 mgN/L para los nitratos y 3.45E+03 y 1.60E+01 NMP/100 mL para los coliformes totales y *E. coli*. Lo anterior, se asocia a aportes de animales, al ingreso de sólidos y de material vegetal, como a procesos de oxidación de la materia orgánica.

En variables como los sólidos, el fósforo total y los ortofosfatos, los nitratos y los coliformes totales y *E. coli* presentaron incrementos en E1 y E2 respecto a E0 (Tabla 10 y Figura 8). El comportamiento creciente registrado en este tramo se asocia al vertimiento de aguas residuales vertidas de forma directa sobre el río, provenientes de las veredas La Clara y La Salada, como también a las cargas contaminantes aportadas por las quebradas La Mina y La Salada, puesto que estas son receptoras de aguas residuales domésticas y no domésticas asociado a los usos residenciales e industriales que se registran en estas subcuencas. En E2 se registró una concentración de 0.18 mg/L en SAAM, vinculado al aporte de detergentes asociado con cargas

de aguas residuales domesticas anteriormente explicadas, destacándose que durante la jornada de monitoreo se observó formación de espumas en E2.

Las variables fisicoquímicas y microbiológicas evaluadas presentaron un incremento paulatino en el tramo comprendido entre Ancón Sur (E3) y Parque de las Aguas (E14), donde los menores niveles se registraron en E3, mientras que los mayores se registraron en el tramo comprendido entre E8 y E14. En la estación Ancón Sur (E3) se presentó un incremento en las variables evaluadas respecto a los datos registrados en E2, asociado a un cambio urbanístico en la cuenca, pues en este tramo se presenta la transición entre la zona rural y urbana, evidenciando principalmente, la influencia de la zona urbana de los municipios de Caldas, La Estrella y Sabaneta, puesto que la intervención antrópica es mayor. En E3 se registró una concentración de sólidos totales correspondiente a 159.00 mg/L, los valores de DBO₅ y DQO fueron de 30.00 y 58.90 mg/L respectivamente, fósforo total de 0.81 mgP/L y nitrógeno total Kjeldahl de 7.14 mgN/L. Los registros observados en las variables medidas en la estación Ancón Sur (E3) se vinculan a los vertimientos de aguas residuales de tipo no doméstico y doméstico realizados de manera directa sobre el río o sobre afluentes como las quebradas: La Miel (Q2), La Valeria (Q1), La Bermejala (Q34) y La Grande (Q5), puesto que hasta la fecha no se ha finalizado la construcción del interceptor sur que conducirá las aguas residuales generadas en estos municipios hasta la PTAR San Fernando (Tabla 10 y Figura 8).

Entretanto, el conjunto de datos reportado en E5 y E6 se asocia con las cargas contaminantes aportadas al río a través de quebradas como La Doctora (Q3), La Mina (Q25), Doña María (E4) y La Ayurá (Q4). Se resalta que en las subcuencas de las quebradas Q3, E4 y Q4 a pesar del aumento en la cobertura del sistema de alcantarillado y la reducción de los vertimientos directos a la corriente, por la implementación de obras de saneamiento, estas no alcanzan su cobertura total y se presentan vertimientos de aguas residuales, lo cual genera un deterioro en su calidad. Las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas registradas en E6 también se vinculan a la Descarga de la PTAR San Fernando (D1), la cual aporta una carga contaminante representativa al río, puesto que a través de su tren de tratamiento de tipo secundario remueve DBO y sólidos a las aguas residuales domésticas y no domésticas provenientes de la mayor parte de los municipios localizados en el sur de la cuenca, pero no remueve directamente cargas de nutrientes o especies patógenas.

Se destaca que en E6 se presentó un incremento en los nitritos (1.90 mgN/L) y nitratos (1.05 mgN/L) respecto a los valores medidos en E5, lo cual posiblemente se vincula al vertimiento de cargas de nutrientes del efluente de la PTAR, la cual no cuenta con la capacidad de remover directamente cargas de las especies de nitrógeno. Se destaca que en E6 también se registró una disminución en los sólidos sedimentables, vinculado a procesos de sedimentación favorecidos por la baja pendiente del tramo y La reducción en el régimen turbulento de la corriente, asociado con el bajo régimen de flujo debido a la época seca. Los datos registrados en E5 y E6 correspondieron a 30.20 y 31.20 mg/L para la DBO₅, 54.20 y 61.60 mg/L para la DQO, 197.00 y 358.00 mg/L para los sólidos totales, 1.33 y 1.17 mgP/L para el fósforo total, 10.00 y 17.30 mgN/L para el nitrógeno total Kjeldahl respectivamente (Tabla 10 y Figura 8).

En la estación Aula Ambiental (E8) se presentó un incremento en todas las variables monitoreadas, excepto en la concentración de los nitritos y nitratos respecto a E6. Este aumento se vincula a las cargas contaminantes aportadas por quebradas como Altavista (Q8), La Picacha

(Q20), La Hueso (Q9), La Iguañá (Q11) y Santa Elena (Q10) subcuencas que se encuentran altamente urbanizadas y por tanto son receptoras de las aguas residuales provenientes de las actividades antrópicas desarrolladas en estas. Según el registro histórico recolectado por la red de monitoreo durante el Convenio 1050 de 2016 (AMVA, 2016), la calidad del agua en estas quebradas varía entre regular y muy mala según los índices ICA e ICA Quebradas, en ese sentido, la carga contaminante aportada por estos tributarios afecta de manera importante las características fisicoquímicas de la corriente principal en el tramo entre E6 y E8, registrándose valores en E8 de concentraciones: de sólidos totales de 498.00 mg/L, los valores de DBO₅ y DQO correspondieron a 125.00 y 224.00 mg/L respectivamente, fósforo total de 3.13 mgP/L y nitrógeno total Kjeldahl de 24.90 mgN/L (Tabla 10 y Figura 8).

Posteriormente, en la estación Puente Acevedo (E9) se estación se registró una disminución en los niveles de DBO₅ (59.30 mg/L), DQO (110.00 mg/L), nutrientes (fósforo total: 2.26 mgP/L y nitrógeno total Kjeldahl: 22.60 mgN/L) y sólidos sedimentables (2.00 ml/L-h), coliformes totales (1.48E+07 NMP/100ml) y *E. coli* (3.00E+06 NMP/100ml) respecto al conjunto de datos reportado en E8. Estos cambios pueden vincularse a la ocurrencia de procesos de sedimentación en el río favorecidos por la baja pendiente en el tramo comprendido entre E8 y E9, que reduce el régimen turbulento de la corriente, asociado también con el bajo régimen de flujo debido a la época seca.

En el tramo entre E11 y E21 se registró un incremento de la mayoría de las variables asociado al ingreso de las aguas residuales de origen doméstico e industrial provenientes del municipio de Bello, uno de los más urbanizados en la cuenca, y al aporte de quebradas como La Madera (Q13), El Hato (Q14) y La García (E10), entre otras, donde Q13 y E10 se destacan entre los afluentes que presentan una mayor deterioro en su calidad del agua y aportan una mayor carga contaminante al río, de acuerdo con los resultados obtenidos en las campañas de quebradas realizadas durante el convenio 1050 de 2016 (AMVA, 2016). La Descarga de la PTAR Aguas Claras (D6) y el bypass proveniente de esta también aportan cargas contaminantes representativas en el tramo Puente Machado (E11) y Niquía (E21) que contribuyen a incrementar los niveles de las variables evaluadas, puesto que corresponden a un efluente tratado y no tratado de aguas residuales provenientes de los municipios de Medellín y Bello. Los datos registrados en E11 y E21 correspondieron respectivamente a cada estación en concentraciones de: 120.00 y 100.00 mg/L para la DBO₅, 209.00 y 192.00 mg/L para la DQO, 637.00 y 651.00 mg/L para los sólidos totales, 2.84 y 4.12 mgP/L para el fósforo total, 23.80 y 32.60 mgN/L para el nitrógeno total Kjeldahl respectivamente (Tabla 10 y Figura 8).

En las estaciones Ancón Norte (E12) y Parque de las Aguas (E14) se observó una disminución) respecto a los datos reportados en E11 y E21 (Tabla 10 y Figura 8) de las variables DBO₅ (78.90 mg/L en E12 y 53.80 mg/L en E14), DQO (168.00 mg/L en E12 y 121.00 mg/L en E14), fósforo total (3.65 mgP/L en E12 y 2.83 mgP/L en E14), sólidos sedimentables (5.00 ml/L-h en E12 y 3.50 ml/L-h en E14), sólidos suspendidos totales (242.00 mg/L en E12 y 196.00 mg/L en E14), sólidos volátiles totales (138.00 mg/L en E12 y 114.00 mg/L en E14) y sólidos fijos totales (438.00 mg/L en E12 y 470.00 mg/L en E14). Lo anterior, puede vincularse a procesos de sedimentación favorecidos por una disminución en la velocidad de la corriente, puesto que aguas arriba de E12 como en el tramo comprendido entre E12 y E14 se presentan zonas de baja pendiente que causan la reducción en el régimen turbulento de la corriente, asociado con el bajo régimen de flujo debido a la época seca. Se resalta que entre E12 y E14 el río recibe las aguas residuales de los municipios de Copacabana y Girardota, como también, los aportes provenientes de las

industrias asentadas en el norte de la cuenca, sin embargo, es importante resaltar que este tramo se presenta una disminución en la población respecto a Itagüí, Medellín y Bello.

Por último, en las estaciones Papelsa (E16) y Puente Gabino (E20) se reportó una disminución en las variables fisicoquímicas medidas, respecto a los resultados obtenidos en las estaciones de muestreo ubicadas aguas arriba. Los datos registrados en E16 y E20 correspondieron a 10.10 y 7.01 mg/L para la DBO₅, 24.80 y 13.10 mg/L para la DQO, 230.00 y 212.00 mg/L para los sólidos totales, 0.73 y 0.78 mgP/L para el fósforo total, 8.40 y 7.94 mgN/L para el nitrógeno total Kjeldahl respectivamente (Tabla 10 y Figura 8). Lo anterior, se vincula a la ocurrencia de procesos de dilución en la corriente debido al ingreso de tributarios que presentan mejores condiciones fisicoquímicas, como es el caso de la Descarga de la central hidroeléctrica La Tasajera (D4), la quebrada Ovejas (Q30) y río Grande.

7.1.3 Comparación de resultados de la campaña del 19 de febrero de 2020 con los objetivos de calidad para la cuenca del río Aburrá-Medellín para el periodo 2017-2022 de la Resolución Metropolitana No. 002016 del 26 de octubre de 2012

En la Resolución Metropolitana 2016 de 2012 se establecen los objetivos de calidad para el río Aburrá-Medellín en el largo plazo (2017-2022) (Tabla 11). Con el fin de evaluar el cumplimiento de los objetivos establecidos corto plazo en la campaña de monitoreo desarrollada el 19 de febrero de 2020, en la Tabla 12 y Figura 9 se presenta una comparación entre ambos.

Tabla 11. Objetivos de calidad para el río Aburrá-Medellín Resolución Metropolitana 2016 de 2012 periodo de 5 a 10 años 2017-2022

ESTACIÓN	CÓDIGO	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	pH (U. de pH)	OD (mg/L)	SST (mg/L)	CONDUCTI VIDAD E. (μS/cm)	NTK (mg/L)	P TOTAL (mg/L)	GRASAS Y ACEITES (mg/L)	COLOR VERDADERO (UPC)
Reserva Alto de San Miguel	E0	<8.00	<10.00	>6.50 - <8.50	>7.00	<15.00	<30.00	<2.00	<0.30	<20.00	<50.00
San Miguel	E1	<8.00	<10.00	>6.50 - <8.50	>7.00	<15.00	<30.00	<2.00	<0.30	<20.00	<50.00
Primavera	E2	<8.00	<10.00	>6.50 - <8.50	>7.00	<15.00	<50.00	<2.00	<0.30	<20.00	<50.00
Ancón Sur	E3	<15.0 0	<30.00	>4.50 - <9.00	>4.00	<20.00	<50.00	<3.50	<1.50	<20.00	<50.00
Antes de San Fernando	E5										
Después de San Fernando	E6	<50.0 0	<100.00	>6.50 - <8.50	>4.00	<200.00	<120.00	<10.0 0	<2.00	<20.00	<50.00
Aula Ambiental	E8										
Puente Acevedo	E9										
Puente Machado	E11	<50.0 0	<100.00	>6.50 - <8.50	>4.00	<200.00	<120.00	<10.0 0	<2.00	<20.00	<50.00
Niquía	E21										
Ancón Norte	E12		<100.00		>4.00	<200.00	<120.00		<2.00	<20.00	<50.00

Parque de las Aguas	E14	<50.0 0		>6.50 - <8.50				<10.0 0			
Papelsa	E16	<30.0 0	<40.00	>5.00 - <9.00	>4.00	<100.00	<70.00	<10.0 0	<2.00	<20.00	<50.00
Puente Gabino	E20										

La celda de color verde indica el cumplimiento del objetivo establecido y la celda de color rojo denota un incumplimiento de este, es decir, refleja un nivel superior al fijado como criterio de calidad para las variables medidas, a excepción del oxígeno disuelto cuyo color rojo representa un déficit para alcanzar la concentración de oxígeno proyectado como valor del criterio en cada tramo. Con relación al pH, la celda de color verde significa un valor de pH en el rango especificado y por tanto cumplimiento del objetivo especificado, por fuera del intervalo y marcado con color rojo se establecen aquellos resultados que no dieron cumplimiento.

Tabla 12. Comparación de resultados campaña de monitoreo del 19 de febrero de 2020 con los objetivos de calidad del río Aburrá-Medellín Resolución Metropolitana 2016 de 2012 largo plazo 2017-2022

ESTACIÓN	CÓDIGO	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	pH (U. de pH)	OD (mg/L)	SST (mg/L)	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (µS/cm)	NTK (mg/L)	P TOTAL (mg/L)	GRASAS Y ACEITES (mg/L)	COLOR VERDADERO (UPC)
Reserva Alto de San Miguel	E0	3.04	10.00	6.76	7.74	5.00	27.55	1.00	0.05	8.00	10.00
San Miguel	E1	3.04	10.00	7.67	7.13	5.00	36.77	1.00	0.05	8.00	10.00
Primavera	E2	3.04	10.00	7.19	7.39	11.00	68.77	1.00	0.09	8.00	10.00
Ancón Sur	E3	30.00	58.90	7.96	6.45	30.00	182.15	7.14	0.81	8.00	17.28
Antes de San Fernando	E5	30.20	54.20	7.62	6.43	36.00	254.46	10.00	1.33	9.00	22.28
Después de San Fernando	E6	31.20	61.60	7.45	5.84	31.00	573.31	17.30	1.17	16.00	52.46
Aula Ambiental	E8	125.00	224.00	7.75	3.02	107.00	572.31	24.90	3.13	29.00	102.03
Puente Acevedo	E9	59.30	110.00	7.57	2.05	107.00	561.31	22.60	2.26	16.00	47.29
Puente Machado	E11	120.00	209.00	7.46	2.21	342.00	618.54	23.80	2.84	19.00	49.48
Niquía	E21	100.00	192.00	7.26	0.97	328.00	673.62	32.60	4.12	18.00	74.72
Ancón Norte	E12	78.90	168.00	7.57	1.00	242.00	672.39	30.20	3.65	13.00	87.68
Parque de las Aguas	E14	53.80	121.00	7.42	1.01	196.00	836.62	25.00	2.83	8.00	74.24
Papelsa	E16	10.10	24.80	7.42	6.68	79.00	283.08	8.40	0.73	8.00	61.31
Puente Gabino	E20	7.01	13.10	7.48	6.85	104.00	289.00	7.94	0.78	8.00	55.95

De acuerdo con los resultados obtenidos (Tabla 12), en las estaciones San Miguel (E1) y Primavera (E2) se presentó un incumplimiento en la conductividad eléctrica, puesto que se registraron valores superiores a 30.00 y 50.00 µS/cm respectivamente. Lo anterior, se relaciona con la fracción disuelta aportada a través de las aguas residuales de tipo doméstico vertidas el río y a las quebradas La Mina, La Clara y La Salada, procedentes de las veredas La Clara y La

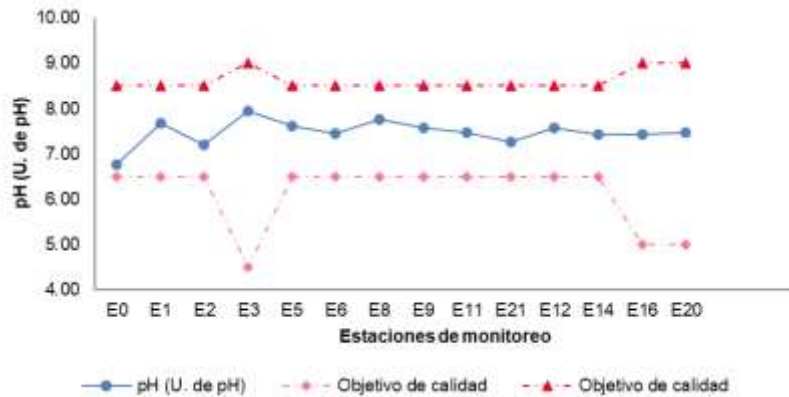


AUNAR ESFUERZOS PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HIDRICO SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO, EN EL MARCO DE LA OPERACIÓN DE LA RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA CUENTA HIDROGRÁFICA DEL RÍO ABURRÁ – MEDELLÍN

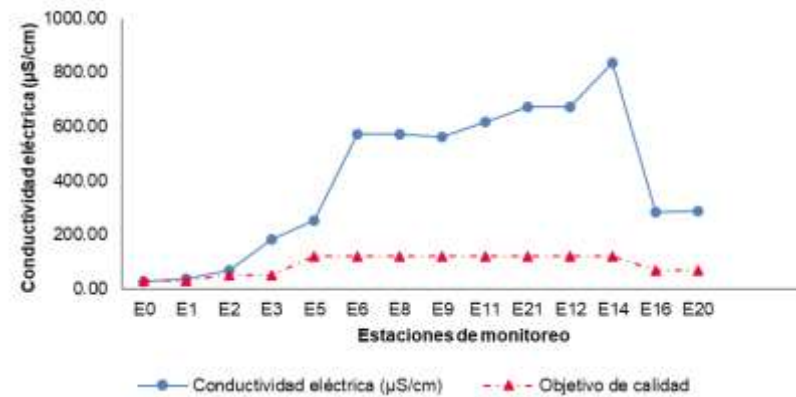


Salada. Se destaca que las variables restantes (DBO_5 , DQO, pH del agua, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales, nitrógeno total Kjeldahl, fósforo total, grasas y aceites y color verdadero) se mantuvieron dentro de los límites fijados. En cuanto a la estación Reserva Alto de San Miguel (E0), se resalta que en este sitio de monitoreo se cumplieron la totalidad de los objetivos de calidad establecidos.

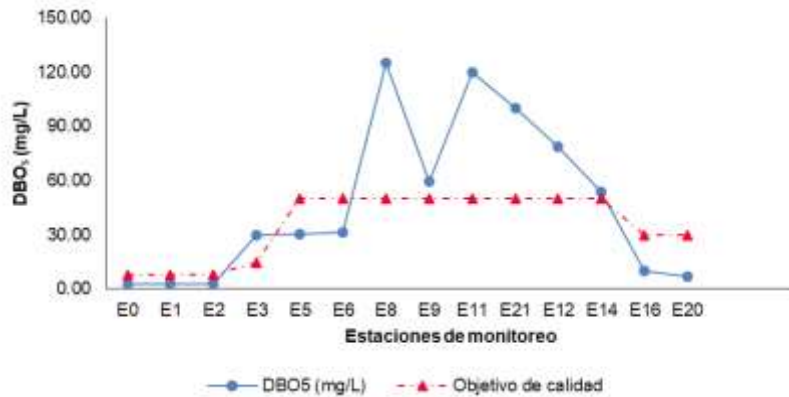
En el tramo Ancón Sur (E3)-Después de San Fernando (E6) se registró un incumplimiento en la variable conductividad eléctrica y nitrógeno total Kjeldahl. Se resalta que en E3 se superaron también los niveles establecidos para la DBO_5 , DQO y sólidos suspendidos totales, mientras que en E6 se superó el límite fijado para el color verdadero. Lo anterior, se vincula a las descargas de aguas residuales de tipo doméstico y no doméstico, que aún no se encuentran conectadas a los colectores e interceptores de EPM provenientes de los municipios del sur de la cuenca (caldas, la Estrella, Sabaneta, Envigado e Itagüí), que se vierten directamente sobre el río Aburrá-Medellín y quebradas afluentes dentro de las que se destacan por mayor aporte de carga contaminante La Valeria (Q1), La Doctora (Q3), La Mina (Q25) y Doña María (E4), entre otras, sumado a la descarga de aguas residuales tratadas provenientes de la PTAR San Fernando (D1).



