



Indicadores e índices de la calidad físico-química del agua en microcuencas cafeteras

Nelson Rodríguez V. ■ Laura Vanessa Quintero Y.



Indicadores e índices de la calidad físico-química del agua en microcuencas cafeteras

Nelson Rodríguez V. * ■ Laura Vanessa Quintero Y. **

* Nelson Rodríguez V., Investigador Científico III, Poscosecha. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0003-0897-4013>

** Laura Vanessa Quintero Y., Investigador Científico I, Poscosecha. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-9982-7790>

Como citar:

Rodríguez-Valencia, & N., Quintero-Yepes, L. (2024).

Indicadores e índices de la calidad físico-química del agua en microcuencas cafeteras. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0010>



Comité Nacional

Ministro de Hacienda y Crédito Público
Ricardo Bonilla González

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural
Jhenifer Mojica Flórez

Ministro de Comercio, Industria y Turismo
Germán Umaña Mendoza

Director del Departamento Nacional de Planeación
Jorge Iván González

Representante del Gobierno en Asuntos Cafeteros
Jimena Velasco Chaves

Representantes Gremiales Período 1° enero/2023 - 31 diciembre/2026

Jorge Alberto Posada Saldarriaga (Antioquia)
José Alirio Barreto Buitrago (Boyacá)
Eugenio Vélez Uribe (Caldas)
Danilo Reinaldo Vivas Ramos (Cauca)
Juan Camilo Villazón Tafur (Cesar-Guajira)
Javier Bohórquez Bohórquez (Cundinamarca)
Ruber Bustos Ramírez (Huila)
Javier Mauricio Tovar Casas (Magdalena)
Jesús Armando Benavides Portilla (Nariño)
Armando Amaya Álvarez (Norte de Santander)
Carlos Alberto Cardona Cardona (Quindío)
Luis Miguel Ramírez Colorado (Risaralda)
Héctor Santos Galvis (Santander)
Carlos Sánchez Serrano (Tolima)
Camilo Restrepo Osorio (Valle)

Gerente General
Germán Alberto Bahamón Jaramillo

Gerente de Operaciones
Carlos Arturo Azuero Perdomo

Gerente Financiero y Recursos Organizacionales
Juan Camilo Becerra Botero

Gerente Comercial
Esteban Ordoñez Simmonds

Gerente Técnico
Gerardo Montenegro Paz

Director Investigación Científica y Tecnológica
Álvaro León Gaitán Bustamante

Créditos

Comité Editorial

Pablo Benavides M.
Ph.D. Ing. Agrónomo. Entomología, Cenicafé

Carmenza Esther Góngora B.
Ph.D. Microbióloga. Entomología, Cenicafé

José Ricardo Acuña Z.
Ph.D. Biólogo. Fisiología Vegetal, Cenicafé

Diana María Molina V.
Ph.D. Bacterióloga. Mejoramiento Genético, Cenicafé

Luis Fernando Salazar G.
Ph.D. Ing. Agrónomo. Suelos, Cenicafé

Sandra Milena Marín L.
Secretaría Técnica Comité Editorial, revisión de textos y corrección de estilo M.Sc., Esp., Ing. Agrónoma. Divulgación y Transferencia, Cenicafé

Diseño y diagramación
Carmenza Bacca R.
Luz Adriana Álvarez M.

Fotografías
Archivo Cenicafé

Impresión

ISBN 978-958-8490-71-7
ISBN 978-958-8490-72-4 (En línea)
DOI 10.38141/cenbook-0010

2024 - FNC - Cenicafé - FoNC



Contenido

Presentación	5
Introducción	7
Generalidades	9
Metodología	45
Resultados y discusión	63
Consideraciones finales	129
Literatura citada	133

Agradecimientos

A los profesionales: Rodrigo Calderón Correa, Gustavo Adolfo Gómez Zuluaga, Viviana Lorena Bohórquez Zapata, Cristy Mayerly González Durán, Andrés Felipe Osorio Ocampo.

A los auxiliares: Samuel Antonio Castañeda y Walter Mauricio Osorio Hernández.

Presentación

Existe una gran variedad de indicadores e índices, tanto nacionales como internacionales, que permiten ofrecer información acerca de la cantidad y la calidad del agua que retienen las cuencas, sobre las necesidades de lluvia para el sostenimiento de los ecosistemas, sobre el uso del agua por los diferentes sectores productivos, y sobre la disponibilidad per cápita del recurso, entre otros.

La caracterización físico-química y biológica del agua, para determinar su calidad, resulta ser una actividad costosa cuando es preciso monitorear un alto número de parámetros, razón por la cual se han desarrollado, en los últimos años, indicadores e índices que combinan un grupo de parámetros, y que apoyados en valores de referencia y en ponderaciones asignadas, permiten determinar de forma más económica la calidad del agua e identificar su uso potencial y los procesos de tratamiento que serían necesarios para destinarla para una actividad determinada. Los índices tienen la utilidad de permitir la comparación de la calidad del agua en diferentes lugares y momentos, y de facilitar la valoración de los vertidos contaminantes y de los procesos de autodepuración.

El área cultivada en café, en 2016, fue de 931.750 ha (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia [FNC], 2017), las cuales de acuerdo con datos del Estudio Nacional del Agua [ENA] 2018 (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2019) requirieron de 10.786,5 millones de metros cúbicos de agua. La caficultura es un cultivo de secano que obtiene el agua necesaria de la lluvia; por lo tanto, el monitoreo de la pluviosidad a partir de las Estaciones Climáticas Cafeteras y del IDEAM, es importante para planificar las labores en el cultivo y generar alertas tempranas por déficit o exceso de las lluvias, y allí es importante contar con indicadores relacionados con la disponibilidad de agua.

Existen diferentes modelos de índices para determinar la calidad físico-química del agua, generados en diversos países. Por ejemplo, en Estados Unidos se desarrollaron y se utilizan, entre los más populares, siete índices a saber: NSF-WQI, O-WQI, RPI, DRM-WQI, VRM-WQI, I-WQI y W-WQI, en Canadá se utilizan el BC-WQI y el índice de Prati, y en México los índices de Montoya, De León. En Europa se tiene el índice Dalmatia (Croacia), ICA (Polonia), AMOEBA (Países Bajos) (Fernández & Solano, 2005). En Colombia se tienen los índices desarrollados

por el IDEAM (2011) y los ICOS desarrollados por Ramírez et al. (1997, 1999). Para el monitoreo de la calidad del recurso hídrico en la caficultura se ha desarrollado el índice global de calidad KPI_{21} (Rodríguez et al., 2018), el índice de manejo del agua e índice de calidad ambiental en el beneficio de café (Rodríguez et al., 2015) y el índice de vulnerabilidad del territorio a la disponibilidad hídrica (Rodríguez et al., 2018).

En la presente publicación se dan a conocer los resultados de la aplicación de ocho índices para determinar la calidad físico-química del agua, en 25 microcuencas cafeteras distribuidas en los Departamentos de Antioquia, Caldas, Valle del Cauca, Cauca y Nariño, que formaron parte del Proyecto Gestión Inteligente del Agua “Manos al Agua”, durante cuatro campañas de muestreo realizadas en épocas de cosecha y no cosecha, con el propósito de determinar el impacto de los vertimientos domésticos y del beneficio del café sobre el recurso hídrico superficial y la respuesta de los diferentes índices ante las alteraciones de la calidad de las fuentes superficiales por la descarga de aguas residuales.

Introducción

El agua es un recurso natural fundamental para el desarrollo sostenible de la humanidad. La variabilidad climática tiene una influencia directa en la disponibilidad espacio – temporal del recurso hídrico, cuya oferta también está afectada por procesos de contaminación tanto naturales como antrópicos.

