



**Evaluación del monitoreo a la calidad y cantidad de aguas superficiales y subterráneas del
Área Metropolitana del Valle de Aburrá en el período comprendido entre los años 2012-
2021**

Hermes Manuel Pineda Blanco

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Químico

Asesoras

Sara Lizeth Salamanca Arias, Magíster (MSc) en Prevención de Riesgos Laborales

Lina María González Rodríguez, Doctor (PhD) en Ciencias Químicas

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Química

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	(Pineda Blanco, 2022)
Referencia	Pineda Blanco, H. M. (2022). <i>Evaluación del monitoreo a la calidad y cantidad de aguas superficiales y subterráneas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá en el período comprendido entre los años 2012- 2021</i> . Práctica Empresarial. Universidad de Antioquia, Medellín-Antioquia.
Estilo APA 7 (2020)	



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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Lina María González Rodríguez.

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

Agradecimientos

A mi madre, Dalgy Blanco por acompañarme en este gran desafío de convertirme en profesional, por su apoyo incondicional y por la revisión de mis redacciones incluso cuando la cantidad de páginas y el hecho de que no domina los temas le puede quitar las ganas de leer, su apoyo fue esencial para culminar este proceso.

A la Universidad de Antioquia por ser ese espacio de aprendizaje donde convergieron personas, sueños y conocimientos que han sido usados para construir mi carácter y hacerme un profesional con convicciones y con la ilusión de que es posible generar cambios.

A mis compañeros de trabajo, el Equipo de Gestión Hídrica los cuales compartieron su conocimiento y contribuyeron en la adquisición de memorias, su disposición en escuchar y apoyar fue fundamental para el desarrollo de este documento, en especial a Juan Esteban Quijano que a pesar de tener mucho trabajo siempre se mostró presto a colaborar.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
Planteamiento del problema	12
Justificación.....	13
Objetivos	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos.....	15
Marco teórico	16
Metodología	18
Resultados	20
Consideraciones	24
Construcción de formatos.....	27
Análisis de los resultados de las campañas de monitoreo de aguas superficiales	54
Análisis de los resultados de las campañas de monitoreo de aguas subterráneas.	64
Conclusiones	71
Referencias	75
Anexos.....	77

Lista de tablas

Tabla 1	33
Tabla 2	35
Tabla 3	38
Tabla 4	40
Tabla 5	48
Tabla 6	50
Tabla 7	67
Tabla 8	90
Tabla 9	92
Tabla 10	93
Tabla 11	95

Lista de figuras

Figura 1	28
Figura 2	29
Figura 3	30
Figura 4	31
Figura 5	32
Figura 6	34
Figura 7	36
Figura 8	37
Figura 9	39
Figura 10	47
Figura 11	49
Figura 12	57
Figura 13	59
Figura 14	62
Figura 15	65
Figura 16	70

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AMVA	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
ARD	Agua Residual Doméstica
ARnD	Agua Residual no Doméstica
CE	Conductividad eléctrica
CCME	Canadian Council Ministres of Enviroment
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno.
DQO	Demanda Química de Oxígeno
ICA	Índice de Calidad del Agua
ICA-AS	Índice de Calidad de las Agua Subterráneas
ICG-As	Índice de Calidad General de las Agua Subterráneas
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
I + D	Investigación y Desarrollo
NSF	National Sanitary Foundation
O₂	Oxígeno Molecular
OD	Oxígeno Disuelto
pH	Potencial de Hidrógeno
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
REDRÍO	Red de Monitoreo del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del río Aburrá-Medellín
SST	Sólidos Suspendidos Totales
UdeA	Universidad de Antioquia
WQI	Water Quality Index

Resumen

El índice de calidad del agua (ICA) es una herramienta que permite evaluar la calidad del recurso hídrico. Utiliza técnicas de ponderación que permiten convertir una gran cantidad de datos sobre la calidad del agua en un solo valor o índice, se aplica para evaluar la calidad del agua (superficial y subterránea) según los criterios locales de calidad. Con el desarrollo de este proyecto se busca mejorar la visualización de los datos, facilitando la interpretación y análisis de los resultados, de igual forma se busca relacionar los aspectos o parámetros que influyen de manera negativa en los índices de calidad del agua con las posibles actividades antrópicas que se desarrollan en los tramos o zonas más afectadas en jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. A partir del histórico de los índices de calidad producto del monitoreo de aguas subterráneas se identifican las condiciones de las captaciones y se verifican los cambios positivos o negativos que han tenido, teniendo en cuenta que están condicionadas por los usos del suelo y las actividades antrópicas que se realizan en torno a ellas. En cuanto a la revisión de los resultados históricos del monitoreo de aguas superficiales se definen las posibles razones que han influido en la calidad del recurso, relacionando los parámetros medidos in situ con la posible intervención antrópica en los tramos priorizados a través del río Aburrá-Medellín. Además, por medio de un análisis de tendencias se compara el valor de los índices en diferentes instantes de tiempo para determinar los cambios en la calidad (degradación o mejora) que han tenido a través de los años.

Palabras clave: calidad del agua, índice de calidad del agua, parámetros físico-químicos, monitoreo de calidad, aguas subterráneas, aguas superficiales.

Abstract

The water quality index (ICA) is a tool that allows evaluating the quality of the water resource. It uses weighting techniques that allow converting a large amount of data on water quality into a single value or index, it is applied to evaluate the quality of water (surface and underground) according to local quality criteria. With the development of this project, it seeks to improve the visualization of the data, facilitating the interpretation and analysis of the results, in the same way it seeks to relate the aspects or parameters that negatively influence the water quality indices with the possible activities anthropic that develop in the sections or areas most affected in the jurisdiction of the Área Metropolitana del Valle de Aburrá. From the historical of the quality indices product of the groundwater monitoring, the water point conditions are identified and the positive or negative changes they have had are verified, taking into account that they are conditioned by the uses of the soil and the activities anthropic that take place around it. Regarding the review of the historical results of surface water monitoring, the possible reasons that have influenced the quality of the resource are defined, relating the parameters measured in situ with the possible anthropic intervention in the prioritized sections through the Aburrá-Medellín river. In addition, by means of a trend analysis, the value of the indices is compared at different times to determine the changes in quality (degradation or improvement) that have occurred over the years.

Keywords: water quality, water quality index, physical-chemical parameters, quality monitoring, groundwater, surface water.

Introducción

De todos los recursos naturales, el agua es el más esencial. La vida comenzó en el agua, se nutre con agua. Hay organismos que pueden sobrevivir sin oxígeno. Pero ninguno podría sobrevivir durante mucho tiempo sin agua. Es un recurso básico para garantizar la vida de los seres vivos en el planeta (Tasneem Abbasi, 2012). En términos de calidad, se podría decir que existen fuentes de agua lo suficientemente buenas para beber, pero no adecuada para su uso como refrigerante en una industria. Puede ser bueno para regar algunos cultivos, pero no para otros. Su consumo puede ser adecuado para el ganado y no para la piscicultura. Además, su escasez (cantidad) y contaminación (calidad) provocan que millones de personas tengan un acceso deficiente a este bien tan necesario.

En Colombia, muchos habitantes tienen un acceso deficiente al agua potable dado el aislamiento geográfico al cual están expuestas algunas comunidades (González Scancelli, 2013). En consecuencia, usan las fuentes de agua disponibles en su entorno, lo cual representa un riesgo para la salud porque los recursos hídricos que utilizan pueden estar contaminados (Barrera Niño, 2017).

La calidad del agua de las fuentes hídricas superficiales se ha catalogado como uno de los temas más críticos, debido a la escasez que se ha generado durante los últimos años (Varol, Gökot, Blekeyen, & Sen, 2012). Así mismo, el crecimiento demográfico ha contribuido en la disminución de la calidad del recurso debido a los altos índices de uso del agua y al desconocimiento de los usuarios de las normativas de vertimientos de aguas residuales a los cuerpos de aguas superficiales. Determinar la calidad del agua es de gran importancia para el uso que se le vaya a dar, ya sea para consumo, recreación o industrial (Boyacioglu, 2007). El Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) en el año 2003 diseñó y puso en marcha la Red de Monitoreo del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del río Aburrá-Medellín (REDRÍO). RedRío hace seguimiento a través del monitoreo a la calidad y cantidad del agua del río, a sus principales quebradas afluentes y a las aguas subterráneas del Valle de Aburrá, con el objeto de generar de manera periódica información que permita a la Autoridad Ambiental, realizar una gestión integral del recurso hídrico, referente a su ordenamiento, protección, planeación y restauración. La calidad del agua se mide a partir de parámetros físico-químicos y microbiológicos, los cuales se cuantifican por medio de diferentes métodos. Estos parámetros incluyen temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica,

sólidos suspendidos totales, turbiedad, coliformes fecales, demanda química de oxígeno, nutrientes, entre otros. Para más información sobre el programa REDRÍO ver el **Anexo 1**.

La gestión de la calidad del agua requiere la recopilación y el análisis de un gigantesco conjunto de datos sobre la calidad del agua que puede ser difícil de evaluar y sintetizar. Se han desarrollado herramientas para evaluar los datos sobre la calidad del agua; a partir de modelos de índice de calidad del agua propios de cada fuente hídrica. Que permiten el análisis de grandes conjuntos de datos de calidad del agua que varían temporal y espacialmente para producir un valor único, que indica la calidad del cuerpo de agua en términos fáciles de entender. Con el presente trabajo se busca mejorar la visualización de los datos, facilitando la interpretación y análisis de los resultados, de igual forma se busca relacionar los aspectos o parámetros que influyen de manera negativa en los índices de calidad del agua con las posibles actividades antrópicas que se desarrollan en los tramos o zonas más afectadas en la jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Planteamiento del problema

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá en el tema relacionado con la gestión ambiental del río Aburrá Medellín presenta las siguientes dificultades.

- Calidad de las aguas superficiales y subterráneas en su jurisdicción
- El deterioro y las amenazas por la contaminación producida por vertimientos puntuales, escorrentías, procesos productivos y los usos del suelo a escala industrial, doméstico y agroindustrial.
- El aumento poblacional, el desarrollo industrial, el grado de sensibilización de la comunidad y la falta de acciones que han favorecido el incremento de la contaminación de la microcuenca del Río Medellín.
- La falta de protección y gestión de las aguas, lo que requiere una planificación hidrológica que regule la disponibilidad, calidad y utilización de los recursos hídricos, para llevar a cabo un control adecuado del impacto de la actividad humana sobre la calidad del agua.

Para las aguas superficiales, se hace necesaria la planificación de acciones que permitan mejorar la calidad de las aguas y controlar su deterioro, se requiere conocer y hacer seguimiento en el tiempo. En consecuencia, conocer y analizar el estado histórico y actual de calidad e identificar sus variaciones en el espacio y el tiempo. El monitoreo de la calidad del agua permite obtener información cuantitativa sobre las características físicas, químicas y biológicas del agua, mediante muestreo. Y así dar respuesta frente a actuaciones concretas, como puede ser el control de vertimientos. Así mismo, se hace necesaria la evaluación de las aguas subterráneas en la cuenca del río Medellín para identificar actividades que amenacen la calidad de este recurso y definir zonas de vulnerabilidad.

Justificación

Los servicios ecosistémicos de los cuales se abastece el Valle de Aburrá presentan problemáticas ambientales que podrían traer consecuencias en un futuro cercano. Ciertas actividades humanas están poniendo en riesgo el aprovisionamiento de agua en los municipios que integran la región. Las actividades comerciales y de desarrollo son el motor de la economía nacional, pero también impactan de manera asentada los servicios ecosistémicos de los cuales dependemos para el desarrollo social y el sostenimiento a través del tiempo (Álvarez-Dávila, Restrepo, Gonzáles, Camaño, & Acevedo, 2015).

El incremento de la presión (todas las actividades antrópicas que perturben la estructura y funcionamiento natural de las masas de agua se denominan “presiones”) sobre los recursos hídricos concientiza a la población sobre la problemática actual y como actividades humanas como la minería, la urbanización y la deforestación afectan las cuentas y embalses que abastecen de agua el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. La información sobre la calidad del agua de los ríos, arroyos y cuerpos de agua estáticos, se basan en el monitoreo de la calidad del agua a cargo de las autoridades ambientales del Valle de Aburrá (CorNare, CorAntioquia y el AMVA).

Las modificaciones antrópicas sobre elementos del ambiente con el propósito de satisfacer necesidades de alimento, abrigo, vestimenta, etc., pueden generar subproductos que tienen un impacto negativo sobre los recursos naturales. Por ejemplo, las aguas residuales domésticas e industriales tienden a ser descargadas en los cuerpos de agua cercanos. Aguas residuales con sustancias nocivas que podrían causar enfermedades, comportamientos anormales e incluso problemas en la vida acuática, así como también en el ser humano cuando las ingiere.

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá ha identificado la problemática del río Medellín, razón por la cual, en el 2003 nace la Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Río Aburrá-Medellín (RedRío), en convenio con la Universidad de Antioquia, con el fin de conocer la calidad y la cantidad del río Aburrá-Medellín, las de sus principales quebradas afluentes y las aguas subterráneas, la cual, funge de insumo para diagnosticar y tomar decisiones encaminadas en la administración, ordenamiento y manejo integral de la cuenca, con énfasis en el agua.

Los diversos monitoreos de calidad de las aguas superficiales y subterráneas recopilan información con el propósito de evaluar las necesidades que presentan los acuíferos y el Río Medellín a lo largo de su trayectoria. Se hace necesario analizar el histórico de la calidad del agua, para diagnosticar, tomar decisiones y realizar acciones, ordenadas, hacia el re-establecimiento de este recurso tan importante, la metodología propuesta busca identificar las posibles intervenciones sobre el río y sus alrededores, y así reconocer las causas que impiden alcanzar un “buen estado del recurso hídrico”, con enfoque en los puntos de monitoreo con riesgo de contaminación y antropizados, domésticos, industriales y agrícolas.

Objetivos

Objetivo general

Determinar a partir de los resultados históricos de monitoreo de aguas superficiales y subterráneas en el período comprendido entre los años 2012-2021 las variaciones en la calidad del agua.

Objetivos específicos

Identificar los parámetros principales que intervienen en los índices de calidad de las corrientes de aguas superficiales y subterráneas que supervisa el AMVA, su influencia e importancia.

Construir un formato donde se visualice o identifique, de manera más amigable o dinámica, el resultado de las campañas de monitoreo de aguas superficiales y subterráneas.

Identificar a partir del índice de calidad (IDEAM) el resultado de las campañas de monitoreo de aguas superficiales y cuáles son los tramos más afectados del río Aburrá-Medellín.

Identificar a partir de los resultados de las campañas de monitoreo de aguas subterráneas, cuáles son las zonas más afectadas en jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Realizar un análisis de los resultados de las campañas de monitoreo de aguas superficiales y subterráneas y elaborar un documento con recomendaciones que relacionen la variabilidad e influencia de los parámetros medidos in situ con la intervención antrópica en los tramos o zonas priorizadas en jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Marco teórico

El índice de calidad del agua (ICA), es una expresión que combina varios parámetros, que sirven como una medida para estimar la calidad del recurso hídrico. El índice puede ser representado por un número, un rango o un color; y expresa un diagnóstico cualitativo de la calidad del agua (buena, aceptable, regular, mala o muy mala). A partir del índice la información se puede interpretar con mayor facilidad. El índice de calidad del agua es una herramienta que permite transmitir información que está estrechamente relacionada con profesionales que presentan conocimientos técnicos, a personas apenas familiarizados con la misma.

Las agencias responsables del suministro de agua y el control de la contaminación del agua han defendido firmemente la formulación y el uso de índices. Una vez que se han recopilado los datos sobre la calidad del agua mediante muestreo y análisis, surge la necesidad de traducirlos a una forma que se entienda fácilmente. Una vez que los ICA se desarrollan y aplican, sirven como una herramienta conveniente para examinar tendencias, resaltar condiciones ambientales específicas y ayudar a los tomadores de decisiones gubernamentales a evaluar la efectividad de los programas regulatorios (Tasneem Abbasi, 2012).

De hecho, casi todos los propósitos para los cuales se monitorea la calidad del agua (evaluación, utilización, tratamiento, asignación de recursos, información pública, I + D y planificación ambiental) también son atendidos por índices. Además, los índices hacen que la transferencia y la utilización de datos sobre la calidad del agua sean enormemente más fáciles y lúcidas. Es decir, los índices de calidad del agua ayudan a (Tasneem Abbasi, 2012):

1. Asignación de recursos: los índices pueden aplicarse en decisiones relacionadas con el agua para ayudar a los administradores a asignar fondos y determinar prioridades.
2. Clasificación de las asignaciones o puntos: se pueden aplicar índices para ayudar a comparar la calidad del agua en diferentes ubicaciones o áreas geográficas.
3. Cumplimiento de las normas: los índices pueden aplicarse a ubicaciones específicas para determinar hasta qué punto se cumplen o superan los estándares legislativos y los criterios existentes.

4. Análisis de tendencias: se pueden aplicar índices a los datos de calidad del agua en diferentes momentos para determinar los cambios en la calidad (degradación o mejora) que se han producido durante el período.
5. Información pública: dado que la puntuación del índice es una medida fácil para entender la calidad del agua, los índices se pueden utilizar para mantener al público informado de la calidad general del agua de cualquier fuente, o de diferentes fuentes alternativas, así mismo permite identificar, en una palabra, si las acciones en general, subieron o bajaron.
6. La calidad inherente de un índice el cual traduce una gran cantidad de datos a un solo puntaje es inmensamente valiosa en la investigación científica, por ejemplo, para determinar la eficacia de diferentes medidas de restauración ecológica o estrategias de tratamiento de agua con referencia a un cuerpo de agua, el impacto de las actividades de desarrollo en la calidad del agua, etc.

El agua es un componente crucial del medio ambiente; pero la calidad de las aguas superficiales y subterráneas se ha estado deteriorando durante mucho tiempo debido a actividades tanto naturales como humanas. Ejemplos de actividades antropogénicas que afectan negativamente la calidad del agua son la minería, la ganadería, la producción y eliminación de desechos (industriales, municipales y agrícolas), el aumento de la escorrentía de sedimentos o la erosión del suelo debido al cambio de uso de la tierra y contaminación por metales pesados. (Uddin, M. G., 2021)

Un índice de calidad del agua comprende cuatro procesos o componentes. Primero, se seleccionan los parámetros de calidad del agua de interés. En segundo lugar, se leen los datos de calidad del agua y para cada parámetro de calidad del agua, las concentraciones se convierten en un subíndice adimensional de valor único. En tercer lugar, se determina el factor de ponderación para cada parámetro de calidad del agua y, en cuarto lugar, se calcula un índice de calidad del agua de valor único final mediante una función de agregación utilizando los subíndices y factores de ponderación para todos los parámetros de calidad del agua. (Uddin, M. G., 2021).

Metodología

Para alcanzar los objetivos planteados se llevará a cabo la siguiente metodología:

1. Revisión de la documentación del Área Metropolitana del Valle de Aburrá sobre la Red de Monitoreo del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del río Aburrá-Medellín (REDRÍO). Y las campañas de monitoreo de las corrientes de aguas superficiales y subterráneas.
2. Se identifican e investigan los parámetros principales que intervienen en los índices de calidad de las corrientes de aguas superficiales y subterráneas presentes en los informes del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, su importancia y relación con la calidad del recurso hídrico.
3. Se construye un formato en Excel que permita visualizar el histórico de las campañas de monitoreo del río Aburrá-Medellín de una forma más amigable, compilando la información de las tablas en gráficos. Por lo tanto, se realiza el diseño de un gráfico dinámico en Excel que permita filtrar la información de parámetros medidos o calculados por año, semestre, e incluso calidad. Además, se quiere que en una única gráfica se pueda filtrar la información de los parámetros medidos y calculados (temperatura, pH, conductividad eléctrica y demás). La idea es facilitar la interpretación de los resultados y presentar un panorama general del estado del río a partir de los parámetros medidos en las campañas de monitoreo de la red.
4. A partir del gráfico dinámico del histórico de las campañas de monitoreo de aguas superficiales, teniendo en cuenta la variación y el diagnóstico cualitativo del índice de calidad del agua (buena, aceptable, regular, mala o muy mala; IDEAM), identificar cuáles son los tramos más afectados del río Aburrá-Medellín durante el período comprendido entre el 2012-2021.
5. A partir del gráfico dinámico del histórico de las campañas de monitoreo de aguas subterráneas y teniendo en cuenta la variación y el diagnóstico cualitativo de un índice de calidad del agua (excelente, muy buena, buena, regular, mala o muy mala), identificar cuáles son las zonas más afectadas en jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá durante el período comprendido entre el 2012-2021.

6. Por último, se realiza un análisis de los resultados de las campañas de monitoreo de aguas superficiales y subterráneas en las zonas priorizadas en jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Posteriormente, se elabora un documento con el análisis y las recomendaciones que relacionen la variación de los índices de calidad del agua con los parámetros medidos in situ y con la intervención antrópica.

Resultados

Los cuerpos de agua se pueden caracterizar analizando tres componentes: hidrología, características fisicoquímicas y la parte biológica. Por lo tanto, es indispensable monitorear estos tres componentes. La variedad de regímenes hidráulicos que se presentan en los distintos cuerpos de agua hace necesario caracterizarlos por sus dimensiones, dividir por tramos facilita el análisis de la calidad del agua en relación con la variabilidad del caudal en los diferentes anchos de sección. En las aguas subterráneas es imperativo tener en cuenta el grado de saturación del suelo, en consecuencia, los criterios de calidad de los datos se basan en las concentraciones usuales de iones que deben presentar las muestras de agua subterránea, estos criterios se aplican con la finalidad de verificar si existen muestras con concentraciones atípicas, y explicar las posibles razones según las condiciones de la zona por las cuales las muestras presentan la anormalidad (roca o intervención antrópica). En la actualidad, la disponibilidad de agua en cantidad suficiente y de buena calidad es una de las principales necesidades de cualquier población. Por esta razón, el análisis de la calidad del agua busca:

- Diagnosticar los problemas relacionados con la calidad del agua.
- Relacionar los problemas de calidad con los diferentes usos del agua
- Identificar las variables de calidad del agua que se quieren controlar y los medios o recursos disponibles para hacerlo.

El agua se caracteriza por ciertas propiedades que la distinguen de otros compuestos líquidos y su calidad se determina analizando varios parámetros físicos, químicos y biológicos, como se registra en el **Anexo 2**.

Existen problemas de contaminación que se manifiestan e interfieren en los diversos usos benéficos del agua y su subsecuente confirmación por muestreo y análisis de la calidad del agua. Por ejemplo, se ha observado que una concentración baja de oxígeno disuelto en una corriente de agua interfiere en la vida de los peces y causa molestias de tipo estético; la presencia de niveles altos de bacterias inutiliza un recurso hídrico para recreación; asimismo, se ha demostrado que la presencia de ciertos metales pesados en el agua para consumo humano puede producir cáncer y toxicidad en los usuarios (Sierra Ramirez, 2011). Por esta razón, la calidad del agua depende del uso que va a tener el sistema hídrico que se quiere

evaluar. Dependiendo de si el agua se va a usar para consumo humano, riego, transporte de mercancías, asimilación y drenaje o transporte de desechos, explotación manual y mecánica de materiales de construcción, generación de energía hidroeléctrica, enfriamiento de agua en la industria, abastecimiento de agua municipal, recreación con contacto secundario (restringido) o recreación con contacto primario; el sistema de evaluación de la calidad será diferente. Por lo tanto, no existe un parámetro físico, químico o biológico que permita definir la calidad del agua en un determinado tiempo o sitio. En este orden de ideas, los índices de calidad del agua son expresiones matemáticas que se calculan considerando los siguientes aspectos (Sierra Ramirez, 2011):

1. Aspectos fisicoquímicos: concentraciones, especies y tipos de sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en el agua.
2. Aspectos biológicos: la composición y estado de la biota acuática.
3. Aspectos no acuáticos: los cambios temporales y espaciales que pueden afectar el sistema acuático en estudio. Por ejemplo, la canalización del cauce, la presencia o ausencia de bosques o capa vegetal en las riberas de la corriente, etc.

El índice de Calidad del Agua propuesto por la National Science Foundation de los Estados Unidos ha sido utilizado por diferentes entidades en la evaluación de la calidad del agua. Un índice de la calidad del agua es una expresión global en la cual se integran o combinan factores naturales de tipo morfológico, geográfico y/o climático con las características fisicoquímicas y biológicas del agua, sin ignorar la estética del recurso hídrico.

En Colombia se propuso el uso de un índice de calidad del agua para corrientes superficiales. Este fue publicado en agosto de 2009 por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM como herramienta institucional para evaluar el recurso hídrico en Colombia. La referencia (ICA, 2011) contiene la publicación oficial del IDEAM en la cual se explica la formulación y aplicación del índice de calidad del río Aburrá-Medellín.

En Colombia, existen índices que han sido implementados para las aguas superficiales, sin embargo, para aguas subterráneas no han sido diseñados o aplicados de manera significativa. En la normativa vigente no existe un índice por ley que deba medirse para el monitoreo de las aguas subterráneas. Desde el 2010, en el marco del proyecto RedRío

se ha implementado un índice de calidad de aguas subterráneas para consumo humano (ICA-AS) propuesto por (Martínez Franco, 2007), el cual fue basado en el índice propuesto por la NSF (National Sanitary Foundation). El índice de calidad ICA-AS se diseñó debido a que el principal uso del agua subterránea en la zona del Bajo Cauca Antioqueño es el doméstico y parte de la premisa que la calidad del agua depende del uso. Para la construcción del índice se tiene en cuenta el decreto 475 de 1998 donde se dan las normas para agua potable y segura, el decreto 1594 de 1984 donde se normalizan los parámetros para aguas crudas que requieren tratamiento convencional y para aguas crudas que requieren solo desinfección.

Se escogen aquellos parámetros cuya presencia según el decreto 475 de 1998 pueden afectar directamente la salud de los usuarios y los que alteran la calidad del agua en lo que se refiere a criterios organolépticos y químicos que pueden limitar su uso doméstico y que además tienen un porcentaje significativo de muestras que no cumplen con la norma colombiana. (Martínez Franco, 2007).