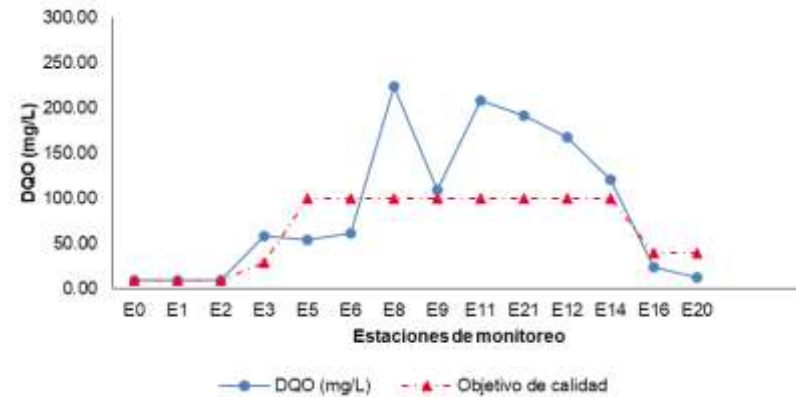
a. pH del agua



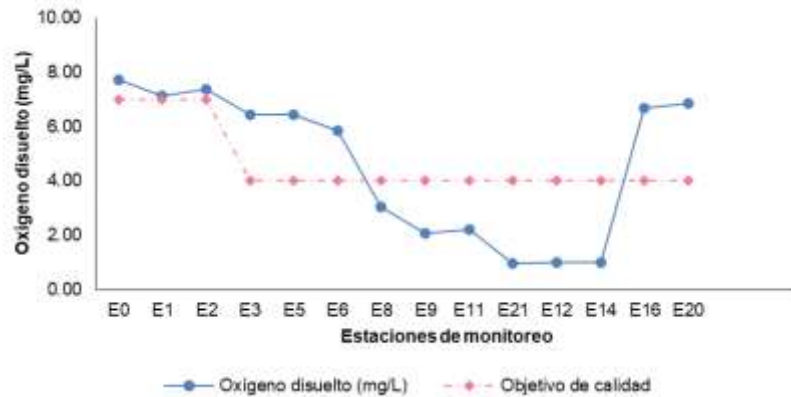
b. Conductividad eléctrica



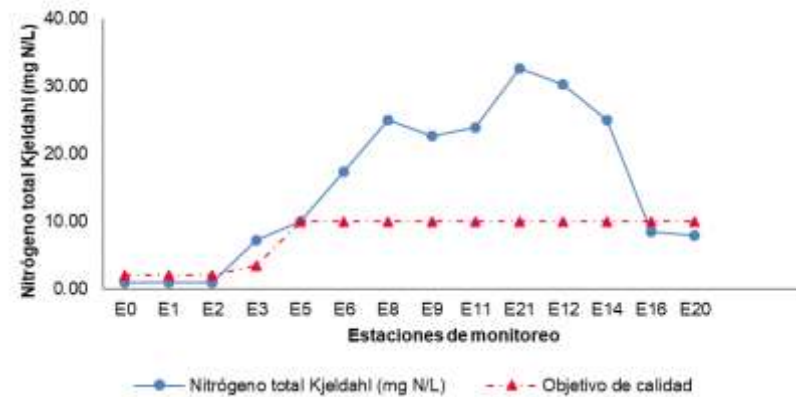
c. DBO₅



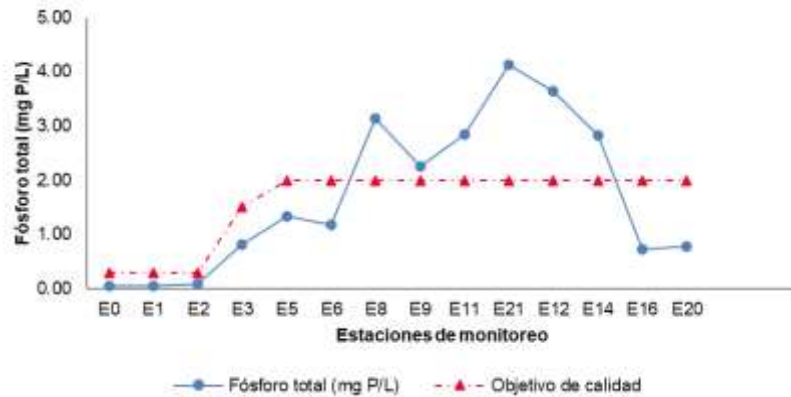
d. DQO



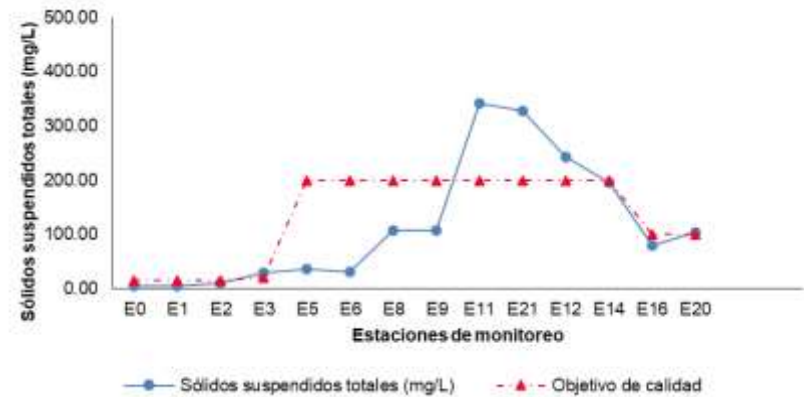
e. Oxígeno disuelto



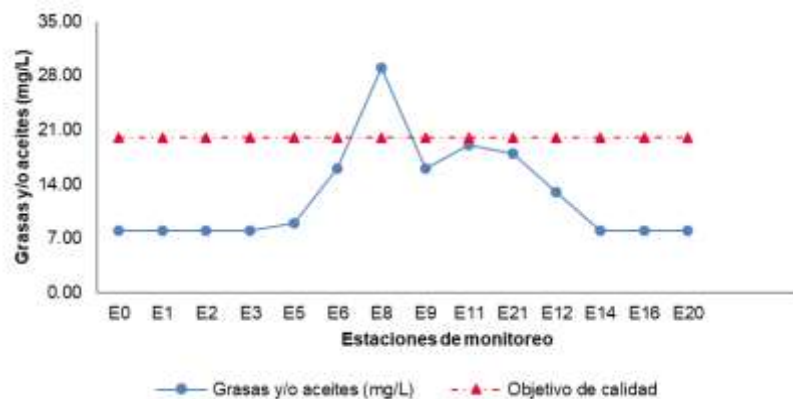
f. Nitrógeno Total Kjeldahl



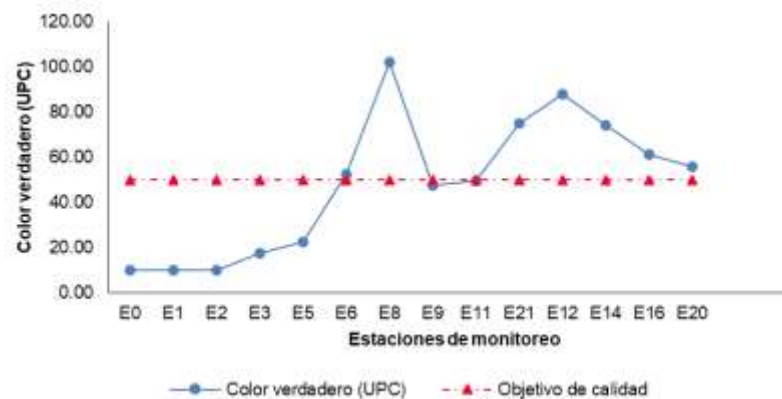
g. Fósforo Total



h. Sólidos Suspendidos Totales



i. Grases y/o aceites



j. Color verdadero

Figura 9. Objetivo de calidad vs variables fisicoquímicas medidas en la campaña del 19 de febrero de 2020



Se destaca que el incumplimiento asociado a las variables conductividad eléctrica y color verdadero se relaciona con la fracción disuelta de los aportes realizados al río. Las demás variables (oxígeno disuelto, pH del agua, sólidos suspendidos totales, fósforo total y grasas y aceites) se mantuvieron dentro de los límites establecidos por la normatividad.

En las estaciones Aula Ambiental (E8), Puente Acevedo (E9), Puente Machado (E11), Niquía (E21), Ancón Norte (E12) y Parque de las Aguas (E14) no se cumplieron nueve de los diez objetivos analizados (DBO₅, DQO, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales, conductividad eléctrica, nitrógeno total Kjeldahl, fósforo total, grasas y aceites y color verdadero). Esto es resultado de la alta intervención antrópica en esta zona de la cuenca, en la cual el río tiene la influencia de la carga contaminante aportada por los municipios localizados en el sur, centro y parte del norte de la cuenca, principalmente de los vertimientos provenientes de los municipios de Itagüí, Medellín y Bello, los cuales corresponden a los municipios más urbanizados del Área Metropolitana. Las aguas residuales aportadas, así como las quebradas que tributan al río en este tramo (La Picacha-Q20, La Hueso-Q9, Santa Elena-Q10 y La García-E10, entre otras), contienen materia orgánica e inorgánica susceptible de oxidarse, como también, material disuelto y en suspensión que generan un incremento en las variables DBO₅, DQO, nutrientes, conductividad eléctrica, sólidos suspendidos totales y una disminución en la concentración de oxígeno disuelto.

Se resalta que en E8 la variable grasas y aceites fue superior al objetivo de calidad establecido, mientras que en las estaciones E9, E11 y E21 la concentración de estas fue cercana a los 20.00 mg/L, límite fijado para las grasas. Adicionalmente, en E9 y E11 se registraron valores de color verdadero de 47.29 y 49.48 UPC respectivamente, cercanos al límite máximo establecido en la normativa (50.00 UPC), no obstante, se dio cumplimiento a la Resolución Metropolitana 2016 de 2012.

En la estación Papelsa (E16) se incumplieron los objetivos de calidad planteados para la conductividad eléctrica y el color verdadero, mientras que en Puente Gabino (E20) se sobrepasaron los límites establecidos para estas variables y además se registró una concentración de sólidos suspendidos totales (104.00 mg/L) levemente superior a lo fijado en la resolución (100.00 mg/L). Los resultados registrados en este tramo estuvieron influenciados por la carga contaminante aportada a lo largo de la cuenca, como también, a los procesos de dilución generados a partir de la confluencia de las aguas turbinadas provenientes de la central hidroeléctrica La Tasajera (aguas arriba de E16), la confluencia entre el río Aburrá-Medellín y río Grande (aguas arriba de E20) y la baja densidad poblacional de la zona, que permite la confluencia de tributarios de buena calidad.

Se destaca que el pH del agua promedio registrado durante la campaña osciló entre 6.76 y 7.96 U. de pH a lo largo de las estaciones de muestreo, de modo que se localizó dentro de los límites establecidos en la normatividad para todos los tramos fijados, lo anterior, asociado a la capacidad amortiguadora de la corriente para neutralizar vertimientos ácidos o básicos realizados sobre la corriente y sus afluentes, sumado a que los valores de pH que se miden en las aguas residuales domésticas, son cercanos a la neutralidad (Romero, 2005).

7.1.4 Carga contaminante del río Aburrá-Medellín para la campaña de monitoreo completa del 19 de febrero de 2020

En la Tabla 13 se muestran los resultados obtenidos para las cargas contaminantes en trece estaciones de monitoreo localizadas sobre el río Aburrá-Medellín y un sitio de muestreo sobre el río Porce durante la campaña de monitoreo de tipo completa realizada el 19 de febrero de 2020, entretanto, en la Figura 10 se ilustra el conjunto de datos obtenido de las cargas contaminantes de DBO₅, DQO nutrientes y sólidos. Las cargas calculadas se determinaron a partir de las variables medidas en las muestras compuestas y los caudales aforados por el Sistema de Alertas Temprana del Valle de Aburrá (SIATA) durante la campaña de monitoreo.

Tabla 13. Cargas contaminantes en el río Aburrá-Medellín Campaña 19 de febrero de 2020

Estación	Código	Caudal (m ³ /s)	DBO ₅ (t/día)	DQO (t/día)	Fósforo total (t P/día)	Nitrógeno total Kjeldahl (t N/día)	Sólidos suspendidos totales (t/día)	Sólidos volátiles totales (t/día)	Sólidos disueltos totales (t/día)	Sólidos fijos totales (t/día)
Reserva Alto de San Miguel	E0	0.28	0.07	0.24	0.00	0.02	0.12	0.59	0.59	0.59
San Miguel	E1	0.52	0.14	0.45	0.00	0.04	0.22	1.30	1.93	1.12
Primavera	E2	1.32	0.35	1.14	0.01	0.11	1.25	2.85	6.49	5.58
Ancón Sur	E3	3.26	8.45	16.60	0.23	2.01	8.45	14.09	36.35	30.71
Antes de San Fernando	E5	3.59	9.38	16.83	0.41	3.11	11.18	20.49	49.99	40.68
Después de San Fernando	E6	4.82	13.00	25.66	0.49	7.21	12.91	34.57	136.21	114.55
Aula Ambiental	E8	6.22	67.12	120.28	1.68	13.37	57.46	77.32	209.96	190.09
Puente Acevedo	E9	8.17	41.85	77.63	1.59	15.95	75.51	86.10	218.77	208.19
Puente Machado	E11	12.01	124.54	216.91	2.95	24.70	354.94	171.24	306.16	489.86
Niquía	E21	12.04	104.03	199.75	4.29	33.92	341.23	110.28	336.03	566.99
Ancón Norte	E12	17.90	122.01	259.79	5.64	46.70	374.23	213.40	516.49	677.32
Parque de las Aguas	E14	18.61	86.52	194.59	4.55	40.20	315.20	183.33	623.97	755.84
Papelsa	E16	39.87	34.79	85.42	2.52	28.93	272.11	103.33	520.11	688.88
Puente Gabino	E20	55.96	33.89	63.33	3.78	38.39	502.79	198.21	522.13	826.70

De acuerdo con los resultados obtenidos, entre las estaciones Reserva Alto de San Miguel (E0) y Ancón Norte (E12) se presentó un comportamiento creciente en las cargas contaminantes, entretanto, en los sitios de monitoreo Parque de las Aguas (E14), Papelsa (E16) y Puente Gabino (E20) se registró una disminución en la mayoría de las variables. Se destaca que durante la presente campaña de monitoreo se reportó una predominancia en las cargas de sólidos disueltos totales y sólidos fijos totales. Lo anterior, evidencia que la mayor parte del material transportado por el río durante esta jornada fue inorgánico disuelto, asociado a la composición de los vertimientos de las aguas residuales realizados sobre el río, como también, a menores velocidades en la corriente que favorecen la sedimentación del material suspendido y a la ocurrencia de procesos de descomposición en el cuerpo de agua.

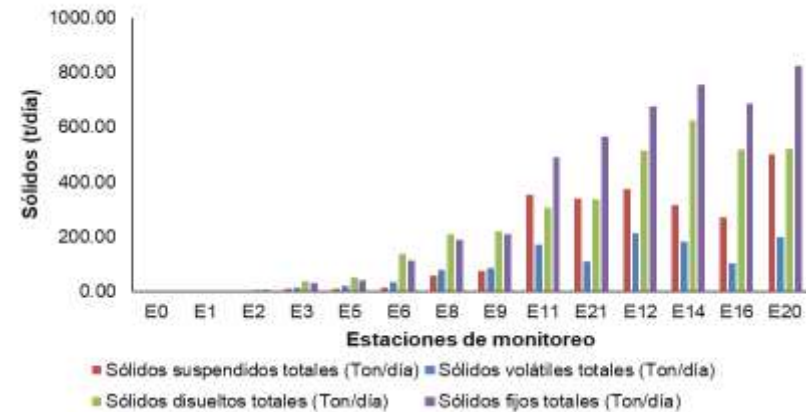
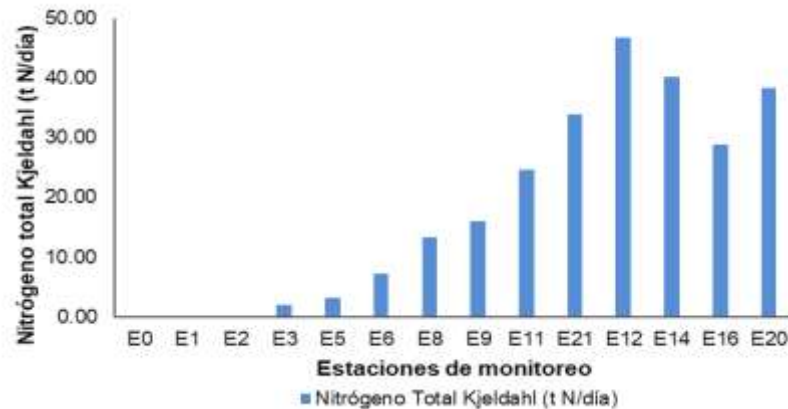
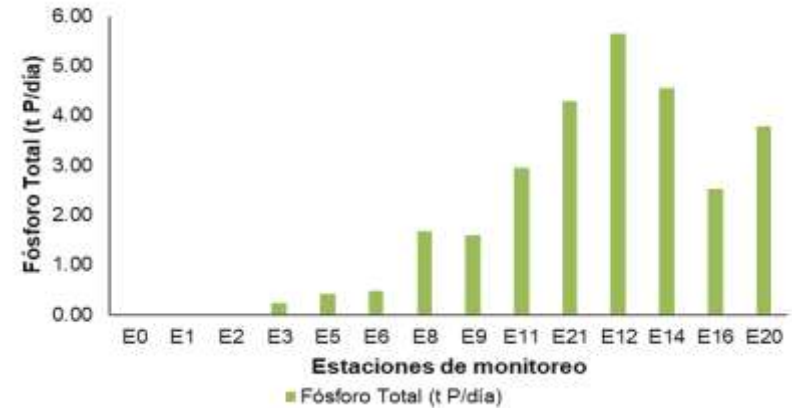
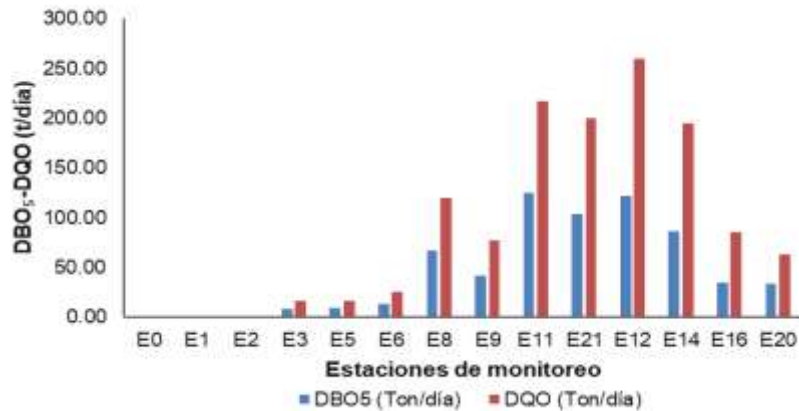
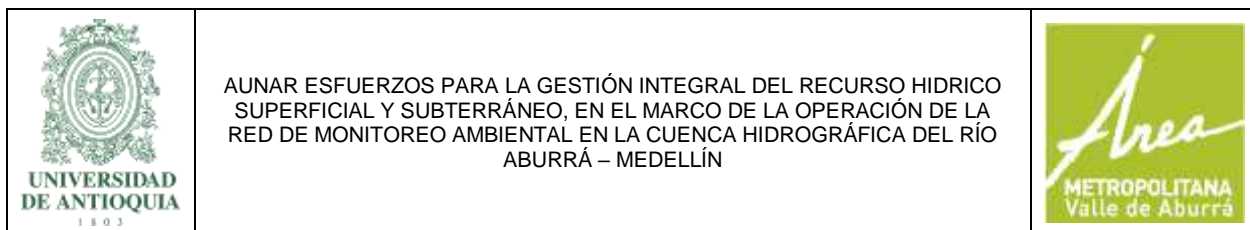


Figura 10. Carga de DBO5, DQO, nutrientes y fracciones de sólidos en las estaciones sobre el eje del río Aburrá-Medellín para la campaña de monitoreo del 19 de febrero de 2020



En E0, E1 y E2 se presentaron las menores cargas para la DBO₅, DQO, nutrientes y sólidos. Estos registros se asociaron a una baja intervención antrópica en este tramo, donde el río recibe las aguas residuales de tipo doméstico provenientes de las veredas La Clara y La Salada, localizadas en zona rural del municipio de Caldas, además de las quebradas La Mina, La Clara y La Salada en el tramo E1-E2. Se destaca que los niveles reportados para las variables DBO₅, DQO, nutrientes y sólidos fueron, en su mayoría, inferiores a los límites de los métodos usados para su cuantificación.

En el tramo comprendido entre las estaciones Ancón Sur (E3) y Ancón Norte (E12), las cargas contaminantes en el río para la DBO₅, DQO, nutrientes y sólidos aumentaron. Este comportamiento fue producto de las aguas residuales descargadas de forma directa al río, asimismo, a los aportes de las quebradas afluentes, las cuales también reciben vertimientos. Se destaca que, en este tramo, tanto el río como sus tributarios, reciben la carga contaminante aportada por las zonas urbanas de los municipios con mayor densidad poblacional en la cuenca. Entre los principales vertimientos realizados en este tramo se destacan la Descarga de la PTAR San Fernando (D1) (localizado entre E5 y E6), la Descarga de la PTAR Aguas Claras (D6) (situada entre E11 y E21) y el bypass proveniente de esta última (ubicado aguas arriba de E11). Quebradas como La Mina (Q25), Doña María (E4), Altavista (Q8), La Picacha (Q20), La Hueso (Q9), La Iguaná (Q11), Santa Elena (Q10), La Rosa (Q12), La Madera (Q13) y La García (E10) también aportan una carga importante en este tramo.

En las estaciones Parque de las Aguas (E14), Papelsa (E16) y Puente Gabino (E20) se presentó una disminución en las cargas contaminantes evaluadas. En este tramo se registró una disminución en los niveles de DBO₅, DQO, nutrientes y sólidos, atribuida a la dilución generada por la descarga de la central hidroeléctrica la Tasajera, la quebrada Ovejas y río Grande. Asimismo, la sedimentación del material suspendido en determinados tramos y la disminución en los vertimientos de aguas residuales debido a una menor intervención antrópica en esta zona (disminución densidad poblacional) influyen en las cargas contaminantes obtenidas entre E14 y E20.

7.1.5 Resultados de los índices ICA e ICA Global para la calificación de la calidad de agua en la campaña de monitoreo sobre el río Aburrá-Medellín realizada el 19 de febrero de 2020

En la Tabla 14 se presentan los resultados obtenidos para los índices ICA, que hace referencia al índice de calidad del agua formulado por el IDEAM para corrientes superficiales para Colombia antes denominado ICACOSU y el índice de calidad ICA Global, que es el índice establecido dentro del proyecto RedRío para el río Aburrá-Medellín en trece (13) estaciones sobre el río Aburrá-Medellín y una (1) sobre el río Porce, durante la campaña completa realizada el día 19 de febrero de 2020. En la Figura 11 se presentan los perfiles para ambos índices de calidad acorde a los resultados obtenidos, entre tanto, en el Mapa 1 y Mapa 2 se muestra su variación espacial.

La clasificación de la calidad del agua obtenida para cada uno de los sitios evaluados según los índices de calidad ICA e ICA Global implementados, se asocia a las variables incluidas para su cálculo. El ICA califica la calidad del agua a partir de las variables fisicoquímicas DQO, DBO₅, fósforo total, nitrógeno total Kjeldahl, porcentaje de oxígeno disuelto, conductividad eléctrica,

sólidos suspendidos totales y pH del agua. Entretanto, el ICA Global clasifica la calidad del agua teniendo en cuenta variables fisicoquímicas e hidrobiológicas, entre las cuales están la DQO, fósforo total, nitrógeno total Kjeldahl, concentración de oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y BMWP/Col. Se resalta que el ICA Global se obtuvo a partir del registro histórico obtenido en la Red de monitoreo, de modo que este índice se adapta específicamente a las condiciones del río Aburrá-Medellín y en comparación con el ICA, este permite evaluar la calidad del agua de manera integral puesto que incluye variables fisicoquímicas e hidrobiológicas.

El conjunto de datos registrado para los índices de calidad evaluados evidenció un deterioro en la calidad del río. Entre las estaciones Reserva Alto de San Miguel (E0) y Primavera (E2) la calidad del agua se catalogó entre buena y aceptable, mientras que en el tramo comprendido entre las estaciones Ancón Sur (E3) y Parque de las Aguas (E14) osciló entre regular y muy mala. Por último, en los sitios de monitoreo Papelsa (E16) y Puente Gabino (E20) se observó una leve recuperación respecto a E14, puesto que la calidad del agua se clasificó entre regular y mala.

Tabla 14. Índices de calidad en el río Aburrá–Medellín para la campaña del 19 de febrero de 2020

ESTACIÓN	CÓDIGO	ICA	ICA CLASIFICACIÓN CALIDAD	ICA_GLOBAL	ICA_GLOBAL CLASIFICACIÓN CALIDAD
Reserva Alto de San Miguel	E0	0.89	Aceptable	2.39	Buena
San Miguel	E1	0.90	Aceptable	2.70	Buena
Primavera	E2	0.85	Aceptable	3.68	Aceptable
Ancón Sur	E3	0.60	Regular	9.13	Mala
Antes de San Fernando	E5	0.55	Regular	10.57	Mala
Después de San Fernando	E6	0.57	Regular	10.93	Mala
Aula Ambiental	E8	0.41	Mala	13.13	Muy Mala
Puente Acevedo	E9	0.39	Mala	12.83	Muy Mala
Puente Machado	E11	0.28	Mala	14.30	Muy Mala
Niquía	E21	0.25	Muy Mala	14.39	Muy Mala
Ancón Norte	E12	0.30	Mala	14.05	Muy Mala
Parque de las Aguas	E14	0.32	Mala	13.90	Muy Mala
Papelsa	E16	0.64	Regular	9.30	Mala
Puente Gabino	E20	0.66	Regular	8.68	Regular

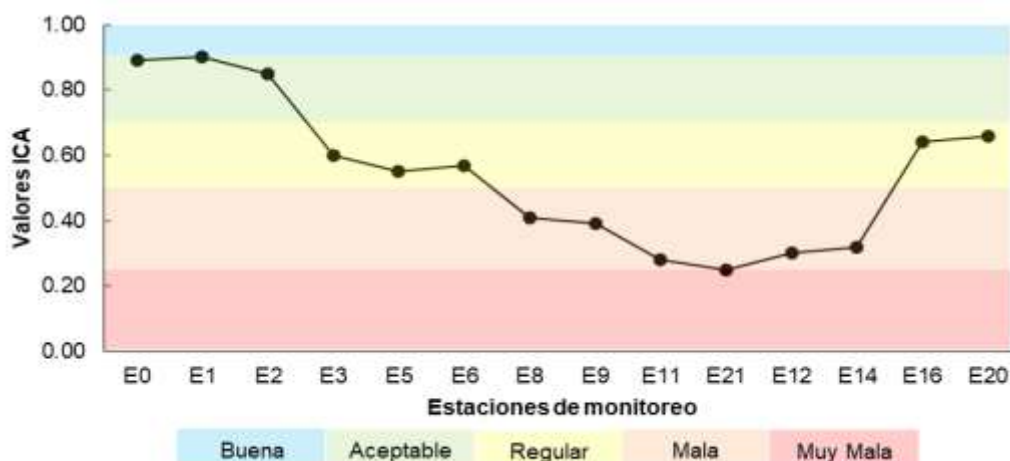
La calidad del agua en la presente campaña de monitoreo estuvo influenciada por los bajos caudales registrados para el río, asociado a una disminución en las precipitaciones en la cuenca durante la temporada seca que se presenta entre diciembre y febrero (CORANTIOQUIA et al., 2018). Se destaca que, según el comportamiento observado para el río en el transcurso de la operación de RedRío, en época seca el caudal base del río y de sus afluentes disminuye, de modo que, una parte significativa del caudal del río corresponde a la masa de aguas residuales vertidas en la cuenca y que la corriente asimila y transporta, por lo que se presenta una mayor concentración en los contaminantes transportados por la corriente y sus tributarios.