Los criterios de calidad del recurso hídrico están muy ligados a la actividad para la cual se va a utilizar el mismo, de forma que cuando se destina para consumo humano su calidad debe ser superior a la que debe tener cuando se destina para actividades recreacionales, de riego o de producción animal, entre otras.

En el Decreto 1594 de 1984 (Ministerio de Agricultura, 1984) y en el Decreto único 1076 del 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2015) se establecen los criterios de calidad para la destinación del recurso hídrico, entre los que se destacan: humano y doméstico, preservación de flora y fauna, agrícola, pecuario, recreativo, industrial y transporte.

Para cada uno de los posibles usos del agua, la normativa colombiana establece parámetros de calidad y valores de referencia, tanto biológicos como físico-químicos, que no deben ser excedidos en el agua destinada para el uso solicitado.

En las fincas cafeteras se requiere el agua de la lluvia para el cultivo del café y los cultivos asociados al mismo y el agua de las fuentes superficiales para el beneficio del café y para el abastecimiento de las viviendas.

El territorio cafetero posee una rica red hídrica abastecida por los ecosistemas de páramos y bosques, con centenares de microcuencas proveedoras; sin embargo, los sistemas de aprovechamiento del agua y su distribución espacial son deficientes. Actualmente existe déficit de agua para uso agronómico en los valles del Magdalena y Cauca.

Ante una disminución en la oferta de agua proveniente de la lluvia, sería necesario recurrir al riego del cultivo para mantener la producción cafetera, lo cual en la zona cafetera central es poco viable, por ser una zona geográfica con baja oferta de caudales naturales (entre el 11,0% y el 13,5% del total de la escorrentía nacional superficial) y por tener la mayor demanda nacional (70,0%).

De otra parte, la mayor área de la caficultura en Colombia se encuentra ubicada en la Región Andina, la cual es la región más poblada y económicamente más activa del país (con cerca del 70% de la población y una gran actividad minera, agrícola, pecuaria e industrial), por lo que se presenta una gran demanda del recurso hídrico y a su vez un gran deterioro del mismo (allí se genera el 83,3% de toda la contaminación hídrica de Colombia), por lo tanto se hace necesario disponer de indicadores de calidad del agua que permitan indicar su uso potencial y el tipo de tratamiento necesario según su destinación prevista.

Uno de los objetivos más importantes para realizar estudios de calidad de las aguas superficiales en las microcuencas cafeteras es contribuir a la determinación de su oferta, tanto en cantidad como en calidad, siendo necesario priorizar aquellos cuerpos de agua que se caractericen por presentar una menor oferta de caudal natural y una mayor demanda por parte de las diferentes actividades socioeconómicas asentadas en la microcuenca, reconociendo y cuantificando la alteración de los caudales por la extracción de agua para sus usos consuntivos, y determinando la alteración de la calidad del agua en la microcuenca por la acción de los vertimientos procedentes de las actividades domésticas, industriales y agropecuarias.



Generalidades

Indicadores e índices

Un aspecto importante para entender las herramientas que se utilizan para determinar la calidad del agua es conocer las definiciones de un indicador y de un índice, y comprender su diferencia.

Un indicador es una herramienta cuantitativa o cualitativa que muestra indicios o señales de una situación, actividad o resultado; brinda una señal relacionada con una única información. Cada indicador brinda información relevante y única respecto a algo: una señal que debe ser interpretada de una única manera, dado que tiene un solo objetivo (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social [CONEVAL], 2013). Un indicador permite relacionar entre sí dos o más variables (todo aquello que se mide) y son resultado de cálculos matemáticos sencillos y de respuestas lineales.

Por ejemplo, la relación entre el número de plantas potabilizadoras de agua (variable uno) y el número de personas de una población (variable dos) es un indicador; si se duplica el número de plantas potabilizadoras se duplica el valor del indicador y si se reduce a la mitad el número de plantas potabilizadoras, se reduce a la mitad el indicador.

Los indicadores cuando son más de uno y están relacionados con las mismas variables, brindan una información parcial, que debe ser integrada (en un índice) para obtener un valor único que exprese lo que ocurre con las variables en la realidad.

Los índices son indicadores compuestos que resumen la información contenida en los sistemas de indicadores y se consideran herramientas eficaces que contribuyen a la formulación y el análisis de políticas públicas (Bas, 2014).

Los índices son la combinación matemática (no lineal) de un conjunto de indicadores simples, los cuales pueden tener igual o diferente ponderación y se unen con el propósito de resumir un concepto multidimensional en uno unidimensional. Su principal objetivo es cuantificar y simplificar la información del conjunto de indicadores simples, de forma que se transmita la comprensión del tema que se está analizando, tanto a las partes interesadas como al público en general (Bas, 2014).

Por ejemplo, en el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA), desarrollado por el Ministerio de Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), se conjugan 22 variables, todas ellas con pesos específicos diferentes. Si se realizan estrategias de depuración para disminuir la concentración de algunas variables que han superado los valores límite, de forma que su concentración disminuya a la mitad, es posible que los cambios en el índice no permitan reducir su valor a la mitad del valor original.

Índices e indicadores de la cantidad y la calidad del recurso hídrico

Tanto a nivel nacional como mundial se han desarrollado diversos indicadores e índices que permiten relacionar la disponibilidad de agua (en cantidad) con la demanda tanto de los habitantes como de los gremios productivos, con el fin de determinar áreas con déficit o superávit hídrico, contribuyendo para que los planificadores del recurso puedan tomar decisiones acertadas respecto a sitios donde deben asentarse las actividades económicas, en función de la disponibilidad de agua. De igual manera, se han desarrollado diversos índices e indicadores para evaluar la calidad del agua disponible (tanto física, química y biológica, como integrando las tres características), basados en un número selecto de variables, que ponderadas de forma apropiada permiten categorizar el recurso hídrico de acuerdo con su calidad.

Un índice hídrico es el resultado de un conjunto de indicadores sumados en forma ponderada, de gran utilidad para evaluar las condiciones actuales y las tendencias relacionadas con la disponibilidad hídrica (en cantidad y calidad) y permite comparar áreas y situaciones, en torno a disponibilidad del recurso, permite anticipar condiciones futuras sobre la oferta y la demanda del recurso, y brinda información de alertas tempranas para prevenir riesgos relacionados con el agua.

Indicadores e índices de la cantidad de agua

Se utilizan para determinar la oferta y la demanda de agua en una zona, región y país. Entre ellos se tienen:

Indicador de disponibilidad de agua (Indicador de Falkenmark). Es un indicador de la disponibilidad de agua per cápita, que permite en el marco mundial detectar los países con crisis agudas del agua (Falkenmark et al., 1989).

Tabla 1. Indicador de disponibilidad de agua. Adaptado de Falkenmark et al. (1989) y de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2013).

Agua dulce renovable anual (m ³ per cápita-año)	Nivel de escasez de agua
> 10.000	Sin presión hídrica
1.700 – 10.000	Presión hídrica ocasional o localizada
1.000 – 1.700	Presión hídrica regular
500 – 1.000	Escasez crónica de agua
< 500	Escasez absoluta de agua

El indicador establece que, si en una región la disponibilidad per cápita es menor a 500 m³/año, la región presenta una escasez absoluta de agua. Si la disponibilidad es mayor a 10.000 m³/año, la región no tiene presión sobre sus recursos hídricos. Este indicador es importante, dado que permite ordenar la actividad económica de la región con base en la demanda de agua de la misma.

Para Colombia, el indicador se encuentra entre 34.000 m³ año⁻¹ (para condiciones de año medio) y 26.700 m³ año⁻¹ (para condiciones de año seco). La disminución en la disponibilidad de agua per cápita en Colombia ha sido del 40% en los últimos 30 años. El 60% de esta reducción se ha debido a la afectación de la calidad por la contaminación del recurso (Rodríguez et al., 2018).

Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH). Es un índice incorporado en los Estudios Nacionales del Agua, asociado al régimen natural de las cuencas que califica cualitativamente la capacidad de retención y regulación hídrica, por medio de la forma de la curva de duración de caudales medios diarios (CDC), para señalar las zonas que escurren de forma más estable y la ocurrencia de caudales extremos. El valor es representativo de las condiciones medias de la cuenca a la salida de la subzona, o antes de una intervención antrópica importante, resultado de una síntesis de las condiciones medias de la cuenca medidas sobre el cauce principal (IDEAM, 2019). Para su cálculo se utiliza la **Ecuación <1>**.

$$IRH = \frac{V_p}{V_t} \quad <1>$$

Donde:

IRH = Índice de retención y regulación hídrica.

V_p = Volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea del caudal medio.

V_t = Volumen total representado por el área bajo la curva.

En la Tabla 2 se presentan las categorías del índice.

Tabla 2. Categorías del índice de retención y regulación hídrica (IRH) (IDEAM, 2019).

IRH	Categoría
IRH > 0,85	Muy alta
0,75 < IRH ≤ 0,85	Alta
0,65 < IRH ≤ 0,75	Moderada
0,50 < IRH ≤ 0,65	Baja
IRH ≤ 0,50	Muy baja

El área geográfica Magdalena-Cauca, donde se concentra la mayoría de los cultivos de café, presenta categorías del IRH entre baja (departamentos de Norte de Santander y Cesar) y alta (departamentos de Antioquia, Tolima, Huila, Cauca y Nariño), según los resultados presentados en el Estudio Nacional del Agua 2018 (IDEAM, 2019).

Índice de Aridez (IA). Este índice incorporado en los Estudios Nacionales del Agua, es un indicador que califica cualitativamente las condiciones naturales de aridez, midiendo el grado de suficiencia o insuficiencia de la precipitación para el sostenimiento de los ecosistemas de una región. A lo largo de la historia, el IA ha estado en constante evolución y, en Colombia se adoptó una relación entre la Evapotranspiración Potencial (ETP) y la Evapotranspiración Real (ETR), con el objeto de representar la dinámica superficial del suelo (IDEAM, 2019). Para su cálculo se utiliza la **Ecuación <2>**.

$$IA = \frac{ETP - ETR}{ETP} \quad <2>$$

Donde:

IA = Índice de aridez.

ETP = Evapotranspiración potencial anual multianual de Hargreaves (mm).

ETR = Evapotranspiración real anual multianual de Budyko (mm).

En la Tabla 3 se presentan las categorías del índice.

Tabla 3. Categorías del índice de aridez (IA) (IDEAM, 2019).

IRH	Categoría
< 0,15	Altos excedentes
0,15 - 0,19	Excedentes
0,20 - 0,29	De moderado a excedentes
0,30 - 0,39	Moderado
0,40 - 0,49	De deficitario a moderado
0,50 - 0,59	Deficitario
≥ 0,60	Altamente deficitario

En la Figura 1 se presentan los resultados del índice de aridez para las cinco zonas geográficas de Colombia, según IDEAM (2019). La zona Magdalena-Cauca presenta categorías del índice entre moderado a altos excedentes, en el 96% de su área.

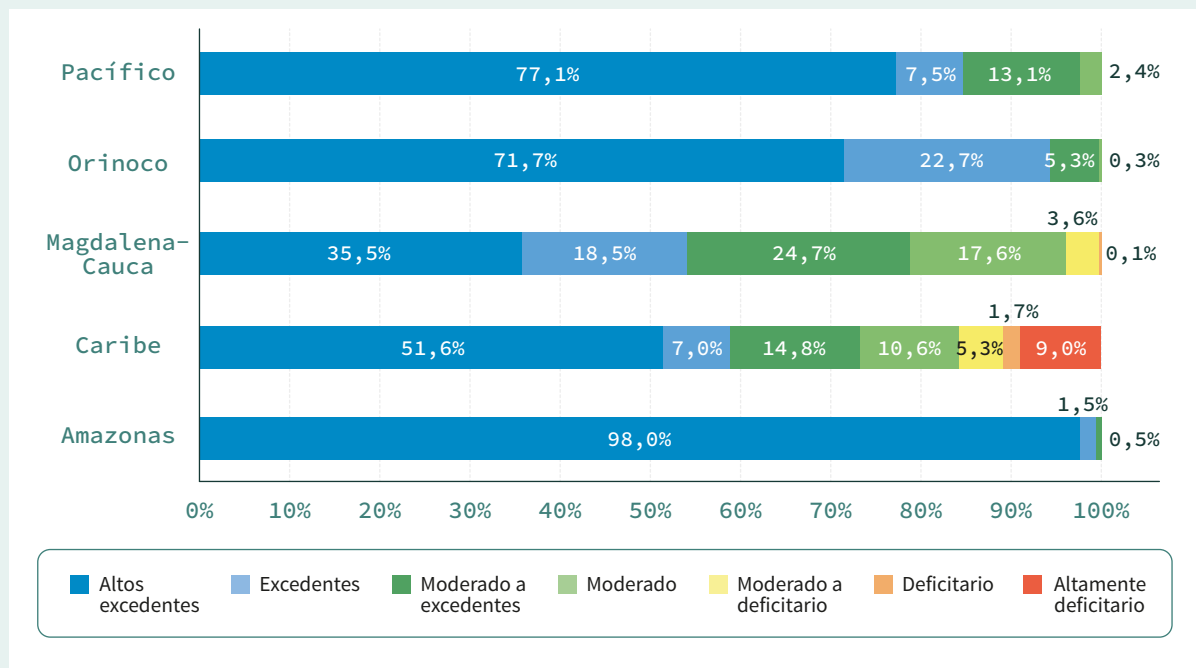


Figura 1. Distribución del índice de aridez por área hidrográfica. *Fuente: Estudio Nacional del Agua 2018 (IDEAM, 2019).*

Índice de Uso del Agua (IUA). El índice de uso del agua, incorporado en los Estudios Nacionales del Agua, corresponde a la cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores de usuarios, en un período determinado de tiempo (anual, mensual) y una unidad espacial de análisis (área, zona, subzona, entre otras), en relación con la oferta hídrica superficial disponible para las mismas unidades de tiempo y espacio (IDEAM, 2010); para su cálculo se utiliza la **Ecuación <3>**.

$$IUA = \frac{D_h}{O_h} * 100 \quad <3>$$

Donde:

IUA = Índice de uso del agua.

D_h = Demanda hídrica sectorial. Σ (volumen de agua extraída para usos sectoriales en un período determinado), incluye los siguientes consumos: humano o doméstico, del sector agrícola, del sector industrial, del sector de servicios, del sector de energía, del sector acuícola y el agua extraída no consumida.

O_h = Oferta hídrica superficial disponible (resulta de la cuantificación de la oferta hídrica natural sustrayendo la oferta correspondiente al caudal ambiental).

En la Tabla 4 se presentan las categorías del índice.

Tabla 4. Rangos y categorías del índice de uso del agua (IUA) (IDEAM, 2010).

Rango IUA	Categoría IUA	Significado
≤ 1	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible.
1 - 10	Bajo	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible.
10,01 - 20	Moderado	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible.
20,01 - 50	Alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible.
> 50	Muy alto	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible.

En el Estudio Nacional del Agua 2018 (IDEAM, 2019) se presenta un valor de la oferta hídrica total para la zona geográfica Magdalena-Cauca de 273.338 Hm³ (hectómetros cúbicos) y un valor de la oferta hídrica disponible (una vez sustraído el caudal ambiental) de 151.875 Hm³. Para dicha zona, la demanda hídrica fue de 25.766,5 Hm³, por lo que el índice de uso del agua fue de 16,97%, que lo sitúa en la categoría de moderado.