Adicionalmente, en el marco del proyecto RedRío desde el 2017 se propuso la aplicación de un nuevo índice de calidad que nació de la motivación de profundizar y aplicar nuevas herramientas en el conocimiento de la calidad del agua subterránea y la determinación de la potencialidad de sus usos. En este orden de ideas, surge el índice de calidad general de agua subterránea (ICG-As) que fue propuesto por (Vélez Ortíz, 2017), este índice está basado en la propuesta hecha por el CCME (Canadian Council Ministres of Enviroment). El índice busca calificar la calidad del agua subterránea analizada de acuerdo con sus usos potenciales y la normatividad vigente del lugar. Para la construcción del índice se tiene en cuenta el decreto 1594 de 1984 por el cual se define y establecen límites máximos en cuanto a los usos del agua y residuos líquidos, la resolución 2115 de 2007 por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano y el decreto 3930 de 2010 por el cual se reúne y reglamenta parcialmente en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones (Vélez Ortíz, 2017). Para más información relacionada con el objetivo y la construcción de estos índices dirigirse al **Anexo 3**.

Los parámetros que se eligen para la medición del ICA deben ser representativos en aspectos (físicoquímicos, biológicos o no acuáticos) (Sierra Ramirez, 2011):

- Cuando se desea que en el ICA quede reflejada la **capacidad recuperadora** de la corriente, el oxígeno disuelto o su porcentaje de saturación son indicadores muy apropiados para valorar esta actividad.
- Si se considera que el contenido de **materia orgánica** debe incluirse en el ICA, entonces, se pueden emplear parámetros como la DBO₅, DQO, los sólidos volátiles o el carbono orgánico total (COT).
- La profundidad al disco Secchi, la turbiedad, el color y los sólidos suspendidos son parámetros ideales para incluir la influencia del **aspecto estético del agua** en el ICA. De la misma manera, el recuento de coliformes totales y fecales **son indicadores de contaminación fecal** y los metales pesados **de toxicidad**.
- Los nitratos y fosfatos son indicadores de la **presencia o ausencia de nutrientes**: NO₃ y PO₄.

En el **Anexo 2** se describen los siguientes parámetros, frecuentemente incluidos en el cálculo del ICA:

El pH: origina cambios en la fauna y la flora de los cuerpos de agua. Ejerce influencia sobre la toxicidad de ciertos compuestos, como el amoníaco, metales pesados, hidrógeno sulfurado, etc.

Dureza: las aguas duras imposibilitan el efecto adecuado de jabones en las aguas de uso doméstico. Sus valores altos ocasionan incrustación y corrosión en las tuberías o equipos metálicos industriales o redes de acueducto. En aguas de teñido originan manchas en las telas.

Conductividad: se mide en $\mu\text{mhos/cm}$ o $\mu\text{S/cm}$. Indica la presencia de sales en forma ionizada, como los cloruros o iones de sodio, carbonatos, etc. Permite establecer relaciones e interpretación de resultados con los sólidos disueltos en las descargas o cuerpos de agua. Es la mejor medida indirecta de la salinidad, ya que por otros métodos se torna engorroso e impreciso. En consecuencia, se establecen relaciones empíricas de la conductividad en soluciones estándar que posibilita resultados más rápidos y funcionales.

Alcalinidad y acidez: Estos dos parámetros no pueden considerarse como contaminantes directos o específicos, sino como una medida de los efectos de la combinación de sustancias asociadas a los carbonatos y bicarbonatos. Debido a las variaciones que

producen en el pH se generan reacciones secundarias rompiendo el ciclo ecológico en un cuerpo de agua. Ellos se expresan como la concentración de carbonato de calcio (CaCO_3).

En los ICA también se pueden incluir variables biológicas que pueden reflejar diferentes aspectos de la calidad del agua. Entre las variables biológicas puede incluirse el recuento de macro invertebrados, análisis de tejidos, determinaciones fisiológicas, etc. Con respecto a los aspectos no acuáticos, se acostumbra a incluir en el ICA variables como la longitud de la corriente que se encuentra canalizada, la cobertura de bosques, etc. (Sierra Ramirez, 2011).

Para establecer la importancia que tiene cada uno de los términos en el valor total del ICA se le asigna un peso a cada término. **La asignación de pesos es un aspecto cualitativo.** Por lo general, estos valores se obtienen realizando encuestas a expertos en calidad del agua en las cuales los encuestados sugieren valores para cada peso. Al final se puede tomar, como valor de cada peso, el valor promedio obtenido para cada uno de ellos en las encuestas. (El valor del peso dependerá del uso o del objetivo que se quiera con el cálculo del ICA para el recurso hídrico) (Sierra Ramirez, 2011).

Consideraciones

Se analiza el histórico de calidad de aguas superficiales a partir de las campañas de monitoreo del río Aburrá-Medellín y sus quebradas afluentes, donde, durante las jornadas se recolectan muestras compuestas entre las 6:00 y 18:00 horas. Es importante mencionar que las campañas de monitoreo realizadas en los períodos comprendidos entre el 2004 y 2006, no se tendrán en cuenta en el análisis debido a que el conjunto de datos corresponde a muestras puntuales en diferentes sitios de monitoreo que presentaban condiciones diurnas y nocturnas de la corriente, por lo que es imposible comparar con las muestras compuestas tomadas a partir del año 2010. A raíz de ello se selecciona un horizonte de aproximadamente 10 años para realizar el análisis de la calidad del agua.

Se calculan los promedios históricos para las variables fisicoquímicas oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE), demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO), nitrógeno total, fósforo total, sólidos suspendidos totales (SST) a partir del conjunto de datos registrados en las campañas de monitoreo realizadas en el período comprendido entre los años 2012-2021.

Se realiza una comparación entre las variables fisicoquímicas y el índice de calidad del agua (ICA) de algunas campañas de monitoreo con el promedio histórico, sin embargo, no es posible tener en cuenta el régimen hidrológico de estas, debido a que, no se tiene información disponible para identificar en cada uno de los años si las campañas de monitoreo corresponden a temporada seca o húmeda, por lo tanto, el análisis de este documento se realiza a partir de los datos medidos o calculados semestralmente.

El promedio histórico de los monitoreos en el período comprendido entre el 2012-2021 combina el conjunto de datos registrado en todas las campañas de monitoreo, independiente del régimen hidrológico reportado para cada jornada. De acuerdo con lo anterior, es importante aclarar que durante las campañas de caudal alto se presenta una dilución de los contaminantes debido al incremento en el caudal de la corriente, por lo tanto, cuando se presentan incrementos significativos en el caudal de la corriente debido a eventos de lluvia o en períodos de transición de época seca a época húmeda, se manifiesta una resuspensión de sedimentos, la cual reincorpora materia orgánica e inorgánica al recurso hídrico. Mientras que en las campañas de caudal bajo se registra una concentración de los contaminantes debido a un menor caudal, por lo que se presenta una menor capacidad de dilución. En ese sentido, dado que las campañas se adelantan bajo condiciones secas y húmedas, la comparación de los resultados con respecto al valor medio por semestre no necesariamente refleja una mejora o deterioro en la calidad del agua. Para analizar las condiciones de mejora o deterioro a lo largo del río Aburrá-Medellín a partir de la información histórica recolectada en el marco del programa RedRío, es necesario realizar un análisis de tendencias.

El cálculo de los valores medios depende de la cantidad de datos existentes, la estación Reserva Alto de San Miguel comenzó a monitorearse en el 2017 y el monitoreo de la estación en Parque de las Aguas se suspendió por aproximadamente 6 años y se retomó nuevamente el 25 de abril de 2018. Estas dos estaciones tienen menos registros respecto a las estaciones de monitoreo restantes.

Para el análisis y la medición de la calidad en las aguas subterráneas las captaciones monitoreadas se seleccionan teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Puntos pertenecientes a la red de monitoreo, de fácil acceso y donde es posible tomar la muestra.

- Puntos donde se ha detectado algún tipo de contaminación puntual.
- Puntos donde existe actividad industrial o agrícola potencialmente contaminante cerca de la captación.
- Las inspecciones visuales realizadas en los diferentes monitoreos piezométricos.

A partir de lo anterior, se deduce que la red de calidad es una red dinámica que depende de las preguntas que se quieran resolver y se asocia a las actividades propias de los establecimientos donde se encuentran las captaciones que podrían presentar una contaminación, por lo tanto, los puntos de monitoreos de calidad de aguas subterráneas tienen a variar en cada una de las campañas, lo que dificulta tener información de las captaciones a través de tiempo.

En el marco del convenio RedRío se han implementado los índices de dos autores para el monitoreo de aguas subterráneas, desde el 2010, se implementó un índice de calidad de agua subterránea para consumo humano (ICA-AS) propuesto por (Martínez Franco, 2007). Con el tiempo se propone la aplicación de un nuevo índice de calidad para las aguas subterráneas (ICG-AS) propuesto por (Vélez Ortiz, 2017), este índice se ha aplicado desde el año 2017. En este orden de ideas el histórico de monitoreo solo permite el análisis del ICA-AS propuesto por (Martínez Franco, 2007) debido a la disponibilidad de los datos registrados en las campañas de monitoreo en el período comprendido entre los años 2012-2021.

En el marco del convenio 643 del 2019 entre la Universidad de Antioquia y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, se entrega un informe ejecutivo donde realizan un análisis del registro histórico de los resultados obtenidos del ICA-AS propuesto por (Martínez Franco, 2007), en el **Anexo 3**, **Anexo 4** y **Anexo 5**, se relacionan los lineamientos para la construcción del índice de calidad, el código en Matlab usado por la UdeA y el resultado cualitativo de la evolución de la calidad reportada en el informe ejecutivo, respectivamente. Como los resultados del informe ejecutivo (**Anexo 5**) presentan discrepancias con los datos calculados en el presente informe, se toman decisiones que garanticen la fiabilidad de los resultados. En el reporte histórico de los resultados de calidad analizados en el laboratorio y disponible en el AMVA, existen parámetros que no fueron medidos o de los cuales no se tienen datos, en años donde la Universidad de Antioquia reporta valores en la medición del índice de calidad, parámetros necesarios para el cálculo del ICA-AS Martínez. Por lo tanto, se plantean dos posibles escenarios: el primer escenario es suponer que los parámetros de los

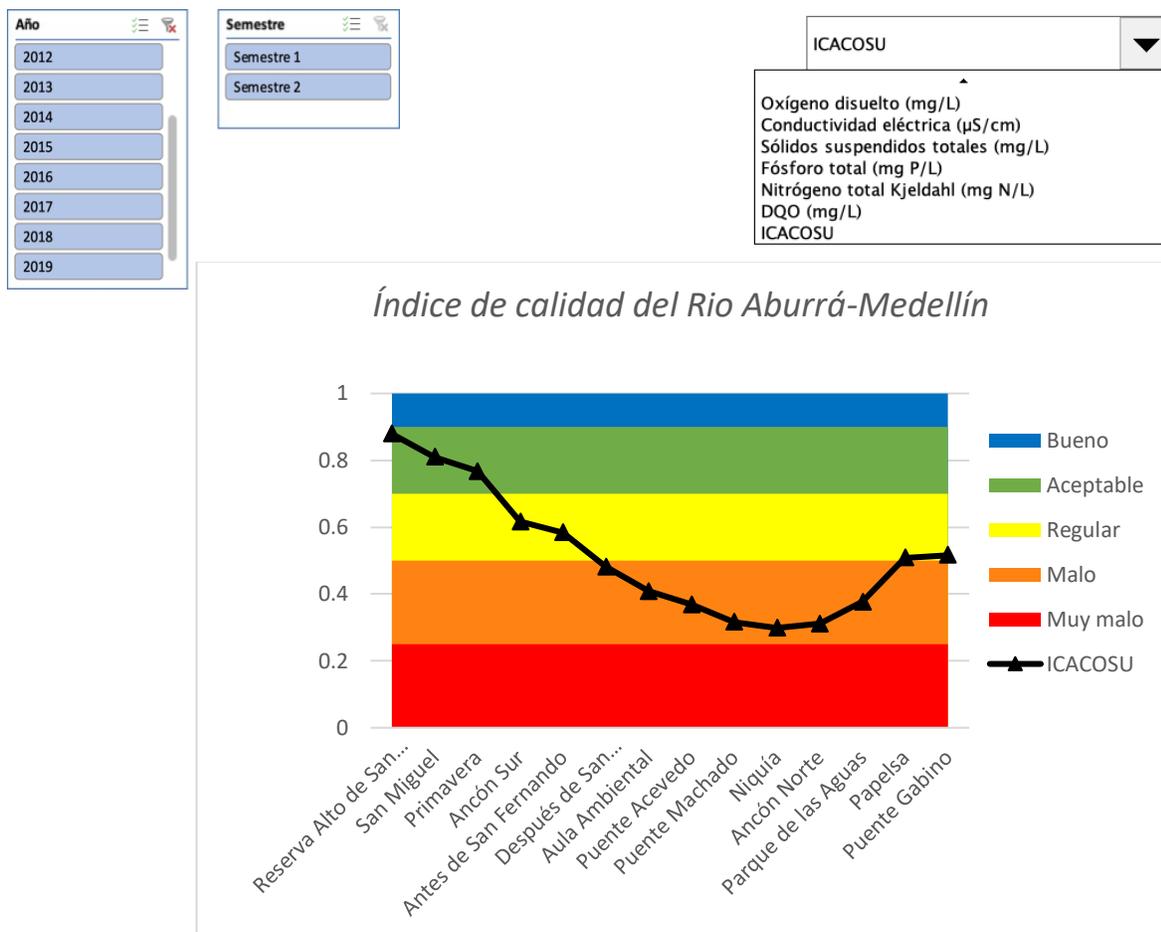
que no se tiene registro tuvieron un comportamiento negativo por lo que no aportaron a una buena calidad, el segundo escenario es suponer que los parámetros de los que no se tiene registro tuvieron un comportamiento positivo por lo que aportaron significativamente a la calidad del recurso, excepto si se trata del parámetro coliformes fecales en ese caso no se cuantifica el ICA-AS. En este orden de ideas, se obtiene el índice de calidad para los dos escenarios, donde, el escenario 2 presenta resultados más parecidos a los reportados por la Universidad de Antioquia en el informe ejecutivo, razón por la cual, se opta por seleccionar dicho escenario para desarrollar toda la parte relacionada con el componente de aguas subterráneas del presente informe.

Construcción de formatos

Se realiza la construcción de formatos donde se visualice o identifique, de manera más amigable o dinámica, el resultado de las campañas de monitoreo de aguas superficiales y subterráneas.

En el monitoreo de aguas superficiales la idea general es poder visualizar el histórico de las campañas de monitoreo del río Aburrá-Medellín, compilando la información de las tablas en gráficos. Por lo tanto, se realiza el diseño de un gráfico dinámico en Excel que permita filtrar la información de parámetros medidos o calculados (Temperatura, pH, conductividad eléctrica y demás), año y semestre. Se construye una interfaz dinámica que le permita al usuario acceder y filtrar la información del gráfico.

La **Figura 1** (*índice de calidad del río Aburrá-Medellín*) es una curva que muestra el cambio de calidad a través de las 14 estaciones ubicadas a lo largo del río Aburrá-Medellín desde su nacimiento en la Reserva Alto de San Miguel en Caldas hasta su desembocadura al río Porce con la estación Puente Gabino en el municipio de Santo Domingo, se puede filtrar la información de parámetros medidos o calculados, año y semestre.

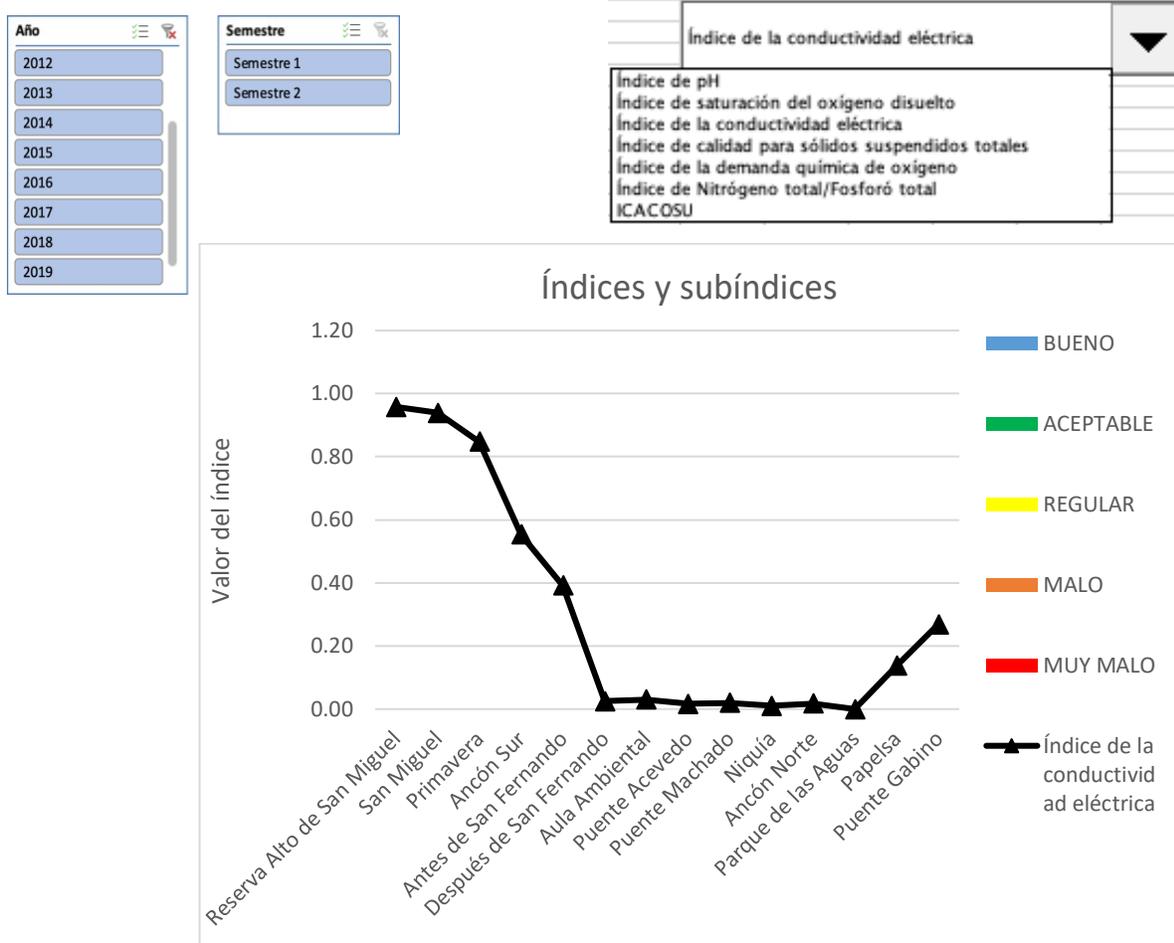
Figura 1*Índice de calidad del río Aburrá-Medellín.*

La **Figura 2** (*subíndices de calidad del río Aburrá-Medellín*) es una curva que muestra cada uno de los subíndices de calidad a través de las 14 estaciones ubicadas a lo largo del río Aburrá-Medellín, se puede filtrar la información por subíndice de los parámetros medidos o calculados, año y semestre. Dicha información es de vital importancia porque permite correlacionar los valores del índice de calidad del agua con los valores de los subíndices y así mismo con el valor de los parámetros medidos en campo (parámetros que se pueden filtrar en la **Figura 1**), más adelante se profundiza en este tema. La referencia (ICA, 2011) contiene la publicación oficial del IDEAM en la cual se explica la formulación y

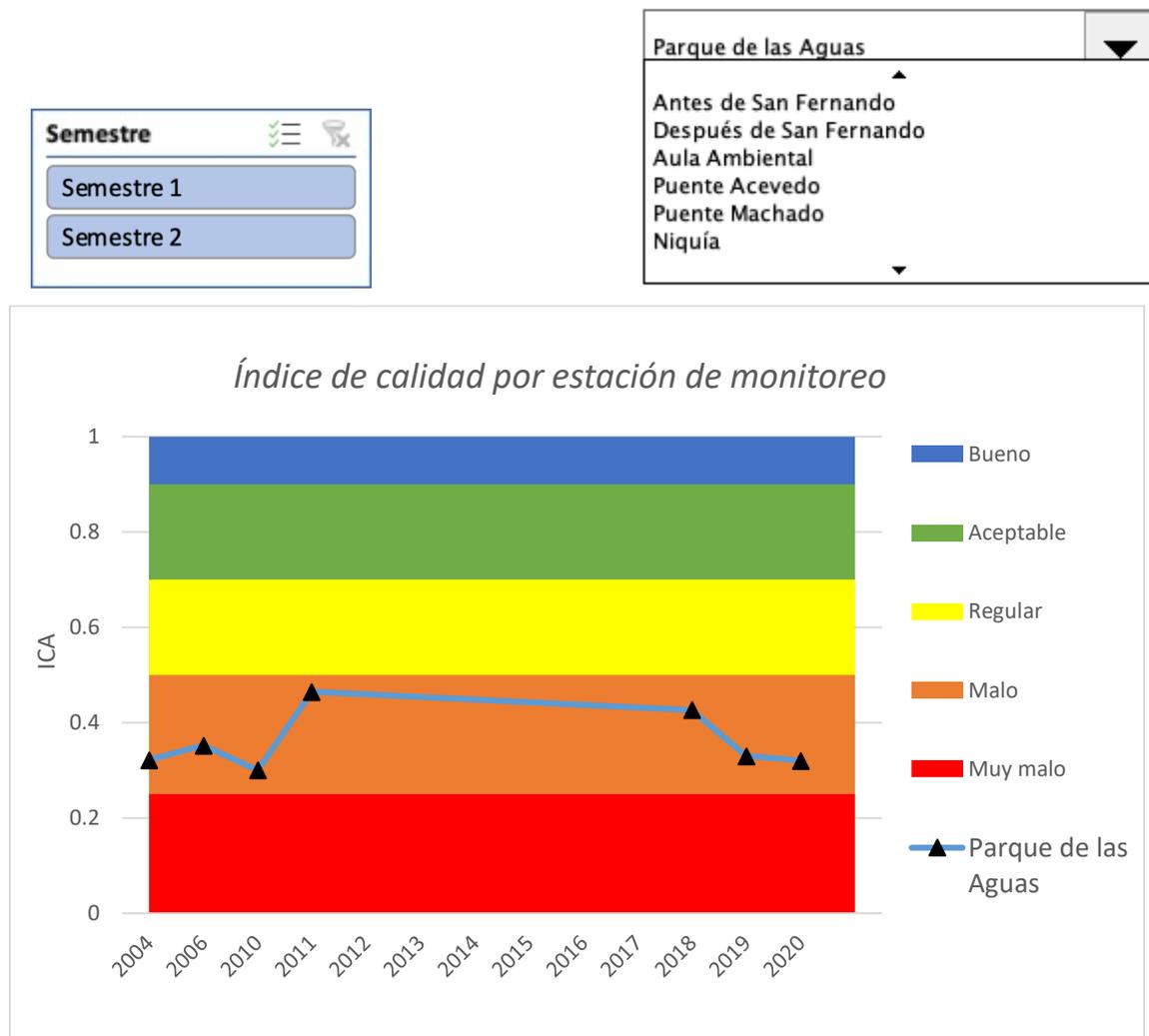
aplicación del índice de calidad del río Aburrá-Medellín, así como cada uno de los aspectos relacionados con los subíndices que se utilizan para su construcción.

Figura 2

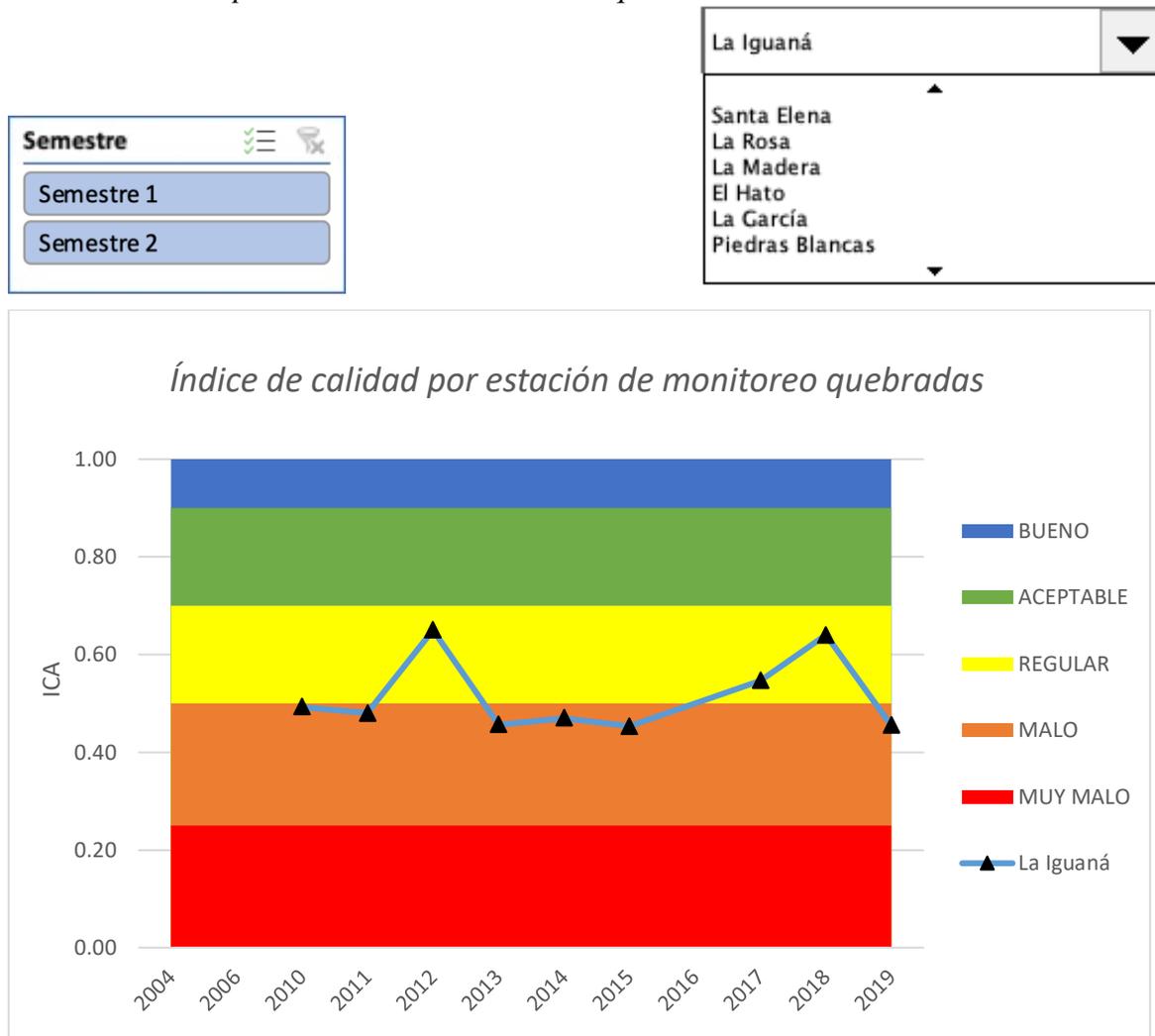
Subíndice de calidad del río Aburrá-Medellín



La **Figura 3** (*índice de calidad por estación de monitoreo*) muestra una curva que presenta el histórico de calidad de las estaciones de monitoreo que se encuentran ubicadas en el río Aburrá-Medellín, se puede filtrar la información por semestre y estación de monitoreo.