La calidad del agua en las estaciones Reserva Alto de San Miguel (E0), San Miguel (E1) y Primavera (E2) osciló entre buena y aceptable, según los datos obtenidos para ambos índices. Estos resultados se relacionan con la baja intervención antrópica en la zona de influencia de los sitios de monitoreo. La calidad del agua en E0 se asocia a la existencia de una zona de protección ambiental como lo es la Reserva Forestal Protectora Regional Alto de San Miguel, que contribuye a conservar y proteger el recurso hídrico en la parte alta de la cuenca. No obstante, la calidad del

agua en E1 y E2 estuvo influenciada por las aguas residuales de tipo doméstico descargadas a la corriente, provenientes de las veredas La Clara y La Salada, sumado a tributarios de importancia en la zona como las quebradas La Mina y La Salada, que presentan un incremento en los asentamientos comerciales e industriales en sus correspondientes subcuencas.

Entre las estaciones Primavera (E2) y Ancón Sur (E3) se presentó un cambio en los valores que indican un detrimento en la calidad y por tanto cambios en la clasificación de la calidad de los índices de calidad del agua, lo que evidencia un deterioro en sus condiciones, el cual se asocia a la intensificación en las actividades antrópicas generadoras de cargas contaminantes vertidas o transportadas a la corriente, puesto que en este tramo se presenta la transición en la cuenca de zona rural a la zona urbana, dónde el río Aburrá-Medellín es receptor de vertimientos de aguas residuales tratados y sin tratar principalmente del Municipio de Caldas y parte de La Estrella y Sabaneta.

En el tramo comprendido entre las estaciones Ancón Sur (E3) y Después de San Fernando (E6) la calidad del agua fue catalogada como regular según el ICA y como mala de acuerdo con el ICA Global. El deterioro evidenciado entre E3 y E6 es una respuesta al incremento en la actividad antrópica generadora de cargas contaminantes asociada con la urbanización de los municipios localizados en el sur de la cuenca (Caldas, La Estrella, Sabaneta, Envigado e Itagüí), cargas contaminantes aportada al río a través de vertimientos directos de las aguas residuales generadas en estos municipios, como también a la aportada a través de quebradas como La Grande (Q3), La Doctora (Q5), La Mina (Q25) y Doña María (E4), entre otras. Se destaca que previo a E6 se localiza la Descarga de la PTAR San Fernando (D1), la cual aporta carga contaminante en este tramo, por el vertimiento de las aguas residuales tratadas mediante un tratamiento secundario provenientes de una porción de los municipios del sur de la cuenca.



a. ICA



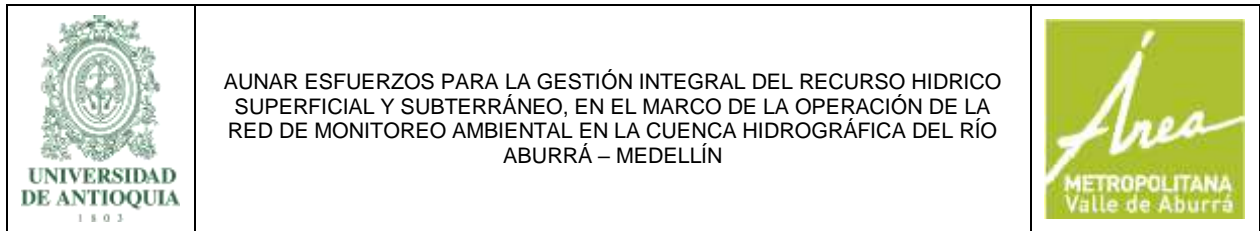
b. ICA Global

Figura 11. Índices de calidad en el río Aburrá–Medellín para la campaña del 19 de febrero de 2020

Las condiciones más críticas en la calidad del río se registraron en el tramo comprendido entre las estaciones Aula Ambiental (E8) y Parque de las Aguas (E14). Según los resultados obtenidos, la calidad del agua entre E8 y E14 se clasificó como mala, de acuerdo con el ICA, excepto en Niquiá (E21), estación en la cual la calidad del agua se catalogó como muy mala. Para el caso del índice ICA Global, la calidad del agua en este tramo se catalogó como muy mala, donde E21 registró el mayor valor para este índice.

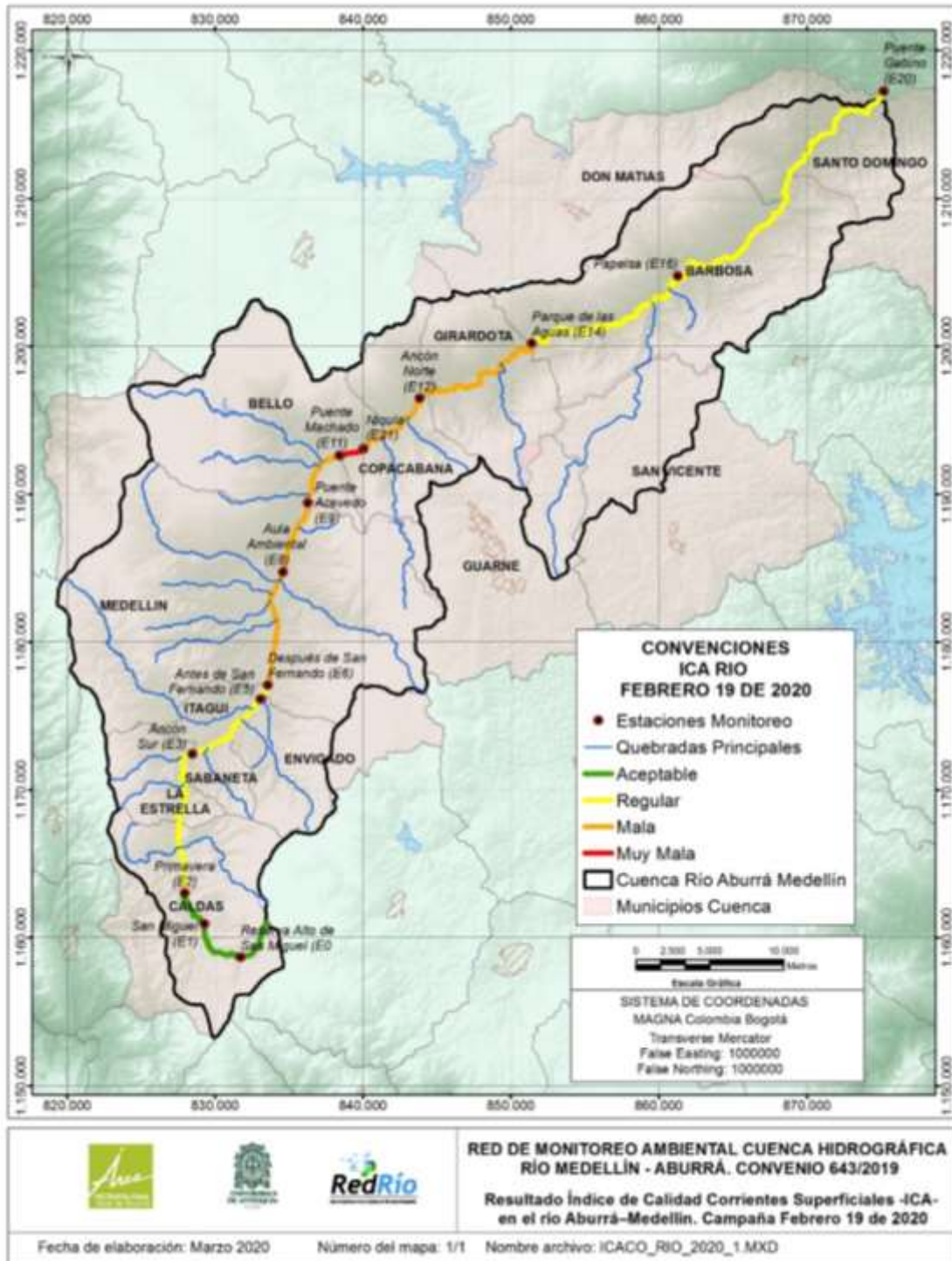
Lo anterior se debe a que en este tramo el río recibe las aguas residuales que aún no se encuentran conectadas a los colectores e interceptores de los municipios más urbanizados de la cuenca (Medellín y Bello), además de los vertimientos provenientes de los municipios de Copacabana y Girardota y del sector industrial asentado en la zona norte de la cuenca. Asimismo, los resultados en este tramo se vinculan a la carga contaminante acumulada, transportada desde el sur de la cuenca y el aporte de las quebradas que tributan en este, principalmente Altavista (Q8), La Picacha (Q20) La Hueso (Q9), Santa Elena (Q10), La Iguaná (Q10), La Rosa (Q12), La Madera (Q13) y La García (E10), las cuales se caracterizan por presentar una calidad del agua entre regular y muy mala según los datos obtenidos para los índices ICA e ICA Quebradas durante el Convenio 1050 de 2016 y el Convenio 643 de 2019 (campaña de monitoreo realizada el 28 y 29 de agosto de 2019) (AMVA, 2016; AMVA, 2020). Se destaca que el mayor deterioro en la calidad del río se presentó en E21, lo cual puede estar vinculado a la Descarga de la PTAR Aguas Claras (D6) y al bypass de aguas residuales no tratadas que estuvo vertiendo aguas arriba de E11, durante la campaña de muestreo.

En la estación Papelsa (E16) la corriente presentó una leve mejoría en la calidad del agua de acuerdo con los resultados obtenidos, la calidad del agua cambió de mala a regular según el ICA y de muy mala a mala según el ICA Global. Lo anterior, se relaciona con la dilución de los contaminantes transportados por el río, generada a partir de la descarga de las aguas turbinadas provenientes de la central hidroeléctrica La Tasajera (D4) y a la contribución de quebradas afluentes poco intervenidas ubicadas en la zona como Ovejas (Q30). Se destaca que en la

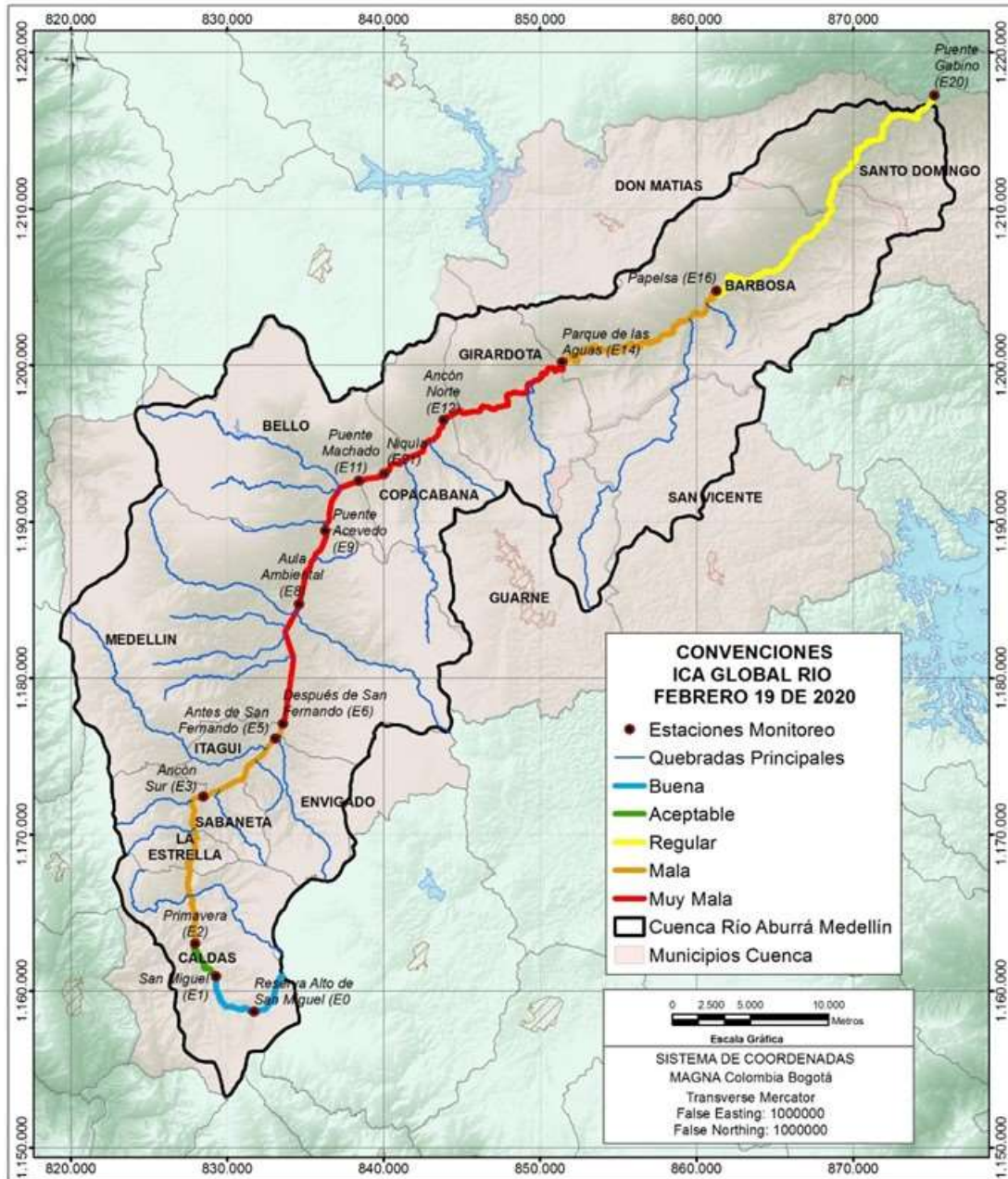


campana de monitoreo se reportaron caudales similares en E14 y D4. Según los aforos realizados por SIATA, en E14 se aforo un caudal correspondiente a $18.61 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que en D4 de $16.32 \text{ m}^3/\text{s}$. lo que resalta la importancia del ingreso de D4 al río Aburrá-Medellín en el aporte a la dilución de las cargas contaminantes. Por último, en la estación Puente Gabino (E20) la calidad del agua se calificó como regular de acuerdo con ambos índices. Este resultado también se relacionó con procesos de dilución debido a la confluencia entre el río Aburrá-Medellín y río Grande, sumado igualmente a los tributarios de buena calidad existentes en la zona.

Se destaca que la mejora en la calidad del agua evidenciada entre E16 y E20 respecto al tramo entre E3 y E16 se relaciona a su vez con las condiciones hidráulicas del cauce, que favorecen la oxigenación de la corriente en zonas de régimen turbulento y la sedimentación de material suspendido en zonas de baja pendiente. Se resalta también que en este tramo disminuye la intervención antrópica sobre el río Aburrá-Medellín y río Porce y sus tributarios debido a una menor densidad poblacional y a que los usos predominantes del suelo se relacionan con actividades agrosilvopastoriles, lo cual representa una disminución en las cargas contaminantes vertidas a la corriente respecto al tramo entre E3 y E16 en la cual predomina el uso del suelo urbano.



Mapa 1. Índice de Calidad de Corrientes Superficiales - ICA (IDEAM) río Aburrá-Medellín campaña del 19 de febrero de 2020



Mapa 2. Índice de Calidad de Agua Global - ICA Global (RedRío) río Aburrá-Medellín campaña del 19 de febrero de 2020

7.1.6 Medición de color ADMI y Triestimular en monitoreo de muestra Completa realizado el 19 de febrero de 2020

Entre las variables medidas en la Red con la finalidad de caracterizar fisicoquímicamente el río está el color verdadero. Esta variable se determina a través del método Hazen APHA/Pt-Co, método apto para aguas naturales y residuales domésticas con presencia de sustancias orgánicas, húmicas y fúlvicas, puesto que estas le aportan una tonalidad amarilla al agua (Martínez y Osorio, 2018). Sin embargo, el río Aburrá-Medellín es receptor de aguas residuales domésticas y no domésticas, estas últimas se caracterizan por tener una amplia variabilidad en sus perfiles de color, por lo que el método Hazen APHA/Pt-Co no es idóneo (AMVA, 2015a). En ese sentido, se evaluó el color ADMI y triestimular, dos alternativas al método Hazen, en trece (13) estaciones sobre el río Aburrá-Medellín y una (1) en el río Porce con la finalidad de analizar su variabilidad espacio-temporal en términos de la calidad del agua.

7.1.6.1 Muestras Puntuales

En la Tabla 15 se presentan los resultados obtenidos para las variables fisicoquímicas medidas *in situ* y el conjunto de datos registrados para el color ADMI y Triestimular, medidos en el espectrofotómetro y el software de NANOCOLOR UV/VIS II, propiedad del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, correspondiente a las muestras puntuales tomadas a las 06:00, 09:00, 12:00, 15:00 y 18:00 horas en doce (12) estaciones localizadas en el río Aburrá-Medellín y una (1) sobre el río Porce. Adicionalmente, en la Figura 12, se ilustran los resultados para color ADMI y Triestimular en horas de la mañana y en horas de la tarde.

Tabla 15. Color ADMI, triestimular y variables fisicoquímicas de las muestras puntuales en estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020

ESTACIÓN	HORA	ADMI UNIDADES DE COLOR ADMI	COLOR TRIESTIMULAR			CE µS/cm	T Ambiente °C	T Agua °C	pH U de pH	OD mg/L
			436 nm (m ⁻¹)	525 nm (m ⁻¹)	620 nm (m ⁻¹)					
San Miguel (E1)	6:00	3.00	0.10	0.00	0.00	34.00	12.00	15.80	7.59	7.62
	9:00	4.20	0.10	0.00	0.00	35.00	21.00	16.90	7.68	7.57
	12:00	3.00	0.20	0.00	0.00	38.00	25.00	21.50	7.72	6.88
	15:00	4.80	0.10	0.00	0.00	38.00	25.00	21.50	7.68	6.73
	18:00	4.20	0.10	0.00	0.00	38.00	22.00	20.30	7.64	6.90
Primavera (E2)	6:00	12.00	0.50	0.40	0.40	67.70	13.00	15.00	7.18	8.22
	9:00	12.00	0.70	0.40	0.40	68.10	21.00	17.60	7.29	7.73
	12:00	13.00	0.30	0.00	0.00	70.10	25.00	21.60	7.30	7.14
	15:00	14.00	0.40	0.10	0.10	69.00	25.00	22.40	7.18	6.92
Ancón Sur (E3)	18:00	12.00	0.50	0.30	0.20	69.90	22.00	20.50	7.12	7.29
	6:00	9.90	0.50	0.20	0.10	124.00	14.00	17.50	7.92	7.34
	9:00	15.00	0.50	0.10	0.00	148.00	24.00	18.10	8.04	7.18
	12:00	19.00	0.50	0.20	0.10	199.00	27.00	20.60	8.01	6.73
	15:00	18.00	0.70	0.20	0.00	192.00	29.00	23.30	7.94	6.12
	18:00	15.00	0.50	0.10	0.00	233.00	26.00	22.30	7.87	5.56
	6:00	19.00	0.80	0.30	0.20	231.00	20.00	19.00	7.66	7.37
	9:00	25.00	1.10	0.80	0.80	288.00	23.00	20.30	7.67	6.76



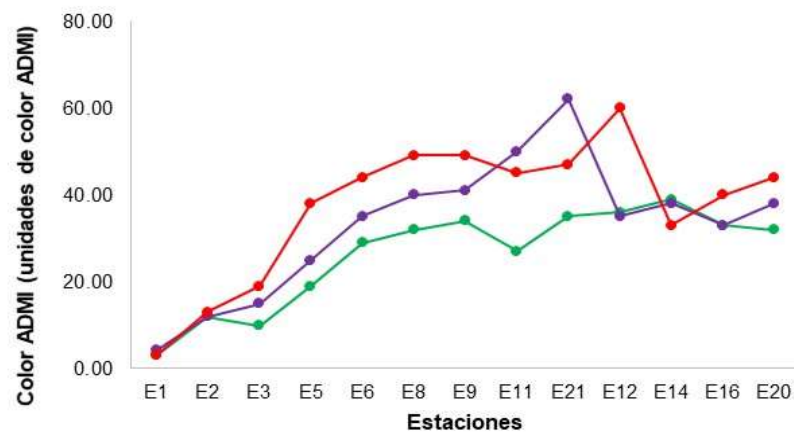
AUNAR ESFUERZOS PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HIDRICO SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO, EN EL MARCO DE LA OPERACIÓN DE LA RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO ABURRÁ – MEDELLÍN



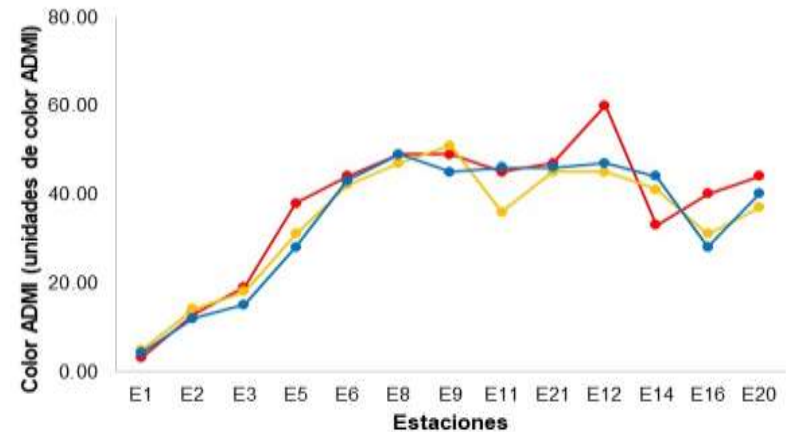
ESTACIÓN	HORA	ADMI UNIDADES DE COLOR ADMI	COLOR TRIESTIMULAR			CE µS/cm	T Ambiente °C	T Agua °C	pH U de pH	OD mg/L
			436 nm (m ⁻¹)	525 nm (m ⁻¹)	620 nm (m ⁻¹)					
Antes de San Fernando (E5)	12:00	38.00	1.60	0.70	0.60	241.00	26.00	25.30	7.71	6.32
	15:00	31.00	1.10	0.60	0.50	253.00	28.00	25.90	7.64	6.06
	18:00	28.00	1.20	0.70	0.50	247.00	26.00	24.30	7.48	6.02
Después de San Fernando (E6)	6:00	29.00	1.20	0.50	0.40	492.00	21.00	21.50	7.54	6.73
	9:00	35.00	1.60	0.70	0.60	677.00	22.00	22.50	7.35	5.81
	12:00	44.00	1.80	0.80	0.70	610.00	29.00	25.30	7.44	5.64
	15:00	42.00	1.90	0.90	0.70	509.00	28.00	26.50	7.24	5.04
Aula Ambiental (E8)	18:00	43.00	1.80	0.90	0.70	531.00	28.00	26.60	7.49	5.79
	6:00	32.00	1.40	0.80	0.60	493.00	21.00	21.10	7.87	4.80
	9:00	40.00	1.80	0.90	0.70	528.00	24.00	21.50	7.82	3.65
	12:00	49.00	2.00	1.20	0.90	647.00	30.00	24.40	7.40	3.08
Puente Acevedo (E9)	15:00	47.00	2.10	1.20	0.90	594.00	31.00	25.40	7.71	2.35
	18:00	49.00	2.00	1.20	0.90	580.00	29.00	24.60	7.75	2.07
	6:00	34.00	1.70	1.00	0.70	523.00	20.00	21.00	7.66	4.41
	9:00	41.00	1.50	0.80	0.50	549.00	25.00	21.50	7.60	2.69
Puente Machado (E11)	12:00	49.00	2.00	1.20	0.90	569.00	33.00	24.60	7.50	1.26
	15:00	51.00	2.30	1.40	1.10	605.00	33.00	25.10	7.51	1.16
	18:00	45.00	1.50	0.80	0.50	576.00	30.00	25.00	7.48	1.97
	6:00	27.00	1.20	0.50	0.30	564.00	20.00	20.70	7.64	4.79
Niquía (E21)	9:00	50.00	1.80	0.50	0.20	570.00	25.00	24.00	7.33	1.88
	12:00	45.00	1.30	0.60	0.40	638.00	30.00	27.00	7.43	1.92
	15:00	36.00	1.50	0.70	0.40	652.00	32.00	27.50	7.47	2.06
	18:00	46.00	1.40	0.90	0.50	639.00	29.00	25.40	7.45	1.94
Ancón Norte (E12)	6:00	35.00	1.40	0.60	0.30	597.00	21.00	21.50	7.57	3.34
	9:00	62.00	1.40	0.60	0.30	673.00	25.00	23.00	7.27	0.69
	12:00	47.00	2.30	0.80	0.30	673.00	31.00	26.90	6.94	0.20
	15:00	45.00	1.90	0.80	0.50	694.00	33.00	28.70	7.08	0.34
Parque de las Aguas (E14)	18:00	46.00	2.00	0.90	0.50	701.00	28.00	26.00	7.33	0.27
	6:00	36.00	1.70	0.80	0.40	587.00	19.00	21.62	7.61	2.85
	9:00	35.00	1.70	0.80	0.50	595.00	25.00	21.74	7.62	1.83
	12:00	60.00	1.40	0.60	0.30	696.00	30.00	24.22	7.54	0.39
Papelsa (E16)	15:00	45.00	1.60	0.60	0.30	721.00	32.00	25.83	7.52	0.05
	18:00	47.00	1.70	0.70	0.30	750.00	30.00	26.25	7.52	0.04
	6:00	39.00	1.20	0.40	0.20	864.00	18.00	22.40	7.44	0.93
	9:00	38.00	1.20	0.40	0.20	857.00	25.00	23.00	7.45	1.08
Puente Gabino (E20)	12:00	33.00	1.60	0.90	0.40	794.00	31.00	25.60	7.43	1.81
	15:00	41.00	1.20	0.40	0.20	839.00	32.00	26.30	7.49	0.67
	18:00	44.00	1.20	0.40	0.10	865.00	29.00	25.80	7.49	0.47
	6:00	33.00	1.10	0.50	0.30	324.00	18.00	20.20	7.53	7.16
Puente Gabino (E20)	9:00	33.00	1.40	0.70	0.60	282.00	26.00	21.50	7.45	6.96
	12:00	40.00	1.50	0.80	0.60	265.00	31.00	24.60	7.34	6.56
	15:00	31.00	1.60	0.80	0.70	262.00	32.00	24.70	7.38	6.63
	18:00	28.00	1.70	1.00	0.80	295.00	29.00	24.20	7.44	6.49
Puente Gabino (E20)	6:00	32.00	0.10	0.00	0.00	299.00	21.00	21.00	7.50	6.91
	9:00	38.00	0.10	0.00	0.00	295.00	24.00	21.90	7.46	6.98
	12:00	44.00	0.20	0.00	0.00	289.00	32.00	23.70	7.46	6.83
	15:00	37.00	0.10	0.00	0.00	273.00	34.00	26.30	7.44	6.50
	18:00	40.00	0.10	0.00	0.00	277.00	30.00	24.20	7.50	6.96