La demanda hídrica del cultivo del café, para el año 2016, se estimó en 5,5 Hm³, (IDEAM, 2019), es decir, el 0,0213% de toda la demanda por agua de la zona geográfica Magdalena-Cauca y el 0,0147% de la demanda hídrica nacional. El índice del uso del agua para el café, en la cuenca Magdalena-Cauca fue de 0,004% y a escala nacional de 0,0005%, que lo sitúa en la categoría muy baja.

Índice de Presión Hídrica de los Ecosistemas (IPHE). Es un índice utilizado en los Estudios Nacionales del Agua y se refiere a los consumos de agua verde en una cuenca (huella hídrica verde) relacionados con el agua verde disponible para actividades productivas (DAV) (IDEAM, 2019).

El agua verde hace referencia al agua de lluvia almacenada en el suelo en forma de humedad y la huella hídrica verde (HHv) se refiere a la apropiación humana del agua verde, la cual se cuantifica mediante la estimación del agua evapotranspirada por la vegetación asociada a un proceso antrópico (cultivos) que no tiene como origen el agua de riego. La HHv solo aplica para el sector agropecuario (IDEAM, 2019).

Para su cálculo se utiliza la **Ecuación <4>**.

$$IPHE = \frac{\sum HHv}{DAv} \quad <4>$$

Donde:

IPHE = Índice de Presión Hídrica de los Ecosistemas.

$\sum HHv$ = Consumo de agua verde por parte de las actividades agropecuarias y forestales.

DAv = Evapotranspiraciones de las diferentes coberturas de las cuencas hidrográficas.

En la Tabla 5 se presentan las categorías del índice.

Tabla 5. Rangos y categorías del índice de presión hídrica de los ecosistemas (IPHE) (IDEAM, 2019).

Rango IPHE	Categoría IPHE	Significado
< 0,1	Muy bajo	Se interpreta como una señal que resalta alta disponibilidad de agua verde para el sector productivo y posibilidades de ampliación de la frontera agrícola, sin impactar a ecosistemas de protección.
0,1 – 0,3	Bajo	Se interpreta como una señal que resalta disponibilidad de agua verde para el sector productivo y posibilidades de ampliación de la frontera agrícola, sin impactar a ecosistemas de protección.
0,301 – 0,5	Moderado	Se interpreta como una señal sobre la ampliación de la frontera agrícola, la cual se encuentra a una distancia aceptable del límite de ecosistemas de protección.
0,501 – 0,8	Alto	Se interpreta como una señal de alerta sobre la ampliación de la frontera agrícola, la cual se encuentra cerca del límite de ecosistemas de protección.
0,801 – 1,0	Muy alto	Se interpreta como una señal de alerta sobre la ampliación de la frontera agrícola, la cual se encuentra muy cerca del límite de ecosistemas de protección.
> 1,0	Crítico	Se interpreta como una señal que de la frontera agrícola superó el límite de zonas de protección y puede encontrarse en riesgo la integridad ecológica de la cuenca, para la provisión de servicios ecosistémicos.

En la Tabla 6 se presentan las subzonas hidrográficas con un índice de presión hídrica de los ecosistemas crítico (IPHE > 1,0).

Para la zona cafetera central se destaca el alto valor en las cuencas hidrográficas de los ríos Cali, Chinchiná, La Vieja, Sogamoso, Bogotá, Amaine y Cerrito y Otún.

En el Estudio Nacional del Agua 2018 (IDEAM, 2019) se presenta un valor de la HHv del café de 10.786,5 Hm³ año⁻¹, como resultado también se obtuvo que la disponibilidad de agua verde en Colombia es de 1.008.965,7 Hm³ año⁻¹. Este valor es interesante si se compara con la precipitación total a escala nacional, la cual en volumen de agua es de 3.293.750,8 Hm³ año⁻¹, lo cual indica que solo el 31% de la precipitación media anual está disponible para fines productivos como agua verde. Con los datos anteriores se obtiene un índice de presión hídrica de los ecosistemas de 0,011 para el cultivo del café, que lo sitúa en la categoría de muy baja.

Tabla 6. Subzonas hidrográficas (SZH) con índice de presión hídrica de los ecosistemas (IPHE) crítico (IDEAM, 2019).

Área hidrográfica	SZH	Subzona hidrográfica	IPHE
Caribe	1116	Río Tolo y otros directos al Caribe	1,04
	1204	Río Canalete y otros arroyos directos al Caribe	1,10
	1301	Alto Sinú-Urrá	1,35
	1303	Bajo Sinú	1,06
	1608	Río del Suroeste y directos río de Oro	1,56
Magdalena Cauca	2120	Río Bogotá	1,13
	2303	Directos al Magdalena entre ríos Seco y Negro	1,04
	2314	Río Opón	1,16
	2405	Río Sogamoso	1,20
	2609	Ríos Amaine y Cerrito	1,12
	2612	Río La Vieja	1,29
	2613	Río Otún y otros directos al Cauca	1,10
	2614	Río Risaralda	1,04
	2615	Río Chinchiná	1,43
	2630	Ríos Lilí, Meléndez y Cañaveralejo	1,04
	2634	Río Cali	2,73
	2637	Ríos Las Cañas-Los Micos y Obando	1,05
Orinoco	3702	Río Margua	1,32
Amazonas	4502	Río Camuya	2,94
Pacífico	5101	Río San Juan (Frontera Ecuador)	1,62
	5204	Río Juananbú	1,14
	5310	Río Anchicayá	4,62

Índice de agua no retornada a la cuenca (IARC). Es un índice utilizado en los Estudios Nacionales del Agua y se refiere a los consumos de agua azul en una cuenca (huella hídrica azul) relacionados con el agua azul disponible para actividades productivas (OHD) (IDEAM, 2015).

El agua azul hace referencia al agua de escorrentía, a las fuentes de agua superficial (ríos y lagos) y las fuentes de agua subterránea (acuíferos). El agua azul se presenta como un concepto que agrupa en una sola idea todo el recurso hídrico superficial y subterráneo que representa la visión convencional de la Gestión Integral del Recurso Hídrico (Corporación Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia [CTA] et al., 2015). La huella hídrica azul (HHa) se refiere a la apropiación humana de agua azul (ríos, lagos, acuíferos), la cual se cuantifica mediante la estimación del volumen de agua, asociado a la extracción o retención de la misma en una fuente superficial y/o subterránea, para satisfacer el requerimiento hídrico de un proceso antrópico y que no retorna a la cuenca origen. La HHa está presente en el sector agrícola como riego y en todos los otros sectores como la parte del agua usada que no retorna a la cuenca, por lo que se considera no disponible para otro uso (IDEAM, 2015). Para su cálculo se utiliza la **Ecuación <5>**.

$$IARC = \frac{\sum HHa}{OHD_{\text{año_medio}}} \quad <5>$$

Donde:

IARC = Índice de agua no retornada a la cuenca.

$\sum HHa$ = Suma de todas las huellas hídricas azules multisectoriales al interior de la cuenca en un período de tiempo “t”, en volumen/tiempo.

$OHD_{\text{año_medio}}$ = Oferta hídrica disponible en año medio que determina la disponibilidad de agua azul en la cuenca para el período de tiempo “t”, en volumen/tiempo.

En la Tabla 7 se presentan las categorías del índice.

Tabla 7. Rangos y categorías del índice de agua no retornada a la cuenca (IARC) (IDEAM, 2015).

Rango IARC	Categoría IARC
< 0,010	Muy baja
0,010 – 0,100	Baja
0,101 – 0,200	Moderada
0,201 – 0,500	Alta
0,501 – 1,000	Muy alta
> 1,000	Crítica

En el Estudio Nacional del Agua 2018 (IDEAM, 2019) se presenta un valor de la HHa del café de 0,6 Hm³ y un valor de la oferta hídrica disponible de 151.875 Hm³, por lo que el índice de agua no retornada a la cuenca fue de 4 x10⁻⁶, que lo sitúa en la categoría de muy baja.