Figura 3*Índice de calidad por estación de monitoreo*

La **Figura 4** (*índice de calidad por estación de monitoreo en quebradas*) muestra una curva que presenta el promedio histórico de calidad de las estaciones de monitoreo que se encuentran ubicadas en las dos (2) descargas directas al río Aburrá- Medellín (PTAR San Fernando y PTAR Aguas Claras) y las 24 quebradas afluentes, se puede filtrar la información por semestre y estación de monitoreo. Esta información es relevante debido a que las 24 quebradas afluentes al río descargan con una calidad que afecta directamente la calidad del río Aburrá-Medellín.

Figura 4*Índice de calidad por estación de monitoreo en quebradas*

La idea funge de insumo para el uso de una plataforma como Power BI que permite conectar los datos que se tienen en Excel, para visualizarlos y analizarlos directamente en la página web. Con Power BI se construye una interfaz con dos tableros dinámicos que permiten mostrar grosso modo la información de calidad del programa REDRÍO en el Observatorio del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

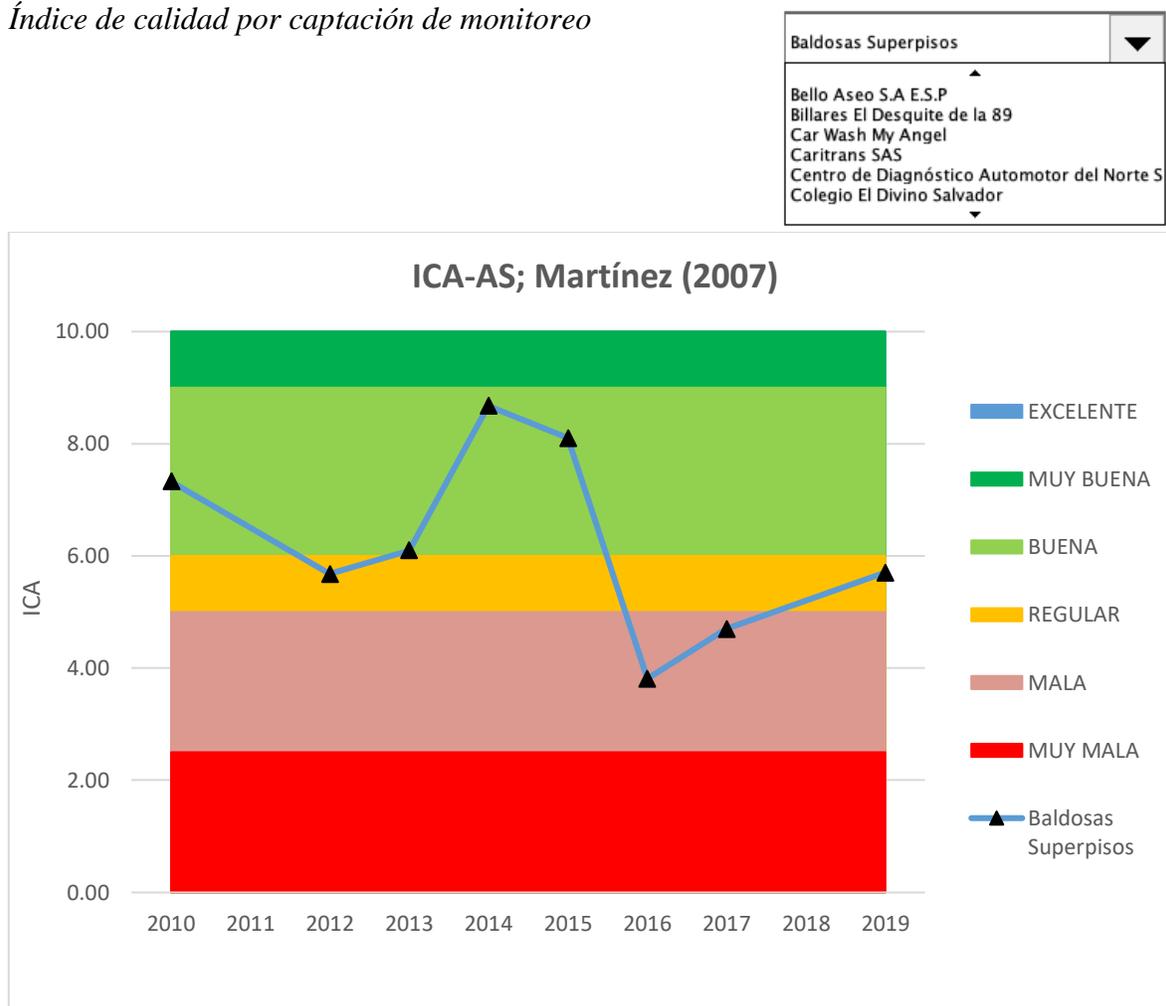
El tablero 1 - Índice de calidad de aguas superficiales en el Río Aburrá-Medellín presenta 2 gráficas y 2 figuras dinámicas que muestran el histórico de calidad de las campañas de monitoreo a través del río Aburrá-Medellín y el histórico de calidad por estación de monitoreo.

El tablero 2 - Índice de calidad aguas superficiales de las quebradas afluentes al Río Aburrá-Medellín muestra una gráfica que presenta el promedio histórico de calidad de las estaciones de monitoreo que se encuentran ubicadas en las dos (2) descargas directas al río Aburrá- Medellín (PTAR San Fernando y PTAR Aguas Claras) y las 24 quebradas afluentes. Además, muestra una tabla y un diagrama circular que permiten visualizar la información desde otras perspectivas, incluyendo datos adicionales.

En el monitoreo de aguas subterráneas la idea es poder visualizar una curva (**Figura 5 - Índice de calidad por captación de monitoreo**) que muestre el histórico de calidad de las captaciones monitoreadas que se encuentran ubicadas en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, se puede filtrar la información por captación de monitoreo.

Figura 5

Índice de calidad por captación de monitoreo



A partir de la **Figura 1** y la **Figura 3** se identifican los tramos más afectados del río Aburrá-Medellín. En la **Tabla 1** se registra el resultado de la calidad promedio que predomina por estación de monitoreo, se discrimina la información entre estación de monitoreo, municipio y calidad promedio. Adicionalmente, en la **Figura 6** se muestra un mapa con la ubicación geográfica de las 14 estaciones de monitoreo ubicadas a través del río Aburrá-Medellín y la calidad promedio predominante asociada a cada una de ellas.

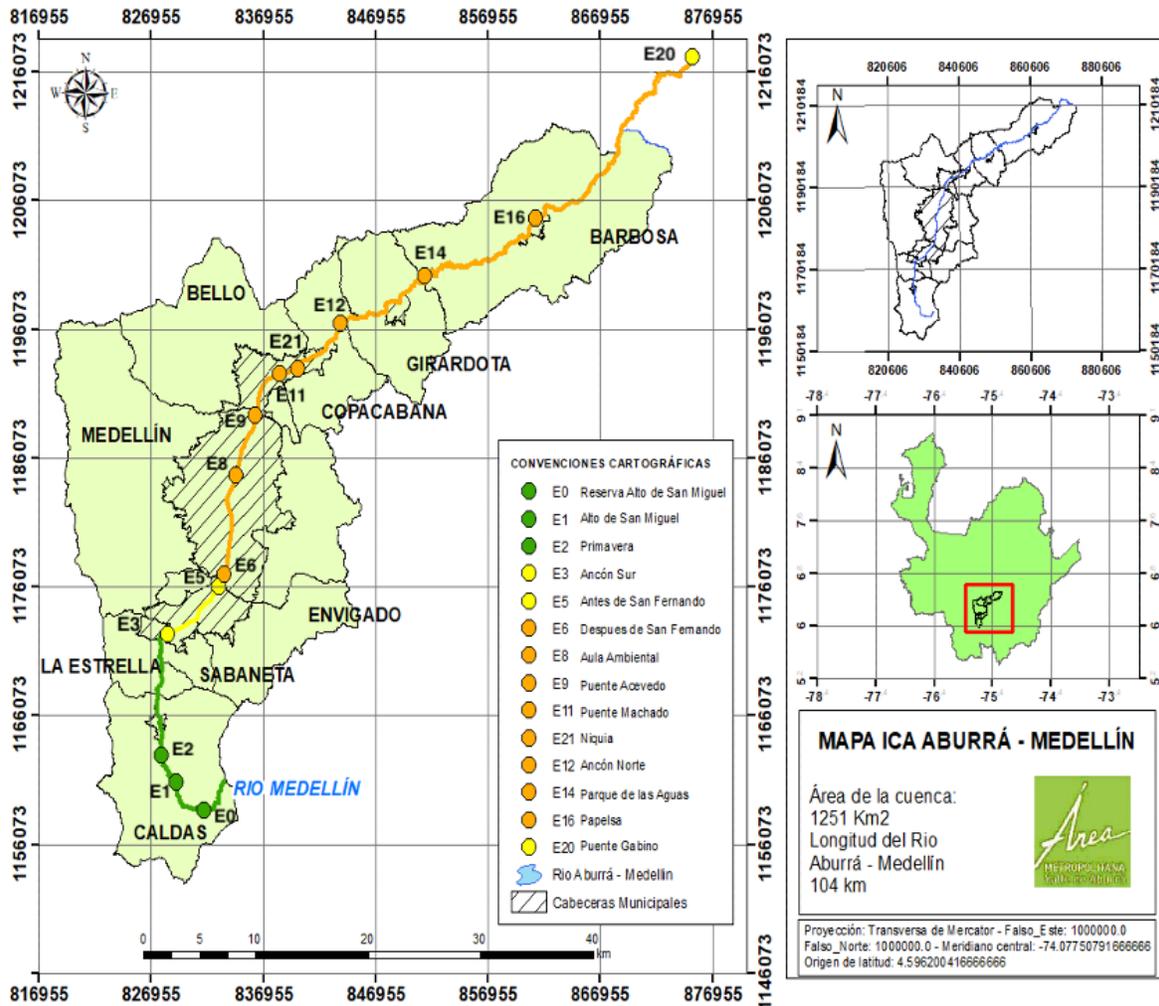
Tabla 1

Calidad promedio predominante por estación de monitoreo.

Estaciones	Municipios	Calidad Promedio - Año	Calidad Promedio - Semestre 1	Calidad Promedio - Semestre 2
Reserva Alto de San Miguel	Caldas	Aceptable	Aceptable	Bueno
San Miguel	Caldas	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Primavera	Caldas	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Ancón Sur	La Estrella	Regular	Regular	Regular
Antes de San Fernando	Medellín	Regular	Regular	Regular
Después de San Fernando	Medellín	Malo	Malo	Malo
Aula Ambiental	Medellín	Malo	Malo	Malo
Puente Acevedo	Medellín	Malo	Malo	Malo
Puente Machado	Bello	Malo	Malo	Malo
Niquia	Bello	Malo	Malo	Malo
Ancón Norte	Copacabana	Malo	Malo	Malo
Parque de las Aguas	Barbosa	Malo	Malo	Malo
Papelsa	Barbosa	Malo	Regular	Malo
Puentes Gabino	Santo Domingo	Regular	Regular	Regular

Figura 6

Mapa con la ubicación geográfica de las 14 estaciones de monitoreo ubicadas a través del río Aburrá-Medellín y la calidad promedio.



Fuente: Juan Esteban Quijano y Hermes Pineda.

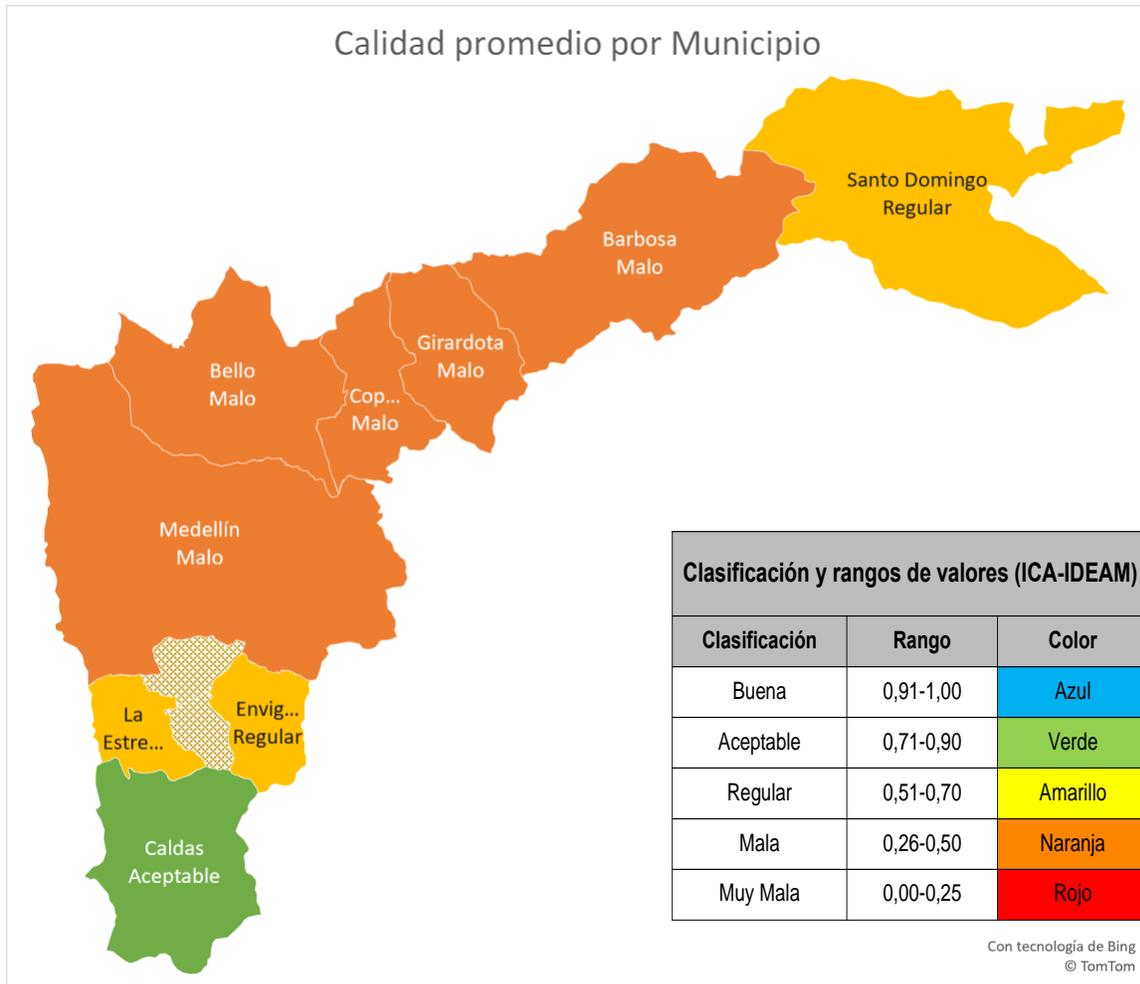
A partir de los datos registrados en la **Figura 4** se seleccionan las quebradas afluentes más afectadas. En la **Tabla 2** y la **Figura 7** se muestra el resultado de la calidad promedio que predomina por quebrada monitoreada, la información es relevante debido a que las 24 quebradas afluentes al río descargan con una calidad que afecta directamente la calidad del río Aburrá-Medellín. Por lo tanto, funge de insumo para identificar como la calidad de las quebradas influye en la calidad de los tramos más afectados del río, en la **Tabla 2** se discrimina por quebrada monitoreada, código de la estación y calidad promedio.

Tabla 2*Calidad promedio predominante por quebrada monitoreada.*

Estaciones	Código	Calidad Promedio - Año	Calidad Promedio - Semestre 1	Calidad Promedio - Semestre 2
La Miel	Q2	Aceptable	Aceptable	Aceptable
La Valeria	Q1	Regular	Regular	Regular
La Bermejala (Estrella)	Q34	Regular	Regular	Regular
La Grande	Q5	Regular	Regular	Aceptable
La Doctora	Q3	Regular	Regular	Regular
La Mina	Q25	Malo	Malo	Malo
Doña María	E4	Regular	Regular	Regular
La Ayurá	Q4	Aceptable	Regular	Regular
Altavista	Q8	Malo	Malo	Malo
La Picacha	Q20	Malo	Malo	Malo
La Hueso	Q9	Malo	Malo	Malo
La Iguaná	Q11	Malo	Malo	Malo
Santa Elena	Q10	Malo	Malo	Malo
La Rosa	Q12	Malo	Malo	Malo
La Madera	Q13	Malo	Malo	Malo
El Hato	Q14	Malo	Malo	Regular
La García	E10	Malo	Malo	Malo
Piedras Blancas	Q15	Aceptable	Aceptable	regular
El Chuscal	Q32	Regular	Regular	Regular
El Salado	Q27	Regular	Regular	Regular
Ovejas	Q30	Aceptable	Aceptable	Aceptable
La López	Q28	Regular	Mala	Regular
Descarga San Fernando	D1	Regular	Regular	Regular
Descarga PTAR Aguas Claras	D2	Malo	----	Malo

Figura 8

Mapa con la información geográfica del cambio de la calidad a través de los diferentes municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.



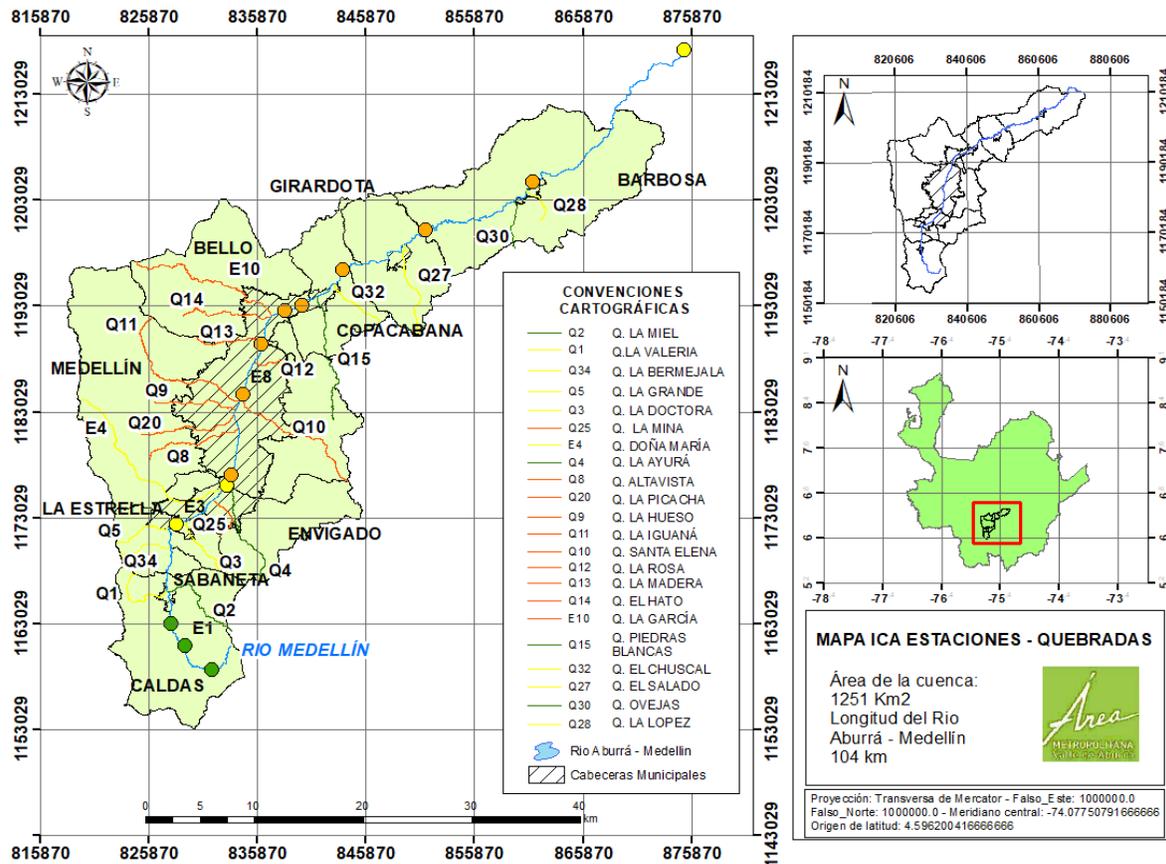
A partir de la información compilada en la **Tabla 1** y la **Tabla 2**, se identifican y seleccionan las estaciones de monitoreo en los tramos más afectados del río Aburrá-Medellín. Dicha información se registra en la **Tabla 3**. Adicionalmente, en la **Figura 9** se muestra la ubicación geográfica de las 14 estaciones de monitoreo ubicadas a través del río Aburrá-Medellín junto con las quebradas afluentes, y la calidad promedio predominante asociada a cada una de ellas.

Tabla 3*Estaciones de monitoreo en los tramos más afectados del río Aburrá-Medellín.*

Río Aburrá-Medellín		
Estación	Municipio	Calidad Promedio
Aula Ambiental	Medellín	Malo
Puente Acevedo	Medellín	Malo
Puente Machado	Bello	Malo
Niquia	Bello	Malo
Ancón Norte	Copacabana	Malo
Parque de las Aguas	Barbosa	Malo
Quebradas		
Estación	Código	Calidad Promedio
La Mina	Q25	Malo
Altavista	Q8	Malo
La Picacha	Q20	Malo
La Hueso	Q9	Malo
La Iguaná	Q11	Malo
Santa Elena	Q10	Malo
La Rosa	Q12	Malo
La Madera	Q13	Malo
El Hato	Q14	Malo
La García	E10	Malo
El Chuscal	Q32	Regular
El Salado	Q27	Regular

Figura 9

Mapa con la información geográfica del cambio de calidad de las 14 estaciones de monitoreo ubicadas a través del río Aburrá-Medellín, junto con la calidad de las quebradas afluentes.



Fuente: Juan Esteban Quijano y Hermes Pineda.

Con base en la información de la **Tabla 9** (ver **Anexo 3. Índices de calidad de aguas subterráneas** donde se muestra el resumen de las ecuaciones para la construcción del ICA-AS Martínez, 2007) y la compilada en la **Figura 5**, se registra en la **Tabla 4** el histórico de los resultados del ICA-AS para las diferentes captaciones de monitoreo. Adicionalmente, en la **Figura 10** se muestra el mapa con la ubicación geográfica de las captaciones monitoreadas y la calidad promedio predominante asociada a cada una de ellas.