*CE: Conductividad eléctrica

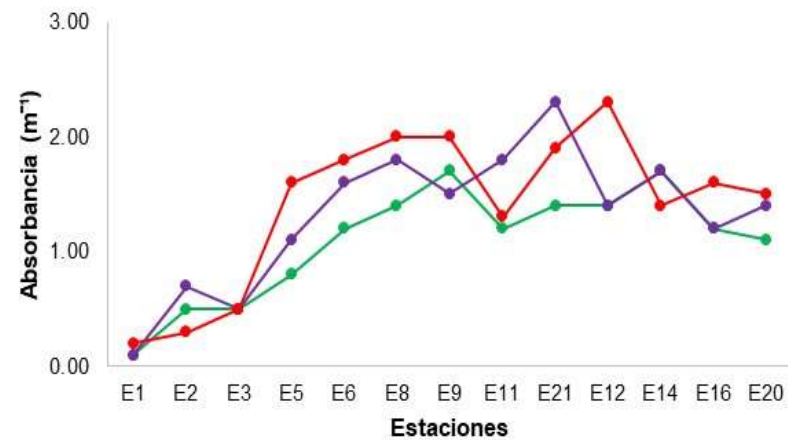
*OD: Oxígeno disuelto



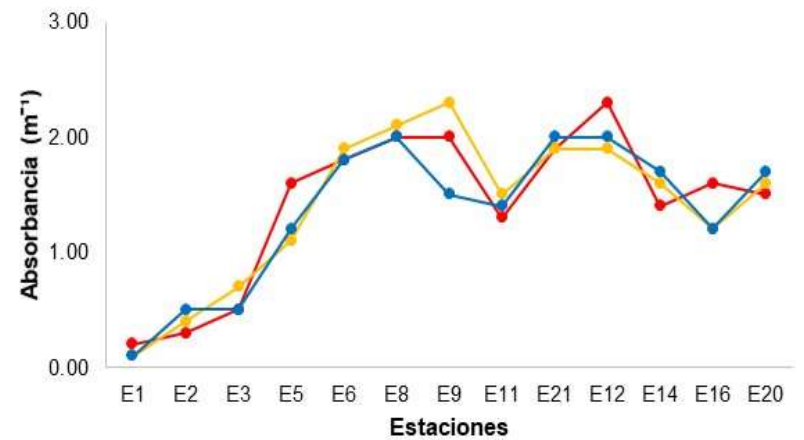
a. Color ADMI (6:00-12:00 horas)



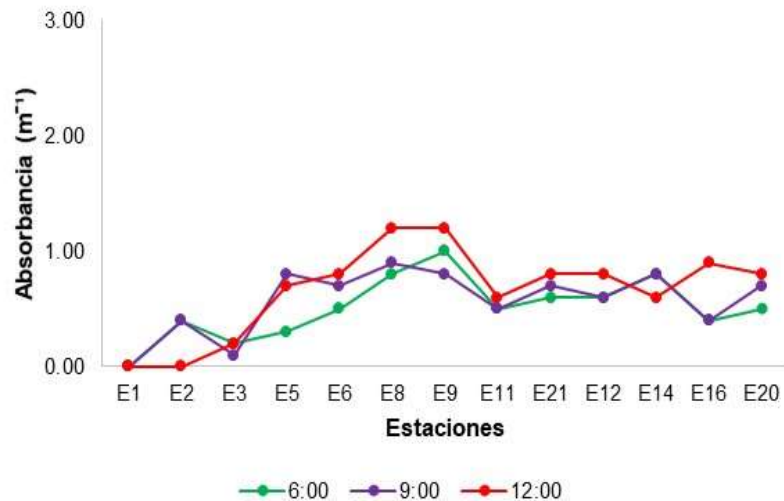
b. Color ADMI (12:00-18:00 horas)



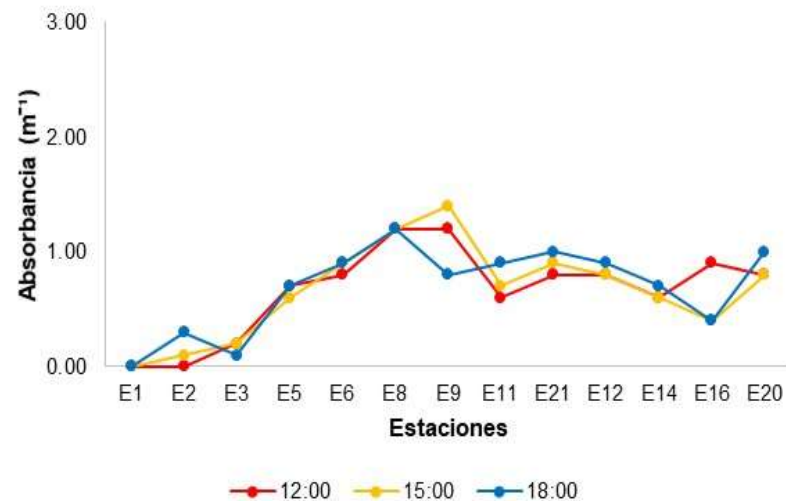
c. Longitud de onda 436 (6:00-12:00 horas)



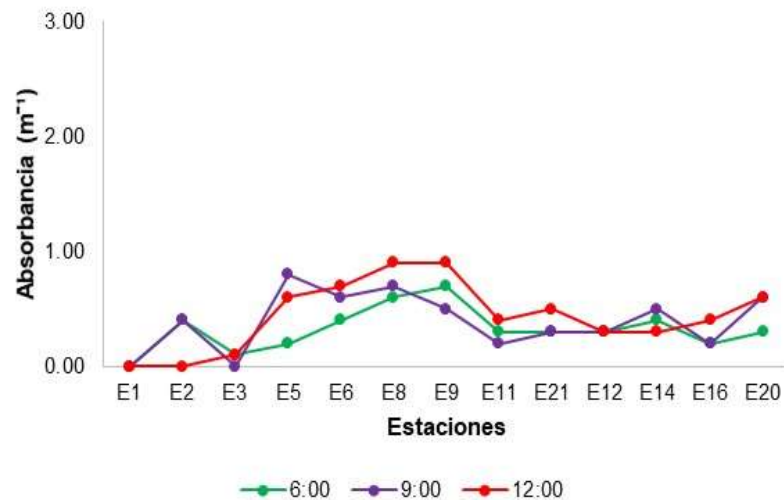
d. Longitud de onda 436 (12:00-18:00 horas)



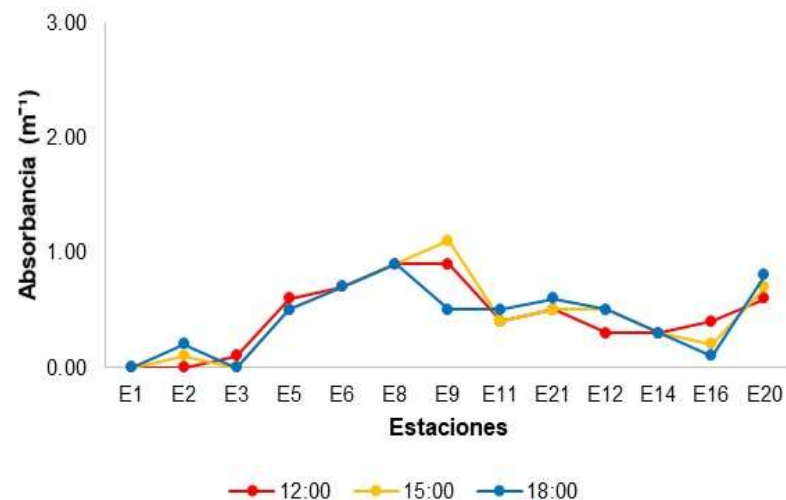
e. Longitud de onda 525 (6:00-12:00 horas)



f. Longitud de onda 525 (12:00-18:00 horas)

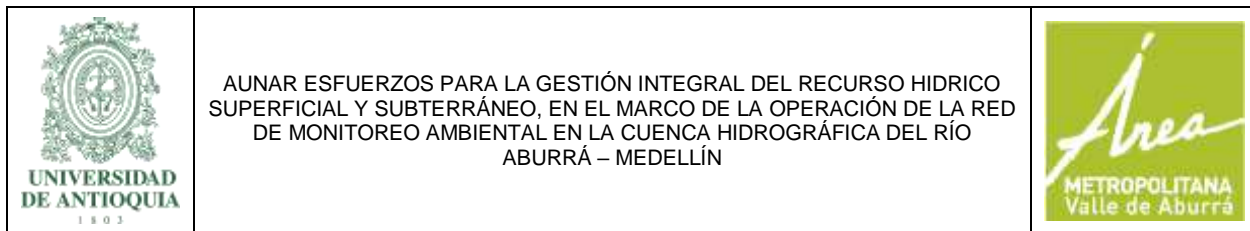


g. Longitud de onda 620 (6:00-12:00 horas)



h. Longitud de onda 620 (12:00-18:00 horas)

Figura 12. Color ADMI y Triestimular de las muestras puntuales en estaciones sobre el río Aburrá-Medellín, 19 de febrero de 2020



El conjunto de datos registrado para el color ADMI y Triestimular evidenció un comportamiento variable durante la jornada de monitoreo. Se destaca que para ambas variables se observó una mayor dispersión en el conjunto de datos en horas de la mañana en contraste con los registros tomados en la tarde, en la cual los datos evidenciaron una menor variabilidad entre horas. Durante la mañana, los mayores valores tanto para el color ADMI como Triestimular se registraron a las 12:00 horas, mientras que en la tarde se observó una mayor similitud entre los registros obtenidos a las 12:00, 15:00 y 18:00 horas. Se resalta que los mayores valores reportados para el color Triestimular correspondieron a la longitud de onda de 436 nm, mientras que los menores valores se registraron a 620 nm.

Los registros más bajos se presentaron en la estación San Miguel (E1), para el color ADMI se obtuvieron valores entre 3.00 y 4.80 unidades de color ADMI, mientras que para el color Triestimular, se obtuvieron datos entre 0.10 y 0.20 m^{-1} a 436 nm y no se detectó en las longitudes de onda de 525 y 620 nm. Los mayores registros para el color ADMI se presentaron en el tramo Después de San Fernando (E6) y Ancón Norte (E12), donde los datos oscilaron entre 27.00 y 62.00 unidades de color ADMI, observados en E11 a las 6:00 horas y en E21 a las 9:00 horas respectivamente. En cuanto al color Triestimular, se obtuvieron valores en el tramo E5-E20, los mayores registros correspondieron a 2.30, 1.40 y 1.10 m^{-1} para las longitudes de onda 436, 525 y 620 nm respectivamente en la estación Puente Acevedo a las 15:00 horas.

En las estaciones San Miguel (E1) y Primavera (E2) se obtuvieron los valores mas bajos para ambas variables, asociado a una menor intervención en este tramo debido a que estos sitios de monitoreo se localizan en zona rural y aguas abajo de un área protegida. Se destaca que el conjunto de datos registrados en E1 y E2 se vincula a sustancias disueltas que son aportadas por las aguas residuales domésticas provenientes de las veredas La Clara y La Salada, pero también a fuentes naturales como resultado de la descomposición de material vegetal. Lo anterior coincide con los registros obtenidos para la conductividad eléctrica a lo largo de la jornada, en la cual los menores registros se obtuvieron en E1 y E2.

Los registros obtenidos en el tramo comprendido entre las estaciones Ancón Sur (E3) y Parque de las Aguas (E14) se vinculan a los aportes directos de aguas residuales domésticas y no domésticas realizados sobre el río, como también, a la carga contaminante disuelta aportada por las quebradas afluentes. Entre los principales aportes directos realizados al río en este tramo se destacan la Descarga de la PTAR San Fernando (D1) y la Descarga de la PTAR Aguas Claras (D6) puesto que la carga contaminante de tipo disuelto proveniente de estas es significativa teniendo en cuenta los caudales tratados y que en ambas plantas no se realiza remoción de iones. Por otro lado, las quebradas también representan un aporte de material disuelto a la corriente, entre las que se destacan principalmente aquellas corrientes localizadas en los municipios de Medellín y Bello, como Altavista (Q8), La Hueso (Q9), Santa Elena (Q10), La Rosa (Q12), La Madera (Q13), El Hato (Q14) y La García (E10). Se resalta que entre las estaciones Después de San Fernando (E6) y Parque de las Aguas (E14) se presentaron los mayores valores para el color ADMI y Triestimular, tramo en el cual también se reportaron los registros más altos en la conductividad eléctrica de la corriente. Los registros obtenidos en las estaciones Papelsa (E16) y Puente Gabino (E20) se vinculan a los aportes de quebradas como Ovejas (Q30), la descarga de la central hidroeléctrica La Tasajera y la confluencia entre el río Aburrá-Medellín y

río Grande, los cuales contribuyen a diluir los contaminantes transportados por el río Aburrá-Medellín.

7.1.6.2 Muestras compuestas

En la Tabla 16 se muestran los resultados de las variables fisicoquímicas y los valores de color ADMI y Triestimar para las muestras compuestas tomadas en trece (13) estaciones sobre el río Aburrá-Medellín y una (1) sobre el río Porce, entretanto, en la Figura 13 se ilustran los datos obtenidos. Se destaca que los valores registrados en la Tabla 16 y Figura 13(a) y (b) para la estación Reserva Alto de San Miguel (E0) corresponden a la muestra tomada a las 12:00 horas.

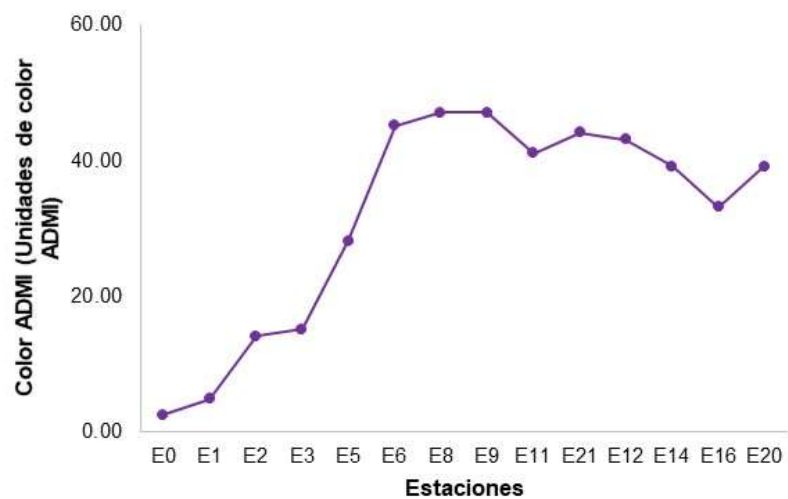
Tabla 16. Color ADMI, Triestimar y variables fisicoquímicas de las muestras compuestas en estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020

ESTACIÓN	ADMI (Unidades de Color ADMI)	Absorbancia			CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	SDT (mg/L)	DQO (mg/L)	COLOR VERDADERO (UPC)
		436 nm (m^{-1})	525 nm (m^{-1})	620 nm (m^{-1})				
Reserva Alto de San Miguel (E0)	2.40	0.00	0.00	0.00	27.55	25.00	<10.00	<10.00
San Miguel (E1)	4.80	0.10	0.00	0.00	36.77	43.00	<10.00	<10.00
Primavera (E2)	14.00	0.20	0.00	0.00	68.77	57.00	<10.00	<10.00
Ancón Sur (E3)	15.00	0.60	0.20	0.10	182.15	129.00	58.90	17.28
Antes de San Fernando (E5)	28.00	1.00	0.60	0.40	254.46	161.00	54.20	22.28
Después de San Fernando (E6)	45.00	2.10	1.30	0.90	573.31	327.00	61.60	52.46
Aula Ambiental (E8)	47.00	2.00	1.20	0.90	572.31	391.00	224.00	102.03
Puente Acevedo (E9)	47.00	2.10	1.30	1.00	561.31	310.00	110.00	47.29
Puente Machado (E11)	41.00	1.60	0.70	0.40	618.54	295.00	209.00	49.48
Niquía (E21)	44.00	1.80	0.70	0.40	673.62	323.00	192.00	74.72
Ancón Norte (E12)	43.00	1.70	0.70	0.40	672.39	334.00	168.00	87.68
Parque de las Aguas (E14)	39.00	1.60	0.60	0.30	836.62	388.00	121.00	74.24
Papelsa (E16)	33.00	1.30	0.40	0.20	283.08	151.00	24.80	61.31
Puente Gabino (E20)	39.00	1.40	0.70	0.60	289.00	108.00	13.10	55.95

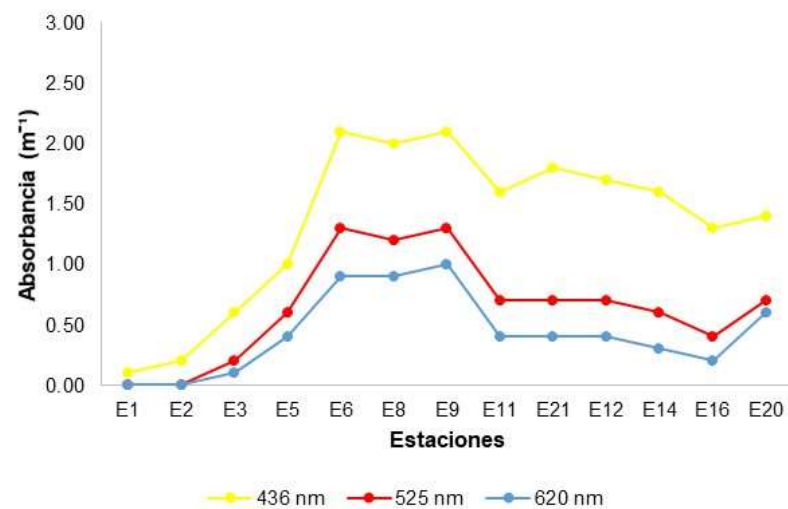
*CE: Conductividad eléctrica

*SDT: Sólidos disueltos totales

*DQO: Demanda química de oxígeno

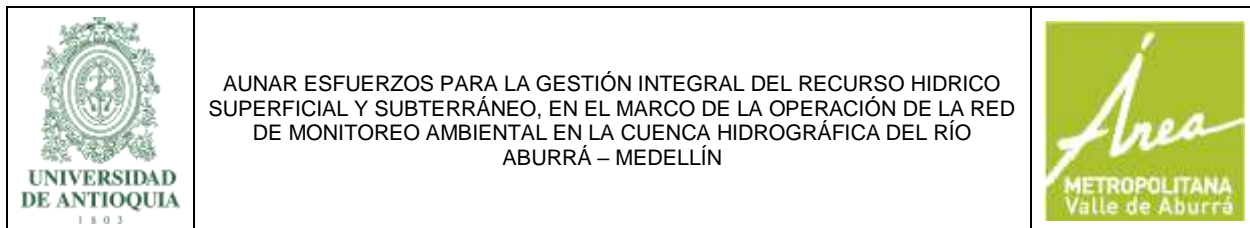


a. Color ADMI



b. Color Triestimular

Figura 13. Color ADMI y Triestimular de las muestras compuestas en estaciones sobre el río Aburrá-Medellín 19 de febrero de 2020

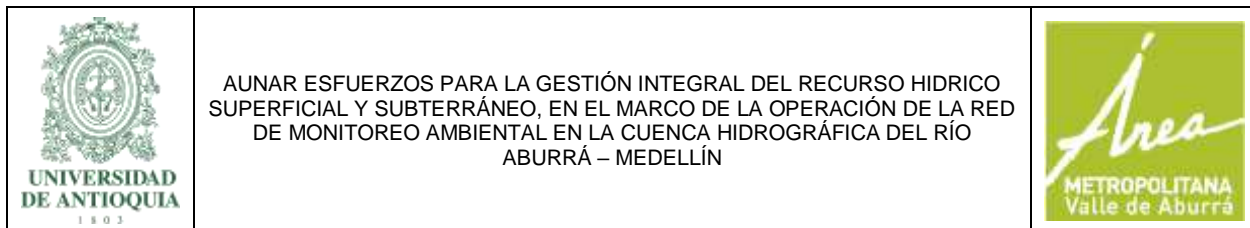


En la estación Reserva San Miguel (E0) se registraron los valores más bajos para el color ADM y triestimular, como también para las variables fisicoquímicas conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y color verdadero. Para el color ADMI se registró un valor de 2.40 unidades de color ADMI, mientras que para el color triestimular se obtuvo un valor de 0.00 m^{-1} para las tres longitudes de onda. Los resultados obtenidos en E0 se vinculan a la descomposición de material vegetal. En las estaciones San Miguel (E1) y Primavera (E2) se reportaron valores de 4.80 y 14.00 unidades de color ADMI y de 0.10 y 0.20 m^{-1} a 436 nm respectivamente, para ambas estaciones no se reportaron valores para las longitudes de onda de 525 y 620 nm. Los registros reportados en E1 y E2 se relacionaron con los aportes de aguas residuales provenientes de las veredas La Clara y El Salado, como a la presencia de sustancias húmicas y fúlvicas. La conductividad eléctrica promedio en E1 y E2 osciló entre 36.77 y 68.77 $\mu S/cm$, mientras que los sólidos disueltos entre 43.00 y 57.00 mg/L, el color verdadero fue inferior al límite de detección del método (<10.00 UPC).

En las estaciones Ancón Sur (E3) y Antes de San Fernando (E5) se observó un incremento en ambas variables, asociado a la carga contaminante de tipo disuelta aportada directamente al río, proveniente de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella e Itagüí o a través de quebradas como La Valeria (Q1), La Miel (Q2), La Grande (Q5), La Doctora (Q3), Doña María (E4) y La Mina (Q25, entre otras. El color ADMI fluctuó 15.00 y 28.00 unidades de color ADMI, mientras que el color triestimular osciló entre 0.60 y 1.00 m^{-1} a 436 nm, 0.20 y 0.60 m^{-1} a 525 nm y 0.10 y 0.40 m^{-1} a 620 nm.

En el tramo comprendido entre las estaciones Después de San Fernando (E6) y Parque de las Aguas (E14) se registraron los valores más altos para el color ADMI y triestimular. La primera variable osciló entre 39.00 y 47.00 unidades de color ADMI, los cuales se registraron en E14 y E8 respectivamente. En cuanto al color triestimular, las absorbancias más altas se registraron en E9 con valores de 2.10, 1.30 y 1.00 m^{-1} para las longitudes de onda de 436, 525 y 620 nm respectivamente. Se resalta que en la estación E6 también se obtuvieron lecturas de 2.10 y 1.30 m^{-1} para las longitudes de onda de 436 y 525 nm de manera correspondiente. Los resultados obtenidos para el color ADMI y triestimular en este tramo coinciden con los registros más altos obtenidos para la conductividad eléctrica promedio, la concentración de sólidos disueltos totales y el color verdadero reportados en el río durante esta campaña de monitoreo.