Índice de eficiencia en el uso del agua (IEUA). Es un índice utilizado en los Estudios Nacionales del Agua y se refiere a la relación entre la huella hídrica azul y la demanda hídrica (IDEAM, 2019). La huella hídrica azul se cuantifica mediante la estimación del agua extraída que no retorna a la cuenca y la demanda hídrica se cuantifica mediante la estimación de la extracción del volumen de agua necesario para satisfacer el requerimiento hídrico total de un proceso, incluidos los usos consuntivos, no consuntivos (retornados posteriormente como vertimientos y descargas) y las pérdidas del sistema (IDEAM, 2019). La estimación del IEUA se realiza mediante la **Ecuación <6>**.

$$IEUA = \frac{\sum HHa}{\sum DH} \quad <6>$$

Donde:

IEUA = Índice de eficiencia en el uso del agua.

∑HHa = Sumatoria de todas las huellas hídricas azules multisectoriales al interior de la cuenca, en un período de tiempo “t”, en volumen/tiempo.

DH = Demanda hídrica.

En la Tabla 8 se presentan las categorías del índice.

Tabla 8. Rangos y categorías del índice de eficiencia en el uso del agua (IEUA) (IDEAM, 2010).

Rango IEUA	Categoría IEUA	Significado
0,501 – 1,0	Muy alto	Menos del 50% del agua extraída está asociada a usos que posteriormente retornan a la fuente. Susceptible parcialmente de medidas de reúso y recirculación, y pérdidas del sistema. Un aumento en la eficiencia en este volumen de agua tiende a reducir la demanda hídrica (extracción).
0,201 – 0,5	Alto	Entre el 80% y el 50% del agua extraída está asociada a usos que posteriormente retornan a la fuente. Susceptible parcialmente de medidas de reúso y recirculación, y pérdidas del sistema. Un aumento en la eficiencia en este volumen de agua tiende a reducir la demanda hídrica (extracción).

Continúa...

... Continuación Tabla 8.

Rango IEUA	Categoría IEUA	Significado
0,101 – 0,2	Moderado	Entre el 90% y el 80% del agua extraída está asociada a usos que posteriormente retornan a la fuente. Susceptible parcialmente de medidas de reúso y recirculación, y pérdidas del sistema. Un aumento en la eficiencia en este volumen de agua tiende a reducir la demanda hídrica (extracción).
0,01 – 0,1	Bajo	Entre el 99% y el 90% del agua extraída está asociada a usos que posteriormente retornan a la fuente. Susceptible parcialmente de medidas de reúso y recirculación, y pérdidas del sistema. Un aumento en la eficiencia en este volumen de agua tiende a reducir la demanda hídrica (extracción).
< 0,01	Muy bajo	Más del 99% del agua extraída está asociada a usos que posteriormente retornan a la fuente. Susceptible parcialmente de medidas de reúso y recirculación, y pérdidas del sistema. Un aumento en la eficiencia en este volumen de agua tiende a reducir la demanda hídrica (extracción).

En el Estudio Nacional del Agua 2018 (IDEAM, 2019) se presenta un valor de la HHa del café de 0,6 Hm³ y un valor de la demanda hídrica de 5,5 Hm³, por lo que el índice de eficiencia en el uso del agua fue de 0,11, que lo sitúa en la categoría de moderado.

Índice de manejo del agua en el beneficio del café (IMAPBHC). Para beneficiar el café en Colombia por métodos convencionales, se requieren entre 40 y 50 L kg⁻¹ de café pergamino seco (cps), de los cuales aproximadamente la mitad se utiliza en la clasificación del fruto, el despulpado y transporte de la pulpa a los procesadores y el transporte de café despulpado a los tanques de fermentación y la otra mitad se utiliza en el lavado del café, el transporte del café lavado a los silos y el lavado de equipos.

Para cuantificar el consumo de agua en el proceso de beneficio del café y determinar su ahorro y uso eficiente, se generó el Índice de Manejo del Agua en el Proceso de Beneficio Húmedo del Café (IMAPBHC) (Rodríguez et al., 2015). En este indicador se consideran cada una de las etapas del proceso de beneficio, en las cuales se ha utilizado agua, asignándole una ponderación de acuerdo al consumo tradicional de agua. Por ejemplo, en la etapa de recibo de café es tradicional la utilización de 5 L kg⁻¹ cps, lo que representa el 12,5% del valor total de agua en el proceso convencional (consumo de agua de 40 L kg⁻¹ cps). El empleo de la tolva seca o de dispositivos de bajo consumo (separador hidráulico de tolva y tornillo sinfín, tolvas húmedas con recirculación, tanque sifón con recirculación), permiten ahorrar casi la totalidad de este consumo, por lo que se le asigna el valor proporcional al ahorro de agua, expresado en forma de fracción.

La escala del IMAPBHC se mueve en el rango entre cero (0) a uno (1), en la cual un valor de cero (0) es indicador de gran consumo de agua (mayor a 40 L kg⁻¹ cps), sin ahorro de agua y se interpreta como una acción de presión sobre el recurso de agua superficial, mientras que un valor cercano a uno (1) es indicador de un bajo consumo de agua en el beneficio. En la medida en que el indicador se aproxime a uno (1), es mayor el ahorro de agua realizado en el proceso de beneficio, lo cual indica un uso eficiente del agua en este proceso. En la Tabla 9 se presentan las categorías del índice.

Tabla 9. Categorías del índice de manejo del agua en el beneficio húmedo del café (IMAPBHC) (Rodríguez et al., 2015).

IMAPBHC	Categoría
> 0,875	Muy alto
0,750 – 0,875	Alto
0,370 – 0,749	Moderado
0,130 – 0,369	Bajo
< 0,130	Muy bajo

Indicadores e índices de la calidad de agua

La calidad del agua está determinada por la hidrología, la fisicoquímica y la biología de la masa de agua en estudio. Es así, que los indicadores e índices de la calidad del agua se clasifican de acuerdo con los parámetros que los integran y, por lo tanto, pueden ser físico-químicos, biológicos e hidrológicos, o una combinación de dos o de las tres categorías.

En la determinación de la calidad del agua se utiliza el monitoreo de parámetros fisicoquímicos, la realización de bioensayos en el laboratorio y el monitoreo en el campo con bioindicadores.

Los indicadores de calidad del agua determinan condiciones fisicoquímicas generales de la calidad de un cuerpo de agua y, en alguna medida, permiten reconocer problemas de contaminación en un punto determinado, para un intervalo de tiempo específico. Además, permiten representar el estado en general del agua y las posibilidades o limitaciones para determinados usos en función de variables seleccionadas, mediante ponderaciones y agregación de variables físicas, químicas y biológicas.

Índices de calidad físico-química del agua. Tienen como propósito sintetizar la información proporcionada por la gran cantidad de parámetros que participan en el diagnóstico de la calidad del agua. Los índices tienen el valor de permitir la comparación de

la calidad en diferentes lugares y momentos, y de facilitar la valoración de los vertidos y de los procesos de autodepuración. Existen varios modelos a nivel mundial que se condensan en las Tablas 10 y 11.

Tabla 10. Índices de calidad físico-química del agua y número de parámetros utilizados en su determinación (Adaptado de Fernández et al., 2003).