Tabla 4*Registro histórico de los resultados obtenidos del ICA-AS Martínez.*

NOMBRE	CODIGO	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Hacienda El Progreso	Ba_GEO_0069		Regular				Mala	Mala	Mala
Bello Aseo S.A.	Be_A_057						Buena	Regular	Regular
Parqueadero La Asunción	Co_A_008	Buena	Buena				Regular	Regular	Regular
Caritrans SAS	Co_GEO_0032		Buena			Regular	Mala	Mala	Mala
Tintorería Industrial Colombiana LTDA	Es_A_037						Buena	Buena	Buena
Motel Aries	Es_A_012								Regular
Tintorería Industrial Colombiana LTDA	Es_P_038						Buena	Buena	Buena
Industrias Metálicas Corsan S.A.	It_A_082		Regular				Buena	Mala	Mala
Sociedad Mercantil de Automotores S.A. (Somerauto)	Me_A_009	Muy Buena	Buena				Buena	Muy buena	Mala
Servicentro Estación Hospital	Me_A_154	Buena	Regular	Mala	Regular		Regular		Mala
Ferrocortes (Antes Intertex)	Me_A_228	Regular	Regular				Buena		Buena

Lavadero y Aparquadero Suracar	Me_A_411	Regular	Mala			Regular	Buena	Buena	Regular
Colegio La María (Parkinet)	Me_A_186						Buena		Buena
Distracom Los Ángeles	Be_A_022						Mala		Regular
Parqueadero PH	Be_A_048	Buena	Regular				Buena	Mala	Buena
Motel Doresky	Co_A_014	Regular	Regular				Regular		Buena
Inversiones Siderense	Es_A_001	Muy Buena	Buena				Buena	Buena	Regular
Industrias de Aceros S.A- IDEACE	It_A_004	Buena	Regular			Buena	Buena	Regular	Muy buena
Herrajes Gaher Ltda.	It_A_103		Buena	Buena		Regular	Buena		Muy buena
Mecánicos Unidos	It_P_016						Buena	Buena	Muy buena
Parqueadero la Pirámide	Me_A_116			Buena			Buena	Buena	Buena
Jardín Botánico Joaquín Antonio Uribe	Me_A_151						Regular	Regular	Regular
Baldosas Superpisos	Me_A_159	Regular	Buena	Buena	Buena	Mala	Mala		Regular
Parqueadero Moravia	Me_A_183	Buena	Regular				Buena	Buena	Buena
Billares el Desquite de la 89	Me_A_327		Regular	Mala		Regular	Buena		Buena

Lavadero y Parqueadero la 83	Me_A_331		Buena	Muy Buena		Buena	Buena	Buena	Muy buena
Terminal Belencito	Me_A_340	Regular	Regular	Regular		Buena	Regular		Regular
Almacenes e Industrias Roca S. A	Me_A_365		Mala	Buena		Regular	Buena		Muy buena
Lavautos y parqueadero La 30 Belén	Me_A_368		Buena	Buena		Regular	Regular	Buena	Buena
Parqueadero Belén 30 A (Nueva Granada N2)	Me_A_369		Buena	Mala		Buena	Regular		Buena
Estación de servicio Esso Laureles	Me_A_390		Buena	Mala		Regular	Regular	Regular	Muy buena
Lavaautos la 52	It_A_094						Regular		Regular
Proteco S. A	It_P_107			Buena		Buena	Regular	Mala	Mala
Tintorería Industrial Diego	Me_A_432	Regular	Mala				Regular	Regular	Regular
Planta potabilizadora de EPM	Ba_GEO_0070		Buena				Mala		
Gimnasio GYM	Be_A_014								
Sede Santa Ana Transporte Hato Viejo	Be_A_018	Buena	Regular						
Newtrans	Be_A_019	Regular	Buena						

Centro de Diagnóstico Automotor del Norte S.A. - CDA del Norte	Be_A_030								
Bellanita de transportes	Be_A_039	Muy buena						Buena	
Colorquímica	Es_P_024	Muy buena	Buena			Regular	Buena	Regular	
Lote abandonado (antes Colgras)	Gi_GEO_0041		Buena			Buena	Regular	Regular	
Artextil S. A	It_A_009						Buena	Buena	
Inverenting S.A.S.	It_A_040								
Gaula Antioquia	It_A_102		Regular	Regular		Buena	Buena	Regular	
Textiles Humper	It_A_110		Buena	Buena					
Artextil S. A	It_P_009						Muy buena	Buena	
Stella Giraldo de Escobar - Lavapres expres	Me_A_036	Buena	Regular				Buena		
Vestimundo S. A	Me_A_043		Buena						
El Chuscalito Vivero y Restaurante	Me_A_056		Buena					Regular	
JG Espinal y CIA. Estación de servicios Mobil sur	Me_A_071	Mala	Mala						
Texaco Palacé	Me_A_090	Mala	Mala						

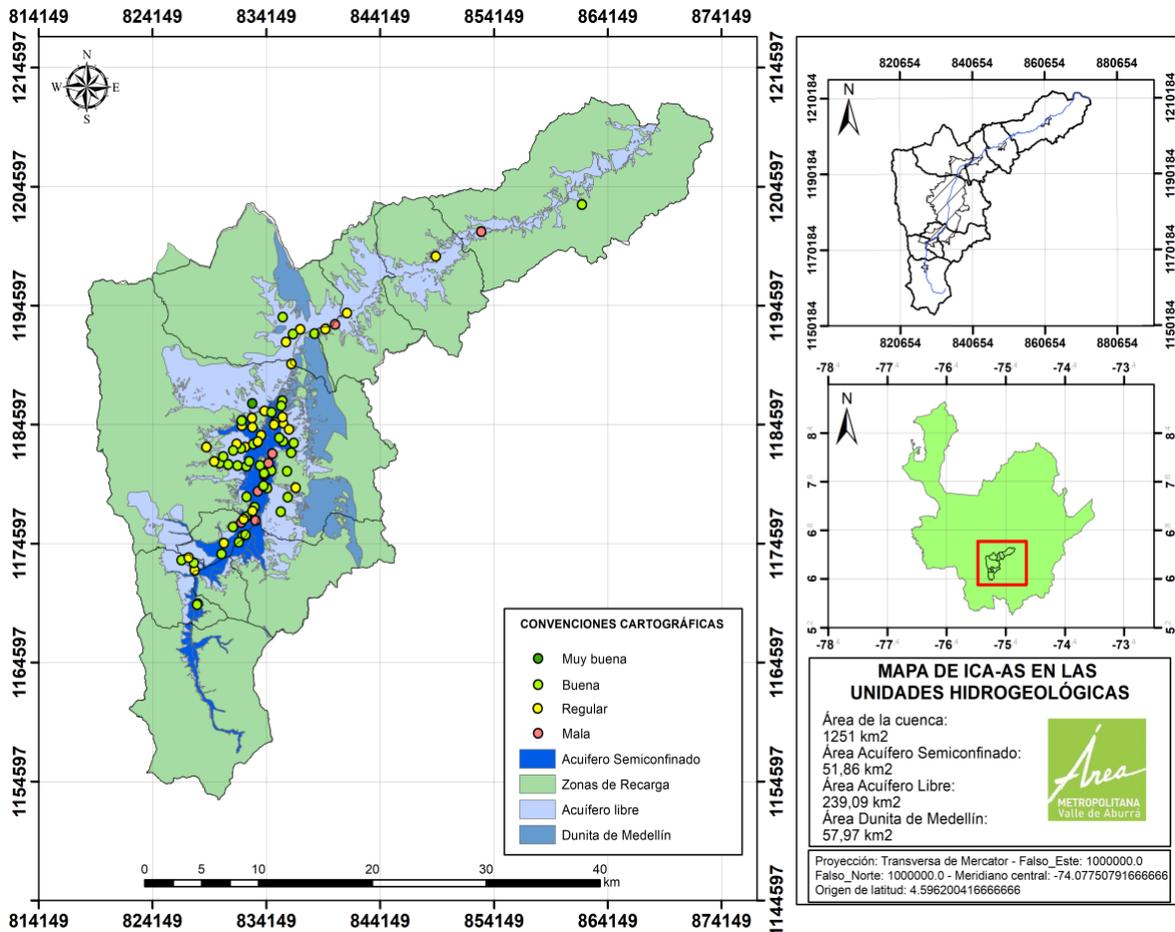
Terminal de buses la Milagrosa	Me_A_093		Buena						
Lavadero Buenas Aires	Me_A_103	Buena	Buena				Buena	Buena	
Fundación Universitaria Autónoma de las Américas	Me_A_117	Regular	Buena	Buena		Buena	Buena	Regular	
Lavaautos la Palmera	Me_A_118	Excelente	Regular						
Lavadero y Parqueadero La 46	Me_A_119					Regular	Buena	Regular	
Estación de servicio Terpel Las Mercedes	Me_A_143	Buena	Regular						
Laundry Sink-Lavatecsa	Me_A_223		Regular						
Estación Terpel El Rodeo. Tres A.M.S. A	Me_A_253	Buena	Buena						
Parqueadero Paisa	Me_A_310								
Parqueadero Lavakart's	Me_A_324								
Ferrosvel S. A	Me_A_328		Buena	Regular		Buena	Regular	Regular	
Corporación universitaria adventista	Me_A_343		Buena	Muy buena		Buena	Buena	Buena	
Parqueadero y Lavadero La 88	Me_A_345								
Estación de Servicio Móvil El Condor	Me_A_387		Buena	Muy buena	Buena	Buena			

Lavaautos Bolivariana	Me_A_389								
Full car 39	Me_A_391								
Restaurante Ego's (Antes: Lavautos Ego)	Me_A_392		Buena	Buena	Buena			Regular	
Parqueadero y lavadero VIP	Me_A_396	Muy Malo	Regular						
Parqueadero y lavadero Don Quijote	Me_A_397	Buena	Buena	Buena	Buena	Muy buena	Buena	Buena	
Guantes Blancos Lavadero	Me_A_400	Buena	Mala						
Lavautos Naranjal	Me_A_401	Regular							
JUMBO S.A. Somos llantas (Carrefour 65)	Me_A_406								
Car Wash My Angel	Me_A_413	Buena	Regular	Regular	Regular			Regular	
EQUI CAT	Me_A_423		Buena	Regular					
Parqueadero y Lavadero Pure Detailing	Me_A_431			Regular			Buena	Buena	
Parqueadero y Lavadero GranSport	Me_A_434	Excelente	Muy buena			Muy buena	Excelente		
Parqueadero Córdoba	Me_A_441	Regular	Regular				Regular		
Intermármol	Me_A_443				Buena	Buena	Buena		
Parque Industrial Hilanderias	Me_P_248		Buena	Mala	Regular	Mala			

Leonisa S.A (+profundo) (pozo 1)	Me_P_271		Buena	Muy buena	Buena	Buena		Regular	
Leonisa S.A (pozo 2)	Me_P_270			Muy buena	Buena				
Gaseosas Lux- Postobon (pozo 1)	Me_P_287			Excelente	Muy buena		Buena	Muy buena	
Gaseosas Lux- Postobon (pozo 2)	Me_P_286			Excelente	Buena	Buena	Buena	Muy buena	
Gaseosas Lux- Postobon (pozo 3)	Me_P_285			Excelente	Buena	Buena	Buena	Buena	
Gaseosas Lux- Postobon (pozo 5)	Me_P_284		Buena	Buena		Muy buena			
Unidad Deportiva de Belén	Me_GEO_0108			Buena	Buena	Regular			
Colegio el Divino Salvador en la Estrella	Es_GEO_0016			Regular		Regular	Regular	Buena	
Río Medellín Sur	Río Medellín Sur			Buena	Buena	Mala			
Loma de los González	Loma de los González						Buena		
Urbanización Pontezuela	Urbanización Pontezuela						Buena		

Figura 10

Mapa con la ubicación geográfica de las captaciones monitoreadas y la calidad promedio predominante.



Fuente: Juan Esteban Quijano y Hermes Pineda.

A partir de los resultados de las campañas de monitoreo de aguas subterráneas que se muestran en la **Tabla 4**, se priorizan y seleccionan las captaciones donde se registra un mayor número de años con calidad mala y regular. El resultado de la selección funge de insumo para identificar cuáles son las zonas más afectadas en jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá – AMVA, en la **Tabla 5** se muestra el nombre de las captaciones, el código, las coordenadas y la calidad por la cual se priorizan. Adicionalmente, en la **Figura 11** se muestra el mapa con la ubicación geográfica de las captaciones monitoreadas priorizadas y la calidad promedio predominante asociada a cada una de ellas.

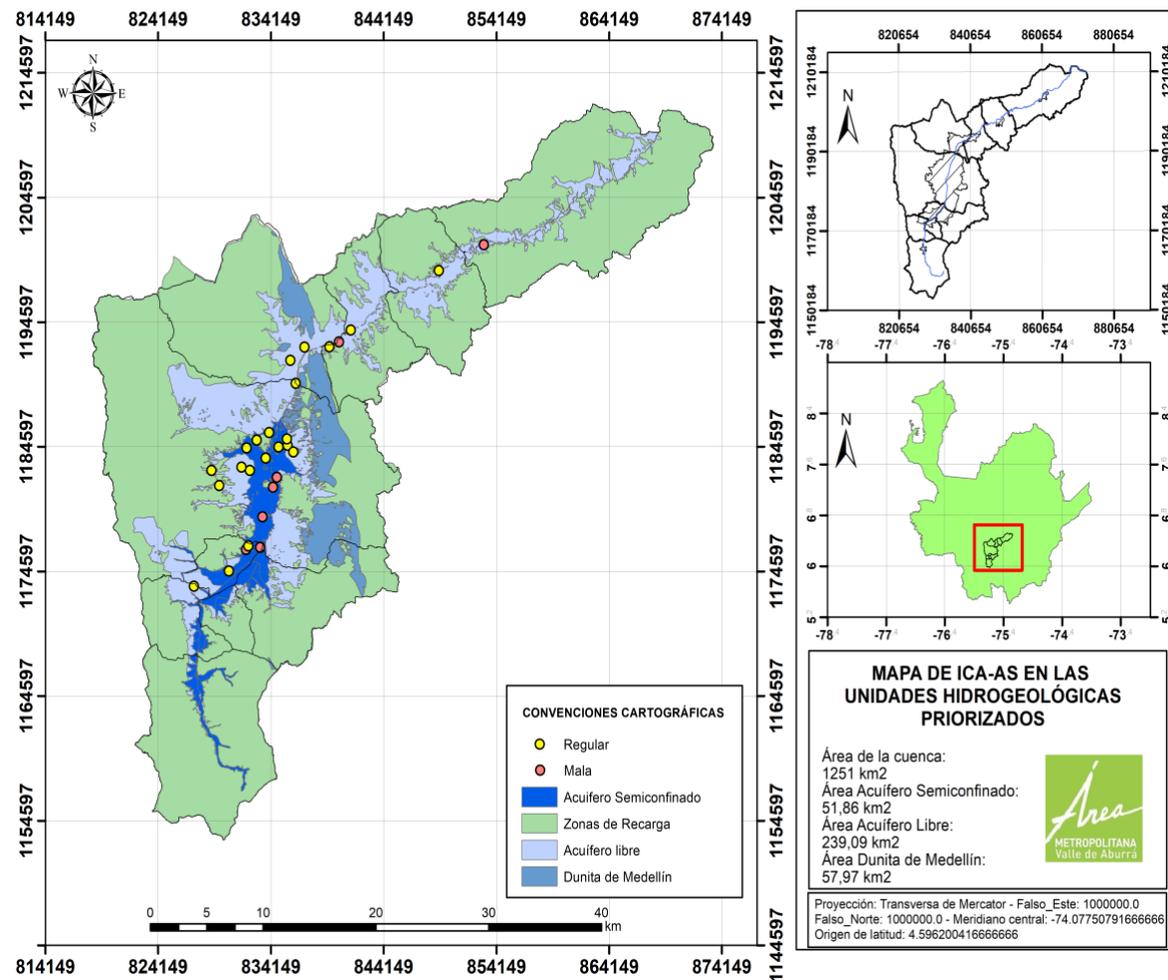
Tabla 5*Captaciones más afectadas en jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.*

NOMBRE	CODIGO	Coord. Este	Coord. Norte	Calidad representativa
Hacienda El Progreso	Ba_GEO_0069	853022,3	1200812,6	Mala
Caritrans SAS	Co_GEO_0032	840171,2	1193023,0	Mala
Industrias Metálicas Corsan S.A.	It_A_082	833190,0	1176521,4	Mala
Proteco S.A	It_P_107	831920,7	1176363,3	Mala
JG Espinal y CIA. Estación de servicios Mobil sur	Me_A_071	834323,1	1181360,8	Mala
Texaco Palacé	Me_A_090	834656,2	1182155,6	Mala
Parque Industrial Hilanderías	Me_P_248	833396,9	1178981,4	Mala
Bello Aseo S.A.	Be_A_057	837118,7	1192592,0	Regular
Parqueadero La Asunción	Co_A_008	841221,2	1193958,1	Regular
Servicentro Estación Hospital	Me_A_154	835622,9	1184713,9	Regular
Lavadero y Aparqueadero Suracar	Me_A_411	833676,0	1183683,4	Regular
Distracom Los Ángeles	Be_A_022	836335,3	1189692,4	Regular
Motel Doresky	Co_A_014	839318,0	1192625,1	Regular
Jardín Botánico Joaquín Antonio Uribe	Me_A_151	835552,3	1185220,5	Regular
Terminal Belencito	Me_A_340	828869,1	1182693,6	Regular
Estación de servicio Esso Laureles	Me_A_390	832278,7	1182696,5	Regular
Lavaautos la 52	It_A_094	830408,1	1174635,7	Regular
Tintorería Industrial Diego	Me_A_432	832871,3	1185125,6	Regular
Sede Santa Ana Transporte Hato Viejo	Be_A_018	835857,0	1191534,0	Regular
Lote abandonado (antes Colgras)	Gi_GEO_0041	849029,8	1198739,5	Regular
Gaula Antioquia	It_A_102	832145,0	1176637,1	Regular
Lavadero y Parqueadero La 46	Me_A_119	836130,2	1184186,8	Regular

Estación de servicio Terpel-Las Mercedes	Me_A_143	834815,6	1184574,4	Regular
Ferrosvel S. A	Me_A_328	829546,0	1181479,0	Regular
Parqueadero y lavadero VIP	Me_A_396	831522,7	1182974,7	Regular
Car Wash My Ángel	Me_A_413	831989,4	1184500,3	Regular
Parqueadero Córdoba	Me_A_441	833982,4	1185742,3	Regular
Colegio el Divino Salvador en la Estrella	Es_GEO_0016	827303,7	1173410,9	Regular

Figura 11

Mapa con la ubicación geográfica de las captaciones monitoreadas priorizadas y la calidad promedio predominante



Fuente: Juan Esteban Quijano y Hermes Pineda.

En agosto de 2019 la Universidad de Antioquia y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá suscriben el convenio 643 de 2019, donde, se realiza monitoreo piezométrico, hidrogeoquímico, isotópico y de calidad, entre otras actividades. Uno de los productos del convenio es el registro histórico de los resultados obtenidos del ICA-AS Martínez. No obstante, como se menciona en las consideraciones existe una discrepancia entre los datos cualitativos del presente informe y los reportados en el informe ejecutivo por la UdeA. Por lo tanto, en la **Tabla 6** se muestra el comparativo entre los valores calculados de la **Tabla 4** y si concuerdan con los valores reportados por la Universidad de Antioquia (ver **Anexo 5. Histórico de calidad del ICA-AS Martínez**).

Tabla 6

Comparativo entre el histórico de calidad ICA-AS calculado y el reportado por la UdeA.

NOMBRE	CODIGO	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Hacienda El Progreso	Ba_GEO_0069		F				F	F	F
Bello Aseo S.A.	Be_A_057						F	F	F
Parqueadero La Asunción	Co_A_008	F	V				F	F	F
Caritrans SAS	Co_GEO_0032		F			V	F	F	F
Tintorería Industrial Colombiana LTDA	Es_A_037						V	V	V
Motel Aries	Es_A_012								
Tintorería Industrial Colombiana LTDA	Es_P_038						V	V	V
Industrias Metálicas Corsan S.A.	It_A_082		F				V	F	F
Sociedad Mercantil de Automotores S.A. (Somerauto)	Me_A_009	V	F				F	V	F
Servicentro Estación Hospital	Me_A_154	V	V	V	F		F		F
Ferrocortes (Antes Intertex)	Me_A_228	F	F				V		V
Lavadero y A parqueadero Suracar	Me_A_411	V	V			V	F	F	F
Colegio La María (Parkinet)	Me_A_186						F		F
Distracom Los Ángeles	Be_A_022						F		F
Parqueadero PH	Be_A_048	V	V				V	F	F
Motel Doresky	Co_A_014	F	F				F		F
Inversiones Siderense	Es_A_001	F	F				F	F	F

Industrias de Aceros S. A	It_A_004	F	F			V	V	F	V
Herrajes Gaher Ltda.	It_A_103		F			F	F		V
Mecánicos Unidos	It_P_016						V	V	V
Parqueadero la Pirámide	Me_A_116			F			F	V	F
Jardín Botánico Joaquín Antonio Uribe	Me_A_151						F	F	F
Baldosas Superpisos	Me_A_159	F	V	F	V	V	F		F
Parqueadero Moravia	Me_A_183	F	F				F	F	F
Billares el Desquite de la 89	Me_A_327		F	V		V	V		F
Lavadero y Parqueadero la 83	Me_A_331		F	V		V	F	F	V
Terminal Belencito	Me_A_340	V	V	V		V	F		F
Almacenes e Industrias Roca S. A	Me_A_365		F	V		F	F		V
Lavautos y parqueadero La 30 Belén	Me_A_368		F	V		F	F	V	F
Parqueadero Belén 30 A (Nueva Granada N2)	Me_A_369		F	V		V	F		F
Estación de servicio Esso Laureles	Me_A_390		F	V		F	F	F	V
Lavaautos la 52	It_A_094						F		V
Proteco S. A	It_P_107			V		F	F	F	F
Tintorería Industrial Diego	Me_A_432	V	V				F	F	V
Planta potabilizadora de EPM	Ba_GEO_0070		F				F		
Gimnasio GYM	Be_A_014								
Sede Santa Ana Transporte Hato Viejo	Be_A_018	F	F						
Newtrans	Be_A_019	F	F						
Centro de Diagnóstico Automotor del Norte S.A. - CDA del Norte	Be_A_030								
Bellanita de transportes	Be_A_039	F						F	
Colorquímica	Es_P_024	F	V			F	F	F	
Lote abandonado (antes Colgras)	Gi_GEO_0041		F			V	F	F	
Artexil S. A	It_A_009						F	F	
Inverenting S.A.S.	It_A_040								

Gaula Antioquia	It_A_102		F	F		V	F	F	
Textiles Humper	It_A_110		F	F					
Artextil S. A	It_P_009						V	F	
Stella Giraldo de Escobar - Lavapres expres	Me_A_036	V	V				F		
Vestimundo S. A	Me_A_043		F						
El Chuscalito Vivero y Restaurante	Me_A_056		F					V	
JG Espinal y CIA. Estación de servicios Mobil sur	Me_A_071	V	V						
Texaco Palacé	Me_A_090	F	F						
Terminal de buses la Milagrosa	Me_A_093								
Lavadero Buenos Aires	Me_A_103	V	V				F	F	
Fundación Universitaria Autónoma de las Américas	Me_A_117	V	V	V		V	V	F	
Lavaautos la Palmera	Me_A_118	F	V						
Lavadero y Parqueadero La 46	Me_A_119					F	F	F	
Estación de servicio Terpel Las Mercedes	Me_A_143	F	F						
Lavatecsa	Me_A_223		F						
Estación Terpel El Rodeo. Tres A.M.S. A	Me_A_253	V	F						
Parqueadero Paisa	Me_A_310								
Parqueadero Lavakart's	Me_A_324								
Ferrosvel S. A	Me_A_328		F	V		V	F	V	
Corporación universitaria Adventista	Me_A_343		F	F		V	F	F	
Parqueadero La 88	Me_A_345								
Estación de Servicio Móbil El Condor	Me_A_387		F	F	V	F			
Lavaautos Bolivariana	Me_A_389								
Full car 39	Me_A_391								
Restaurante Ego's (Antes: Lavaautos Ego)	Me_A_392		F	V	V			F	
Parqueadero y lavadero VIP	Me_A_396	F	F						

Parqueadero y lavadero Don Quijote	Me_A_397	V	V	V	F	F	F	F	
Guantes Blancos Lavadero	Me_A_400	V	V						
Lavautos Naranjal	Me_A_401	V							
Somos llantas (Carrefour 65)	Me_A_406								
Car Wash My Ángel	Me_A_413	V	V	V	V				
EQUI CAT	Me_A_423		F	V					
Parqueadero y Lavadero Mediterráneo	Me_A_431			V			F	F	
Parqueadero y Lavadero GranSport	Me_A_434	V	F			F	F		
Parqueadero Córdoba	Me_A_441	V	V				F		
Intermármol	Me_A_443				V	F	F		
Parque Industrial Hilanderías	Me_P_248		F	V	F	V			
Leonisa S.A (+profundo) (pozo 1)	Me_P_271		V	F	V	V		F	
Leonisa S.A (pozo 2)	Me_P_270			F	F				
Gaseosas Lux-Postobon (pozo 1)	Me_P_287			F	F		V	V	
Gaseosas Lux-Postobón (pozo 2)	Me_P_286			F	F	V	F	V	
Gaseosas Lux-Postobón (pozo 3)	Me_P_285			F	F	V	V	F	
Gaseosas Lux-Postobón (pozo 5)	Me_P_284		F	F		F			
Unidad Deportiva de Belén	Me_GEO_0108			F	V	V			
Colegio el Divino Salvador en la Estrella	Es_GEO_0016			F		V	F	F	
Río Medellín Sur	Río Medellín Sur			F	F	V			
Loma de los González	Loma de los González						F		
Urbanización Pontezuela	Urbanización Pontezuela						F		

*V representa el valor verdadero, se asigna cuando el valor cualitativo calculado en la Tabla 4 es el mismo del Anexo 5 reportado por la UdeA.

*F representa el valor falso, se asigna cuando el valor cualitativo calculado en la Tabla 4 no corresponde al valor del Anexo 5 reportado por la UdeA.

Es importante mencionar que se hizo revisión del código en Matlab que se encuentra en el **Anexo 4** y se verifica que la Universidad de Antioquia utiliza las mismas ecuaciones que se usan en el presente informe para la construcción de la curva *Índice de calidad por captación de monitoreo* de la **Figura 5** (ver **Anexo 3. Índices de calidad de aguas subterráneas**). Por lo tanto, se presume que la información de los parámetros medidos en el laboratorio para el análisis de la calidad que emplea la UdeA en el cálculo del ICA-AS, es diferente o en su defecto está más completa que la información disponible en el AMVA y con la cual se realizaron los cálculos del presente informe.

Análisis de los resultados de las campañas de monitoreo de aguas superficiales

Al momento de analizar la calidad en corrientes de agua que fluyen permanentemente, es fundamental tener en cuenta las siguientes consideraciones: flujo y área transversal constantes en los diferentes tramos, concentraciones y velocidades como un promedio de la sección transversal, transporte de contaminantes en la dirección del flujo, los vertimientos no afectan la hidráulica de la corriente y un flujo unidimensional.

A partir de los datos de la **Figura 1** y la **Figura 2**, se analizan cada uno de los parámetros que afectan el índice de calidad del recurso hídrico (ICA-IDEAM), se observa un pH uniforme en las diferentes estaciones (incluido las priorizadas) con valores cercanos a la neutralidad, que fluctúan entre 7.02 y 7.35. El máximo valor promedio medido del pH durante el período comprendido de 2012-2020 es de 7.76 en la estación Antes de San Fernando. De las estaciones priorizadas en la **Tabla 3** el máximo valor es de 7,59 y corresponde a la estación Aula Ambiental. Casi todos los valores de pH que se registran, se traducen en un valor de subíndice de pH de 1 o cercano a este. Lo que contribuye de manera positiva en el cálculo del ICA- IDEAM.

El oxígeno disuelto (**Figura 1** y **Figura 2**) describe una tendencia decreciente en el tramo comprendido entre las estaciones Después de San Fernando y Parque de las Aguas, en las estaciones Papelea y Puente Gabino aumenta la concentración. Los bajos niveles de oxígeno disuelto se deben al incremento en las actividades antrópicas domésticas, que generan mayores vertimientos de aguas residuales provocando una mayor demanda de oxígeno en el agua, además, se debe tener en cuenta que el aumento de la radiación solar disminuye la dilución del O_2 en el agua. En síntesis, la dinámica del oxígeno se ve

directamente afectada por la temperatura del agua, la oxidación de compuestos, contenido de materia orgánica y las condiciones hidráulicas de la corriente.