Entre las estaciones Antes de San Fernando (E5) y Después de San Fernando (E6) se presentó un incremento considerable tanto en el color ADMI como en el color triestimular, lo cual puede asociarse a la carga contaminante de tipo disuelta aportada por la Descarga de la PTAR San Fernando (D1), puesto que entre los procesos de tratamiento implementados en la planta no se realiza remoción de iones. Por lo anterior, el aporte proveniente de la PTAR Aguas Claras (D6) también contribuye a generar un aumento en ambas variables entre las estaciones Puente Machado (E11) y Niquía (E21). Las quebradas localizadas en los municipios de Medellín y Bello, que según el registro histórico obtenido en la Red corresponden a los afluentes que presentan mayor deterioro en su calidad del agua, también aportan compuestos disueltos que contribuyen a incrementar el color en el tramo E6-E14. Entre las principales quebradas se destacan La Hueso (Q9), Santa Elena (Q10), La Rosa (Q12), La Madera (Q13) y La García (E10).



En las estaciones Papelsa (E16) y Puente Gabino (E20) se observó una disminución en los valores registrados respecto a E14. Este comportamiento puede relacionarse con procesos de dilución vinculados al ingreso de la Descarga de la central hidroeléctrica La Tasajera (D4) y a la confluencia entre el río Aburrá-Medellín y río Grande. Se destaca que en E20 se observó un incremento tanto en los registros de color ADMI como en las absorbancias medidas para las tres longitudes de onda evaluadas en el color triestímulo, este aumento puede vincularse con el aporte de compuestos disueltos provenientes de río Grande.

7.1.7 Resultados de monitoreo componente hidrobiológico campaña de muestra completa 19 de febrero de 2020

A continuación, se presentan los resultados de las muestras biológicas de algas perifíticas y macroinvertebrados acuáticos, tomados en la campaña de muestra Completa, sobre trece estaciones del río Aburrá-Medellín y una sobre el río Porce; adicionalmente se realiza el cálculo del Índice biótico BMWP/Col. La metodología para realizar el monitoreo del componente hidrobiológico, desarrollado en la red de monitoreo ambiental del río Aburrá-Medellín RedRío, se detalla en el Manual de Monitoreo - Convenio 643 de 2019.

7.1.7.1 Algas Perifíticas

La comunidad de algas perifíticas ha sido empleada como indicador biológico para la evaluación de la calidad del agua, reconociéndose su capacidad como grupo bioindicador. Las algas perifíticas son sensibles a cambios ambientales en cortos periodos de tiempo y su grado de tolerancia en algunas especies permite deducir o asociar niveles de contaminación, donde su abundancia y composición reflejan las condiciones ambientales del pasado reciente ya que este tipo de comunidad permanece unida al sustrato, siendo testigo confiable de los procesos ocurridos en el sistema (Masseret et al., 1998). Las mediciones periódicas de esta comunidad en combinación con la determinación de variables fisicoquímicas aumentan su valor informativo, constituyendo la base para una correcta evaluación de la calidad del agua (Lobo *et al.*, 2004). Adicionalmente, la integración de medidas biológicas en este caso la composición y estructura de la comunidad perifítica, proporciona un conocimiento más relevante acerca de la ecología de un ambiente acuático (Pajunen et al., 2020)

Durante este muestreo se monitorearon en total 14 estaciones, 13 estaciones ubicadas en el río Aburrá – Medellín y una estación ubicada en el río Porce. En la Tabla 17 se presenta el listado de los morfotipos de algas perifíticas encontradas en esta campaña, en la cual se registraron 20 morfotipos pertenecientes a tres divisiones algales, donde el 60% de los géneros identificados corresponden a la división Bacillariophyta o diatomeas, algas microscópicas unicelulares que viven en casi cualquier tipo de agua, y pueden identificarse típicamente por su pared celular formada de sílice (Round et al., 1990, Ramírez, 2000).

Tabla 17. Listado taxonómico de las algas perifíticas registradas en el río Aburrá-Medellín en la campaña de muestra completa realizada el 19 de febrero de 2020

DIVISION	CLASE	ORDEN	FAMILIA	MORFOTIPO
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Bacillariales	Bacillariaceae	Nitzschia sp.
		Cocconeidales	Achnanthidiaceae	Achnanthidium sp.
			Cocconeidaceae	Cocconeis sp.
		Cymbellales	Cymbellaceae	Cymbella sp.
		Fragilariales	Gomphonemataceae	Gomphonema sp.
		Naviculales	Naviculaceae	Gyrosigma sp.
			Naviculaceae	Navicula sp1.
			Naviculaceae	Navicula sp2.
			Naviculaceae	Stauroneis sp.
			Pinnulariaceae	Pinnularia sp.
Tabellariales	Tabellariaceae	Tabellaria sp.		
	Coscinodiscophyceae	Melosirales	Melosiraceae	Melosira sp.
Chlorophyta	Chlorophyceae			Colonia chlorophyceae
		Oedogoniales	Oedogoniaceae	Oedogonium sp.
	Ulvophyceae	Cladophorales	Cladophoraceae	Cladophora sp.
		Ulotrichales	Ulotrichaceae	Ulothrix sp.
Cyanophyta	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Oscillatoriaceae	Lyngbya sp.
				Oscillatoria sp.
			Phormidium sp.	
	Synechococcales	Pseudanabaenaceae	Pseudanabaena sp.	

En la Foto 5 se muestran algunos organismos identificados en esta campaña. Los géneros *Cocconeis* sp., *Pinnularia* sp. y *Gyrosigma* sp. hacen parte del grupo de las diatomeas, las cuales según el modelo de Margalef (1978) son comunes de ambientes turbulentos y ricos en elementos nutritivos. Por su parte, el género *Oscillatoria* sp. ha sido considerado indicador de polución orgánica (Roldán y Ramírez, 2008).



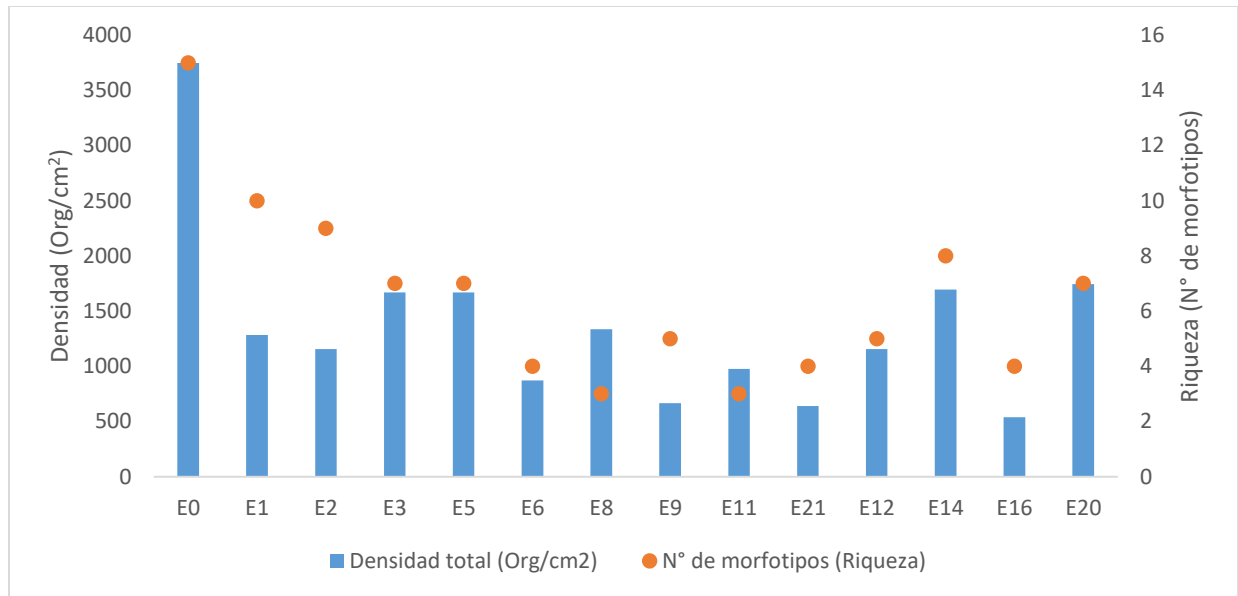
Foto 5. Algunas algas perifíticas encontradas en la campaña de monitoreo realizada el 19 de febrero de 2020. (A) *Cocconeis* sp. (B) *Oscillatoria* sp. (C) *Pinnularia* sp. (D) *Gyrosigma* sp.

En la Tabla 18 se sintetizan los resultados obtenidos para la densidad de algas perifíticas en esta campaña de monitoreo. En general, como ya se mencionó, se encontró una presencia importante de diatomeas, las cuales presentaron la mayor densidad de algas en las estaciones. El hecho de que la mayoría de las algas encontradas sean diatomeas se debe a su pared celular rodeada de silicio, lo que les confiere más peso y en consecuencia mayor adaptación para colonizar sustratos firmes inmersos en las corrientes expuestas a la velocidad, resistiendo a diferentes tipos de contaminación y ambientes turbulentos (Bold y Wynne, 1985). La mayor densidad de morfotipos correspondió al género *Navicula* sp., algunas especies de este género han sido asociadas con aguas contaminadas, debido principalmente a su habitabilidad y sostenibilidad en condiciones ambientales estresantes y aguas turbias, siendo calificadas como buenas indicadores de contaminación (Akinyemi et al., 2007).

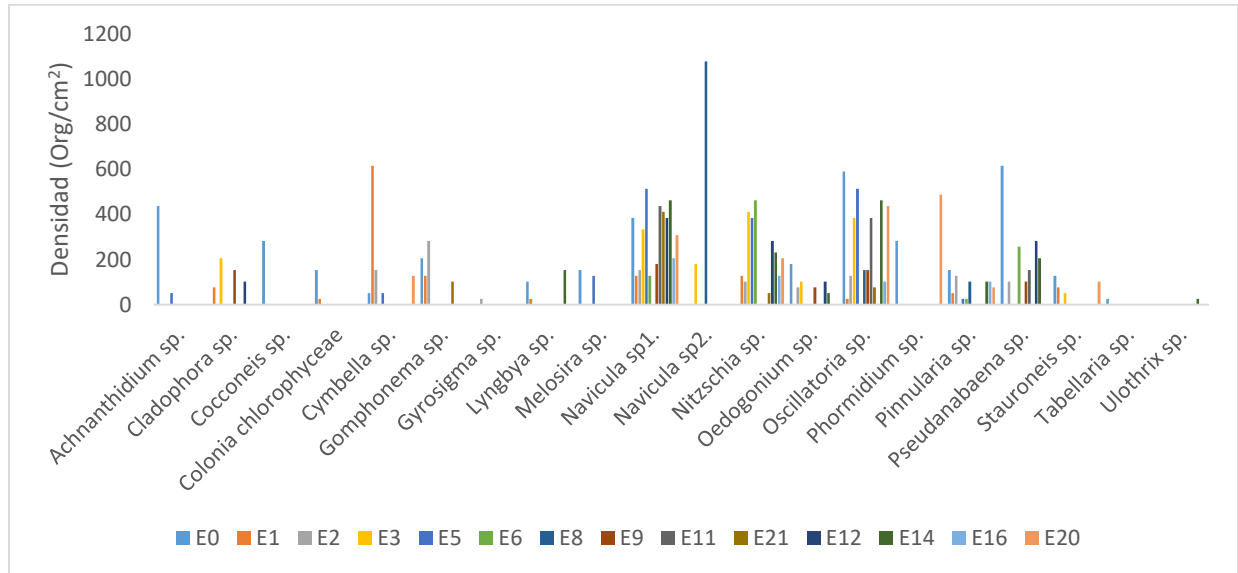
Tabla 18. Densidad de algas perifíticas por unidad de área (Org/cm²) en estaciones de monitoreo en el río Aburrá-Medellín en la campaña de muestra completa realizada el 19 de febrero

MORFOTIPO	E0	E1	E2	E3	E5	E6	E8	E9	E11	E21	E12	E14	E16	E20
Achnanthidium sp.	437				51									
Cladophora sp.		77		205				154			103			
Cocconeis sp.	283													
Colonia chlorophyceae	154	26												
Cymbella sp.	51	616	154		51									128
Gomphonema sp.	205	128	283							103				
Gyrosigma sp.			26											
Lyngbya sp.	103	26										154		
Melosira sp.	154				128									
Navicula sp1.	385	128	154	334	514	128		180	437	411	385	462	205	308
Navicula sp2.				180			1079							
Nitzschia sp.		128	103	411	385	462				51	283	231	128	205
Oedogonium sp.	180		77	103				77			103	51		
Oscillatoria sp.	591	26	128	385	514		154	154	385	77		462	103	437
Phormidium sp.	283													488
Pinnularia sp.	154	51	128		26	26	103					103	103	77
Pseudanabaena sp.	616		103			257		103	154		283	205		
Stauroneis sp.	128	77		51										103
Tabellaria sp.	26													
Ulothrix sp.												26		
Densidad total (Org/cm²)	3750	1284	1156	1669	1669	873	1336	668	976	642	1156	1695	539	1747
Riqueza (N° de morfotipos)	15	10	9	7	7	4	3	5	3	4	5	8	4	7

La mayor densidad de organismos algales se encontró en la estación Reserva Alto de San Miguel (E0), reportando cerca del 21% de la densidad total. De igual forma, presentó la mayor riqueza de morfotipos, identificándose en esta 15 morfotipos de los 20 identificados. En contraste, la estación Papelsa (E16) presentó la más baja densidad de algas perifíticas y en las estaciones Aula Ambiental (E8) y Puente Machado (E11) se identificó la menor riqueza de esta comunidad (Figura 14)



a. Distribución espacial de la densidad de organismos y número de morfotipos por unidad de área (Org/cm²)



b. Distribución de morfotipos en cada estación

Figura 14. Comunidad de algas perifíticas en estaciones de monitoreo del río Aburrá-Medellín en la campaña completa realizada el 19 de febrero de 2020

En la Tabla 19 se presentan los resultados de los índices de Diversidad, Dominancia y Equidad. Aunque el índice de diversidad (H') no representa una medida directa del grado de contaminación del sistema acuático, el rango de valores del índice de diversidad (H') normalmente oscila entre 1.5 y 3.5, donde valores por debajo de 1.5 se relacionan con ambientes muy contaminados

(Magurran, 1988). Por su parte, los índices de Equidad y Dominancia oscilan en un rango de 0 a 1, relacionándose ambos con la distribución de morfotipos en la comunidad.

Tabla 19. Índices de Diversidad, Dominancia y Equidad en estaciones de monitoreo río Aburrá-Medellín en la campaña completa realizada el 19 de febrero de 2020

ESTACIÓN	CÓDIGO	DIVERSIDAD (H')	EQUIDAD (J')	DOMINANCIA (D)
Reserva Alto de San Miguel	E0	2.467	0.911	0.100
San Miguel	E1	1.745	0.758	0.270
Primavera	E2	2.066	0.940	0.141
Ancón Sur	E3	1.782	0.916	0.185
Antes de San Fernando	E5	1.539	0.791	0.251
Después de San Fernando	E6	1.083	0.781	0.389
Aula Ambiental	E8	0.619	0.564	0.672
Puente Acevedo	E9	1.567	0.974	0.216
Puente Machado	E11	1.018	0.927	0.381
Niquía	E21	1.035	0.746	0.456
Ancón Norte	E12	1.486	0.923	0.246
Parque de las Aguas	E14	1.794	0.863	0.195
Papelsa	E16	1.342	0.968	0.274
Puente Gabino	E20	1.757	0.903	0.197

La estación Reserva Alto de San Miguel (E0) presentó el mayor valor para el índice de Diversidad (H'), así como el menor valor de dominancia (D) y un alto valor del índice de Equidad (J'), lo que es coherente con lo reportado anteriormente y podría indicar una mejor estructura de la comunidad de algas perifíticas en esta estación en comparación con las demás estaciones. En general, las estaciones restantes presentaron valores medios a bajos del índice de Diversidad, encontrándose el menor valor en la estación Aula Ambiental (E8), la cual además presentó un bajo valor para el índice de Equidad y el más alto valor de dominancia en el estudio, manifestando un deterioro en la estructura de la comunidad de algas perifíticas (Figura 15).

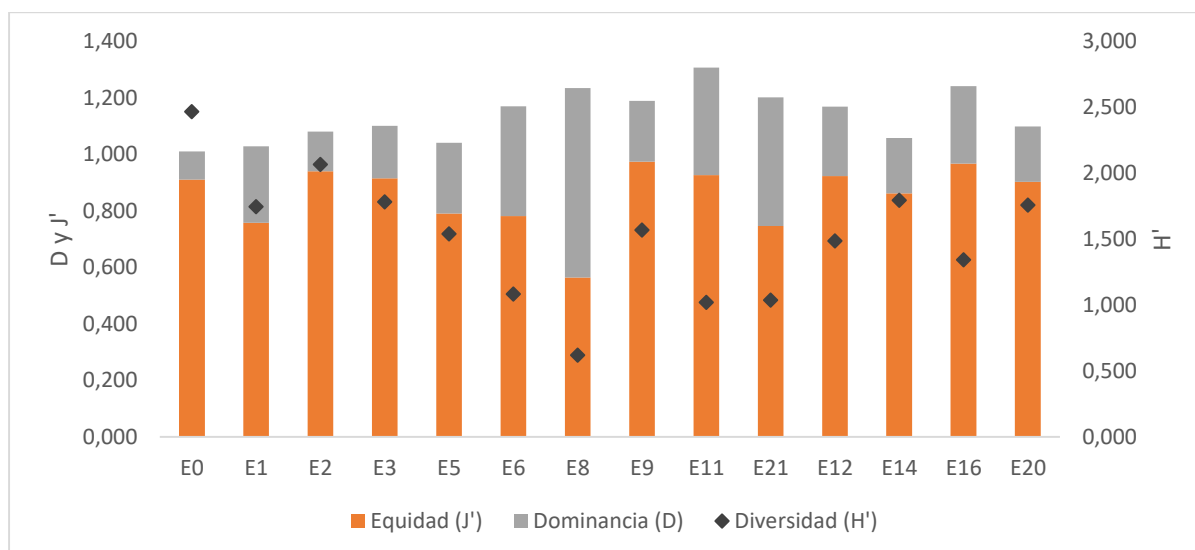
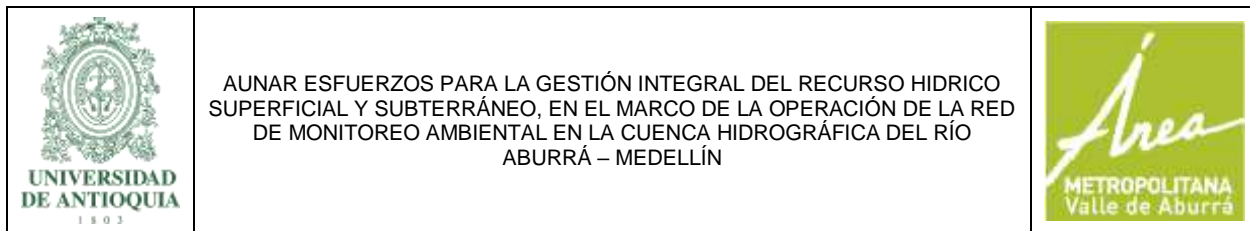


Figura 15. Contraste de los índices de Diversidad (H'), Equidad (J') y Dominancia (D) en estaciones de monitoreo río Aburrá-Medellín en la campaña completa realizada el 19 de febrero de 2020



- **Consideraciones generales sobre el análisis perifítico**

El tramo inicial del río Aburrá-Medellín conformado por las cuatro primeras estaciones presentó la mayor riqueza de morfotipos además de densidades medias a altas. Específicamente la primera estación monitoreada correspondiente a Reserva Alto de San Miguel (E0) exhibió una mejor estructura en la comunidad de algas perifíticas al presentar mayor densidad y riqueza, así como altos valores en los índices de diversidad y equidad y una baja dominancia. Este resultado puede asociarse a una mayor disposición de hábitats y menores procesos de contaminación debidos a una menor intervención antrópica, propiciando el desarrollo y permanencia de diferentes morfotipos de la comunidad de alga perifíticas.

Por otro lado, la menor densidad de algas perifíticas se encontró en la estación Papelsa (E16), que además presentó bajos valores de diversidad y riqueza. Adicionalmente, la estación Aula Ambiental (E8) presentó un bajo valor de riqueza de morfotipos, así como bajos valores de los índices de diversidad y equidad y un alto valor de dominancia, relacionado con una alta presencia del género *Navicula* sp., lo cual podría asociarse con afectaciones en esta estación que propician un mayor desarrollo de organismos con alta resistencia a alteraciones en el sistema.

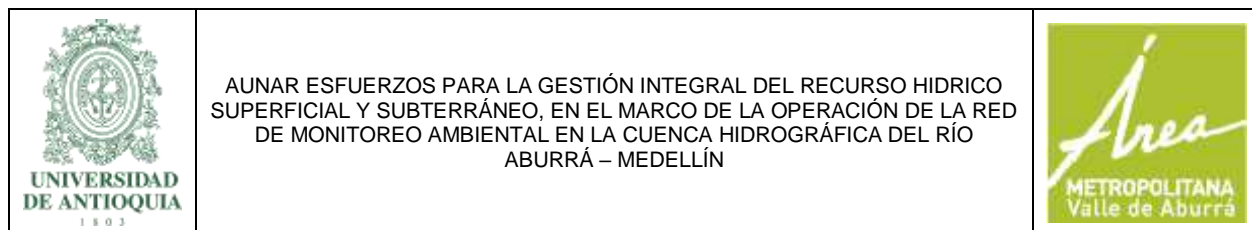
En general, las características ecológicas de los principales organismos encontrados están asociados a procesos de adaptación a la contaminación, lo que puede indicar que existen diversos condicionantes ecosistémicos que generan una importante afectación sobre el río y, por tanto, sobre la comunidad de algas perifíticas.

7.1.7.2 Macroinvertebrados acuáticos

Los macroinvertebrados acuáticos son organismos clave en la dinámica de los ecosistemas acuáticos. Se caracterizan por su tamaño visible (de 0.5 mm hasta 5.0 mm aprox.), ciclos de vida largos (desarrollados total o parcialmente en el agua), estrechos rangos de sensibilidad al estrés y formas de vidas sedentarias (Prat 2009, Roldan 2016). Comprenden gran cantidad de grupos como: platelmintos, artrópodos, moluscos y crustáceos, entre otros, presentes principalmente en aguas dulces. Dentro de los macroinvertebrados acuáticos, los estados inmaduros (larvas) de los insectos se consideran el grupo más abundante y diverso, lo cual se refleja en un amplio espectro de tolerancia frente a diferentes parámetros de contaminación (Aguirre y Caicedo, 2013).

En la fase de campo, los macroinvertebrados acuáticos se capturaron mediante un muestreo cualitativo. El muestreo se realizó colectando los organismos adheridos a rocas, hojarasca y vegetación en la ribera del cuerpo de agua, de forma manual y utilizando una red triangular en un transecto de 100 metros aguas arriba del punto de muestreo. Las muestras tomadas en todos los sustratos se depositaron para separación y limpieza en una bandeja plástica y posteriormente se preservaron en alcohol al 70% en recipientes plásticos rotulados.

En el análisis de laboratorio, se hizo la determinación de los diferentes taxa utilizando un estereomicroscopio marca BOECO y las claves taxonómicas de Aguirre & Caicedo, O. (2013); Domínguez & Fernández (2009); Fernández & Domínguez (2001), Roldán, G. (2003) y Merrit &



Cummins (1996). Para el análisis cuantitativo de la calidad del agua, se aplicó el índice biótico BMWP/Col modificado para Antioquia por Roldán (2003).

El índice biótico BMWP (The Biological Monitoring Working Party) para Colombia, determina la calidad del agua y se ha desarrollado a través de un puntaje (de 1 a 10), asignado a las familias de macroinvertebrados acuáticos. En la ponderación de este índice los puntajes más altos se asignan a las familias con rangos de tolerancia más reducidos, es decir, más susceptibles a la contaminación y los más bajos a aquellas más tolerantes o con rangos de tolerancia más amplios (Roldán, 2003). Por su parte, conocer la variabilidad de este índice biótico nos ayuda a entender la transición de la calidad del agua en el espacio-tiempo y a ver la alteración de los ecosistemas estudiados con base en la biota, como lo evidencia RedRio a través de este estudio.

En esta campaña se monitorearon 14 estaciones a lo largo del río Aburrá (Tabla 20), encontrando que predominan los oligoquetos de la familia Tubificidae (Figura 3-B), en nueve de las catorce estaciones monitoreadas (la mayoría con mala calidad del agua). Por su parte, las estaciones con mejor calidad del agua: Reserva Alto de San Miguel (E0), Alto de San Miguel (E1) y Primavera (E2), se encontraron en común, los Coleópteros de las familias Staphylinidae y Scirtidae y los géneros *Leptonema* y *Smicridea* de la familia Hydropsychidae. Así mismo Calopterygidae (E2, E3) y Leptophlebiidae (E1, E2), organismos bioindicadores de ambientes de muy buena calidad de agua, como es el caso de E0 y E1, a ambientes ligeramente contaminados (E2), según los resultados del índice BMWP/Col (Tabla 21).