Índice	Número de parámetros	Estructura	Fórmula de agregación
<i>Bacterial Pollution Index</i> (BPI)	1	Curvas	Lectura directa
<i>Benthic Saprobity Index</i> (BSI)	Mínimo 30	Tabla	Promedio porcentual
<i>Biological Diversity Index</i> (BDI)	Indeterminado	Tabla	Proporción
<i>British Columbia</i>	Hasta 47	Fórmulas	Raíz cuadrada de sumatoria
Dalmatia	9	Curvas-fórmulas	Proporción de dos sumatorias ponderadas
Dinius (1987)	12	Ecuaciones	Media geométrica ponderada
DRM	7	Curvas	Promedio ponderado
Greensboro	9	No especificado	No especificado
Idaho	5	Ecuación	Proporción logarítmica
León (1998)	15	Fórmulas	Promedio geométrico ponderado
<i>Industrial Pollution Index</i> (IPI)	5 a 14	Curvas	Ln de la sumatoria ponderada modificada
Malasia	6	Ecuaciones	Promedio ponderado
Montoya (1997)	17	Ecuaciones	Promedio ponderado
Miami River Index	7	Tabla	Sumatoria
<i>Nutrient Pollution Index</i> (NPI)	9	Curvas	Ln de la sumatoria ponderada modificada
NSF	9	Curvas	Promedio ponderado
<i>Organic Pollution Index</i> (OPI)	5	Curvas	Ln de la sumatoria ponderada modificada

Continúa...

... Continuación Tabla 10.

Índice	Número de parámetros	Estructura	Fórmula de agregación
Oregon	7	Ecuaciones	Cuadrado de la media armónica
<i>Pesticide Pollution Index</i> (PPI)	2 a 7	Curvas	Ln de la sumatoria ponderada modificada
Polonia	6	Fórmulas	Cuadrado de la media armónica
Prati	8 a 13	Fórmulas	Sumatoria no ponderada
<i>Production Respiration Index</i>	2 a 3	Diagrama	Lectura directa
Washington	8	Ecuación	Ecuación cuadrática
índice de calidad del IDEAM	5 a 6	Ecuaciones	Promedio ponderado
Índice global de calidad KPI ₂₁	34	Curvas	Promedio ponderado

Tabla 11. Índices de contaminación y número de parámetros utilizados en su determinación (Fernández et al., 2003).

Índice	Número de parámetros	Estructura	Fórmula de agregación
ICOMI (mineralización)	3	Ecuaciones	Promedio aritmético
ICOMO (materia orgánica)	3	Ecuaciones	Promedio aritmético
ICOSUS (sólidos suspendidos)	1	Ecuación	Lectura directa
ICOTRO (trofia)	1	Rangos	Lectura directa
ICOTEMP (temperatura)	1	Ecuación	Lectura directa
ICO-pH (pH)	1	Ecuación	Lectura directa
ICOTOX (toxicidad)	Uno tóxico por vez	Ecuaciones	Ecuaciones
ICOBIO (biológico)	Indeterminado	Ecuaciones	Lectura directa

Índice de calidad de la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF-WQI). Es uno de los más conocidos y utilizados, fue desarrollado en 1970 por la Fundación Nacional de Saneamiento de Estados Unidos. Se ha utilizado en 12 de los 50 Estados de este país. Es un índice multiparámetro que utiliza nueve parámetros (Demanda Bioquímica de Oxígeno [DBO₅], Sólidos Totales [ST], temperatura, porcentaje de saturación de oxígeno, coliformes fecales, contenido de nitratos, contenido de fosfatos, pH y turbidez) (Water Research Center [WRC], 2021).

Para la determinación del índice de calidad se transforman los valores de estos nueve parámetros para obtener unos valores numéricos que se conocen como valores de calidad (para ello se utilizan modelos matemáticos) y estos valores se multiplican por un valor de ponderación (este valor está relacionado con la importancia del parámetro evaluado) (Tabla 12); la sumatoria de este producto permite calcular el valor de la calidad del agua en un rango entre 0 y 100 (Tabla 13). Por ejemplo, el agua de mala calidad tiene un índice menor de 25 y es de excelente calidad si el valor del índice es mayor de 90. Para que el agua pueda usarse para consumo humano su valor debe ser mayor a 90, y por encima de 70 puede utilizarse para uso recreativo y para la acuicultura.

Tabla 12. Ponderación (Wi) del índice de la calidad fisicoquímica (NSF-WQI) (WRC, 2021).

Variable	Unidades	Factor
Oxígeno disuelto	Porcentaje de saturación	0,17
Coliformes fecales	Colonia/100 mL	0,16
pH	Unidades	0,11
DBO ₅	mg L ⁻¹	0,11
Cambio de temperatura	°C	0,10
Fosfatos	mg L ⁻¹	0,10
Nitratos	mg L ⁻¹	0,10
Turbidez	(unidades nefelométricas) NTU	0,08
Sólidos totales	mg L ⁻¹	0,07

Tabla 13. Categorías del índice de calidad NSF-WQI (WRC, 2021).

NSF -WQI	Categoría
91 – 100	Excelente
71 – 90	Buena
51 – 70	Media
26 – 50	Mala
0 – 25	Muy mala

Índice de Calidad del Agua – IDAHO (I-WQI). El objetivo de este índice fue definir algunas de las relaciones más útiles entre los constituyentes comunes en la evaluación de la calidad del agua. Las variables incluidas en el índice son: oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH, coliformes totales y fósforo, en mg L⁻¹. El índice se basa en algunos criterios de calidad de agua como coliformes fecales, que no excedan 2.000 UFC/100 mL, fósforo total < 0,1 mg L⁻¹. Si cualquiera de los dos parámetros es excedido, el cuerpo de agua requiere de manejo de las cargas totales máximas diarias (TMDL). En la Ecuación <7> se presenta la fórmula para su cálculo (Fernández & Solano, 2005).

$$I - WQI = \log \left[\frac{OD^{1,65}}{50 * P^{0,5} + T^{0,15} + 0,4 * CF^{0,5} + 0,15 * CE^{0,5}} \right] \quad <7>$$

Donde:

I-WQI = índice de calidad de IDAHO.

OD = Oxígeno disuelto (% de saturación).

P = Fósforo total (mg L⁻¹).

T = Turbidez (NTU).

CF = Coliformes fecales (conteo/100 mL).

CE = Conductividad eléctrica (μS cm⁻¹).

En la Tabla 14 se presentan los rangos y las categorías de calidad del índice.

Tabla 14. Categorías del índice de calidad I-WQI (Fernández & Solano, 2005).

I-WQI	Categoría	Significado
2 - 3	Alta	Aguas limpias.
1 - 2	Moderada	Aguas que necesitan TMDL para una o más variables de la fórmula.
0 - 1	Mala	Aguas que necesitan TMDL y BMP para una o más variables de la fórmula.

TDML: Manejo de las cargas totales máximas diarias.

BMP: Buenas Prácticas de Manejo.

Índice de calidad de Oregón (O-WQI). Es un índice que expresa la calidad del agua por la integración de ocho variables, a saber: temperatura, oxígeno disuelto, DBO, pH, sólidos totales, nitrógeno amoniacal y nitratos, fósforo total y coliformes fecales. Fue desarrollado para

evaluar el monitoreo mantenido por el Laboratorio del Departamento de Calidad Ambiental de Oregon (Estados Unidos). En la **Ecuación <8>** se presenta la fórmula para su cálculo y en la Tabla 15 los rangos del índice y su categorización (Fernández & Solano, 2005).

$$O-WQI = \sqrt{\frac{8}{\frac{1}{SI_T^2} + \frac{1}{SI_{OD}^2} + \frac{1}{SI_{DBO}^2} + \frac{1}{SI_{pH}^2} + \frac{1}{SI_{ST}^2} + \frac{1}{SI_N^2} + \frac{1}{SI_P^2} + \frac{1}{SI_{CF}^2}}} \quad <8>$$

Donde:

O-WQI = Índice de calidad de Oregon.

SI = Subíndice al cual está incorporado una función para transformar el valor de cada una de las variables en valores de calidad.

T = Temperatura (°C).

OD = Oxígeno disuelto (% de saturación).

DBO = Demanda biológica de oxígeno (mg L⁻¹).

pH = Potencial de hidrógeno (U).

ST = Sólidos totales (mg L⁻¹).