Los cambios en la concentración de oxígeno entre la estación Después de San Fernando y Parque de las Aguas pueden estar relacionados con la oxidación de compuestos aportados a través de las aguas residuales vertidas directamente al río como las descargas de la PTAR San Fernando y la PTAR Aguas Claras, o a través de sus quebradas afluentes, como La Mina, La Hueso, Santa Elena y La García (quebradas priorizadas en la **Tabla 3**) que aportan materia orgánica e inorgánica que puede oxidarse y contribuir con la disminución de la concentración de oxígeno disuelto en el agua. Además, la poca variación de la pendiente en el tramo comprendido entre la estación Aula Ambiental y Parque de las Aguas, dificulta el intercambio gaseoso entre la corriente y la atmósfera, por lo tanto, disminuye la dilución del O_2 en el agua, la carga de aguas residuales vertidas en los municipios de Medellín y Bello, sobre el río Aburrá-Medellín y sus quebradas afluentes, brindan como resultado las concentraciones promedio para este tramo. Adicionalmente, se observa una relación directamente proporcional entre el valor medido en campo del oxígeno disuelto y el subíndice asociado al mismo, lo que implica, que entre menor sea el valor del oxígeno disuelto menor será el valor del subíndice y así mismo, menor el aporte de este parámetro en el cálculo del ICA-IDEAM.

La conductividad eléctrica (**Figura 1** y **Figura 2**) presenta un comportamiento creciente a lo largo del río Aburrá-Medellín, entre las estaciones Ancón Sur hasta Parque de las Aguas, donde los valores que corresponden a la estación Ancón Sur y Antes de San Fernando se vinculan a las descargas de aguas residuales que vierten directamente al río, provenientes de los municipios de Caldas, La Estrella y Sabaneta, relacionados con la falta del colector sur que se encuentra en construcción. Para los valores más altos, que se observan en el tramo entre Después de San Fernando y Parque de las Aguas, la conductividad eléctrica está relacionada con la descarga de la PTAR San Fernando, la descarga de la PTAR Aguas Claras y las cargas transportadas al río mediante sus quebradas afluentes, receptoras de vertimientos como Altavista, La Picacha, La Hueso, Santa Elena, La Rosa, La Madera y La García (quebradas priorizadas en la **Tabla 3**), que reciben descargas de aguas residuales domésticas y no domésticas a lo largo de su recorrido. Adicionalmente, se observa una relación inversamente proporcional entre el valor de conductividad eléctrica medido en

campo y el subíndice asociado al mismo, lo que implica, que entre mayor sea el valor de la conductividad eléctrica menor será el valor del subíndice y así mismo, menor el aporte de este parámetro en el cálculo del ICA-IDEAM.

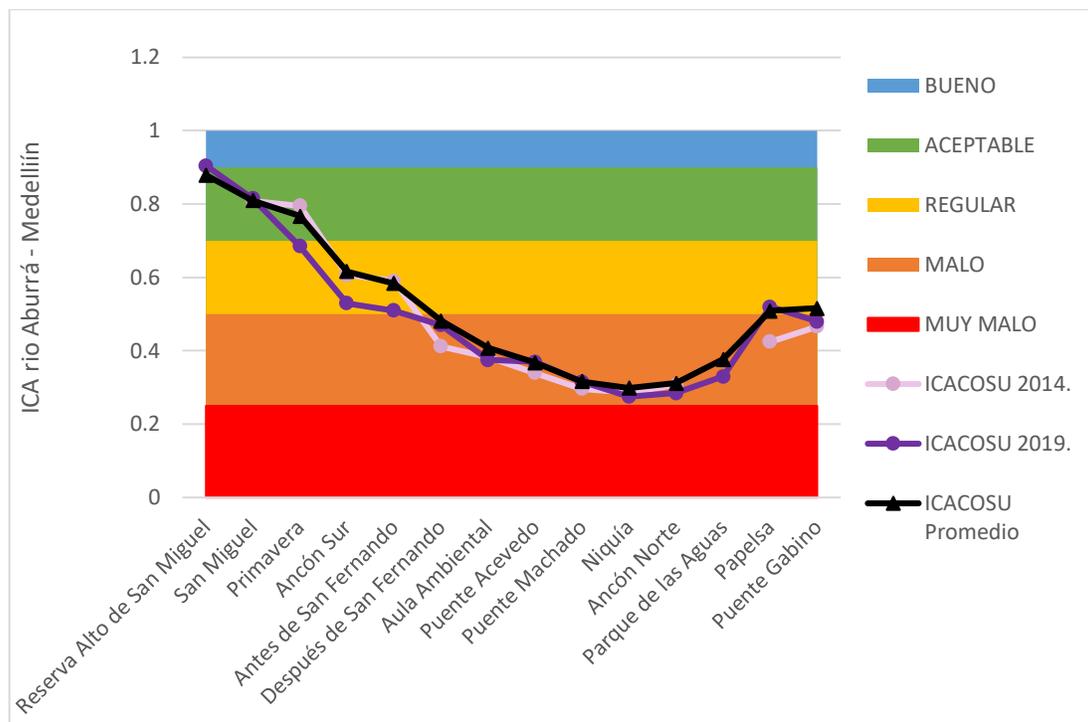
Las cargas contaminantes (**Figura 1** y **Figura 2**) correspondientes a la DQO, nitrógeno total Kjeldahl (NTK), fósforo total y los sólidos suspendidos totales (SST), presentan una tendencia creciente a lo largo de las estaciones de monitoreo ubicadas sobre el río Aburrá-Medellín, con una disminución en las estaciones Parque de las Aguas, Papelsa y Puente Gabino.

En el tramo comprendido entre la estación Ancón Sur y Aula Ambiental se evidencia una pendiente de alto crecimiento en las cargas contaminantes. Esto se asocia a vertimientos de aguas residuales realizados sobre el río, como la descarga de la PTAR San Fernando y a las quebradas afluentes como La Mina, Altavista, La Hueso, La Picacha, La Iguaná y Santa Elena. En la estación Puente Machado se observa un aumento en las cargas contaminantes que pueden estar vinculadas a las quebradas La Madera, El Hato y La García. En Ancón Norte se evidencian altas cargas contaminantes en el río, posiblemente asociado al aporte de contaminantes por vertimientos de sistemas de alcantarillado urbanos de los municipios de Bello y Copacabana, además, de los vertimientos provenientes de las industrias localizadas en esta zona (ver **Anexo 6** - listado de usuario o empresas identificados que realizan vertimientos a cuerpos de aguas, con o sin permiso de vertimientos). Adicionalmente, se observa una relación inversamente proporcional entre los valores de los sólidos suspendidos totales y la DQO medidos en el laboratorio y los subíndices asociado a cada uno de ellos, lo que implica, que entre mayor sea el valor de los sólidos suspendidos totales o la DQO, menor será el valor de los subíndices y así mismo, menor el aporte de estos parámetros en el cálculo del ICA-IDEAM.

A partir de los datos reportados en la **Figura 1** (*índice de calidad del río Aburrá-Medellín*), se construye la **Figura 12**, donde, se muestran un contraste entre el promedio histórico del monitoreo para el ICA-IDEAM (línea color negro) y los monitoreos realizados en las campañas del 2014 (línea color rosa), 2019 (línea color morada).

Figura 12

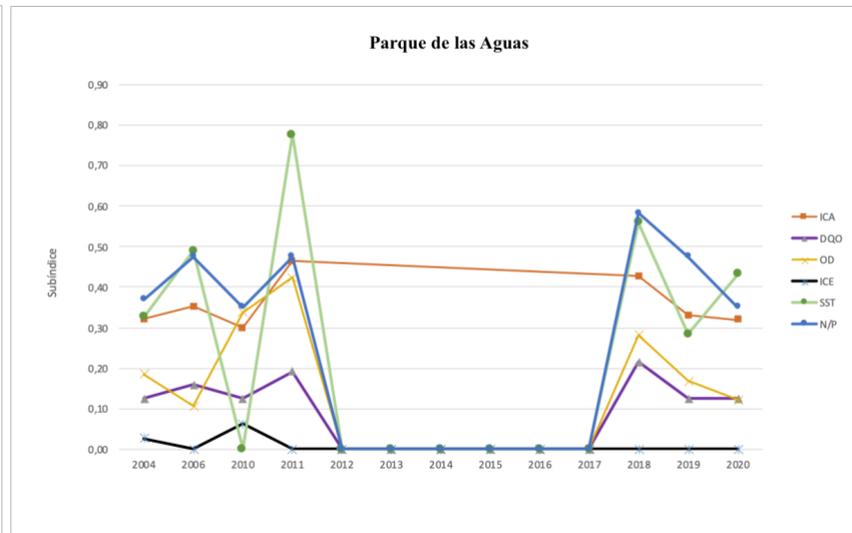
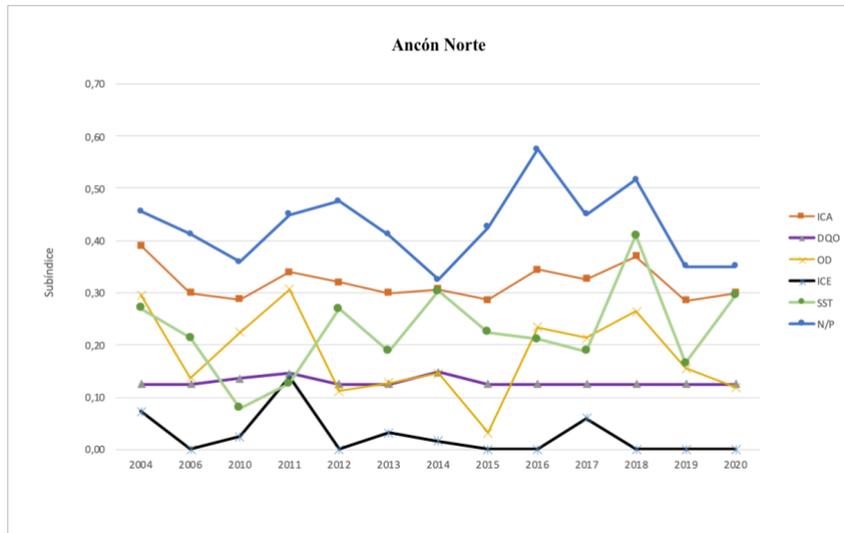
Registro histórico índices de calidad del agua período 2012-2020.



Los valores obtenidos del ICA-IDEAM en los años 2014 y 2019 son muy parecidos al promedio histórico a lo largo de la trayectoria a través del río Aburrá-Medellín, lo que implica, que a pesar de los diversos factores que pueden afectar la calidad del recurso hídrico como, los tipos de agua residual vertida (doméstica, industrial, escorrentía urbana, agropecuaria y la mezcla de estas), las descargas fraudulentas de residuos líquidos y/o sólidos, los vertimientos de excesos de los alcantarillados, los vertimientos de lixiviados de rellenos sanitarios (La Curva de Rodas, La Pradera o El lote El Caracol) y las fallas en los sistemas sépticos; la calidad mantiene la tendencia en las distintas estaciones de monitoreo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, la medición de los parámetros dependen del régimen hidrológico en temporada seca y temporada húmeda (los caudales afectan de forma acentuada la medición de cada uno de los parámetros), así como, el dimensionamiento del cauce del río en tramos (en términos de profundidad, velocidad del agua, el ancho de la sección).

Otro factor importante a tener en cuenta y que se observa en la **Figura 13**, es que el parámetro que causa un índice malo en un año puntual puede ser diferente al parámetro que

causa el mismo índice malo en un año diferente (por semestre), o entre las distintas estaciones de monitoreo que se encuentran en un mismo rango de calidad (bueno, aceptable, regular, malo, muy malo), los parámetros que causan un índice malo en una estación pueden ser diferentes a los parámetros que causa el mismo índice malo en la estación de monitoreo consecutiva. Adicionalmente, existen microempresas o emprendimientos, como salones de bellezas (con vertimientos de tinturas, y químicos relacionados con la actividad) o lugares donde manufacturan artículos artesanales de todo tipo que pueden estar o no vinculados a las empresas de acueducto o alcantarillado, y tener vertimientos sin identificar con descargas directas de aguas residuales a los cuerpos de agua y que pueden no cumplir con las condiciones óptimas de calidad para realizar dichos vertimientos.



En la **Figura 3** se muestran los valores promedio anuales (se puede filtrar por semestre) calculados para el ICA-IDEAM desde el 2004-2020 en las 13 estaciones sobre el río Aburrá-Medellín y un sitio de monitoreo en el río Porce.

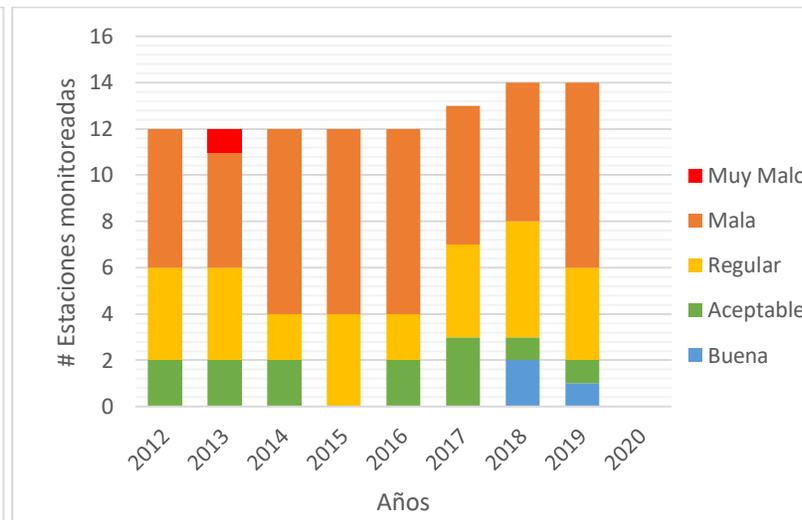
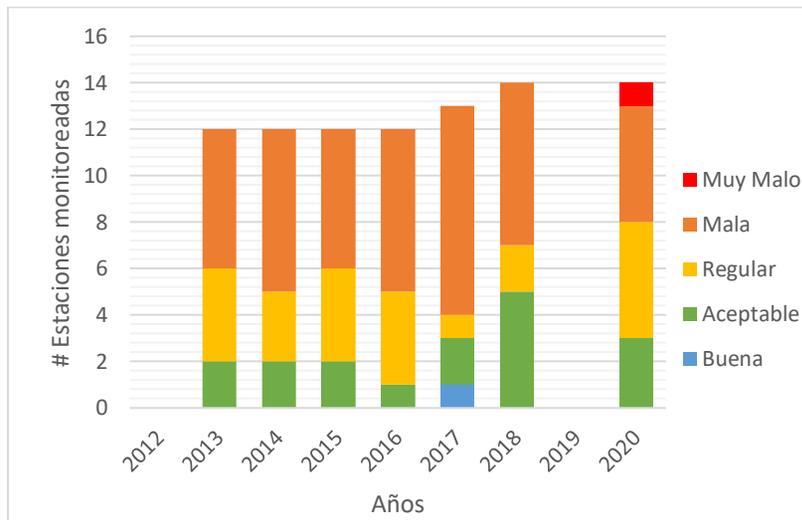
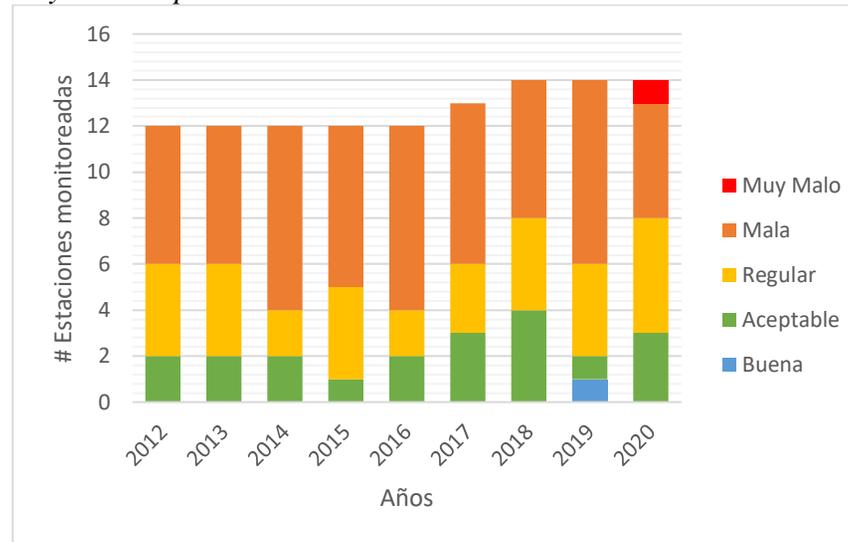
En la estación Aula Ambiental se observan algunas tendencias positivas con un pico en la magnitud del valor medido en el 2018. Sin embargo, esa estación presenta un deterioro significativo de la calidad del río, la cual puede relacionarse con el crecimiento demográfico en los municipios de Caldas, La Estrella, Sabaneta, Envigado, Itagüí y Medellín y a la poca gestión en el desarrollo de obras de saneamiento para recolectar y tratar las aguas residuales vertidas sobre el río y afluentes.

La estación de monitoreo Puente Acevedo presenta una tendencia positiva, las condiciones de calidad han mejorado poco a poco a través de los años con un pico en la magnitud del valor calculado en el 2018, la tendencia puede vincularse al tratamiento en la PTAR Aguas Claras, lo que evidencia mejoras de la calidad del agua en esta estación. Además, las estaciones Puente Machado y Niquia presentan una tendencia estable, las condiciones de calidad para estas estaciones se han mantenido constantes, sin embargo, la estación Niquia es donde la calidad del agua presenta un mayor deterioro. Las estaciones Ancón Norte y Parque de las Aguas presentan una tendencia variada, sin mejoras significativas.

Con el objetivo de ampliar la información relacionada con el análisis de tendencias, en la **Figura 14** se muestran 3 gráficos con la información del número de estaciones monitoreadas y la calidad promedio predominante a través de los años.

Figura 14

Número de estaciones monitoreadas y calidad promedio asociada



Se plantean algunas recomendaciones que relacionan la variabilidad de los parámetros medidos in situ con la intervención antrópica:

El Oxígeno Disuelto es un parámetro importante para evaluar el estado general del recurso, es un indicador de la presencia de vida acuática. Lo aporta la atmósfera y disminuye o se agota por la descomposición de la materia orgánica, la descarga de desechos orgánicos e inorgánicos a través de vertimientos industriales y aguas residuales domésticas, que ocasionan el descenso en las concentraciones de OD. Su ausencia indica condiciones anaerobias en el sistema. Entre las fuentes más importantes de oxígeno disuelto se encuentran: reaireación de la atmósfera (relacionado con la temperatura del agua, pendiente de la corriente, entre otros) y fotosíntesis de las plantas acuáticas. Los consumidores más importantes de oxígeno disuelto son: oxidación de la materia orgánica, oxidación del material nitrogenado, oxígeno demandado o consumido por la materia orgánica sedimentada y el oxígeno utilizado por las plantas acuáticas para respirar.

Los Sólidos Suspendidos Totales pueden ocasionar depósitos de lodos, condiciones anaerobias, problemas estéticos y adsorción de contaminantes. Generalmente, provienen de las aguas residuales domésticas, industriales, por erosión natural o antrópica del suelo, aguas que se infiltran en las tuberías de alcantarillado y por conexiones erradas (alcantarillado de aguas lluvias que se conectan erróneamente con los alcantarillados de aguas residuales puras).

La Demanda Química de Oxígeno es un parámetro directamente relacionado con materia orgánica. El valor medido depende de los vertimientos domésticos, industriales y la degradación natural de hojas. Ocasiona problemas estéticos y consume el oxígeno disuelto disponible en el agua.

El Nitrógeno y el Fósforo son nutrientes esenciales para el crecimiento, cuando son descargados al agua, pueden llevar al crecimiento de vida acuática indeseable. Si se vierten en cantidades excesivas al suelo, pueden contaminar el agua subterránea, crecimiento excesivo de algas (eutrofización), toxicidad en los peces (amonio). Las altas concentraciones de estos parámetros están relacionados con las descargas de aguas residuales domésticas e industriales, sobre todo las relacionadas con actividades agrícolas (escorrentía de aguas provenientes de la agricultura y la vegetación natural, pesticidas), escorrentía urbana y precipitación atmosférica.

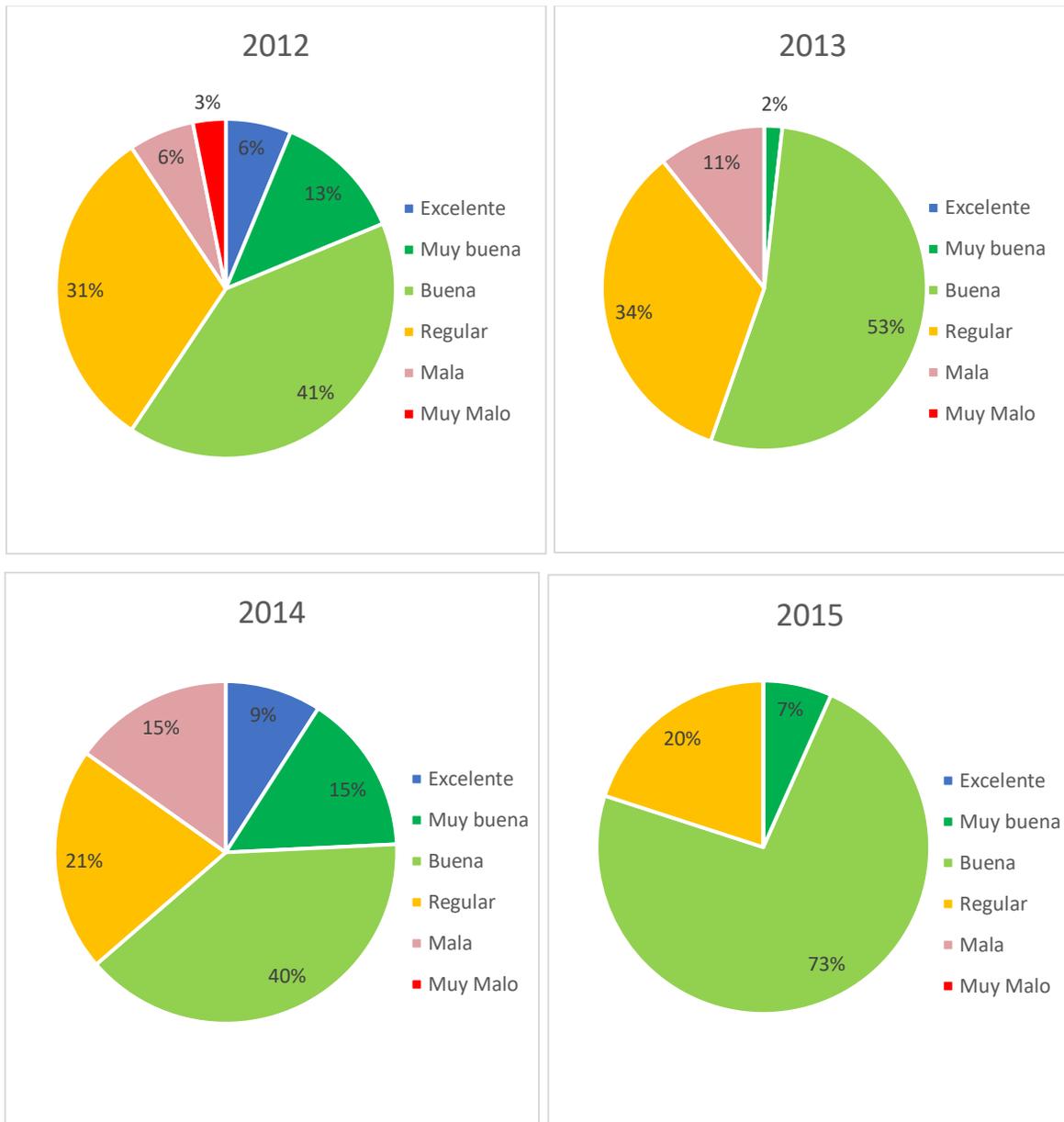
El pH mide el nivel de acidez y/o alcalinidad en el agua, usualmente se ve afectado por las descargas de aguas residuales domésticas e industriales y normalmente la medida de este parámetro está entre 6,4 y 8,6 en aguas industriales los valores pueden variar drásticamente.