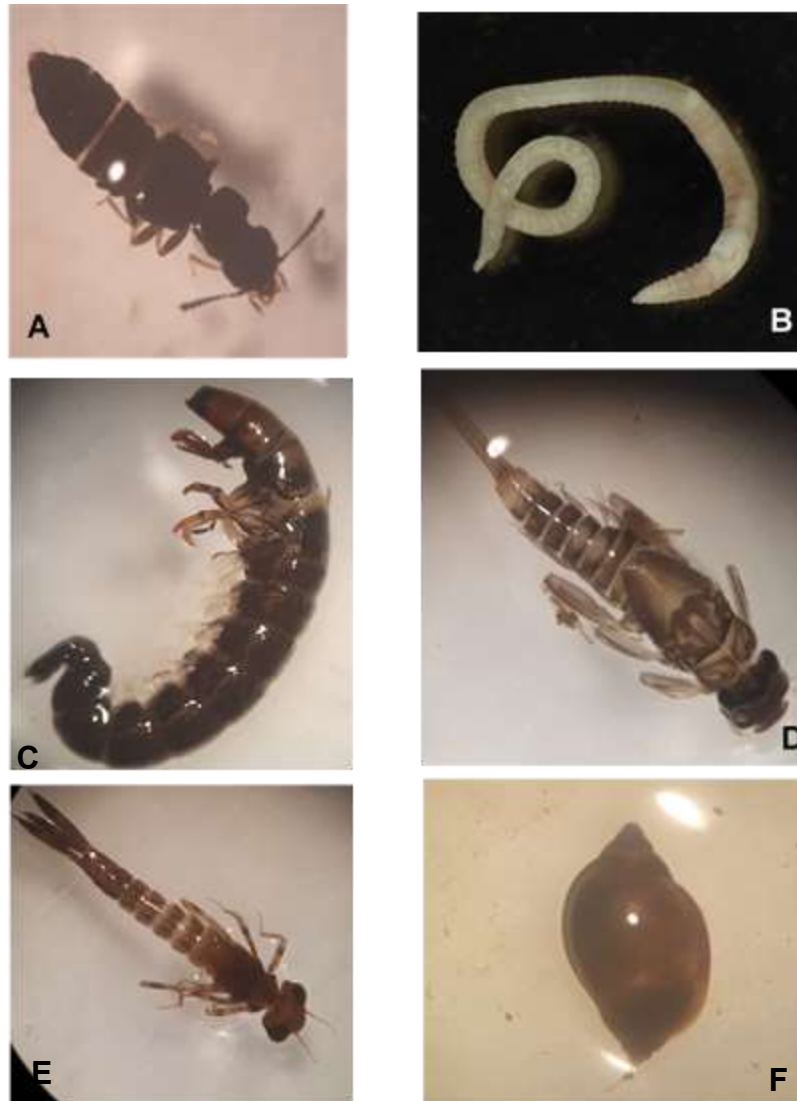
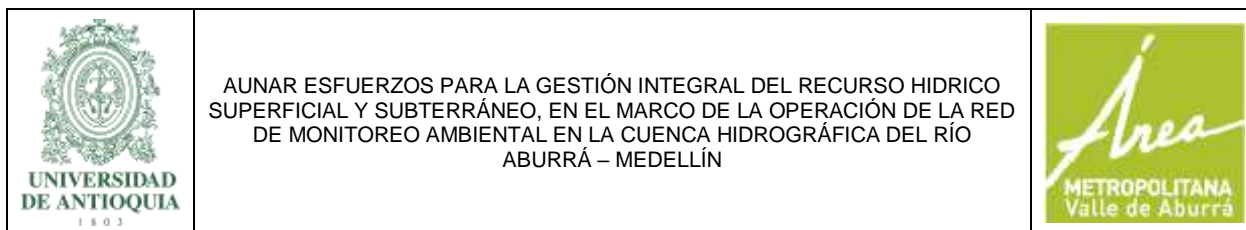


Figura 16. Familias de Macroinvertebrados acuáticos encontradas en la campaña de monitoreo realizada el 19 de febrero de 2020. (A) Staphylinidae (B) Tubificidae (C) Hydropsychidae (D) Leptophlebiidae (E) Calopterygidae (F) Physidae

En cuanto a la riqueza taxonómica se evidenció que el mayor número de taxa pertenece al Alto de San Miguel (E1) y la Reserva Alto de San Miguel (E0) con 24 y 23 taxa respectivamente, mientras que en Primavera (E2) se reportaron 15 taxa. Por su parte, las demás estaciones de muestreo presentaron una riqueza relativamente baja entre 1 y 5 taxa como podemos apreciar en la tabla 4. Es de señalar que a mayor diversidad mejor serán las condiciones ecológicas de la estación muestreada como se puede observar en E0 y E1 en comparación con las demás, esto debido a las buenas condiciones de calidad del agua que favorecen el desarrollo de la biota.

Tabla 20. Comunidad de macroinvertebrados acuáticos en las estaciones de monitoreo río Aburrá-Medellín en la campaña completa realizada el 19 de febrero de 2020

CLASE	ORDEN	FAMILIA	GÉNERO	ESTACIONES													
				E0	E1	E2	E3	E5	E6	E8	E9	E11	E21	E12	E14	E16	E20
Turbellaria	Tricladida	Dugesidae	<i>Girardia</i>			X					X			X			
Oligochaeta	Haplotaxida	Tubificidae	Sin determinar		X	X	X		X	X	X	X		X	X		
Clitellata	Rhynchobdellida	Glossophoniidae	<i>Helobdella</i>													X	
Malacostraca	Amphipoda	Gammaridae	Sin determinar		X												
	Collembola	Isotomidae	Sin determinar	X													
Insecta	Arachnida	Hydrachnidiae	<i>Hydracarina</i>								X						
	Hemiptera	Velliidae	<i>Microvelia</i>	X	X												
		Gerridae	<i>Rhagovelia</i>												X		
		Saldidae	<i>cf. Micranthia</i>										X				
		Naucoridae	<i>Limnocoris</i>	X													
	Ephemeroptera	Tricorythidae	<i>Leptohyphes</i>	X	X												
		Leptophlebiidae	<i>Trabulodes</i>	X	X												
		Baetidae	<i>Baetodes</i>		X	X											
	Odonata	Libellulidae	<i>Dythemis</i>		X	X											
		Gomphidae	<i>cf. progomphus</i>		X												
		Calopterygidae	<i>Hetaerina</i>		X	X											
	Coleoptera	Dryopidae	<i>cf. pelonomus</i>		X												
		Elmidae	<i>Ancyronix</i>	X													
			<i>Cylloepus</i>	X		X											
			<i>Macrelmis</i>	X	X												
		Heteroceridae	Sin determinar	X													
		Dytiscidae	Sin determinar	X													
		Gyrinidae	<i>Andogyrus</i>	X													
		Ptylodactilidae	Sin determinar	X													
		Hydrophilidae	<i>Hydrochus</i>	X													
		Scirtidae	<i>Elodes</i>	X	X	X											
		Psephenidae	<i>Psephenus</i>										X				
		Staphylinidae	<i>Stenus</i>	X	X	X											
		Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Leptomena</i>	X	X	X										
	<i>Smicridea</i>			X	X	X											
	Hydrobiosidae		<i>Atopsyche</i>	X													
	Philopotamidae		<i>Chimarra</i>		X	X											
	Helicopsychidae		Sin determinar		X												
Leptoceridae	Sin determinar			X													
Calamoceratidae	<i>Phylloicus</i>		X														
Glossomatidae	Sin identificar (casa)			X													
Plecoptera	Perlidae	<i>Anacroneuria</i>	X	X													
Diptera	Chironomidae	<i>Chironomus</i>				X							X			X	
		<i>Tanypodinae</i>	X														
		<i>Dicrotendipes</i>			X	X		X	X				X			X	
	Culicidae	<i>cf. Aedes</i>					X					X					
	Tipulidae	<i>Tipula</i>	X	X													
		<i>Limonia</i>	X														
	Blephariceridae	<i>Limonicola</i>		X													
	Psychodidae	Sin determinar							X								
Simuliidae	<i>Simulium</i>	X	X	X				X									



CLASE	ORDEN	FAMILIA	GÉNERO	ESTACIONES														
				E0	E1	E2	E3	E5	E6	E8	E9	E11	E21	E12	E14	E16	E20	
	Lepidoptera	Pyralidae	Sin determinar											X		X		
Gastrópoda	Basommatophora	Physidae	<i>Physa</i>		X	X	X			X					X		X	X
		Ancylidae	Sin determinar				X											
Riqueza				24	23	15	5	1	4	4	2	2	4	5	3	1	4	

7.1.7.3 Resultados del Índice biótico BMWP/Col

Los resultados del índice registrados en esta campaña sobre el río Aburrá-Medellín presentan una calidad crítica a muy crítica en 11 de las 14 estaciones de muestreo, mientras que la estación E2 correspondiente a la estación Primavera es una estación de transición que evidencia el inicio del deterioro de la calidad del agua a través del índice biótico BMWP/col, con dominancia en organismos como los gasterópodos del género *Physa*, indicadores de presencia de materia orgánica (Figura 16F).

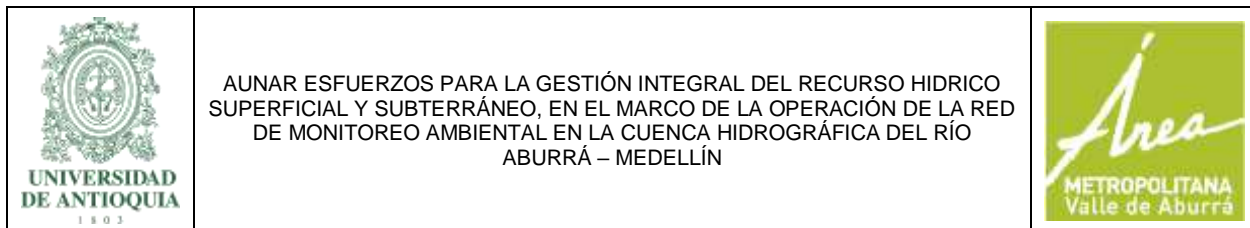
Las estaciones E0 y E1 (Alto de San Miguel y San Miguel) mostraron una calidad buena con aguas de muy limpias a limpias. Es de señalar que a lo largo de la red de drenaje se observan alteraciones debido a las actividades antrópicas como vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales, ocupación de cauce para infraestructura, entre otras, desarrolladas en todo el Valle de Aburrá.

Tabla 21. Valores del índice biótico BMWP/Col en las estaciones de monitoreo río Aburrá-Medellín en la campaña completa realizada el 18 de agosto de 2019

ESTACIÓN	ID	VALOR	SIGNIFICADO	CALIDAD
Reserva alto de San Miguel	E0	116	Aguas muy limpias a limpias	Buena
San Miguel	E1	126	Aguas muy limpias a limpias	Buena
Primavera	E2	76	Aguas ligeramente contaminadas	Aceptable
Ancón Sur	E3	11	Aguas fuertemente contaminadas	Muy crítica
Antes de San Fernando	E5	2	Aguas fuertemente contaminadas	Muy crítica
Después de San Fernando	E6	14	Aguas fuertemente contaminadas	Muy crítica
Aula Ambiental	E8	11	Aguas fuertemente contaminadas	Muy crítica
Puente Acevedo	E9	8	Aguas fuertemente contaminadas	Muy crítica
Puente Machado	E11	1	Aguas fuertemente contaminadas	Muy crítica
Niquía	E21	10	Aguas fuertemente contaminadas	Muy crítica
Ancón Norte	E12	13	Aguas fuertemente contaminadas	Muy crítica
Parque de las Aguas	E14	9	Aguas fuertemente contaminadas	Muy crítica
Papelsa	E16	5	Aguas fuertemente contaminadas	Muy crítica
Puente Gabino	E20	8	Aguas fuertemente contaminadas	Muy crítica

- Consideraciones generales sobre Macroinvertebrados e Índice Biótico BMWP/Col**

Las estaciones de la Reserva Alto de San Miguel (E0) y Alto de San Miguel (E1) en la campaña presentaron una calidad de aguas muy limpias a limpias (buena calidad), según la composición de macroinvertebrados acuáticos y al índice BMWP/Col. Esto gracias a la alta diversidad que se evidencia con taxones bioindicadores de buena calidad del agua. Es muy probable que esta buena condición se deba a una baja presión antrópica en estas zonas.



La estación Primavera (E2) con aguas ligeramente contaminadas muestra la transición con aguas de calidad aceptable según el índice BMWP/col, probablemente determinado por el inicio de procesos de incremento de materia orgánica que evidencia la dominancia de los gasterópodos de la familia Physidae y la pérdida de diversidad.

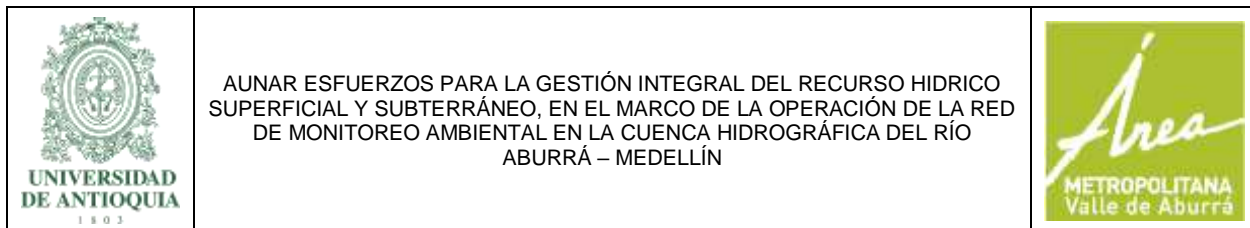
La mayoría de las estaciones monitoreadas presentaron ambientes con una calidad muy crítica, es decir más del 78% se encuentran en condiciones críticas, por lo que la cuenca del río Aburrá-Medellín presenta casi en su totalidad muy mala calidad del agua de acuerdo con los resultados presentados por la comunidad de macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores. Los organismos más representativos durante la campaña pertenecen a la familia Tubificidae (Figura 16-B), la cual es indicadora de ambientes contaminados por materia orgánica, siendo esto una evidencia biótica de la problemática de la cuenca. La mala calidad del agua que evidencia la cuenca Aburrá-Medellín puede relacionarse con los vertimientos de aguas residuales e industriales, a la ocupación de cauce ocasionando una reducción de la biodiversidad de los macroinvertebrados acuáticos y en la reducción en la calidad del agua, lo cual se evidencia en el índice BMWP/Col.

7.1.8 Índice de Calidad Ecológica para la campaña de muestra completa del 19 de febrero de 2020

El índice de calidad ecológica (ICE) permite analizar la subordinación de la abundancia de grupos hidrobiológicos como las algas del perifiton y los macroinvertebrados acuáticos con respecto a las variables ambientales. La herramienta fundamental para su elaboración es el monitoreo biológico, un instrumento centrado en el uso de los atributos estructurales y/o funcionales de los individuos, las poblaciones, las comunidades y los ecosistemas (Hart 1994; Forero 2012). Este índice permite establecer cuantitativamente para los géneros, valores de tolerancia ante condiciones adversas, identificados de acuerdo con el análisis integrado de las variables ambientales locales junto con la composición y abundancia de los organismos (Forero, 2012).

Entre los años 2013 y 2014, la Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) propuso la evaluación del ICE como una prueba piloto en la Guía de Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico, con el fin de analizar la potencialidad del índice, su alcance, validez y aspectos por mejorar (Corporación Académica Ambiental, 2016). El índice de calidad ecológica se formula con base en análisis multivariados, de acuerdo con los métodos descritos por Haase y Nolte (2008); Chalar *et al.* (2011) y Forero (2012). La metodología del ICE incluye un sistema en el que la calidad ecológica se determina por un gradiente ambiental a través de un análisis de relación directa (análisis de redundancia sin tendencia –RDA- o Análisis de Correspondencia Canónica –ACC-), la identificación para cada taxón de rangos de tolerancia y valores óptimos en función de ese gradiente ambiental y ponderaciones de calidad para cada estación (Forero, 2012).

Chalar *et al.* (2011) propone cinco pasos en los que se basa la elaboración del índice de calidad ecológica:



- Correlaciones de Spearman entre las variables fisicoquímicas para eliminar variables redundantes.
- Determinación de un gradiente ambiental desde un análisis lineal (análisis de redundancia sin tendencia, RDA por sus siglas en inglés) o uno unimodal (Análisis de Correspondencia Canónica, ACC), según sea el caso, utilizando un programa estadístico que calcule estos análisis tal como CANOCO versión 4.6 o R (Ter Braak; Smilauer, 2002). Los datos son estandarizados previamente siguiendo el método propuesto por Guisande-González *et al.*, (2006). Para explicar el gradiente ambiental se examinan, además, las correlaciones de Spearman entre las variables significantes y las no significantes en el ACC o RDA.
- Estandarización de los puntajes de las estaciones (sample scores) obtenidos desde el primer eje del RDA o del ACC. Ésta consiste en redimensionar los datos a una nueva escala entre uno y diez utilizando una regresión lineal. La regresión es formulada desde los valores máximo y mínimo de los sample scores.
- En el programa Análisis de Datos C2 (software libre <https://www.staff.ncl.ac.uk/stephen.juggins/software.htm>) se obtendrán los puntajes óptimos y de tolerancia para cada taxón, a partir de un análisis de Promedios Ponderados (Weighted Averaging, WA) utilizando los datos redimensionados. Con estos puntajes se calcularán los valores del índice de estado ecológico por estación, con base en la fórmula propuesta por Haase y Nolte (2008).
- Agrupamiento de las estaciones a partir de los valores del índice de estado ecológico junto con los datos de la variable fisicoquímica indicadora (fósforo total, Nitratos, entre otros). Con ello se obtendrán los rangos para establecer las categorías del índice. Para este análisis se empleará como método de agrupamiento a los pares de grupos no ponderados aplicando la media aritmética (UPGMA, por sus siglas en inglés) y la distancia euclidiana.

En el marco de la Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del río Aburrá-Medellín se encuentra la aplicación del índice de calidad ecológica, el cual es un método que no se encuentra condicionado a un sistema ni a un grupo de organismos en específico y puede ser utilizado en diferentes zonas geográficas, lo que posibilita una adecuada evaluación local de los ecosistemas, puesto que considera la variabilidad climática, edáfica, geomorfológica y biológica que ocurre dentro de las regiones ecuatorial y tropical (Forero, 2012).

7.1.8.1 Índice de calidad ecológica río Aburrá-Medellín

El presente informe contiene el análisis del índice de calidad ecológica para la campaña de monitoreo sobre el río Aburrá-Medellín, realizada el día 19 de febrero de 2020. Las estaciones seleccionadas para el análisis del ICE incluyen a los sitios de cierre de los tramos establecidos en la Resolución Metropolitana 002016 de 2012, donde se adoptan los objetivos de calidad del río Aburrá-Medellín para el periodo 2012-2022. Además, se consideró una estación en la Reserva Alto de San Miguel como blanco para el análisis, mientras que la estación Niquía servirá para conocer el impacto del vertimiento al río de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Aguas Claras. Dichas estaciones de monitoreo se enuncian en la Tabla 22.

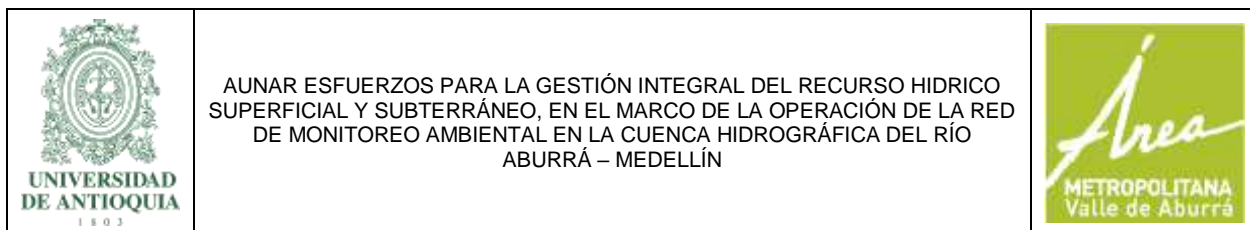


Tabla 22. Estaciones de monitoreo para el cálculo del ICE

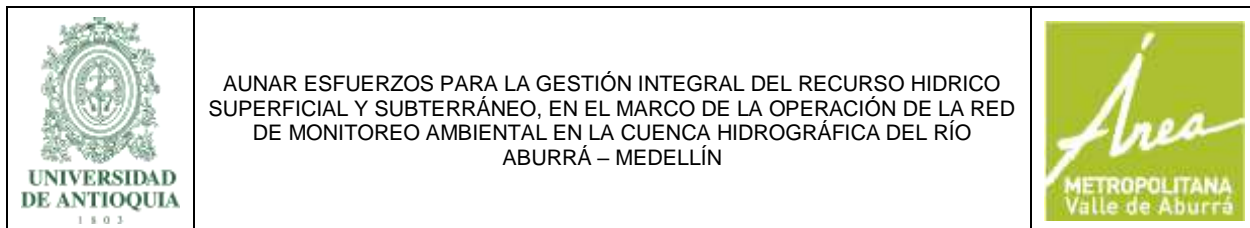
ESTACIÓN	CÓDIGO
Reserva Alto de San Miguel	E0
San Miguel	E1
Primavera	E2
Ancón Sur	E3
Después de San Fernando	E6
Aula Ambiental	E8
Puente Machado	E11
Niquía	E21
Ancón Norte	E12
Papelsa	E16
Puente Gabino	E20

En el río Aburrá-Medellín, el ICE se ejecuta por separado tanto para las comunidades hidrobiológicas de macroinvertebrados acuáticos bentónicos como para las algas del perifiton. De este modo, se obtienen las siguientes tres matrices:

- Matriz fisicoquímica: en esta se incluyen los registros de campo y resultados de laboratorio de las estaciones de monitoreo de interés.
- Matriz macroinvertebrados: en esta tabla se establecen los géneros de los macroinvertebrados acuáticos bentónicos y su abundancia en cada una de las estaciones en las que se evaluará el índice.
- Matriz algas perifíticas: se registran los géneros de las algas perifíticas y su abundancia en las estaciones de monitoreo que se consideran para ejecutar el índice.

Cada una de estas matrices se depura teniendo en cuenta aspectos como:

- Posibles datos incoherentes en los registros y comentarios que se encuentren en el documento.
- Los nombres de las variables y géneros de las comunidades deben ser cortos, y se debe evitar el uso de signos especiales como paréntesis, guiones, superíndices o subíndices.
- En la matriz de macroinvertebrados y algas perifíticas, las celdas sin registro de abundancia deben contener un valor de cero.
- Los géneros que no registran abundancia en todas las estaciones de monitoreo de interés deben descartarse.
- Con relación a las variables fisicoquímicas, no se deben considerar aquellas que registran el mismo valor en todas las estaciones de monitoreo.
- Si se presenta el caso en el que la matriz de macroinvertebrados y algas difieren en el número de estaciones monitoreadas, se debe organizar una matriz fisicoquímica por separado, que coincida en número tanto con las estaciones de macroinvertebrados como para las que registran algas perifíticas.



Luego de depurar las matrices, se realiza la estandarización de los datos de acuerdo con la fórmula establecida por Guisande *et al.*, (2011):

$$VE = \frac{x - Min}{Max - Min}$$

En la cual VE es el valor estandarizado, Max y Min corresponden a los valores máximo y mínimo de cada variable. Con esta estandarización, los datos se llevan a un rango entre 0 y 1 sin perder la esencia de las distancias entre los registros.

7.1.8.2 Resultados campaña de monitoreo 19 de febrero de 2020

A continuación, se presentan los resultados para la campaña de monitoreo del tipo completa desarrollada en el río Aburrá-Medellín, discriminados para algas perifíticas y macroinvertebrados acuáticos.

- **Algas Perifíticas**

Al considerar el índice de calidad ecológica a partir de las algas perifíticas en once estaciones de monitoreo sobre el río Aburrá-Medellín, se obtuvo a partir del primer filtro del análisis una longitud de gradiente en el primer eje de 3.23, lo que indica que las relaciones entre la abundancia de algas perifíticas y las variables fisicoquímicas se representaron a partir de un modelo unimodal, vinculado a un análisis de correspondencia canónica (ACC). Con respecto al análisis ACC, se obtuvo un $p=0,008$; por tanto, el modelo presentó significancia estadística dado que el valor p fue menor a 0,05.

Posterior a la depuración de los supuestos de colinealidad y el factor de la inflación de la varianza, en el modelo de análisis de correspondencia canónica se incluyeron nueve (9) variables fisicoquímicas: temperatura del agua, pH del agua, caudal, grasas y aceites, sustancias activas al azul de metileno (SAAM), nitritos, níquel, plomo y *E coli*. Para el análisis también se tuvieron en cuenta diez y nueve (19) morfotipos de algas perifíticas.