N = Nitrógeno (amoniacal + nitratos) (mg L⁻¹).

P = Fósforo total (mg L⁻¹).

CF = Coliformes totales (conteo/100 mL).

Tabla 15. Categorías del índice de calidad O-WQI (Fernández & Solano, 2005).

O-WQI	Categoría
90-100	Excelente
85-89	Buena
80-84	Justa
60-79	Pobre
< 60	Muy Pobre

Índice simplificado de calidad de agua (ISQA). Es un índice que involucra muy pocos parámetros analíticos en la determinación de la calidad del agua. Fue desarrollado para las cuencas de Cataluña (España). Involucra cinco parámetros a saber: temperatura (T) en °C, Demanda Química de Oxígeno (DQO) en mg L⁻¹, sólidos suspendidos totales (SST) en

mg L⁻¹, oxígeno disuelto (OD) en mg L⁻¹, y conductividad eléctrica (CE) en μS cm⁻¹, los cuales mediante ecuaciones son transformados en valores de calidad. En la **Ecuación <9>** se presenta la fórmula para su cálculo y en la Tabla 16 los rangos del índice y su categorización (De Bustamante et al., 2002).

$$ISQA = E_T * (A_{DQO} + B_{SST} + C_{OD} + D_{CE}) \quad <9>$$

Donde:

ISQA = Índice simplificado de la calidad del agua.

E_T = Factor en función de la temperatura del agua, varía entre 0,8 y 1,0.

A_{DQO} = Factor en función de la DQO del agua, varía entre 0 y 30.

B_{SST} = Factor en función de los sólidos suspendidos del agua, varía entre 0 y 25.

C_{OD} = Factor en función del oxígeno disuelto del agua, varía entre 0 y 25.

D_{CE} = Factor en función de la conductividad eléctrica del agua, varía entre 0 y 20.

Tabla 16. Categorías del índice de calidad ISQA (De Bustamante et al., 2002).

ISQA	Categoría
91 – 100	Muy alta
71 – 90	Alta
51 – 70	Moderada
26 – 50	Mala
0 – 25	Muy mala

Índice de Calidad del Agua - IDEAM (ICA-IDEAM). Es el índice que ha establecido el IDEAM en Colombia, para la determinación de la calidad del agua superficial. Es un índice multi-parámetro que utiliza entre cinco y seis parámetros (demanda química de oxígeno [DQO], sólidos suspendidos totales [SST], oxígeno disuelto [OD], conductividad eléctrica [CE] y pH y relación N/P). El índice de calidad del agua es el valor numérico que califica en una de cinco categorías, la calidad del agua de una corriente superficial, con base en las mediciones obtenidas para un conjunto de cinco o seis variables, registradas en una estación de monitoreo j en el tiempo t (IDEAM, 2011). En la **Ecuación <10>** se presenta la fórmula del índice.

$$ICA_{njt} = \left(\sum_{i=1}^n W_i * I_{ikj} \right) \quad <10>$$

Donde:

ICA_{njt} = Índice de calidad del agua de una determinada corriente superficial j en el tiempo t, evaluado con base en n variables.

W_i = Es el ponderador o peso relativo asignado a la variable de calidad i.

I_{ikj} = Es el valor calculado de la variable i (obtenido de aplicar la curva funcional o ecuación correspondiente).

n = Es el número de variables de calidad involucradas en el cálculo del indicador; n es igual a cinco o seis dependiendo de la medición del ICA que se seleccione.

En las Tablas 17 y 18 se presentan las ponderaciones cuando se utilizan cinco o seis variables en la determinación del índice y en la Tabla 19 se presentan los rangos del índice y su categorización (IDEAM, 2011).

Tabla 17. Variables y ponderaciones para el índice con cinco variables (IDEAM, 2011).

Variable	Unidad de medida	Ponderación
Oxígeno disuelto (OD)	% de saturación	0,20
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg L ⁻¹	0,20
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg L ⁻¹	0,20
Conductividad eléctrica (CE)	μS cm ⁻¹	0,20
pH	Unidades	0,20

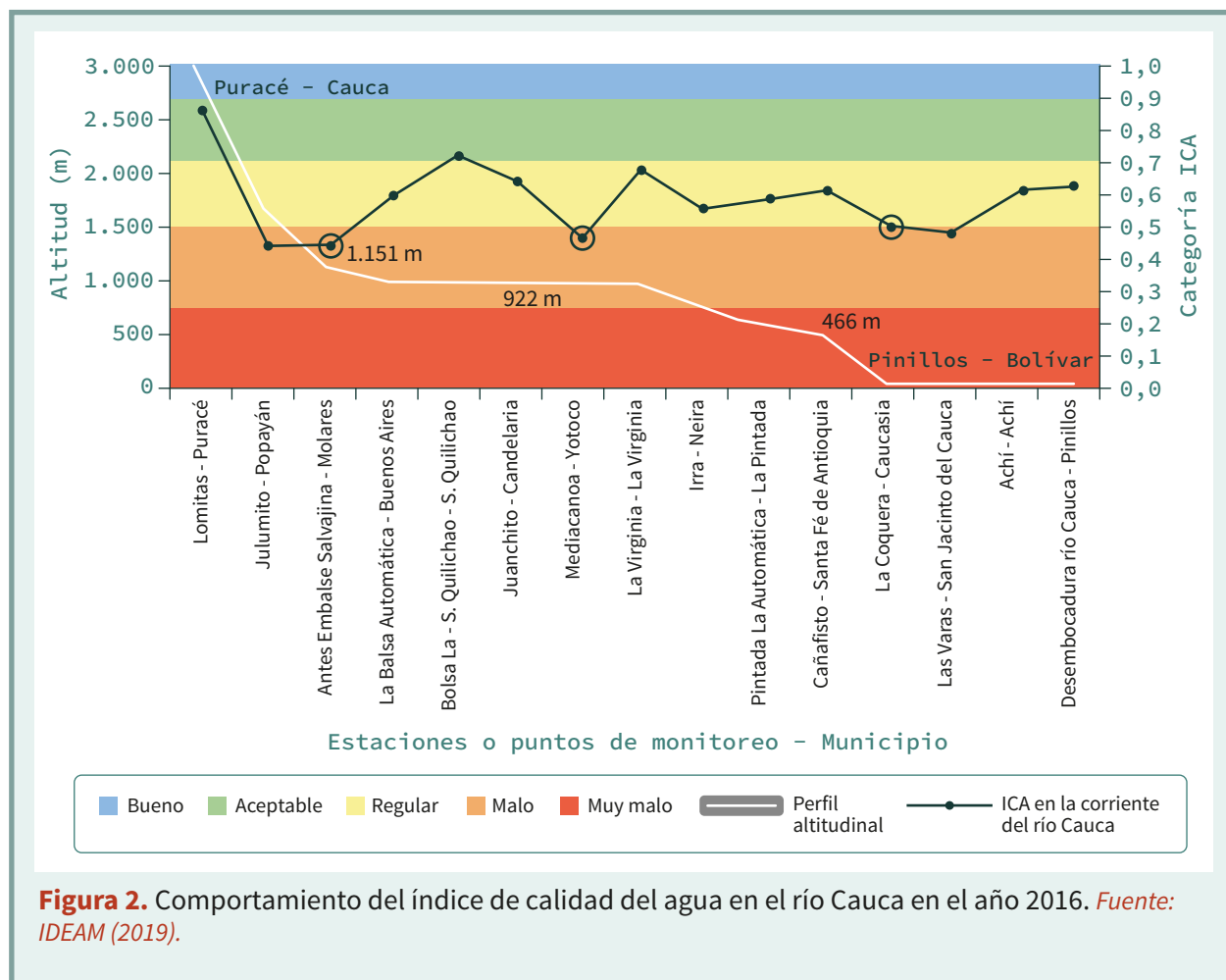
Tabla 18. Variables y ponderaciones para el índice con seis variables (IDEAM, 2011).