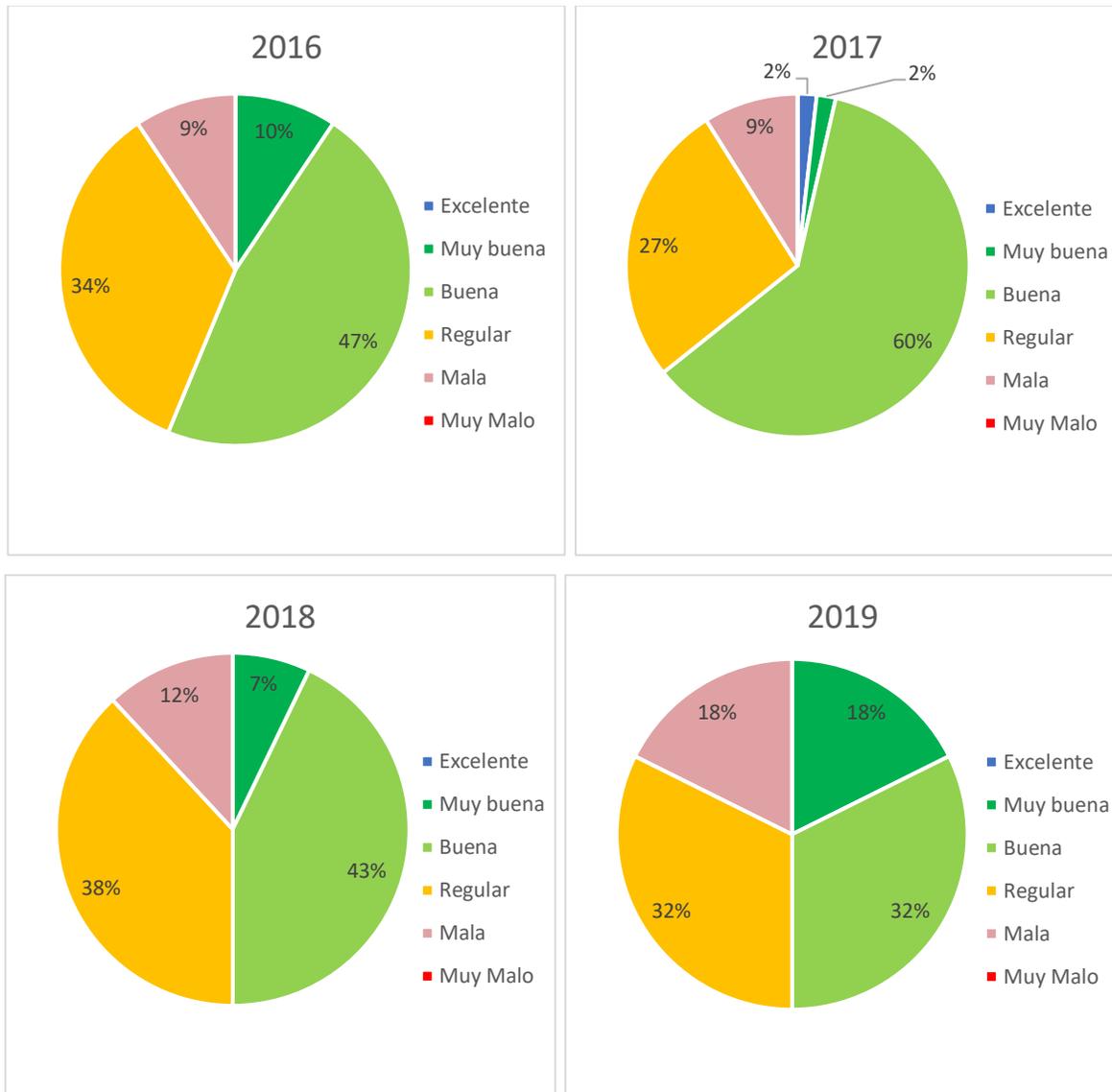
La Conductividad Eléctrica (cationes y aniones como: Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cl^- , B^{+3}), por lo general son adicionados por los vertimientos de agua residual doméstica. La salinidad excesiva puede dañar cosechas y el sodio puede afectar la permeabilidad de los suelos.

Análisis de los resultados de las campañas de monitoreo de aguas subterráneas.

La red de monitoreo de calidad depende de las preguntas que se quieren resolver y se asocia a las actividades propias de los establecimientos donde se encuentran las captaciones y la contaminación que se puede efectuar debido al desarrollo de dichas actividades. Por lo tanto, los puntos de monitoreos de calidad de las aguas subterráneas tienen a variar en cada una de las campañas, lo que impide mantener la información a través de tiempo.

En la **Figura 15** se muestra el registro histórico de los resultados obtenidos en el cálculo del ICA-AS, en términos de la calidad del agua subterránea se observa una mejoría gradual en los diferentes monitoreos a través de los años. En las campañas del 2018 y 2019 se observa un porcentaje de 50% para la condición Mala-Regular y un porcentaje del 50% para la condición Buena-Muy Buena. En el registro de los demás años predomina el porcentaje asociado a la calidad Buena-Muy Buena.

Figura 15*Evolución de la calidad teniendo en cuenta el ICA-AS Martínez.*



A partir de los datos reportados en la **Tabla 5** para los usuarios de calidad Mala-Regular, se construye la **Tabla 7** donde se muestran los puntos de monitoreo priorizados caracterizados por la actividad asociada al uso de la captación y si la calidad ha mejorado, empeorado o permanecido igual a través de los años. Adicionalmente, en la **Figura 16** se observan dos diagramas circulares que representan el porcentaje asociado al número de usuarios con calidad Mala y Regular, y si la calidad ha mejorado, empeorado o permanecido igual a través de los años.

Tabla 7

Puntos de monitoreo priorizados, actividad asociada al uso de la captación y si la calidad a mejorado, empeorado o permanecido igual a través de los años.

NOMBRE	CODIGO	Actividad asociada a los puntos de Agua	Calidad representativa	Cambios positivos	Cambios negativos	Igual
Hacienda El Progreso	Ba_GEO_0069	Ganadería ^ (Sin uso)	Mala			X
Caritrans SAS	Co_GEO_0032	Estación de servicio (Sin uso)	Mala		X	
Industrias Metálicas Corsan S.A.	It_A_082	Industrial ^ **	Mala		X	
Proteco S.A	It_P_107	Industria textil ^	Mala		X	
JG Espinal y CIA. Estación de servicios Mobil sur	Me_A_071	Estación de servicio ^ **	Mala			X
Texaco Palacé	Me_A_090	Estación de servicio ^ **	Mala			X
Parque Industrial Hilanderías	Me_P_248	Comercial ^ (Sin uso)	Mala		X	
Bello Aseo S.A.	Be_A_057	Institucional ^ **	Regular		X	

Parqueadero La Asunción	Co_A_008	Lavado de vehículos	Regular		X	
Servicentro Estación Hospital	Me_A_154	Estación de servicio ^ (Sin uso)	Regular		X	
Lavadero y Aparqueadero Suracar	Me_A_411	Lavado de vehículos +	Regular			X
Distracom Los Ángeles	Be_A_022	Parqueadero (Sin uso)	Regular	X		
Motel Doresky	Co_A_014	Comercial ^ (Sin uso)	Regular	X		
Jardín Botánico Joaquín Antonio Uribe	Me_A_151	Institucional o recreativo ^ (Sin uso)	Regular			X
Terminal Belencito	Me_A_340	Parqueadero ^ (Sin uso)	Regular			X
Estación de servicio Esso Laureles	Me_A_390	Lavado de vehículos	Regular	X		
Lavaautos la 52	It_A_094	Lavado de vehículos ^ +	Regular			X
Tintorería Industrial Diego	Me_A_432	Industrial (Cotoblanc HTD-C)	Regular			X
Sede Santa Ana Transporte Hato Viejo	Be_A_018	Comercial ^ (Sin uso)	Regular		X	

Lote abandonado (antes Colgras)	Gi_GEO_0041	(Sin uso)	Regular		X	
Gaula Antioquia	It_A_102	Institucional ^ **	Regular			X
Lavadero y Parqueadero La 46	Me_A_119	Lavado de vehículos ^ **	Regular			X
Estación de servicio Terpel Las Mercedes	Me_A_143	Estación de servicio ^ **	Regular		X	
Ferrosvel S.A	Me_A_328	Doméstico	Regular		X	
Parqueadero y lavadero VIP	Me_A_396	Lavado de vehículos y parqueadero	Regular		X	
Car Wash My Angel	Me_A_413	Lavado de vehículos +	Regular			X
Parqueadero Córdoba	Me_A_441	Lavadero de vehículo y parqueadero (Sin uso)	Regular			X
Colegio el Divino Salvador en la Estrella	Es_GEO_0016	Institucional ^ (Sin uso)	Regular	X		

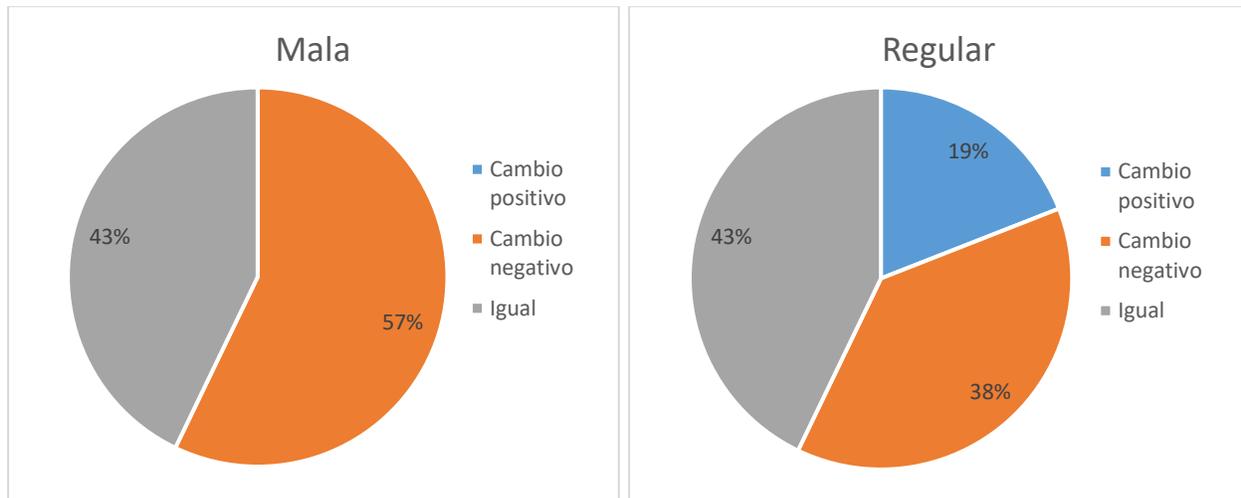
^ La actividad asociada a la captación se asume según la razón social del usuario

** No se tiene ningún tipo de información que respalde la actividad asociada al uso del punto de agua

+ Interacción con aceites, jabón o productos para el lavado de automóviles

Figura 16

Porcentaje de usuarios en calidad Mala y Regular, y el cambio de la calidad a través del tiempo.



De acuerdo con lo observado en la **Tabla 7** y la **Figura 16** el sistema es sensible en términos de calidad, para los usuarios Distracom Los Ángeles, Motel Doresky, Estación de servicio Esso Laureles y Colegio el Divino Salvador en la Estrella se observa una mejoría en la calidad a través del tiempo. Para los usuarios donde predomina la calidad Mala el porcentaje de cambios negativos representa al 57% de los mismos y en términos generales se aprecia que la mayoría de las captaciones priorizadas se usan para el lavado de vehículos.

Históricamente, se ha hablado que uno de los mayores problemas asociado a la contaminación de las aguas subterráneas es identificar las fuentes de contaminación, ya que, en las aguas subterráneas los vertidos no se ven, se desplazan a velocidades muy bajas y pueden permanecer en los acuíferos decenas de años. Sin embargo, la degradación de la calidad depende de la vulnerabilidad de los acuíferos frente a las actividades potencialmente contaminantes que se desarrollan en su entorno. Los problemas con respecto a la contaminación de las aguas subterráneas se pueden dar por las siguientes condiciones:

Filtraciones de aguas residuales, domésticas o industriales, debido a vertidos directos a la captación, por fugas de las redes o canales, por infiltraciones procedentes de fosas sépticas, de los lixiviados o rezumes de los residuos sólidos almacenados en vertederos, por contaminación de metales pesados, por contaminación de nitratos o por compuestos orgánicos en zonas agrícolas, asociado a la agricultura por el uso masivo de los fertilizantes, además, puede existir el caso de una recarga artificial, directa o indirecta de los acuíferos con aguas contaminadas.

Conclusiones

El desarrollo urbano, agrícola e industrial tiene influencia en la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, a través de parámetros hidrológicos que se miden para identificar y conocer la mejora o deterioro que sufre el recurso hídrico, que además, dependen del tipo de agua residual vertida: doméstica, industrial, escorrentía urbana, agropecuaria o mezclas de estas; y si esta es o no depurada mediante plantas de tratamiento de aguas residuales, o si existen descargas fraudulentas de residuos líquidos y/o sólidos, vertimiento de excesos de los alcantarillados, vertimiento de lixiviados de rellenos sanitarios e incluso fallas en los sistemas sépticos.

Según el tipo de uso, varía la importancia de uno u otro parámetro para cuantificar la calidad del agua, las actividades antrópicas generan o contienen sustancias que pueden hacer el agua inútil para algunos usos, puesto que la contaminación afecta las fuentes hídricas y puede dejar inutilizable el recurso. Por ejemplo, los nutrientes presentes en el agua actúan como fertilizantes en la agricultura, sin embargo, cuando la cantidad excede la demanda por el cultivo, puede provocar en las plantas problemas de eutrofización. Es importante tener en cuenta que existen fenómenos naturales como la erosión que arrastra sedimentos que hacen variar la calidad de las corrientes de agua superficiales. Además, actividades como la industria, el uso extensivo de pesticidas y abonos en la agricultura (escorrentía agrícola), la explotación minera, la descarga de basuras y el vertimiento de los desechos domésticos son causantes del deterioro de las aguas (escorrentía urbana).

A partir de los datos de la **Figura 1** y **Figura 2**, se observa que puede existir una relación entre los distintos parámetros que se miden para el cálculo de los índices de calidad, como es el caso de las concentraciones de oxígeno disuelto y DQO₅, a mayor DQO₅ menor OD, sin embargo, como la cantidad de oxígeno disuelto no depende únicamente de la materia orgánica que se encuentra en el recurso, puede que la relación no siempre se cumpla.

En el caso de las aguas subterráneas el análisis de la calidad permitió conocer las condiciones de la captación y verificar los cambios positivos o negativos que han tenido. Teniendo en cuenta que las captaciones están condicionadas por los usos del suelo y las actividades que se realizan en torno a ellas. Los resultados obtenidos a través del análisis del comportamiento del ICA-AS, demuestran una notable mejoría de las captaciones a través de los años, lo que en definitiva refleja que las campañas de monitoreo han servido para concientizar a los usuarios a

realizar un mejor uso del recurso hídrico subterráneo, y un notable avance en la lucha para controlar la contaminación ambiental.

El monitoreo de las aguas superficiales permite hacerle seguimiento al saneamiento del río y sus quebradas, y así dar insumos para identificar las zonas del área metropolitana, con usuarios que posiblemente no estén conectados al sistema de alcantarillado, y tomar las medidas necesarias para evitar que las aguas residuales caigan directamente a los cuerpos de agua sin haber pasado antes por una planta de tratamiento. Sin embargo, pese a estos esfuerzos, existen vertimientos ilegales al río por parte de algunas empresas; extracciones irregulares de minería; así como la construcción de viviendas informales, que hacen que la calidad del río Aburrá-Medellín no mejore tan rápidamente.

Desde el año 2003 entró a operar la planta de tratamiento de aguas residuales de la Ayurá, la calidad del agua del río no mejora significativamente, eso se debe a que existen muchos barrios que son informales, que están desconectados de los sistemas de acueducto y alcantarillado, lo que genera grandes vertimientos sobre el río, además pueden existir industrias que evadan la ley, en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá se conocen casos de empresas que buscan horas de la madrugada para hacer vertimientos irregulares sobre el río.

La metodología propuesta en este trabajo representa una herramienta útil para ayudar a los tomadores de decisiones municipales a evaluar la calidad del recurso y actuar sobre el río y sus alrededores, con el fin de preservar o alcanzar un “buen estado del recurso hídrico”, además, se realizó el análisis a un conjunto de datos de monitoreo (con alcance de aproximadamente 10 años).

Los tramos priorizados en la cuenca presentan un deterioro de la calidad del agua, principalmente debido a la presencia de los grandes centros urbanos y áreas industriales que estresan el río. Se considera necesario intervenir con acciones que sean capaces de reducir las fuentes de presión puntuales y difusas y aumentar la resiliencia del río (capacidad recuperadora) y su entorno.

Entre los parámetros que se miden en la calidad del agua, se resalta la importancia de medir la temperatura del agua porque juega un papel esencial en el control del medio ambiente al influir en los procesos físicos, químicos y biológicos, incluidos factores como la descomposición de la materia orgánica.

Otro parámetro clave para evaluar la calidad de los cuerpos hídricos es el pH, ya que influye en la solubilización y sedimentación de metales y otras sustancias, además, debe situarse en valores

de 6,4 y 8,6 para la supervivencia de la vida acuática, los valores fuera de este rango suelen ser perjudiciales. Los valores de pH pueden variar por fenómenos naturales como la disolución de rocas, la absorción de gases atmosféricos, la oxidación de materia orgánica y la fotosíntesis, además de factores antrópicos como la descarga de efluentes domésticos (oxidación de materia orgánica) y residuos industriales. A lo largo de las estaciones de monitoreo del río Aburrá-Medellín se presenta un pH uniforme con valores neutros, los valores de pH se traducen en un valor de subíndice de 1 o cercano a este. Lo que contribuye de manera positiva en el cálculo del ICA-IDEAM.

Las principales fuentes de oxígeno disuelto son la atmósfera y la fotosíntesis de las algas, mientras que su consumo está relacionado con la descomposición de materia orgánica, la respiración de los organismos acuáticos, la oxidación de iones y las pérdidas a la atmósfera, adicionalmente, las condiciones hidráulicas de la corriente (la pendiente) pueden afectar de manera significativa la dilución de oxígeno en el agua. El agua contaminada tiende a tener bajas concentraciones de oxígeno disuelto debido a su consumo en la oxidación de los compuestos orgánicos, mientras que el agua limpia presenta concentraciones más altas de OD. El oxígeno disuelto describe una tendencia decreciente en los tramos comprendidos entre las estaciones Después de San Fernando y Parque de las Aguas. Los bajos niveles se relacionan con el incremento en las actividades antrópicas domésticas por vertimientos de aguas residuales (PTAR San Fernando y Aguas Claras, quebradas afluentes), además, el aumento de la radiación solar disminuye la dilución del O_2 en el agua.

Las cargas contaminantes como los sólidos suspendidos totales, DQO y la materia orgánica rica en nutrientes, nitrógeno y fósforo que, en exceso, pueden provocar un desequilibrio en la producción y consumo de biomasa, condición conocida como eutrofización, en los tramos priorizados las posibles fuentes de origen son la PTAR San Fernando, quebradas priorizadas, vertimientos de alcantarillados e industrias con vertimientos directos (incluida la agrícola).

A partir de la revisión de los resultados históricos del monitoreo de aguas superficiales y subterráneas se detallaron las posibles razones que han influido en la calidad del recurso, relacionando los parámetros medidos in situ con la intervención antrópica en los tramos o zonas de influencia. Además, el análisis de tendencias permitió comparar el valor de los índices en diferentes instantes de tiempo para determinar los cambios en la calidad (degradación o mejora) que se han producido a través de los años.

Para concluir, se resalta la importancia de una gestión coordinada de las aguas superficiales y subterráneas contemplando conjuntamente aspectos de calidad y cantidad del recurso hídrico, en cierto modo, se complementan, mientras que las aguas superficiales suelen ser de mayor cuantía, tienen una tasa de renovación elevada y son irregulares en el tiempo, las aguas subterráneas tienden a ser de menor cuantía, de renovación lenta y se dispone de ellas constantes en el tiempo. En zonas con problemas de abastecimiento, el uso conjunto de las aguas superficiales y subterráneas es una necesidad evidente.

En pro de conservar o preservar el recurso y garantizando las demandas humanas actuales y futuras, junto con el equilibrio de los ecosistemas, es indispensable tomar medidas preventivas, y no esperar una relación de causa-efecto con impactos negativos sobre las aguas, en cuanto al tipo de vertidos o la aplicación o manufactura de sustancias netamente peligrosas cerca del recurso. Teniendo en cuenta lo anterior, se resalta la importancia de concientizar a la población, ya que la protección del recurso es una responsabilidad compartida, tanto de las administraciones competentes como de los usuarios y potenciales contaminadores. También, incentivar la utilización de las aguas subterráneas, potencializando realizar estudios que lleven a un conocimiento más profundo de los acuíferos y el correcto uso de los mismos (calidad y cantidad).

Referencias

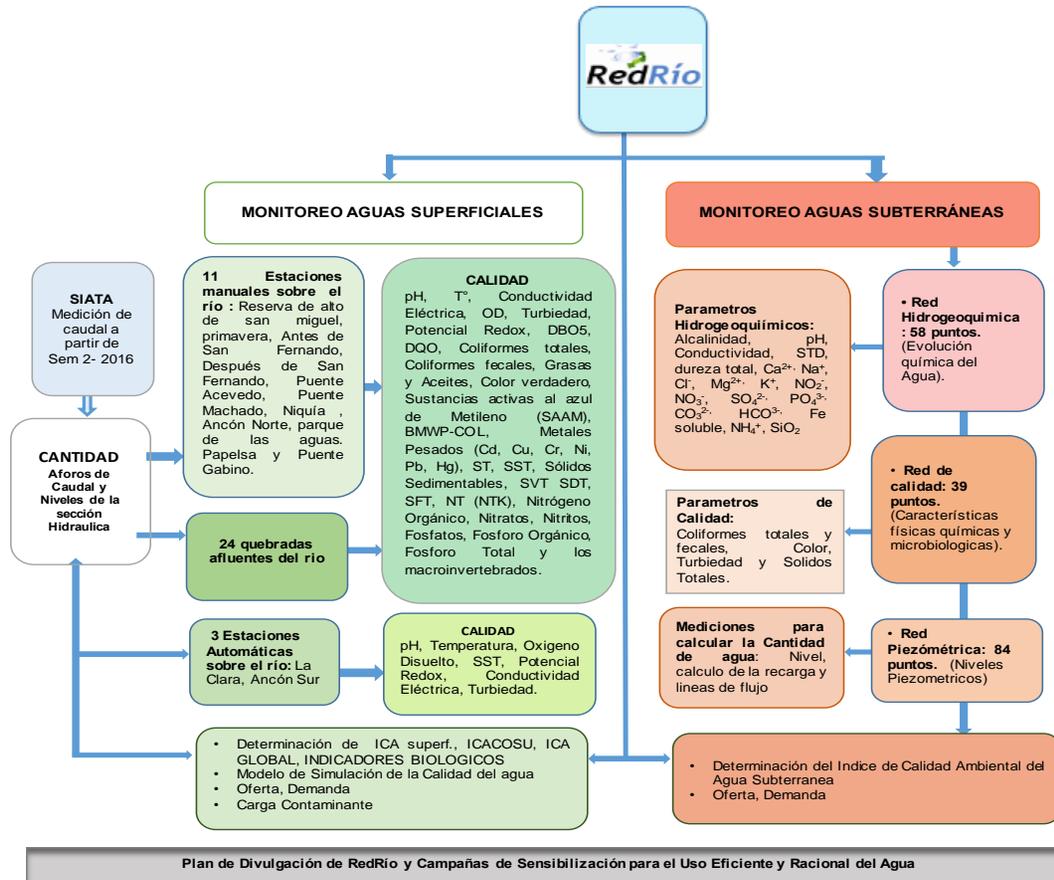
- Álvarez-Dávila, E., Restrepo, Z., Gonzáles, S., Camaño, J. Z., & Acevedo, J. A. (2015). Humboldt. Obtenido de Seguridad hídrica urbana: http://www.humboldt.org.co/images/pdf/naturaleza_urb/5-seguridad-hidrica-urbana.pdf
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (s.f.). *Área Metropolitana del Valle de Aburrá*. Obtenido de Observatorio: <https://www.metropol.gov.co/ambiental/recurso-hidrico/Paginas/aguas-superficiales/red-río.aspx>
- Barrera Niño, D. V. (2017). EL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN RÍOS CAUDALOSOS DE COLOMBIA. Bogotá D.C.
- Boyacioglu, H. (2007). Development of a water quality index based on a European classification scheme. *Water S.A.*, 33(1), 101-106.
- CorAntioquia. (1999). Identificación de alternativas para el análisis de contaminantes ambientales en el Valle de Aburrá - CONTRATO 1253 DE 1998. Medellín.
- González Scancelli, T. (2013). Evaluación del sistema de abastecimiento de agua potable y disposición de excretas de la población del corregimiento de Monterrey, Municipio de Simití Departamento de Bolívar, proponiendo soluciones integrales al mejoramiento de los sistemas y la salud de. Bogotá D.C.
- ICA, Í. d. (Octubre de 2011). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Obtenido de IDEAM: http://www.ideam.gov.co/documents/24155/125494/36-3.21_HM_Indice_calidad_agua_3_FI.pdf/9d28de9c-8b53-470e-82ab-daca2d0b0031
- Martínez Franco, D. C. (2007). Propuesta de implementación de metodologías para la evaluación hidrogeoquímica y de calidad de las aguas subterráneas y aplicación a la zona del Bajo Cauca Antioqueño. Medellín.
- Sierra Ramirez, C. A. (2011). Calidad del agua Evaluación y diagnóstico. Medellín: Ediciones de la U.
- Solano Ortega, F., & Fernández Parada, N. J. (2008). índices de calidad y de contaminación del agua. Bucaramanga: Universidad de Pamplona.
- Tasneem Abbasi, S.A. Abbasi, (2012), Water Quality Indices, El Sevier, Page 4,6; ISBN 9780444543042, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-54304-2.01001-0>.
- Uddin, M. G., Nash, S., & Olbert, A. I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*, 122, 107218. doi:10.1016/j.ecolind.2020.10.
- Universidad de Antioquia, Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2019). 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 del 2019. Medellín.

Varol, M., Gökot, B., Blekeyen, A., & Sen, B. (2012). WATER QUALITY ASSESSMENT AND APPORTIONMENT OF POLLUTION SOURCES OF TIGRIS RIVER (TURKEY) USING MULTIVARIATE STATISTICAL TECHNIQUES—A CASE STUDY. *River Research and Applications*, 1428-1438. DOI:10.1002/rra.1533

Vélez Ortíz, M. S. (2017). Indicadores e índice de calidad de agua subterránea como base para establecer sus usos potenciales. Medellín.