En la Tabla 23 se presentan los valores óptimos y de tolerancia con los que fueron escalonados cada uno de los taxones que se encuentran presentes en las diferentes estaciones de monitoreo, definidos luego de realizar un reescalonamiento por medio de la regresión lineal de los datos. Los óptimos y tolerancias se obtuvieron al aplicar un promedio ponderado de las abundancias con relación a los valores reescalonados que provienen del análisis ACC, el cual concentra la mayor varianza explicada de la relación entre las variables ambientales y la abundancia de las algas perifíticas.

Tabla 23. Valores óptimos y de tolerancia de cada uno de los morfotipos de algas perifíticas – 19 de febrero de 2020

MORFOTIPO	ÓPTIMO	TOLERANCIA
<i>Achnanthydium</i> sp.	1.00	1.18
<i>Cladophora</i> sp.	1.85	0.49
<i>Cocconeis</i> sp.	1.00	1.18
<i>Colonia chlorophyceae</i>	1.07	0.36
<i>Cymbella</i> sp.	1.64	0.41
<i>Gomphonema</i> sp.	1.64	0.58
<i>Gyrosigma</i> sp.	2.19	1.18
<i>Lyngbya</i> sp.	1.10	0.36
<i>Melosira</i> sp.	1.00	1.18
<i>Navicula</i> sp1.	1.72	0.49
<i>Navicula</i> sp2.	8.89	5.51
<i>Nitzschia</i> sp.	1.88	0.43
<i>Oedogonium</i> sp.	1.55	0.63
<i>Oscillatoria</i> sp.	2.27	2.35
<i>Phormidium</i> sp.	1.54	0.60
<i>Pinnularia</i> sp.	3.14	3.36
<i>Pseudanabaena</i> sp.	1.38	0.45
<i>Stauroneis</i> sp.	1.52	0.52
<i>Tabellaria</i> sp.	1.00	1.18

La tendencia presentada por los óptimos y tolerancias de los morfotipos de algas perifíticas se puede observar en la Figura 17. Con base en dichos resultados, taxones como *Navicula* sp2. identificada principalmente en la estación Aula Ambiental (E8), presentó un alto óptimo, a pesar de registrar una tolerancia de 5.51, lo que puede indicar que en la estación E8 se desarrollan condiciones ecológicas propicias para la proliferación de este organismo en particular. Cabe destacar que esta especie de algas perifíticas no necesariamente pueden estar asociadas a una buena condición de calidad del agua desde el punto de vista fisicoquímico teniendo en cuenta el amplio rango de adaptabilidad de algunas diatomeas como el género *Navicula*, quienes pueden proliferar en ambientes con un alto grado de estrés ambiental (Bonilla *et al.*, 2015).

Otros organismos identificados presentan características morfométricas variadas como la forma colonial, filamentosas pertenecientes a las cianobacterias (*Lyngbya* sp., *Phormidium* sp., *Pseudanabaena* sp). Estas se refieren a una división común en ambientes con diversos procesos de contaminación, debido a las diversas estructuras especializadas que presentan y su alta capacidad de adaptación al ambiente (Bonilla *et al.*, 2015).

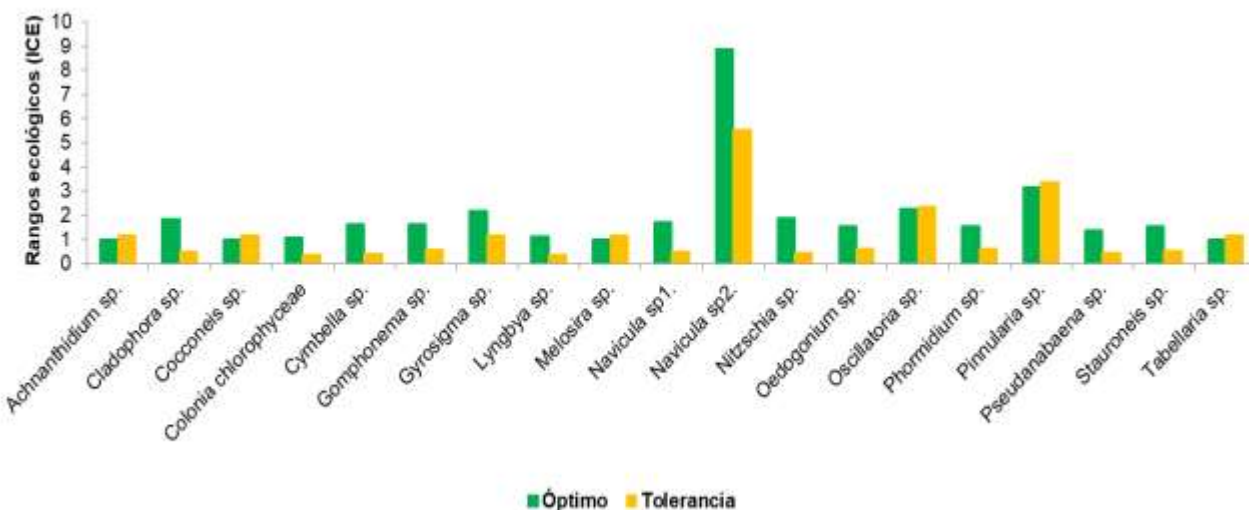


Figura 17. Perfil de los valores óptimos y de tolerancia de los morfotipos de algas perifíticas registradas después del análisis de reescalamiento en asociación con el análisis ACC – 19 de febrero de 2020

En la Tabla 24 se presentan los resultados del índice de calidad ecológica por estación de monitoreo, presentados en una escala de 1 a 10, tal como se orientó desde el reescalamiento. Los valores menores se asocian con una condición baja en la calidad ecológica para el desarrollo de las algas perifíticas registradas en el río Aburrá-Medellín, mientras que los mayores valores corresponden a una buena calidad ecológica.

Tabla 24. Valores por estación del Índice de Calidad Ecológica basado en algas perifíticas – 19 de febrero de 2020

ESTACIÓN	CÓDIGO	ICE
Reserva Alto de San Miguel	E0	1.85
San Miguel	E1	2.29
Primavera	E2	2.37
Ancón Sur	E3	5.55
Después de San Fernando	E6	2.54
Aula Ambiental	E8	6.34
Puente Machado	E11	2.08
Niquía	E21	2.04
Ancón Norte	E12	1.67
Papelsa	E16	2.63
Puente Gabino	E20	2.38

Tal como se puede observar en la Figura 18, el índice de calidad ecológica presentó un mayor valor en las estaciones Aula Ambiental (E8) y Ancón Sur (E3) donde particularmente se identificó a la especie *Navicula* sp2., asociada con un alto valor óptimo. En contraste, las estaciones donde se evidenciaron taxones de *Pinnularia* sp. como E0, E1 y E3 registraron una baja calidad ecológica basado en las algas perifíticas, lo que se puede asociar con los valores de tolerancia por encima del óptimo calculado para este morfotipo.

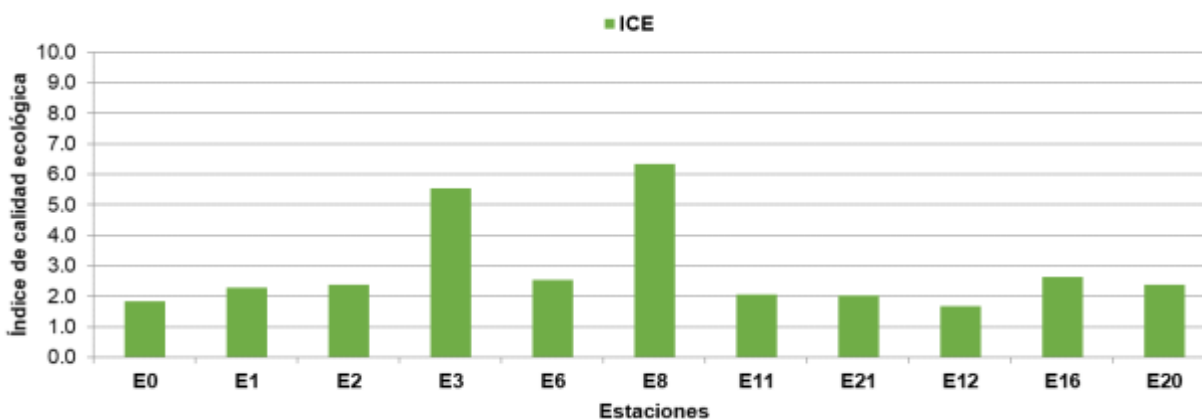


Figura 18. Distribución del Índice de Calidad Ecológica basado en algas perifíticas – 19 de febrero de 2020

Después de aplicar los valores expuestos anteriormente y calcular la ecuación que define el índice, se obtuvo un análisis de agrupamiento en el cual se observa la distancia de tres grupos que definen el escalonamiento del índice (Figura 19). Con respecto a la clasificación del índice, la mayoría de las estaciones presentaron un rango intermedio y bajo de calidad ecológica.

Al obtener el agrupamiento de las diferentes estaciones por medio del índice, se generó la distribución que se presenta en la Tabla 25. A pesar de que el conglomerado está condicionado a tres grupos, las distancias con las cuales se separan estos grupos son cortas, por lo que se recomienda continuar con la calibración de las distancias del índice, ya que la mayoría de las estaciones presentan problemas de contaminación y el índice repliega categorías numéricas muy cercanas en la mayoría de las estaciones.

Tabla 25. Distribución y clasificación del índice de calidad ecológica basado en algas perifíticas – 19 de febrero de 2020

DISTRIBUCIÓN ICE		CLASIFICACIÓN
1.00	2.29	Bajo
2.29	5.55	Intermedio
5.55	10.00	Alto

Dendrograma
Método de Ward, Euclídeana

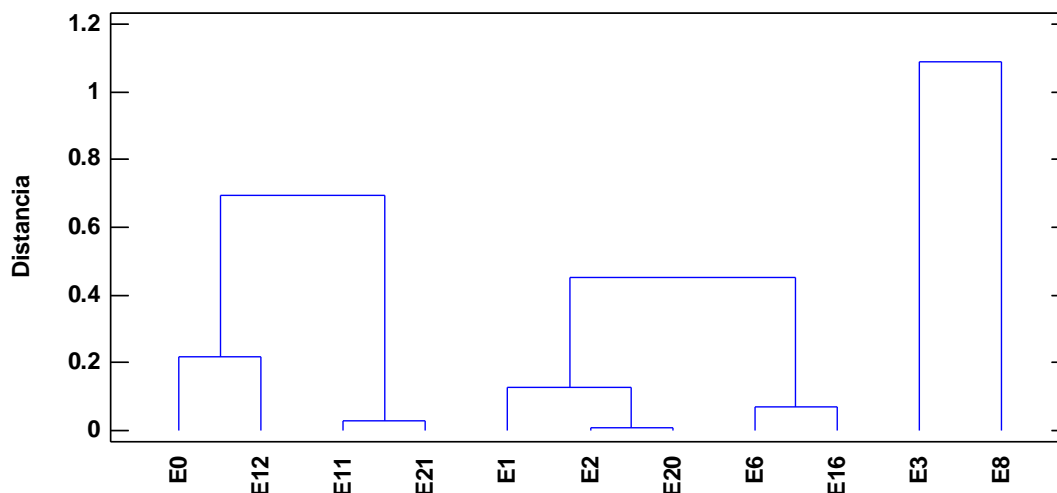


Figura 19. Análisis de agrupamiento del índice de calidad ecológica basado en algas perifíticas – 19 de febrero de 2020

Con base en el análisis multivariado para evaluar las correlaciones entre las variables ambientales incluidas en el análisis ACC y los resultados del ICE, se encontraron correlaciones superiores a 0,45 con respecto al pH del agua. Esta correlación fue directa con respecto al índice, lo que indica que, al presentarse incrementos en estas variables, el índice de calidad ecológica tendió a aumentar, tal como se puede evidenciar en las estaciones Ancón Sur (E3) y Aula Ambiental (E8).

Tabla 26. Correlación entre el ICE basado en algas perifíticas y las variables ambientales incluidas en el análisis ACC – 19 de febrero de 2020

VARIABLE FÍSICOQUÍMICA	CORRELACIÓN	VALOR P
Temperatura del agua	-0.12	0.73
pH del agua	0.45	0.17
Caudal	0.07	0.83
Grasas y aceites	0.00	0.99
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.09	0.80
Nitritos	0.26	0.44
Níquel	-0.39	0.24
Plomo	-0.36	0.27
<i>E. coli</i>	0.10	0.77

- **Macroinvertebrados acuáticos**

Los resultados del índice de calidad ecológica con base en macroinvertebrados acuáticos en el río Aburrá-Medellín, indicaron que las relaciones entre las variables fisicoquímicas y la abundancia de macroinvertebrados acuáticos correspondieron a un modelo lineal. Luego de la estandarización de las matrices, el filtro inicial del análisis estimó una longitud de gradiente de 1,00 unidades de desviación estándar al primer eje; lo que indica la ejecución de modelo de redundancia canónica (RDA). También, se obtuvo un $p=0,25$; por tanto, no se presentó significancia estadística al obtenerse un valor superior a 0,05.

La no significancia del modelo se puede relacionar con el número de estaciones consideradas para definir el gradiente diferencial en el sistema acuático, por lo cual es recomendable incluir una mayor cantidad de puntos de monitoreo en el análisis para establecer un modelo multivariado que contenga un gradiente con más casos y así lograr correlaciones más representativas entre los datos.

Después de depurar los supuestos de colinealidad y el factor de la inflación de la varianza, en el modelo de redundancia canónica (RDA) se incluyeron nueve (9) variables: temperatura del agua, pH del agua, caudal, grasas y aceites, sustancias activas al azul de metileno (SAAM), nitratos, níquel, plomo y *E coli*. Además, se tuvieron en cuenta cuarenta y ocho (49) morfotipos de macroinvertebrados acuáticos para el análisis estadístico.

Luego del reescalamiento y a partir de una regresión lineal aplicada a los datos, se encontraron los valores óptimos y de tolerancia con los que fueron escalonados cada uno de los morfotipos que estuvieron presentes en las diferentes estaciones de monitoreo; los cuales se presentan en la Tabla 27.

Tabla 27. Valores óptimos y de tolerancia de cada uno de los morfotipos de macroinvertebrados acuáticos – 19 de febrero de 2020

MORFOTIPO	ÓPTIMO	TOLERANCIA
<i>Aedes Aegypti</i>	10.00	2.83
<i>Anacroneuria</i>	10.00	2.83
<i>Ancylidae sp.</i>	10.00	2.83
<i>Ancyronix</i>	10.00	2.83
<i>Andogyrus</i>	10.00	2.83
<i>Atopsyche</i>	10.00	2.83
<i>Baetodes</i>	10.00	2.83
<i>cf pelonomus</i>	10.00	2.83
<i>cf progomphus</i>	10.00	2.83
<i>cf. Micranthia</i>	10.00	2.83
<i>Chimarra</i>	10.00	2.83
<i>Chironomus</i>	10.00	2.83
<i>Cylloepus</i>	9.69	4.07

MORFOTIPO	ÓPTIMO	TOLERANCIA
<i>Dicrotendipes</i>	8.56	4.07
<i>Dythelmis</i>	8.38	5.73
<i>Dytiscidae</i> sp.	8.29	4.73
<i>Elodes</i>	8.27	4.80
<i>Gammaridae</i> sp.	8.08	4.07
<i>Girardia</i>	8.08	4.07
<i>Glossomatidae</i> sp.	6.54	4.07
<i>Helicopsychidae</i> sp.	5.68	4.07
<i>Helobdella</i>	4.91	3.69
<i>Hetaerina</i>	4.89	3.65
<i>Heteroceridae</i> sp.	4.30	3.34
<i>Hydracarina</i>	4.24	2.83
<i>Hydrochus</i>	4.24	2.83
<i>Isotomidae</i> sp.	4.24	2.83
<i>Leptoceridae</i> sp.	4.24	2.83
<i>Leptohyphes</i>	4.24	2.83
<i>Leptomena</i>	4.24	2.83
<i>Limnocoris</i>	4.09	1.66
<i>Limonia</i>	3.90	1.66
<i>Limnicola</i>	3.46	1.66
<i>Macrelmis</i>	3.06	1.66
<i>Microvelia</i>	1.89	2.83
<i>Phylloicus</i>	1.31	1.00
<i>Physa</i>	1.24	0.60
<i>Psephenus</i>	1.21	2.83
<i>Psychodidae</i> sp.	1.21	2.83
<i>Ptylodactilidae</i> sp.	1.20	0.21
<i>Pyralidae</i> sp.	1.18	0.49
<i>Simulium</i>	1.05	2.83
<i>Smicridea</i> sp.	1.05	2.83
<i>Stenus</i>	1.05	0.07
<i>Tabanidae</i> sp.	1.00	2.83
<i>Tanypodinae</i> sp.	1.00	2.83
<i>Tipula</i>	1.00	2.83
<i>Trabulodes</i>	1.00	2.83
<i>Tubificidae</i> sp.	1.00	2.83

En la Figura 20 se puede observar la tendencia de los resultados con relación a los óptimos y tolerancias de los morfotipos. El comportamiento de los macroinvertebrados acuáticos en cuanto a óptimos y tolerancias fue variable, pero se destacan 12 morfotipos que registraron un óptimo de 10 y una tolerancia de 2,83, a saber: *Aedes Aegypti*, *Anacroneuria*, *Ancylidae* sp., *Ancyronix*., *Andogyrus*., *Atopsyche*, *Baetodes*., *cf pelonomus*, *cf progomphus*, *cf. Micranthia*, *Chimarra* y *Chironomus*. Se destaca que estos valores de altos óptimos y bajas tolerancias corresponden a

organismos principalmente presentes en la estación E0, lo que indica una riqueza taxonómica mayor con respecto a las demás estaciones de monitoreo sobre el río Aburrá-Medellín.

En general, las características de las familias de interés en cuanto al análisis de los óptimos y tolerancias, están relacionadas con organismos con alta sensibilidad a la degradación del hábitat y la contaminación especialmente de tipo orgánica (Roldán, 2003).

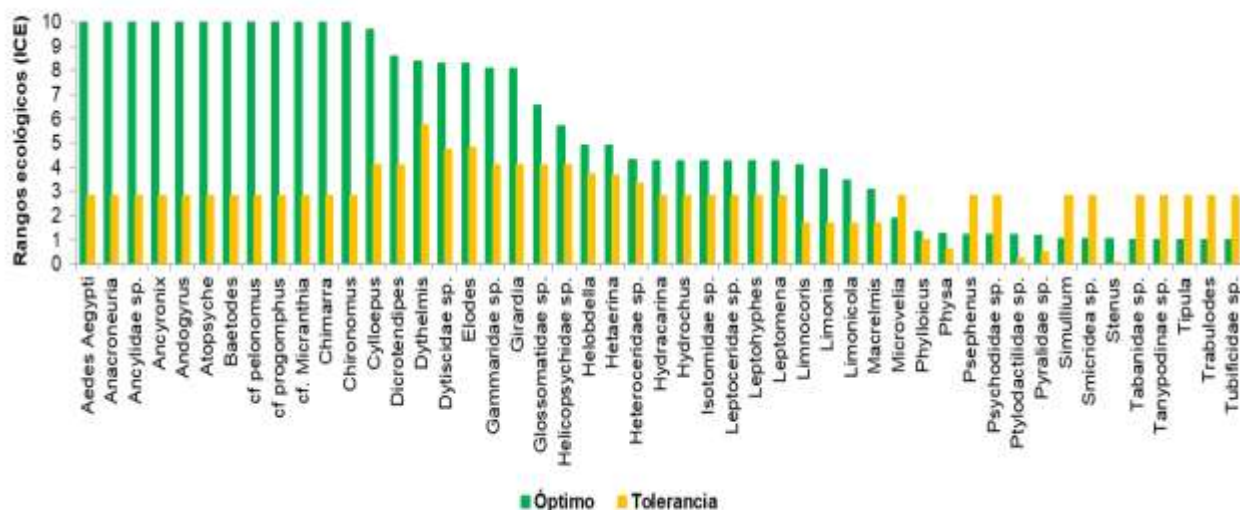


Figura 20. Perfil de los valores óptimos y de tolerancia de los morfotipos de macroinvertebrados acuáticos registrados después del análisis de reescalamiento en asociación con el análisis RDA – 19 de febrero de 2020

Como se orientó desde el reescalamiento, los resultados del índice de calidad ecológica (ICE) oscilan entre valores de 1 a 10 para cada una de las estaciones de monitoreo consideradas, los cuales se presentan en la Tabla 28, siendo asociados los valores menores a una condición baja de calidad ecológica para el desarrollo de macroinvertebrados registrados en el río Aburrá-Medellín, mientras los mayores valores indican una buena calidad ecológica.

Tabla 28. Valores por estación del Índice de Calidad Ecológica basado en macroinvertebrados acuáticos – 19 de febrero de 2020

ESTACIÓN	CÓDIGO	ICE
Reserva Alto de San Miguel	E0	8.3
San Miguel	E1	5.5
Primavera	E2	5.3
Ancón Sur	E3	1.1
Después de San Fernando	E6	2.7
Aula Ambiental	E8	1.1
Puente Machado	E11	1.2

ESTACIÓN	CÓDIGO	ICE
Niquía	E21	1.0
Ancón Norte	E12	1.2
Papelsa	E16	1.2
Puente Gabino	E20	1.2

Los resultados de calidad ecológica basados en macroinvertebrados acuáticos presentaron un mayor registro en la estación Reserva Alto de San Miguel, considerada como blanco para el análisis; en esta estación (E0) se identificaron los morfotipos representativos de acuerdo con sus resultados de óptimos y tolerancia. Sin embargo, la mayoría de las estaciones evidenciaron condiciones de calidad ecológica baja, lo que se puede relacionar con una baja riqueza taxonómica durante el monitoreo y se puede observar en la Figura 21.

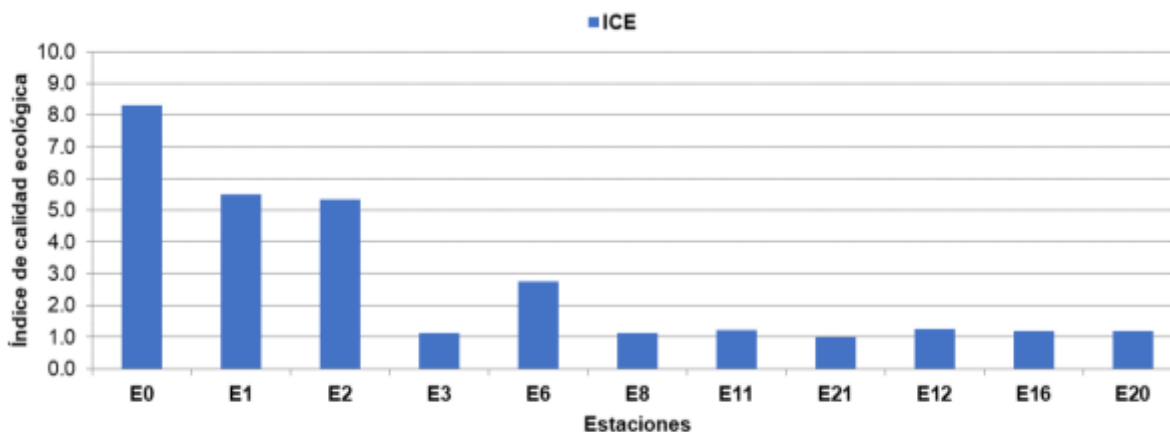


Figura 21. Distribución del Índice de Calidad Ecológica basado en macroinvertebrados acuáticos – 19 de febrero de 2020

Luego de aplicar la ecuación que define el índice para obtener los valores anteriormente expuestos, se realizó un análisis de agrupamiento mostrado en la Figura 22, en el cual se observa la distancia de tres grupos que definen el escalonamiento del índice.