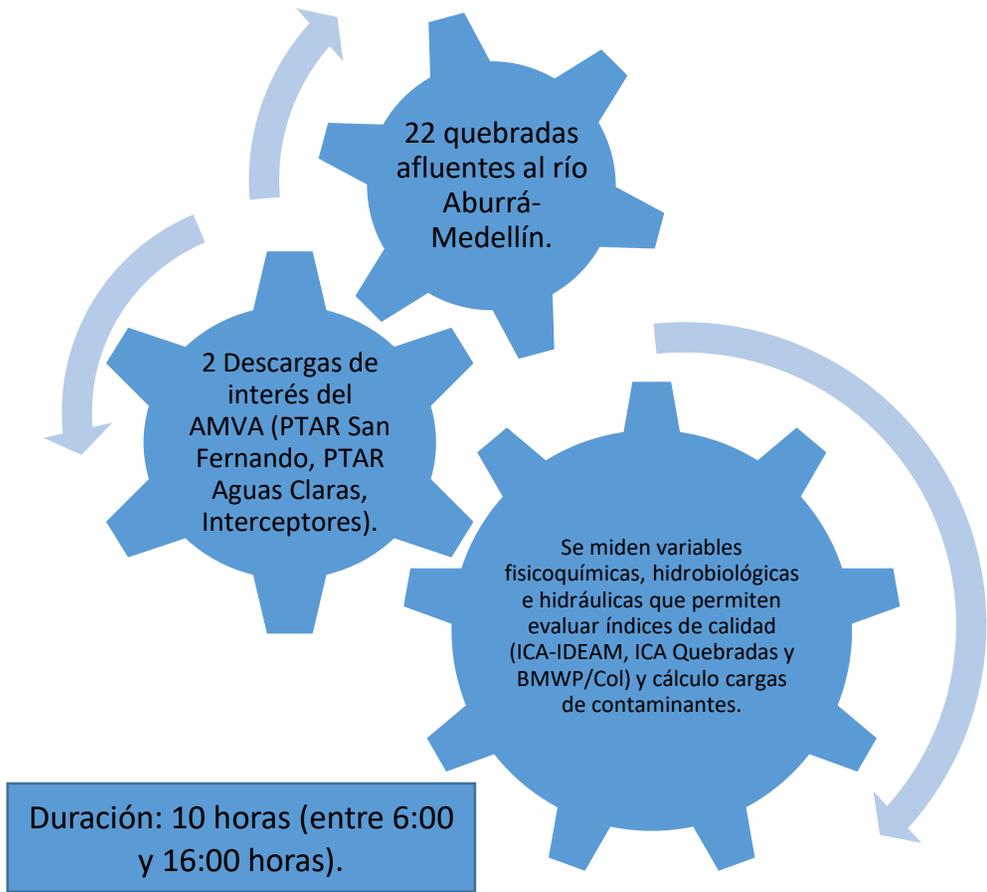
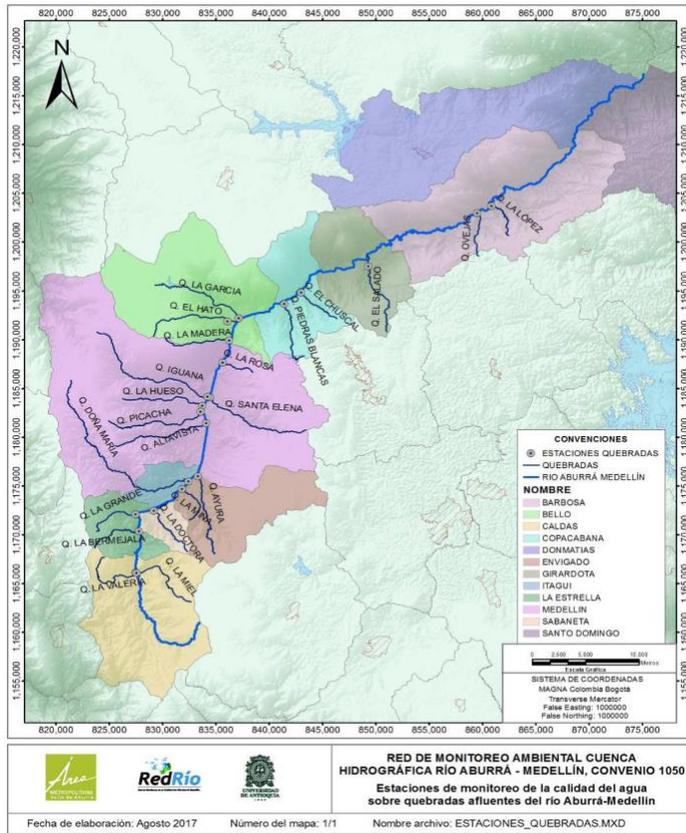
Anexos

Anexo 1. Programa REDRÍO



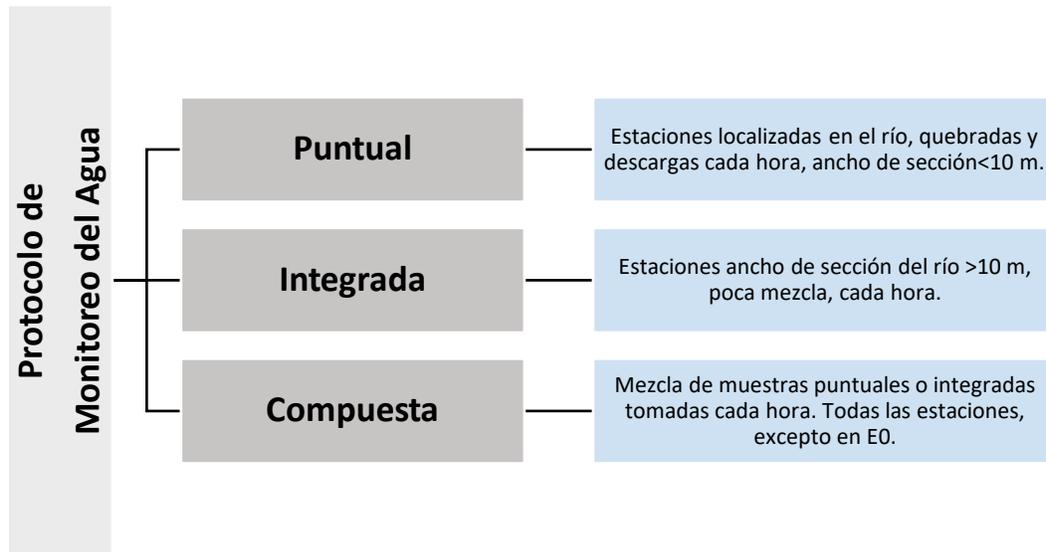
Fuente: (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, s.f.)

Campañas quebradas



Fuente: (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, s.f.)

Protocolo de monitoreo del agua



Tomado de: *Protocolo de Monitoreo del Agua* (Ministerio de Ambiente, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM, INVEMAR, 2018). (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, s.f.).

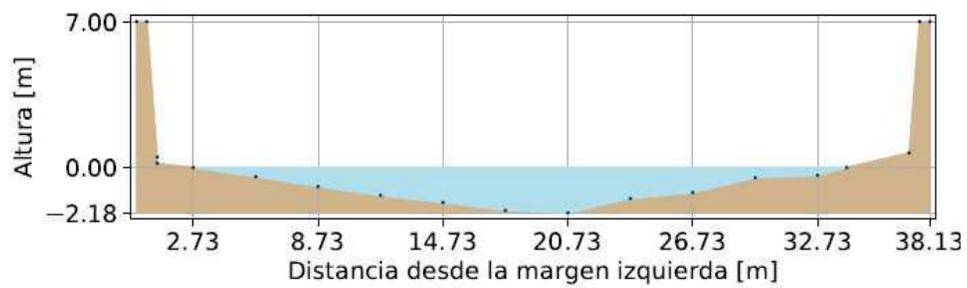
Muestra puntual

Representan las condiciones y características de un cuerpo de agua en el instante en que son tomadas.

- La calidad del cuerpo de agua no difiere espacialmente.
- La recolección de este tipo de muestras se lleva a cabo en el centro de la sección.
- En esta muestra se miden variables de campo (temperatura del agua, concentración de oxígeno disuelto, pH del agua y conductividad eléctrica).

Muestra integrada

- Cambios en la calidad del agua de la corriente en relación a su ancho.
- Corresponde a la mezcla de muestras puntuales que se recolectan de manera simultánea en distintos puntos de la sección.
- Se utilizan para anchos de sección >math>>10\text{ metros}</math>.
- La recolección se lleva a cabo a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y a $\frac{3}{4}$ de la sección transversal de la corriente (igual volumen).
- En esta muestra se miden variables de campo (temperatura del agua, concentración de oxígeno disuelto, pH del agua y conductividad eléctrica).



Fuente: (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, s.f.)

Muestra compuesta

- La muestra compuesta estará conformada por alícuotas (mezcla de varias muestras puntuales o integradas recolectadas en un mismo sitio en un período determinado).
- En esta muestra se miden variables como DBO_5 , DQO, nutrientes y sólidos. En el caso de la campaña completa que se realiza en el río, también se miden metales pesados, color, entre otras

Anexo 2. Parámetros ambientales propuestos para medir en el recurso agua

A. Bacteriológicos		
No.	Parámetro	Descripción
1	Coliformes totales	La presencia de coliformes totales indica que el cuerpo de agua ha sido o está contaminado con materia orgánica de origen fecal, ya sea por humanos o animales.
2	Coliformes fecales	Es un indicador indirecto del riesgo potencial de contaminación con bacterias o virus de carácter patógeno, ya que las coliformes fecales siempre están presentes en las heces humanas y de los animales.
3	Estreptococos totales	Es un indicador de la contaminación fecal de origen humano o animal, usado porque presenta una alta resistencia al cloro. Se usa ampliamente en otros países como indicador bacteriológico en balnearios y playas, es decir, en sitios para la recreación en general.
B. Organolépticos		
4	Turbiedad	Su presencia disminuye la producción de oxígeno por fotosíntesis, restringe los usos del agua, indica deterioro estético del cuerpo de agua, interfiere en la desinfección. La turbiedad es producida por una gran variedad de causas. Entre ellas las más importantes pueden ser: La erosión natural de las cuencas la cual aporta sedimentos a los cauces de los ríos y la contaminación causada por la industria o por desechos domésticos.
5	Color	Su mayor aporte en monitoreo de aguas es la descripción que pueda aportar para el análisis de una muestra o describir las condiciones físicas o estéticas de un cuerpo de agua.
6	Sustancias flotantes	Es un indicador estético del cuerpo del agua, y como tal se debe “medir” de manera cualitativa, o descriptiva.
7	Olor	Se mide cualitativamente como presente o no. Actualmente, lo más práctico evaluar su presencia midiendo concentraciones de H ₂ S.

		C. Físicos
8	pH	<p>Origina cambios en la fauna y la flora de los cuerpos de agua. Ejerce influencia sobre la toxicidad de ciertos compuestos, como el amoníaco, metales pesados, hidrógeno sulfurado, etc.</p> <p>Las variaciones de este parámetro en las corrientes de agua generan un cambio en el ambiente de desarrollo de la fauna y la flora presente en él; elevan el potencial tóxico de ciertas sustancias disueltas en el agua y originan la disminución del oxígeno disuelto, lo que conduce a condiciones anaeróbicas de la corriente.</p>
9	Temperatura	<p>Se mide en $\mu\text{mhos/cm}$ o $\mu\text{S/cm}$. Indica la presencia de sales en forma ionizada, como los cloruros o iones de sodio, carbonatos, etc. Permite establecer relaciones e interpretación de resultados con los sólidos disueltos en las descargas o cuerpos de agua. Es la mejor medida indirecta de la salinidad, ya que por otros métodos se torna engorroso e impreciso. Mediante el establecimiento de relaciones empíricas de la conductividad en soluciones estándar, posibilita resultados más rápidos y funcionales.</p>
10	Conductividad	
11-16	Sólidos totales Suspendidos volátiles Suspendidos Disueltos Disueltos volátiles Sedimentables	<p>Las diferentes formas de sólidos propuestos indican la presencia de sales disueltas, partículas en suspensión de carácter orgánico o inorgánico. Con los sólidos se puede establecer relaciones con otros parámetros como la DQO y la DBO, la turbiedad y el color, para que, una vez establecidas las relaciones empíricas a través de series de datos, se pueda ahorrar parámetros como la DBO, que normalmente demora 7 días desde la entrega de la muestra hasta el reporte de resultados.</p>
		D. Indicador bioquímico
17	DBO5	<p>Demanda bioquímica de oxígeno en cinco días. Parámetro de mayor significación cuando se trata de determinar la carga pollucional que pueden generar los desechos domésticos e industriales de carácter orgánico al ser descargados en corrientes de agua en las que persistan condiciones aeróbicas. Normalmente se determina la demanda a los 5 días y mediante ecuaciones de cinética bacteriana se extrapolan los resultados a los 20 días, para obtenerlos más rápidamente.</p>

E. Químicos básicos		
18	Acidez	Estos dos parámetros no pueden considerarse como contaminantes directos o específicos, sino como una medida de los efectos de la combinación de sustancias asociadas a los carbonatos y bicarbonatos. Debido a las variaciones que producen en el pH se generan reacciones secundarias rompiendo el ciclo ecológico en un cuerpo de agua. Ellos se expresan como la concentración de carbonato de calcio (CaCO_3)
19	Alcalinidad	Carbono orgánico total. Este parámetro es el más conveniente y directo para determinar la cantidad total de materia orgánica presente en el agua. Con sus resultados se pueden establecer relaciones con la DBO, DQO, y, por tanto, obtener conclusiones sobre su consistencia o no.
20	COT	Son la causa más frecuente de la dureza y afectan vitalmente las propiedades incrustantes y corrosivas de un agua.
21	Calcio	Su presencia tiene un efecto de significación sobre la actividad biológica del sistema. Los organismos causantes de autopurificación de los cuerpos de aguas son inhibidos por un contenido de 0,3 mg/L de CN^- . Su toxicidad aumenta cuando se asocia a variables tales como temperatura, pH, OD y la concentración de ciertas sustancias minerales.
22	Cianuros	Son una medida indirecta de contaminación de origen orgánico humano, así como de la presencia de sales ionizables.
23	Cloruros	La prueba de demanda química de oxígeno es muy usada para medir la carga polucional de los desechos domésticos e industriales. Mediante esta prueba se puede medir un desecho en términos de la cantidad de oxígeno requerido para oxidar completamente la materia orgánica del desecho a CO_2 , agua y amoníaco.
24	DQO	Originan cambios significativos de reducción de la tensión superficial del agua, imposibilitando el intercambio adecuado del oxígeno gaseoso. Originan consumo del oxígeno disuelto por su componente orgánico, incrementan la concentración de fósforo total.
25	Detergentes	Las aguas duras imposibilitan el efecto adecuado de jabones en las aguas de uso doméstico. Sus valores altos ocasionan incrustación y corrosión en las tuberías o equipos metálicos
26	Dureza	

		industriales o redes de acueducto. En aguas de teñido originan manchas en las telas.
27	Fósforo total	<p>Puede ser utilizado como indicador de cantidad de detergentes sintéticos vertidos a una corriente, ya que éstos poseen entre el 12 al 13% de fósforo en sus formulaciones. Desde el punto de vista de la eutrofización de cuerpos de agua, el nivel crítico es aproximadamente 0,01 mg/L</p> <p>En aguas superficiales ocasionan películas que interfieren en la transferencia de oxígeno atmosférico. En cantidades excesivas disminuyen la eficiencia de los tratamientos biológicos. Originan taponamientos de las redes de alcantarillado, por su adherencia a las paredes del tubo. Su presencia disminuye notablemente la calidad estética del cuerpo del agua. Generalmente están asociadas a la presencia de hidrocarburos por su insolubilidad en el agua.</p>
28	Grasas y aceites	<p>Están englobados dentro de las grasas y aceites. Sin embargo, por su importancia y efectos ambientales se deben determinar independientemente. Generan olores fuertes y deterioro estético de los cuerpos de agua. Su presencia origina incremento de la DBO, alteran los procesos biológicos e impiden el intercambio del oxígeno gaseoso.</p>
29	Hidrocarburos	<p>Aguas con altos contenidos de este metal, al entrar en contacto con el aire, se puede precipitar, originando sólidos sedimentables, y coloración de las aguas. Su presencia imposibilita el uso del agua en algunas actividades industriales y posibilita el crecimiento de las bacterias del hierro (crenotherix), que causan taponamiento en las tuberías de acueducto.</p>
30	Hierro total	
31	Magnesio	<p>El contenido de dureza está asociado al contenido de magnesio, la formación de incrustaciones y propiedades corrosivas del agua.</p>
32	Manganeso	<p>En pequeñas cantidades produce manchas muy intensas en porcelanas y muebles sanitarios. Su oxidación posibilita la formación de precipitados, generando turbiedad y disminución de la calidad estética de los cuerpos de agua.</p>
33	Nitratos	<p>Este parámetro presente en aguas puede causar metahemoglobina (color azul de la piel) en los infantes alimentados con leche preparada. La enfermedad es</p>

- producida por reducción de los nitratos a nitritos dentro del sistema digestivo de estos niños.
- 34 Nitritos En aguas superficiales crudas, las huellas de nitrito indican contaminación. Debido a que el nitrito es formador de ácido nitroso en solución ácida, cuya mezcla con aminas secundarias forma las nitroso-aminas (cancerígenas), debe tener un cuidadoso control.
- 35 Nitrógeno amoniacal La descarga de este parámetro a los cuerpos de agua puede reducir sus niveles de oxígeno disuelto, en especial, cuando sus tiempos de residencia son altos.
- 36 Nitrógeno orgánico La presencia de N amoniacal y orgánico en aguas indica una reciente contaminación, por lo que ofrecen mayor peligro para la salud pública.
- 37 Oxígeno disuelto (OD) Es una de las pruebas más simples e importantes, para determinar por su concentración la contaminación de corrientes o los cuerpos de agua. Es una de las condiciones más importantes para que exista crecimiento y reproducción de una población normal de peces y otros organismos acuáticos.
- 38 Sulfatos Los sulfatos, al mezclarse con iones de calcio y magnesio en aguas de consumo humano, producen un efecto laxante. En aguas residuales al entrar en contacto con el concreto inducen la formación de cristales de sulfato aluminato que originan una expansión del material que destruye su textura. Bajo la acción de bacterias anaerobias los reducen hasta la formación de sulfuros, que luego en condiciones aeróbicas favorecen la formación de ácido sulfúrico, con los problemas de olor y corrosión asociados a estos compuestos.
- 39 Sulfuros Son grandes causantes de olores y disminución del pH. Es un estado intermedio de la reducción de los sulfatos bajo condiciones anaeróbicas y bacterias sulfurosas. Atacan directamente los metales e indirectamente la corrosión de tuberías. Es tóxico para los peces y otros organismos acuáticos.

40	Salinidad	<p>Es una propiedad importante para las aguas naturales e industriales. Originalmente fue concebida como una medida la masa de sales disueltas. Su determinación inicialmente se hacía por secado y pesado de las sales, pero presenta dificultades por las pérdidas de algunos compuestos. Actualmente, la salinidad se determina indirectamente por la medida de propiedades físicas del agua tales como la conductividad, la densidad y la velocidad del sonido. A través de relaciones empíricas con las propiedades físicas se determina la salinidad de las aguas. La precisión de la determinación de las propiedades físicas, determina la precisión de la medida de salinidad. En orden de precisión el método estándar recomienda: 1) la conductividad, 2) la densidad y 3) la velocidad del sonido en el agua. Aunque la conductividad tiene la mayor precisión, ella sólo responde a los iones disueltos. La densidad del agua, aunque menos precisa, incluye todas las sales disueltas.</p>
41	Zinc	<p>Es un elemento esencial para las plantas y animales, pero en elevadas concentraciones es tóxico para algunas especies de la vida acuática. En aguas alcalinas pueden originar opalescencia en concentraciones de 5 mg/L. Su presencia es un indicador de descargas contaminantes industriales.</p>

F. Metales pesados básicos

42	Aluminio	<p>En las corrientes de los EE. UU., se encuentran valores de 400 µg/L. En aguas de consumo debe estar en 54 µg/L y en aguas subterráneas se encuentra en valores menores de 0,1 µg/L. Los minerales principales asociados al aluminio son la bauxita y óxidos de aluminio que son usados como abrasivos. Se usa en intercambiadores de calor y construcción de partes de aviones, contenedores y en material de construcción. El sulfato de aluminio se usa en la potabilización del agua como floculante. A valores mayores de 1,5 mg/L constituye un tóxico peligroso en los ambientes marinos. La Organización Nacional de Alimentos recomienda un valor máximo de 5 mg/L en aguas para riego. Para aguas de consumo la Environmental Protection Agency, por sus siglas en inglés (EPA) recomienda concentraciones máximas permisibles de 0,05 mg/L.</p>
----	----------	--

43	Arsénico	<p>La contaminación por As aparece asociada a la fabricación o utilización de herbicidas o pesticidas. Obstaculiza reproducción celular. Los tejidos de muchos organismos lo acumulan, por tanto, sus efectos dañinos pueden durar un tiempo cuando la concentración es baja, pero a pesar de ello es mortal.</p> <p>Es especialmente peligroso ya que se puede combinar con otras sustancias tóxicas. Afecta principalmente a los micro moluscos (no se desarrolla la concha). Produce graves enfermedades cardiovasculares en el hombre, además, es un irritante gastrointestinal.</p>
44	Cadmio	<p>Su toxicidad sobre los organismos acuáticos varía con la especie, características físicas y químicas del agua, como temperatura, dureza, turbiedad y contenido de CO₂.</p>
45	Cobre	<p>Su toxicidad varía con el tipo de peces, con la temperatura y el pH del agua, así como también con su estado de oxidación, siendo el Cr⁶⁺ el más nocivo. Las sales de cromo imparten una coloración en el agua.</p>
46	Cromo	<p>Cuando está presente en agua de consumo de una u otra forma invade el cuerpo humano a través de los tejidos de la piel o ingestión de comida, preparada con dicha agua. Debilita progresivamente los músculos, pérdida de la visión, deteriora otras funciones cerebrales, genera parálisis eventual, estado de coma o muerte.</p>
47	Mercurio	<p>En bajas concentraciones es vital para el desarrollo de plantas y animales, pero en elevados valores causan problemas graves en la salud humana.</p>
48	Níquel	<p>Compuesto tóxico acumulativo en el cuerpo humano. Produce una variedad de síntomas en los tejidos vulnerables. Cuando el agua está contaminada con sales de plomo, se le forma a los peces una película mucosa coagulante, primero sobre las agallas y luego sobre todo el cuerpo, causándoles sofocación.</p>
49	Plomo	

Fuente: Informe "Identificación de alternativas para análisis de contaminantes ambientales". Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (CorAntioquia, 1999).

Anexo 3. Índices de calidad de aguas subterráneas

Dentro del estudio de la calidad del agua subterránea existen una serie de herramientas que son útiles para traducir, entender y visualizar la información recopilada, y son los índices de calidad, estos consisten en una expresión que simplifica una combinación relativamente compleja parámetros físicos y químicos los cuales sirven como una medida de la calidad del agua, relacionados con el uso potencial que tendría el agua. (Solano Ortega & Fernández Parada, 2008).

Desde el 2010, en el marco del proyecto RedRío se ha implementado un índice de calidad de agua subterránea para consumo humano (ICA-AS) propuesto por (Martínez Franco, 2007). El índice de calidad ICA-AS se diseñó para evaluar la calidad del agua subterránea que quiere usarse con fines domésticos, en relación con la normatividad colombiana sobre el tema. Este índice se puede emplear para determinar si es posible consumir el agua de la captación solo con un tratamiento de desinfección.

Adicionalmente, con el fin de proponer estrategias que ayuden en la toma de decisiones se implementa un nuevo índice de calidad para las aguas subterráneas, surge el índice de calidad general de agua subterránea (ICG-As) que fue propuesto por (Vélez Ortiz, 2017). El objeto principal del índice es calificar la calidad del agua subterránea analizada de acuerdo con sus usos potenciales y la normatividad vigente del lugar. El índice de calidad general de las aguas subterráneas (ICG-As) responde a necesidades tales como: la generalidad, la facilidad de cálculo y la flexibilidad, además de no requerir en su construcción matemática modificaciones adicionales. Representa mediciones de una variedad de variables en un solo número. Este índice se ha aplicado desde el año 2017 en el monitoreo de calidad realizado en el marco del proyecto RedRío (Universidad de Antioquia, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2019).

Para cada uso considerado, (Vélez Ortiz, 2017) propone los parámetros de análisis más adecuados. Para consumo humano se consideran 12 variables, para uso industrial se seleccionan 7 variables y para uso agrícola se seleccionan 6 variables.

En la **Tabla 8** se presentan los parámetros considerados en cada uno de los índices descritos anteriormente y que son medidos en los monitoreos de calidad de aguas subterráneas.

Tabla 8*Parámetros considerados para la evaluación de los índices de calidad del agua subterráneas.*

ÍNDICE	PARÁMETRO	TIPO DE PARÁMETRO
ICA-AS (Martínez, 2007)	Coliformes fecales	Microbiológico
	Color	Organoléptico
	pH	Físico
	Dureza	Químico
	Nitratos	Químico
	Hierro	Químico
	Turbiedad	Físico
ICG-AS Consumo Humano (Vélez, 2017)	Coliformes totales	Microbiológico
	Coliformes fecales	Microbiológico
	Color	Organoléptico
	pH	Físico
	Conductividad	Físico
	COD	Químico
	Alcalinidad	Químico
	Dureza	Químico
	Sulfatos	Químico
	Nitratos	Químico
	Hierro	Químico
	Cloruros	Químico
ICG-AS Uso industrial (Vélez, 2017)	pH	Físico
	Dureza	Químico
	Conductividad	Físico
	Sólidos disueltos totales	Físico
	Hierro	Químico
	Manganeso	Químico
	Coliformes totales	Microbiológico
ICG-AS Uso agrícola	pH	Físico

(Vélez, 2017)	Manganeso (Boro)	Químico
	Cobre	Químico
	Coliformes totales	Microbiológico
	Coliformes fecales	Microbiológico
	Solidos disueltos totales	Físico

Fuente: Informe de Aguas Subterráneas, Convenio 643 del 2019. (Universidad de Antioquia, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2019)

Construcción del índice ICA-AS (Martínez Franco, 2007).

El índice de calidad se construyó de manera que se pueda emplear una fórmula similar a la del ICA de la NSF, donde las concentraciones de los diferentes parámetros (X_i) se transforman en un valor de calificación (Y_i), que depende del cumplimiento o no de la norma, y luego se multiplica por un valor de peso (P_i) que depende del parámetro. Entonces:

$$ICA - AS = \sum (Y_i * P_i)$$

Para la determinación de los valores Y_i , se tienen en cuenta la norma para agua potable y segura de cada parámetro, contenida en el decreto 475/1998, cuando estos dos valores son iguales se consideraron los límites especificados en el decreto 1594 para aguas crudas que solo requieren desinfección.

En general para la construcción de las curvas Y_i se aplica la siguiente valorización cuando la norma para agua potable es diferente a la norma para agua segura (color, hierro y dureza):

- $Y_i = 10$ si el valor del parámetro es menor o igual al de la norma para agua potable.
- $Y_i = 5$ si el valor es igual a el de la norma para agua segura.
- $Y_i = 7,5$ si el valor corresponde al valor medio entre agua segura y potable.
- $Y_i = 2,5$ si el valor corresponde a un valor por encima de la norma para agua segura.
- $Y_i = 0$ si el valor corresponde a un valor que se encuentra significativamente por encima del valor para agua potable o superior.

Las condiciones anteriores se analizan para cada uno de los parámetros que se escogen para la construcción del índice, aquellos parámetros cuya presencia según el decreto 475 de 1998 pueden afectar directamente la salud de los usuarios y los que alteran la calidad del agua en lo que se refiere

a criterios organolépticos y químicos que pueden limitar su uso doméstico y que además tienen un porcentaje significativo de muestras que no cumplen con la norma colombiana: Coliformes fecales, Nitratos, Hierro, Dureza, pH, Color, Turbidez.

Las ecuaciones para el cálculo de Y_i para cada parámetro se resumen en la **Tabla 9**.

Tabla 9

Valores de Y y P para cada parámetro

Parámetro de calidad	X	Y	P
Coliformes Fecales (microor/cm ³) o (UFC/cm ³)	0	10	0,3
	0 - 500	$4 * 10^{-5}X^2 - 0,04 X + 10$	
	500 - 1000	0	
	1000 - 5000	-2	
	5000 - 10000	-3	
	> 10000	-4	
Nitratos (mg N- NO ₃ /L)	10 o < 10	10	0,25
	10 - 25	$0,0177X^2 - 1,2849X + 21,068$	
	> 25	0	
PH	< 2,5 o > 10	0	0,07
	6,5 - 9	10	
	2,5 - 6,5	$2,5X - 6,25$	
	9 - 10	$-10X + 100$	
Dureza (mg/1 CaCO ₃)	160 o < 160	10	0,07
	160 - 200	$-0,25X + 50$	
	> 200	0	
Hierro (mg Fe/L)	0,3 o < 0,3	10	0,07
	0,3 - 1	$17,191X^2 - 36,393X + 19,266$	
	> 1	0	
Turbiedad (UNT)	5 o < 5	10	0,12
	5 - 25	$-0,5X + 12,5$	
	> 25	0	

Color (UPC)	15 o < 15	10	0,12
	15 - 35	$-0,5X + 17,5$	
	> 35	0	

Fuente: (Martínez Franco, 2007).

Los valores de peso (P_i) se determinaron de acuerdo con la afectación que tiene cada parámetro sobre la calidad del agua para uso doméstico, los parámetros más críticos son las coliformes fecales y los nitratos, por esta razón tienen pesos de 0,3 y 0,25 respectivamente. La turbiedad y el color afectan la calidad estética del agua y puede limitar su uso considerablemente y reciben un valor de peso de 0,12. El pH, el hierro y la dureza limitan el uso del agua, pero no de una manera tan significativa porque no tienen efecto adverso directo sobre la salud de los consumidores o la apariencia del agua y reciben un valor de peso de 0,07. En la **Tabla 9**, se observan los valores de peso para cada parámetro.

El índice se construye de tal manera que los parámetros que estén dentro del rango agua potable - agua segura o agua potable - agua que se puede tratar con solo desinfección, este entre 5 - 10. De acuerdo con esto, se obtienen las siguientes calificaciones según el valor del índice de calidad.

Tabla 10

Calificación para los valores del ICA-AS

Valor ICA-AS	Calificación
10	Excelente
9 - 10	Muy buena
6 - 9	Buena
5 - 6	Regular
2,5 - 5	Mala
0 - 2,5	Muy mala

Fuente: (Martínez Franco, 2007).

Construcción del índice ICG-AS (Vélez Ortíz, 2017)

El objeto del índice es calificar de forma general el agua subterránea analizada de acuerdo con sus usos potenciales y la normatividad vigente. La normatividad colombiana no está totalmente desarrollada y establecida para todos los usos, se seleccionaron 3 de los usos más frecuentes dentro de los cuales las aguas subterráneas cumplen un papel estratégico: el abastecimiento humano, el uso en agricultura y el uso en la industria.

De acuerdo con la revisión bibliográfica, el índice diseñado por el Canadian Council Ministers of Environment – CCME - WQI - responde a las necesidades planteadas en el objetivo como: la generalidad, la facilidad de cálculo y la flexibilidad, además de no requerir en su construcción matemática modificaciones.

Ciertas consideraciones dadas por el índice de calidad general (ICG), son tomadas para una mejor estructura y consolidación del nuevo índice, se clasifican los parámetros de mayor interés en cada uso y se incluyen parámetros que den razón de las propiedades físicas, microbiológicas, organolépticos y químicas. Esto con el objetivo de identificar más fácilmente los puntos sobre los cuales hay que tener cierta atención en caso de presentar alguna variación en dichas variables.

Con base en lo anterior se seleccionan las variables que se observan en la **Tabla 8** para el uso en consumo humano, agricultura e industria. Las variables que intervienen se adaptan y se muestran en las fórmulas 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6 del índice de calidad general así:

$$ICG - As = 100 - \left(\frac{\sqrt{A_1^2 + F^2 + A_2^2}}{1,732} \right) \quad [2.1]$$

$$A_1 = \left(\frac{N^\circ \text{ de objetivos no alcanzados}}{\text{Total de objetivos medidos}} \right) \times 100 \quad [2.2]$$

$$F = \left(\frac{N^\circ \text{ de pruebas fallidas}}{\text{Total de pruebas realizadas}} \right) \times 100 \quad [2.3]$$

$$A_2 = \left(\frac{N}{0,01N + 0,01} \right) \times 100 \quad [2.4]$$

$$\text{Evaluación} = \left(\frac{\text{Valor de prueba fallida}_i}{\text{Valor del objetivo}_i} \right) - 1 \quad [2.5]$$

$$N = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \text{Evaluación}_i}{\text{Total del pruebas realizadas}} \right) \times 100 \quad [2.6]$$

Y su rango de calificación se muestra en la **Tabla 11**.

Tabla 11

Rango de calificación ICG-As.

Calificación	Valor	Descripción
Excelente	95-100	La calidad del agua subterránea es apta para el uso evaluado y cumple con la normatividad establecida.
Buena	79-95	La calidad del agua subterránea puede ser apta para el uso evaluado, sin embargo, debe ser pasada por un proceso u operación sencilla de tratamiento para llegar a la calidad óptima.
Aceptable	64-79	La calidad del agua subterránea tiene potencial para el uso evaluado, sin embargo debe ser sometida a un tren de tratamiento convencional para llegar a la calidad óptima exigida por la normatividad. El recurso está bajo un posible estado de deterioro.
Regular	44-64	La calidad del agua subterránea no es adecuada para el uso evaluado, por lo que debe ser sometida a un tren de tratamiento más elaborado que la lleve a su calidad óptima exigida por la normatividad. El recurso está bajo condiciones de deterioro.
Mala	0-44	La calidad del agua subterránea no es apta para el uso evaluado. Para su uso debe evaluarse a profundidad el diseño de un tren de tratamiento que contrarreste en su totalidad las condiciones actuales en las que se encuentra y pueda llegar al cumplimiento de las exigencias normativas. El recurso está siendo expuesto a contaminación

Adaptado de CCME, 1999

Fuente: (Vélez Ortíz, 2017).

Anexo 4. Código de Matlab del ICA-AS Martínez

% Con este código construido en Matlab se calcula el índice de calidad de aguas subterráneas

```
clear all
clc
filename = 'Datos_Agosto.txt';

datos = dlmread (filename, '\t');
dim =size(datos);
Nf =dim (1);
Nc =dim (2);

%Coliformes fecales
q=1
for i=1:Nf;
    if datos(i,6)==0
        y(i)=10;
    elseif datos(i,6)<=500;
        y(i)=4*10^-5*datos(i,6)^2-0.04*datos(i,6)+10 ;
    elseif datos(i,6)<=1000;
        y(i)=0 ;
    elseif datos(i,6)<=5000;
        y(i)=-2 ;
    elseif datos(i,6)<=10000;
        y(i)=-3 ;
    else datos(i,6)>10000;
        y(i)=-4
    end
    ICA_D(i)=y(i)*0.3
    Yes(i,q)= y(i)
end
%Nitratos como nitrogeno
q=q+1
for i=1:Nf;
    if datos(i,15)<=10;
        y(i)=10;
    elseif datos(i,15)<=25;
        y(i)=0.0177*datos(i,15)^2-1.2849*datos(i,15)+21.068;
    else datos(i,15)>25;
        y(i)=0;
    end

    ICA_D(i)=ICA_D(i)+y(i)*0.25;
    Yes(i,q)= y(i)
end
%Ph
q=q+1
for i=1:Nf;
```

```
if datos(i,1)<=2.5
    y(i)=0;
elseif datos(i,1)<=6.5;
    y(i)=2.5*datos(i,1)-6.25;
elseif datos(i,1)<=9;
    y(i)=10;
elseif datos(i,1)<=10;
    y(i)=-10*datos(i,1)+100 ;
else datos(i,1)>=10;
    y(i)=0;
end
ICA_D(i)=ICA_D(i)+y(i)*0.07;
Yes(i,q)= y(i)
end
```

```
% Dureza
q=q+1
for i=1:Nf;
    if datos(i,8)<=160;
        y(i)=10;
    elseif datos(i,8)<=200;
        y(i)=-0.25*datos(i,8)+50;
    else datos(i,8)>200;
        y(i)=0;
    end
    ICA_D(i)=ICA_D(i)+y(i)*0.07;
    Yes(i,q)= y(i)
end
```

```
% Prueba Hierro
q=q+1
for i=1:Nf;
    if datos(i,12)<=0.3;
        y(i)=10;
    elseif datos(i,12)<=1;
        y(i)=17.191*datos(i,12)^2-36.393* datos(i,12)+19.266;
    else datos(i,12)>1;
        y(i)=0;
    end
    ICA_D(i)=ICA_D(i)+y(i)*0.07;
    Yes(i,q)= y(i)
end
```

```
% Prueba Turbiedad
q=q+1
for i=1:Nf;
    if datos(i,14)<=2;
        y(i)=10;
```

```

elseif datos(i,14)<=25;
    y(i)=-0.5*datos(i,14)+11;
else datos(i,14)>25;
    y(i)=0;
end
ICA_D(i)=ICA_D(i)+y(i)*0.12;
Yes(i,q)= y(i)
end

```

```

% Prueba Color
q=q+1
for i=1:Nf;
    if datos(i,4)<=15;
        y(i)=10;
    elseif datos(i,4)<=35;
        y(i)=-0.5*datos(i,4)+17.5;
    else datos(i,4)>35;
        y(i)=0;
    end
    ICA_D(i)=ICA_D(i)+y(i)*0.12;
    Yes(i,q)= y(i)
end

```

```
ICA_D= ICA_D'
```

```

for i=1:Nf
if ICA_D(i)<=0.25
    calidad{i}='Muy mala'
elseif ICA_D(i)<=5
    calidad{i}='Mala'
elseif ICA_D(i)<=6
    calidad{i}='Regular'
elseif ICA_D(i)<=9
    calidad{i}='Buena'
elseif ICA_D(i)<10
    calidad{i}='Muy buena'
elseif ICA_D(i)==10
    calidad{i}='Excelente'

end
end
calidad=calidad'
yes2=Yes'

```

Fuente: Carpeta de Aguas Subterráneas-Anexo 3.1 “Memorias de cálculo_Códigos” Convenio 643 del 2019. (Universidad de Antioquia, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2019)

Anexo 5. Histórico de calidad del ICA-AS Martínez

NOMBRE	CODIGO-CAMPAÑA	Fase III	Fase IV				Fase V				Convenio 1050		Convenio 1050 adición I	Convenio 643
		ICA-As Martínez (2007)	ICA-As Martínez (2007)				ICA-As Martínez (2007)				ICA-As Martínez (2007)		ICA-As Martínez (2007)	ICA-As Martínez (2007)
		nov-10	nov-12	feb-13	ago-13	abr-14	nov-14	mar-15	ago-15	mar-16	abr-17	ago-17	jun-18	sept-19
Hacienda El Progreso	Ba_GEO_0069					Mala						Buena	Regular	Buena
Bello Aseo S.A.	Be_A_057											Muy buena	Buena	Buena
Parqueadero La Asuncion	Co_A_008	Mala	Muy Buena	Buena	Buena	Buena						Muy buena	Muy buena	Buena
Caritrans SAS	Co_GEO_0032					Mala				Regular		Buena	Buena	Buena
Tintorería Industrial Colombiana LTDA	Es_A_037											Buena	Buena	Buena
Motel Aries	Es_A_012													Buena
Tintorería Industrial Colombiana LTDA	Es_P_038											Buena	Buena	Buena
Industrias Metalicas Corsan S.A.	It_A_082						Mala	Regular				Buena	Buena	Buena
Sociedad Mercantil de Automotores S.A. (Somerauto)	Me_A_009	Buena	Muy Buena	Muy Buena	Buena							Muy buena	Muy buena	Buena
Servicentro Estación Hospital	Me_A_154	Mala	Buena	Regular	Mala	Mala	Mala	Muy Buena	Buena			Muy buena		Buena
Ferrocortes (Antes Intertex)	Me_A_228				Regular							Buena		Buena

Lavadero y Aparqueadero Suracar	Me_A_411		Regular	Mala	Mala	Buena	Mala	Muy Buena		Regular	Buena	Muy buena	Muy buena	Buena
Colegio La María (Parkinet)	Me_A_186					Buena						Muy buena		Excelente
Distracom Los Angeles	Be_A_022							Buena						Muy buena
Parqueadero PH	Be_A_048	Mala	Buena	Regular	Regular	Regular						Buena	Buena	Muy buena
Motel Doresky	Co_A_014													Muy buena
Inversiones Siderense	Es_A_001	Mala	Regular	Regular	Buena	Buena						Muy buena	Muy buena	Muy buena
Industrias de Aceros S.A	It_A_004					Buena		Muy Buena		Buena	Muy Buena	Buena	Muy buena	Muy buena
Herrajes Gaher Ltda	It_A_103					Regular	Buena	Buena		Buena		Muy buena		Muy buena
Mecánicos Unidos	It_P_016											Buena	Buena	Muy buena
Parqueadero la Pirámide	Me_A_116					Regular	Buena	Buena				Muy buena	Buena	Muy buena
Jardín Botánico Joaquín Antonio Uribe	Me_A_151											Muy buena	Buena	Muy buena
Baldosas Superpisos	Me_A_159	Mala	Mala	Buena	Mala	Regular	Buena	Buena	Buena	Mala				Muy buena
Parqueadero Moravia	Me_A_183				Buena	Buena						Muy buena	Muy buena	Muy buena
Billares el Desquite de la 89	Me_A_327					Mala	Mala	Regular		Regular		Buena		Muy buena
Lavadero y Parqueadro la 83	Me_A_331					Muy Buena	Regular	Mala		Buena		Muy buena	Muy buena	Muy buena
Terminal Belencito	Me_A_340	Mala	Regular	Regular	Buena	Regular				Buena	Buena	Muy buena		Muy buena
Almacenes e Industrias Roca S. A	Me_A_365					Buena	Buena	Buena		Buena		Muy buena		Muy buena
Lavautos y parqueadero La 30 Belén	Me_A_368					Buena	Buena	Buena		Buena		Buena	Buena	Muy buena
Parqueadero Belen 30 A	Me_A_369					Mala	Regular	Mala		Buena		Buena		Muy buena

(Nueva Granada N2)														
Estación de servicio Esso Laureles	Me_A_390					Mala	Regular	Buena		Buena		Buena	Buena	Muy buena
Lavaautos la 52	It_A_094											Buena		Regular
Proteco S. A	It_P_107					Buena	Buena	Buena		Muy Buena	Buena	Buena	Buena	Regular
Tintorería Industrial Diego	Me_A_432	Muy Mala	Regular	Mala	Regular	Muy Mala	Mala	Mala					Buena	Regular
Planta potabilizadora de EPM	Ba_GEO_0070					Mala						Regular		
Gimnasio GYM	Be_A_014													
Sede Santa Ana Transporte Hato Viejo	Be_A_018													
Newtrans	Be_A_019													
Centro de Diagnóstico Automotor del Norte S.A. - CDA del Norte	Be_A_030													
Bellanita de transportes	Be_A_039												Muy buena	
Colorquímica	Es_P_024	Buena	Muy Buena	Buena	Buena	Muy Buena		Buena		Buena			Muy buena	
Lote abandonado (antes Colgras)	Gi_GEO_0041					Mala				Buena	Buena	Buena	Buena	
Artexil S. A	It_A_009											Muy buena	Muy buena	
Inverenting S.A.S.	It_A_040					Regular								
Gaula Antioquia	It_A_102					Buena	Regular			Buena		Muy buena	Buena	
Textiles Humper	It_A_110						Buena	Muy Buena						
Artexil S. A	It_P_009											Muy buena	Muy buena	

Stella Giraldo de Escobar - Lavapres expres	Me_A_036	Mala	Buena	Regular	Buena							Muy buena		
Vestimundo S. A	Me_A_043													
El Chuscalito Vivero y Restaurante	Me_A_056												Regular	
JG Espinal y CIA. Estación de servicios Mobil sur	Me_A_071	Regular	Mala	Mala	Mala	Mala								
Texaco Palacé	Me_A_090													
Lavautos La Oriental	Me_A_091					Buena								
Terminal de buses la Milagrosa	Me_A_093													
Lavadero Buenos Aires	Me_A_103		Buena	Buena	Buena	Regular						Muy buena	Muy buena	
Fundación Universitaria Autónoma de las Américas	Me_A_117	Mala	Regular	Buena	Buena	Buena	Regular	Muy Buena		Buena		Buena	Buena	
Lavaautos la Palmera	Me_A_118	Regular	Excelente	Regular	Buena	Buena	Muy Buena	Excelente						
Lavadero y Parqueadero La 46	Me_A_119					Mala	Buena	Muy Buena		Buena		Muy buena	Muy buena	
Terpel Las Mercedes	Me_A_143													
Lavatecsa	Me_A_223													
Estación Terpel El Rodeo. Tres A.M.S. A	Me_A_253	Regular	Buena	Regular	Buena									
Parqueadero Paisa	Me_A_310													
Parqueadero Lavakart's	Me_A_324													
Ferrosvel S. A	Me_A_328					Regular	Buena	Regular		Buena		Muy buena	Regular	

Corporación universitaria adventista	Me_A_343					Muy Buena	Buena	Buena		Buena				
Parqueadero La 88	Me_A_345													
Estación de Servicio Móvil El Condor	Me_A_387					Muy Buena	Muy Buena	Buena		Muy Buena				
Lavaautos Bolivariana	Me_A_389													
Full car 39	Me_A_391													
Antes: Lavautos Ego	Me_A_392					Buena	Buena	Buena						
Parqueadero y Lavadero La Consolata	Me_A_396													
Parqueadero y lavadero Don Quijote	Me_A_397	Mala	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	Mala	Buena	Muy Buena			Muy buena	
Guantes Blancos Lavadero	Me_A_400		Buena	Mala	Muy Buena									
Lavautos Naranjal	Me_A_401	Buena	Regular											
Somos llantas (Carrefour 65)	Me_A_406													
Car Wash Mayoral	Me_A_413		Buena	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular					Muy buena	
EQUI CAT	Me_A_423					Regular	Buena	Buena						
Parqueadero y Lavadero Mediterráneo	Me_A_431					Regular	Buena	Buena					Muy buena	
Parqueadero y Lavadero GranSport	Me_A_434	Muy Buena	Excelente	Buena	Muy Buena	Muy Buena	Muy Buena	Muy Buena		Muy Buena				
Centro Park Córdoba	Me_A_441	Muy Buena	Regular	Regular	Regular	Buena	Buena	Buena		Regular				
Intermármol	Me_A_443					Buena	Buena	Buena		Mala				
Propiedad Horizontal Hilanderías Medellín	Me_P_248					Mala			Regular	Mala				

Leonisa S.A (+profundo) (pozo 1)	Me_P_271				Buena	Buena	Muy Buena	Muy Buena	Buena	Muy buena	Buena			
Leonisa S.A (pozo 2)	Me_P_270							Muy Buena	Muy Buena	Buena				
Gaseosas Lux-Postobon (pozo 1)	Me_P_287				Buena	Excelente	Buena	Excelente	Muy Buena	Muy buena	Muy Buena	Buena	Buena	Muy buena
Gaseosas Lux-Postobon (pozo 2)	Me_P_286							Excelente	Excelente	Muy buena	Buena	Regular	Muy buena	Muy buena
Gaseosas Lux-Postobon (pozo 3)	Me_P_285							Excelente	Excelente	Buena	Buena	Buena	Buena	Muy buena
Gaseosas Lux-Postobon (pozo 5)	Me_P_284							Excelente	Muy Buena					
Unidad Deportiva de Belén	Me_GEO_0108							Buena	Buena		Regular			
Colegio el Divino Salvador en la Estrella	Es_GEO_0016							Regular	Buena		Regular			
Río Medellín sur	Río Medellín sur							Mala	Mala		Mala			
Loma de los González	Loma de los González												Muy buena	
Urbanización Pontezuela	Urbanización Pontezuela												Muy buena	

Fuente: Carpeta de Aguas Subterráneas-Anexo 1.7 "Histórico del calidad 2019" Convenio 643 del 2019. (Universidad de Antioquia, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2019)

Anexo 6. Listado de usuario o empresas que realizan vertimientos a cuerpos de aguas, con o sin permiso de vertimiento

Nombre del proyecto y/o usuario	Municipio	Tipo de Agua Residual generada	Nombre de la fuente donde se realiza el vertimiento (Aplica solo para las descargas directas a un cuerpo de agua)	Otra fuente de agua donde se realiza el vertimiento (Aplica solo para las descargas directas a un cuerpo de agua)
EDS LEMAREN (Antes ESTACION DE SERVICIOS DE GASOLINA LA MIEL)	Caldas	ARD	N/A	La Corrala
ENMARCO MOLDURAS S.A.S.	Caldas	ARD	Aburrá - Medellín	N/A
MADERAS RENOVABLES S.A.S. ANTES MADERAS Y EMPAQUES	Caldas	ARD	Aburrá - Medellín	N/A
COMERCIAL DE CARROCERIAS SU CARROCERIA	Caldas	ARnD	La Miel	N/A
PREDIO "EL DESCANSO" (Proyecto NIDO)	Sabaneta	ARD	Otra	Arroyo de Sabaneta
CLAUDIA PATRICA MARIN BLANDON	Medellín	ARD	Otra	EL ÑATO
J.A.C PRADITOS QUEBRADA EL BUEY	Medellín	ARD	Otra	El Buey
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA – SEDE ROBLEDO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA	Medellín	ARnD	Otra	La Moñonga
TRANSPACIFIC CORPORATION	Medellín	ARnD	N/A	La Sopera
I.M.D. & CIA S.A.S. (Antes I.D.M. URIBE Y CÍA S. C.A.)	Medellín	ARD	Otra	Malpaso
I.M.D. & CIA S.A.S.	Medellín	ARnD	Otra	Malpaso

(Antes I.D.M. URIBE Y CÍA S. C.A.)				
PARQUEADERO EL ASERRÍO (ANTES PARQUEADERO Y TALLER JJ)	Medellín	ARD	N/A	La Manguala
COMERCIALIZADORA A&O -E D S MOBIL LA AUTOPISTA)	Bello	ARD	Otra	LA CURENA
SOLLA S.A.	Bello	ARD	Aburrá - Medellín	N/A
ALMACENES GENERALES DE DEPOSITO DE CAFÉ - ALMACAFE	Bello	ARD	Aburrá - Medellín	N/A
TRANSPORTES HATO VIEJO S.A	Bello	ARD	El Hato	N/A
ESTACION DE SERVICIO ESSO MADEROS	Bello	ARD	Caño Conasfaltos	N/A
PERMOFIELTROS	Bello	ARD	Caño Conasfaltos	N/A
MAXIPETROL S.A.S.	Bello	ARD	Caño Conasfaltos	N/A
HUMBERTO ESCOBAR ISAZA	Bello	ARD	Aburrá - Medellín	N/A
COMERCIALIZADORA DE MATERIALES	Bello	ARD	Otra	La Camila
EMMANUEL S A S.				
CURTIMBRES ANCON S.A. C.I. CUEROS Y DISEÑOS - PUROCUERO	Copacabana	ARnD	Aburrá - Medellín	N/A
PETROQUIMICOS DE ANTIOQUIA S.A.S	Copacabana	ARD	Aburrá - Medellín	N/A
INVATAM - INVERSIONES ARANGO TAMAYO Y CIA LTDA	Copacabana	ARnD	Aburrá - Medellín	N/A
SANDRA YOLIMA - COLINAS DE PEDREGAL	Copacabana	ARD	Otra	EL CONVENTO
INTERQUIM S.A-AKZO NOBEL	Girardota	ARnD	Aburrá - Medellín	N/A

FERRO COLOMBIA S.A.S. (ANTES PIGMENTOS Y PRODUCTOS QUIMICOS S,A)	Girardota	ARnD	Aburrá - Medellín	N/A
FERRO COLOMBIA S.A.S. (ANTES PIGMENTOS Y PRODUCTOS QUIMICOS S,A)	Girardota	ARD	Aburrá - Medellín	N/A
COLCERAMICA S.A - (ANTES MANCESA)	Girardota	ARnD	Otra	La Sopera
ENKA DE COLOMBIA S.A - EFLUENTE 3-4 (A 83)	Girardota	ARnD	N/A	Arenales
ENKA DE COLOMBIA S.A - EFLUENTE A 90	Girardota	ARnD	N/A	Arenales
PAPELSA S.A.	Barbosa	ARnD	N/A	Don Enrique
PAPELSA S.A. - PLANTA PAPEL	Barbosa	ARD	N/A	Don Enrique
EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLIN -EPM	Barbosa	ARD	Aburrá - Medellín	N/A
COLOMBIANA KIMBERLY COLPAPEL	Barbosa	ARnD	Aburrá - Medellín	N/A
TABLEMAC MDF S.A. S	Barbosa	ARnD	N/A	Caño sin nombre

Fuente: (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, s.f.)