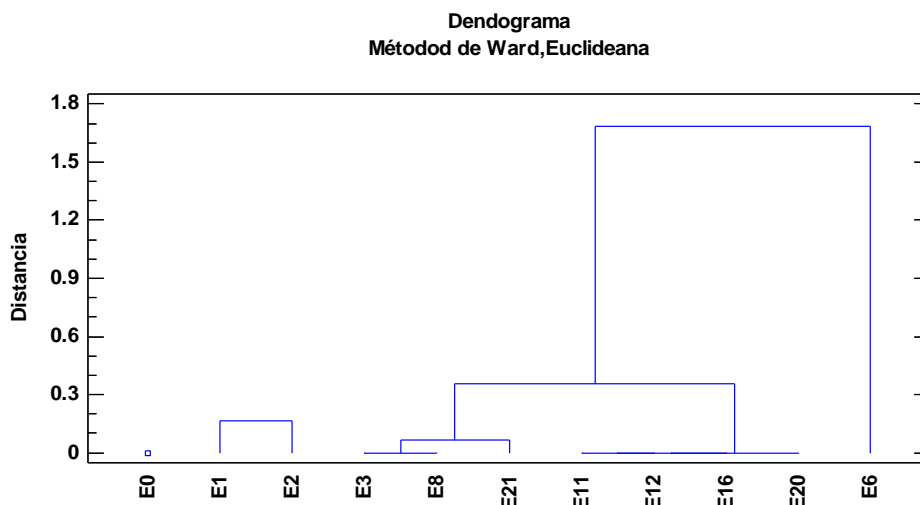


Figura 22. Análisis de agrupamiento del índice de calidad ecológica basado en macroinvertebrados acuáticos – 19 de febrero de 2020

Al obtener el agrupamiento de las diferentes estaciones por medio del índice ICE durante la presente campaña, se generó la distribución de la Tabla 29, donde la mayoría de las estaciones se encuentran concentradas en los valores bajos del ICE, mientras que el grupo más pequeño se asocia con unos valores altos para este.

Tabla 29. Distribución y clasificación del índice de calidad ecológica basado en macroinvertebrados acuáticos – 19 de febrero de 2020

DISTRIBUCIÓN ICE		CLASIFICACIÓN
1.00	5.30	Bajo
5.30	8,30	Intermedio
8.30	10.00	Alto

El análisis clúster aplicado para el índice de calidad ecológica evidencia que las estaciones San Miguel (E2) y Primavera (E3) presentaron una clasificación intermedia, mientras que la estación Reserva Alto de San Miguel (E0) registró una distribución alta, tal como ya se había mencionado durante el análisis.

A partir del análisis de correlaciones de las variables fisicoquímicas con el ICE observado en la Tabla 30, se evidenció una correlación inversa del 0,67 con la variable *E. coli* y del 0,62 con sustancias activas al azul de metileno (SAAM). Además, las variables mencionadas obtuvieron una correlación estadísticamente significativa (valor p menor a 0,05) lo que indica que al incrementar los valores de *E. coli* y SAAM en el río Aburrá-Medellín, el índice ecológico presenta valores menores, tal como se aprecia en las estaciones Ancón Sur (E3) y Aula Ambiental (E8).

Tabla 30. Correlación entre el ICE basado en macroinvertebrados acuáticos y las variables ambientales incluidas en el análisis ACC – 19 de febrero de 2020

VARIABLE FÍSICOQUÍMICA	CORRELACIÓN	VALOR p
Temperatura del agua	-0.55	0.08
pH del agua	-0.35	0.30
Caudal	-0.60	0.05
Grasas y aceites	-0.45	0.17
SAAM	-0.62	0.04
Nitratos	0.32	0.34
Níquel	-0.43	0.18
Plomo	-0.34	0.31
<i>E. coli</i>	-0.67	0.02

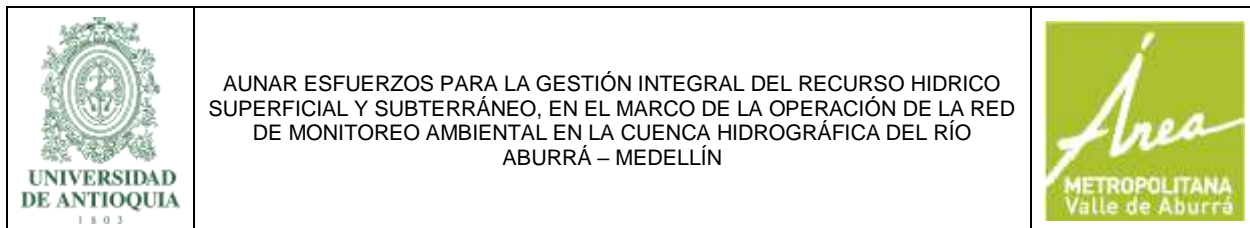
7.1.8.3 Consideraciones generales ICE

Con respecto al ICE basado en algas perifíticas, la ejecución del análisis de correspondencias canónicas (ACC) fue estadísticamente significativo. Por su parte, el análisis de redundancia canónica (RDA) asociado a un modelo lineal ejecutado para la comunidad de macroinvertebrados acuáticos no fue estadísticamente significativo, lo que podría estar relacionado con el número de estaciones consideradas para definir el gradiente diferencial en la cuenca.

Sin embargo, para ambas comunidades se recomienda incluir una mayor cantidad de estaciones para establecer un modelo multivariado que contenga más casos, con el fin de lograr correlaciones de mayor representatividad entre los datos. Además, teniendo en cuenta que la mayoría de las estaciones de monitoreo sobre el río Aburrá-Medellín presentan afectaciones por contaminación de aguas residuales domésticas y no domésticas, es necesario continuar con la aplicación del índice con el fin de establecer valores de distribución del ICE con mayor certeza.

Por otro lado, las dos comunidades hidrobiológicas con las que se evaluó el índice de calidad ecológica se desarrollan en un hábitat diferente y presentan tasas de respuesta distintas ante cambios de la calidad del agua por contaminación, lo que puede relacionarse con que el índice basado en macroinvertebrados haya presentado vértices importantes en cada uno de los monitoreos en comparación con el ICE basado en algas perifíticas, las cuales se caracterizan por una tasa de respuesta alta. También se encontró que el índice de calidad ecológica se ve influenciado por la concentración de diferentes variables físicoquímicas, aunque se destacan variables como pH del agua, *E. coli* y temperatura del agua, variables que también pueden afectar el desarrollo de ambas comunidades hidrobiológicas.

Se evidenció que la respuesta de las algas perifíticas al gradiente ambiental definido para el río Aburrá-Medellín se clasificó en un rango bajo e intermedio de calidad ecológica entre las 1,67 y 5,55 unidades. Se destaca que en la estación E8 se desarrollan condiciones propicias para la proliferación de algunas diatomeas como el género *Navicula*, las cuales pueden proliferar en ambientes con un alto grado de estrés ambiental. Lo anterior indica, que los microorganismos



presentaron una buena adaptación ante las altas concentraciones de materia orgánica, por lo que se podría inferir que los factores que favorecen el crecimiento de comunidades bacterianas pueden también facilitar el desarrollo de algas perifíticas en el río Aburrá-Medellín.

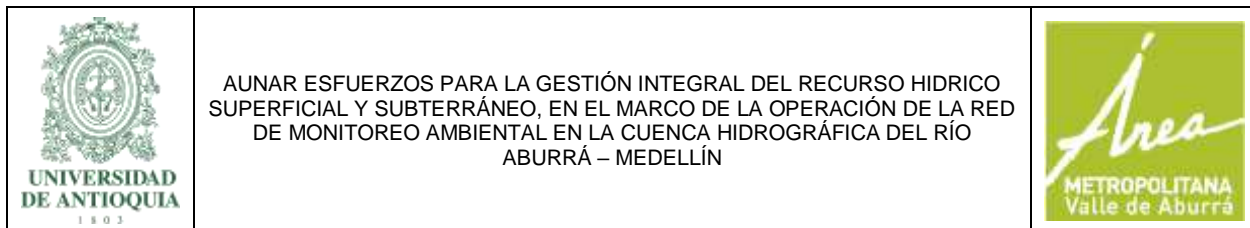
Por su parte, la calidad ecológica en el río con base en la comunidad hidrobiológica de macroinvertebrados registró un comportamiento con valores altos e intermedios en las estaciones E0 y E1, lo que se puede relacionar con que fueron los puntos de monitoreo que registraron una alta diversidad de taxones, comparado con las demás estaciones evaluadas. Se destaca que la estación Aula Ambiental (E8) registró condiciones de calidad ecológica baja para el ICE basado en macroinvertebrados acuáticos, lo que puede indicar que las condiciones fisicoquímicas en dicha estación no favorecen la tolerancia de los morfotipos de este grupo hidrobiológico.

Con respecto a los resultados de óptimos y tolerancias, se encontraron diferentes morfotipos tanto de macroinvertebrados como de algas con registros altos de óptimos y bajos de tolerancia, lo que permite afirmar que son organismos que pueden ser considerados bioindicadores del gradiente ambiental en el sistema estudiado, dado que su buena adaptación a las condiciones ambientales en las diferentes estaciones de monitoreo pueden ayudar con el seguimiento del comportamiento ecológico del río Aburrá-Medellín.

8 CONCLUSIONES

-La calidad del río Aburrá-Medellín, según los resultados obtenidos para los índices ICA (formulado por el IDEAM) e ICA Global en la campaña realizada el 19 de febrero de 2020 presentó una variación a lo largo de su recorrido, asociadas tanto a las condiciones hidroclimáticas secas como a la intervención antrópica en la cuenca. En las estaciones localizadas en la zona alta de la cuenca (E0, E1 y E2), el río presentó un menor deterioro en su calidad del agua y se clasificó entre buena y aceptable. Entretanto, en los sitios de monitoreo restantes se observó un mayor deterioro, donde el tramo comprendido entre Aula Ambiental (E8) y Parque de las Aguas (E14) fue el más crítico, puesto que la calidad del agua se clasificó entre mala y muy mala. Se destaca que en esta campaña el sitio de monitoreo que presentó un mayor deterioro de acuerdo con los resultados obtenidos para ambos índices fue la estación Niquía (E21), cuya calidad del agua se clasificó como muy mala según el ICA y el CIA Global. Es importante resaltar que en el tramo Papelsa(E16)-Puente Gabino (E20), según ambos índices, se observó una recuperación en la calidad del agua respecto a E14. Esta recuperación se asocia principalmente con procesos de dilución vinculados a la descarga de la central hidroeléctrica La Tasajera y río Grande, además de los cambios en la morfología del cauce que favorecen la oxigenación de la corriente debido a la alta turbulencia que favorece el intercambio gaseoso entre el río y la atmósfera. La clasificación de la calidad del agua obtenida para cada uno de los sitios evaluados según los índices de calidad ICA e ICA Global implementados, se asocia a las variables incluidas para su cálculo.

-Acorde a los caudales reportados por el SIATA en la campaña de monitoreo realizada el 19 de febrero de 2020, el caudal aportado por la central hidroeléctrica La Tasajera correspondió a 16.32 m³/s representa aproximadamente el 90% del caudal transportado por el río a la altura de la estación Parque de Las Aguas (E14), por lo que se considera que este aporte contribuye



significativamente en el proceso de dilución de los contaminantes transportados por el río y en su oxigenación favoreciendo procesos de descomposición de la materia orgánica, lo cual se refleja en los resultados obtenidos en las estaciones localizadas aguas abajo: Papelsa (E16) y Puente Gabino (E20).

-La campaña de monitoreo realizada el 19 de febrero de 2020 correspondió a régimen de caudal bajo, debido a las bajas precipitaciones registradas durante esta época. En ese sentido, la calidad del agua durante esta campaña estuvo influenciada por un menor caudal base, por lo que favoreció una mayor concentración de los contaminantes a lo largo del río Aburrá-Medellín, principalmente en el tramo E3-E14.

-Las cargas contaminantes medidas durante las campañas de monitoreo realizada el 19 de febrero del 2020 presentaron una tendencia creciente a lo largo de las estaciones de monitoreo ubicadas sobre el río Aburrá-Medellín, asociado a las cargas contaminantes aportadas al río Aburrá-Medellín a través de las quebradas afluentes y vertimientos directos, como también, a cargas difusas. A partir de la estación Aula Ambiental (E8) se observaron los mayores valores calculados para las cargas contaminantes resaltando que en Ancón Norte (E12) se registraron las mayores cargas para las variables DQO, DBO₅ y nutrientes, mientras que en la estación Puente Gabino (E20) los sólidos presentaron una mayor carga. Estos resultados se deben al ingreso de las cargas contaminantes provenientes de los municipios con mayor densidad poblacional de la cuenca que vierten sus aguas residuales sobre las quebradas afluentes y directamente sobre el río Aburrá-Medellín en aquellos puntos donde las redes de alcantarillado no se conectan con los colectores e interceptores, que finalmente llevan las aguas residuales a las plantas de tratamiento.

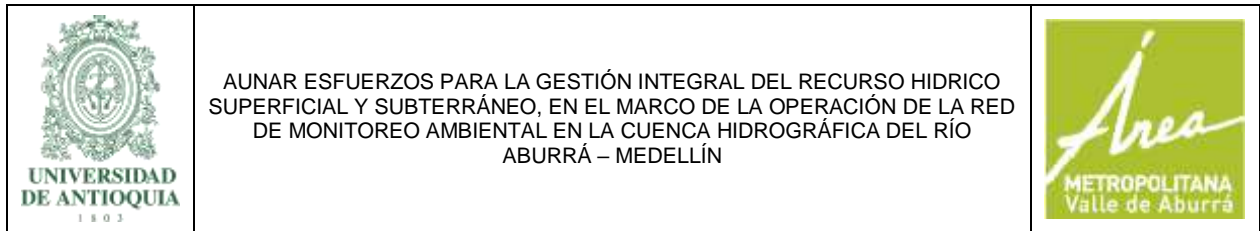
-Acorde a los resultados obtenidos, los objetivos de calidad se incumplieron entre las estaciones Aula Ambiental (E8) y Parque de las Aguas (E14) para la mayoría de las variables, excepto para pH del agua y grasas y aceites, el cual coincide con el tramo más crítico en términos de calidad del agua. Adicionalmente, el pH del agua cumplió en todas las estaciones evaluadas, mientras que la conductividad eléctrica presentó un cumplimiento solo en E0. En los tramos E0-E6 y E16-E20 se cumplieron los objetivos de calidad para la mayoría de las variables evaluadas de acuerdo con la Resolución Metropolitana 2016 de 2012 en el largo plazo.

9 RECOMENDACIONES

-Dar continuidad al desarrollo de las campañas de monitoreo de tipo completa y quebradas afluentes establecidas en la red de monitoreo manual, las cuales tienen una periodicidad de cuatro campañas de monitoreo sobre el río y dos campañas de quebradas durante el año.

-Implementar medidores de nivel y limnímetros en cada una de las estaciones de la red de monitoreo de manera que se pueda realizar una medición simultánea de caudal y de las variables fisicoquímicas, ello permita evaluar su variación respecto al régimen de caudal.

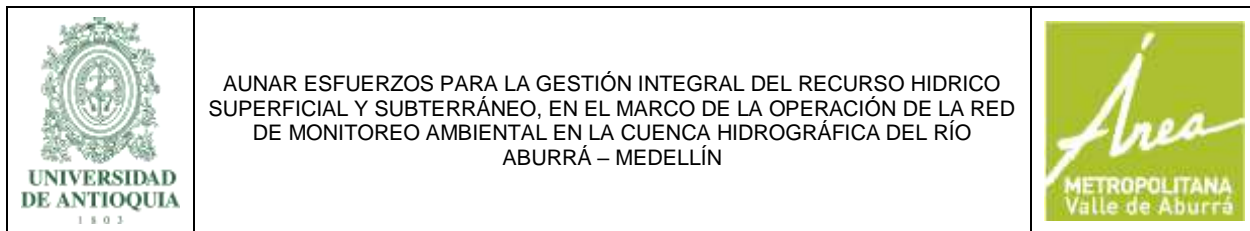
-La información histórica recolectada a partir de la operación de RedRío es fundamental para evaluar las condiciones de mejora o deterioro del río Aburrá-Medellín y de sus afluentes respecto a las obras de saneamiento implementadas y a las acciones adelantadas por las autoridades



ambientales con jurisdicción en la cuenca hidrográfica orientadas a garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico. En ese sentido, la operación de RedRío de forma continua y sistemática posibilita tener una mayor cantidad de datos que permitan analizar la dinámica de su calidad en una cuenca urbanizada y compleja, en la cual las actividades antrópicas tienen un efecto significativo sobre la calidad del río y de sus afluentes.

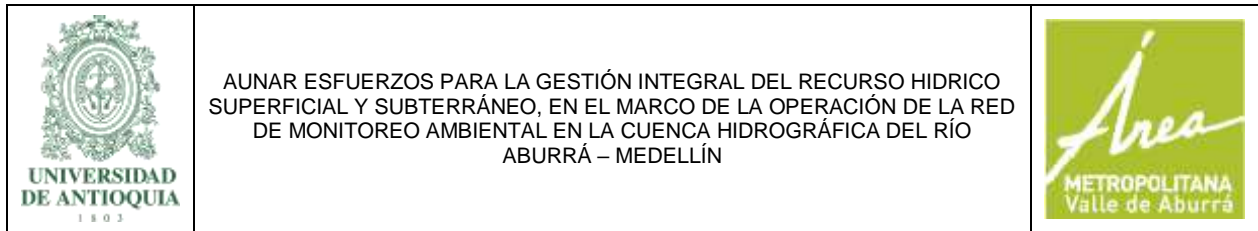
-Implementar el proyecto 13 del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH), en proceso de adopción, para ampliar la red de monitoreo de aguas superficiales en la cuenca hidrográfica, con la finalidad de obtener información sobre el deterioro progresivo en la calidad del agua de las quebradas afluentes al río Aburrá-Medellín.

-Continuar con las acciones de fortalecimiento establecidas en el presente convenio (ver Informe Fortalecimiento Aguas Superficiales).

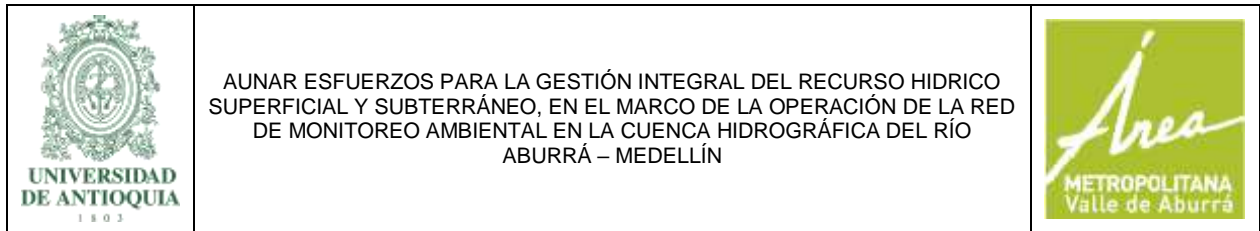


10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, N., & Caicedo, O. (2013). Métodos de campo y de laboratorio para hidrobiología sanitaria. Reimpresos. Medellín.
- Akinyemi SA, Nwankwo SA, & Fasuyi AO,. (2007). Diatomeas como indicador de contaminación en Awon Reservoir, Oyo Town, Nigeria. *Research Journal of Microbiology*, 2: 228-238.
- AMVA. (2016). Informe Calidad del Agua Convenio 1050 de 2016.
- AMVA. (2019). Informe Calidad del Agua Convenio 643 de 2019.
- Arcos, M.P., Gómez, A.C. 2006. Microalgas perifíticas como indicadores del estado de las aguas de un humedal urbano: Jaboque, Bogotá D.C., Colombia. *Acta Nova*, 4 (6): 60-79.
- Bold, H. & Wynne M. (1985). *Introduction to the algae, structure and reproduction*. Prentice-Hall. New Jersey.
- Bonilla, S., Haakonsson, S., Somma, A., Gravier, A., Britos, A., Vidal, L., ... & de la Escalera, G. M. (2015). Cianobacterias y cianotoxinas en ecosistemas límnicos de Uruguay. *Innotec*, (10 ene-dic), 9-22.
- Chalar, G., Arocena, R., Pacheco, J. P., & Fabián, D. 2011. Trophic assessment of streams in Uruguay: A Trophic State Index for Benthic Invertebrates (TSIBI). *Ecological Indicators*, 11, 362-369.
- Corporación Académica Ambiental, Universidad de Antioquia. 2016. Determinación de la calidad ecológica del río Negro y afluentes con base en la comunidad de macroinvertebrados acuáticos, perifiton y diatomeas. Medellín, Colombia.
- Domínguez E. & Fernández H. (2009). Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. *Sistemática y biológica*. Fundación Miguel Lillo. Argentina., 654.
- Fernández, H., & Domínguez, E. (2001). Guía para la determinación de los artrópodos bentónicos Sudamericanos. *Entomotrópica*, 16(3), 219.
- Forero, L. 2012. Elaboración de un Índice para la Evaluación de la Calidad Ecológica de la cuenca del Río Negro (Antioquia) con base en los Macroinvertebrados Bentónicos. Tesis de Pregrado en Biología. Universidad De Antioquia. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Instituto de Biología.
- Guisande, C.; Barreiro, A.; A.; Vaamonde, A. 2011. *Tratamiento de Datos con R, STATISTICA y SPSS*. España. Ediciones Díaz de Santos.
- Guisande, C.; Barreiro, A.; Maneiro, I.; Riveiro, I.; Vergara, A.; Vaamonde, A. 2006. *Tratamiento de Datos*. Galicia, España. Ediciones Díaz de Santos.
- Haase, R.; Nolte, U. 2008. The invertebrate species index (ISI) for streams in southeast Queensland, Australia. *Ecological Indicators*, 8, 599-613.



- Harding, W.R., Archibald, C.G.M., Taylor, J.C. 2005. The relevance of diatoms for water quality assessment in South Africa: A position paper. *Water SA*, 31(1): 41-46.
- Hart, D. D. 1994. Building a Stronger Partnership between Ecological Research and Biological Monitoring. *Journal of the North American Benthological Society*, 13, 110-116.
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vivies de Andrés (INVEMAR). (2018). Protocolo para el monitoreo del agua. Bogotá D.C.
- Lobo, E. A., Callegaro, V. L. M., Hermany, G., Gomez, N., & Ector, L. (2004). Review of the use of microalgae in South America for monitoring rivers, with special reference to diatoms. *Vie et Milieu*, 54(2-3), 105-114.
- Magurran, A. E. (1988). *Ecological diversity and its measurement*. Princeton University Press, New Jersey, 179 pp
- Margalef, R. (1978). Phytoplankton communities in upwelling areas. The example of NW Africa. *Oecologia aquatica*, 3(3).
- Masseret, E., Amblard, C., Bourdier, G. 1998. Changes in the structure and metabolic activities of periphytic communities in a stream receiving treated sewage from a waste stabilization pond. *Water Research*, 32 (8): 2299-2314.
- Merrit, R. W., & Cummins, K. W. (1996). *An introduction to the aquatic insects of North America*. Tercera Edición. Kendall.
- Pajunen, V., Kahlert, M., & Soininen, J. (2020). Stream diatom assemblages as environmental indicators—A cross-regional assessment. *Ecological Indicators*, 113, 106183.
- Pérez, G. R., Restrepo, J. R. 2008. *Fundamentos de limnología neotropical* (Vol. 15). Universidad de Antioquia.
- Prat, N., Ríos, B., Acosta, R., & Rieradevall, M. (2009). Los macroinvertebrados como indicadores de calidad de las aguas. *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y biología*, 631-654.
- Ramírez, J. 2000. *Fitoplancton de agua dulce. Aspectos ecológicos, taxonómicos y sanitarios*. Primera ed. Medellín (CO): Editorial Universidad de Antioquia.
- Roldán, G. 1988. *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia*. Fondo FENColombia - Conciencias - Universidad de Antioquia, Editorial Presencia Ltda. Santafé de Bogotá.
- Roldán, G. 2003. *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia. Uso del método BMWP/Col*. Editorial Universidad de Antioquia.
- Roldán G. y Ramírez, JJ. (2008). *Fundamentos de Limnología Neotropical*. Editorial Universidad de Antioquia. Medellín.
- Roldán-Pérez, G. 2016. Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(155), 254-274.



- Round FE, Crawford RM. (1990). Phylum Bacillariophyta. In: Margulis L, Corliss JO, Melkonian M, Chapman DJ (eds) Handbook of protocista. Jones and Barlett, Boston, pp 574–596
- Sistema de Alerta Temprana-SIATA. (2020). Informe Monitoreo Hidráulico Caudales de la campaña del 19 de febrero de 2020.
- Soto-Estrada, E. (2019). ESTIMACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA EN MEDELLÍN, COLOMBIA. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 35(2), 421-434.
- Ter Braak, C. Smilauer, P. 2002. CANOCO for Windows Version 4.5 Centre for Biometry Wageningen CPRO-DLO. Wageningen, The Netherlands: Wageningen University.
- Wu, J.T. 1999. A generic index of diatom assemblages as bioindicator of pollution in the Keelung River of Taiwan. Hydrobiologia, 397: 79-87.
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). Atmospheric science: an introductory survey (Vol. 92). Elsevier.
- Zúñiga, M. del C. 2010. Diversidad, distribución y ecología del orden Plecoptera (Insecta) en Colombia, con énfasis en Anacroneuria (Perlidae). Universidad de la Amazonía. Momentos de Ciencia 7 (2): 101-112.