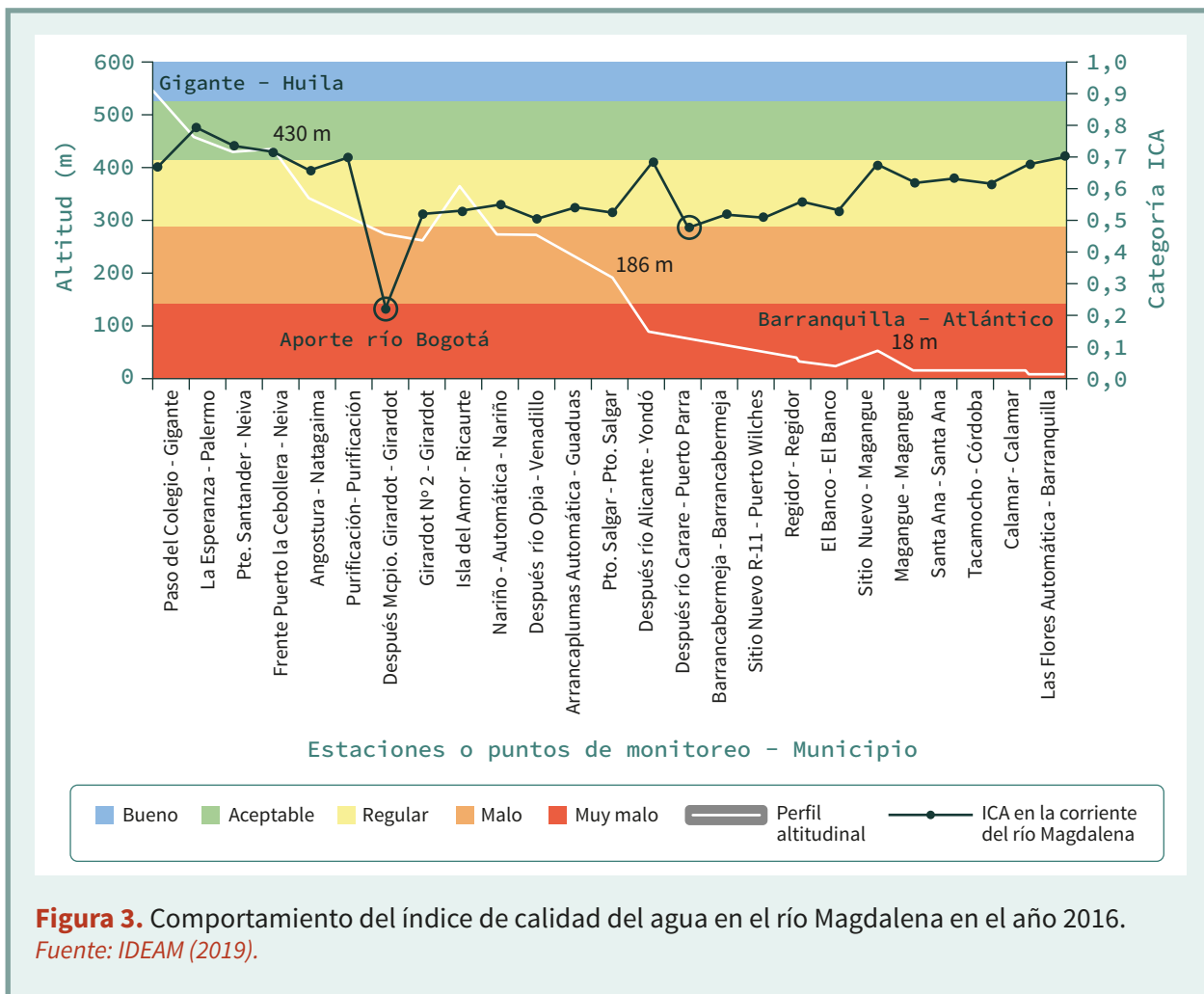
Variable	Unidad de medida	Ponderación
Oxígeno disuelto (OD)	% de saturación	0,17
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg L ⁻¹	0,17
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg L ⁻¹	0,17
N_T/P_T	-	0,17
Conductividad eléctrica (CE)	μS cm ⁻¹	0,17
pH	Unidades	0,15

Tabla 19. Categorías del índice de calidad IDEAM (IDEAM, 2011).

ICA-IDEAM	Categoría
0,91 – 1,00	Buena
0,71 – 0,90	Aceptable
0,51 – 0,70	Regular
0,26 – 0,50	Mala
0,00 – 0,25	Muy mala

Los índices de calidad del IDEAM se han incorporado en los Estudios Nacionales del Agua (ENA) para determinar la calidad de diferentes fuentes superficiales de nuestro país. En las Figuras 2 y 3, se muestra el comportamiento del ICA en el río Cauca y Magdalena, respectivamente, para el año 2016 (IDEAM, 2019).





Índice de Calidad ICO. Desarrollados en Colombia, para la caracterización de las aguas superficiales y vertimientos. Son un grupo de seis índices (Ramírez et al., 1999):

- Índice de contaminación por mineralización (ICOMI), integra la conductividad eléctrica, la dureza y la alcalinidad.
- Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO), conformado por la demanda biológica de oxígeno, coliformes totales y porcentaje de saturación de oxígeno.
- Índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS).
- Índice de contaminación trófico (ICOTRO), el cual se calcula con base en la concentración de fósforo total.
- Índice de Temperatura (ICOTEMP).
- Índice de pH (ICOpH).

En la Tabla 20 se presentan los rangos del índice y su categorización.

Tabla 20. Categorías del índice de calidad ICO (Ramírez et al., 1999).

ICO	Grado de contaminación
0 - 0,2	Ninguna
> 0,2 - 0,4	Baja
> 0,4 - 0,6	Media
> 0,6 - 0,8	Alta
> 0,8 - 1,0	Muy alta

Índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL). Es un índice utilizado en los Estudios Nacionales del Agua y refleja la vulnerabilidad a la contaminación a que puede estar sometida una subzona hidrográfica. Numéricamente corresponde al promedio de las categorías de clasificación asignadas a los cocientes que surgen de dividir las cargas estimadas de cada una de las cinco variables fisicoquímicas básicas seleccionadas por la oferta hídrica superficial (DBO, DQO-DBO, SST, N_T y P_T). La carga de contaminante se estima espacialmente para las subzonas hidrográficas definidas en el país para un período de un año (Orjuela & López, 2013).

La carga de contaminante de cada una de las cinco variables, para una determinada subzona hidrográfica, surge de agregar las cargas estimadas de dicha variable de cada una de las cabeceras municipales que están ubicadas al interior de la subzona. Estas cargas son estimadas para un total de 1.120 municipios, con base en información secundaria proveniente de estadísticas oficiales de población, volúmenes de producción para 43 actividades representativas de la industria manufacturera, beneficio del café y sacrificio de ganado, bovino y porcino (Orjuela & López, 2013).

Para el cálculo del índice se emplea la **Ecuación <11>** y para su interpretación los rangos y categorías condensados en la Tabla 21.

$$IACAL_{jt-añom} = \frac{\sum_{i=1}^n catiacal_{ijt-añom}}{n} \quad <11>$$

Donde:

$IACAL_{jt-añom}$ = Índice de alteración potencial de la calidad del agua de una subzona hidrográfica j durante el período de tiempo t, evaluado para una oferta hídrica propia de un año medio.

$catiacal_{ijt-añom}$ = Categoría de clasificación de la vulnerabilidad por la potencial alteración de la calidad del agua que representa el valor de la presión de la carga estimada de la variable de

calidad i que se puede estar vertiendo a la subzona hidrográfica j , durante el período de tiempo t dividido por la oferta hídrica propia de un año medio.

n = Número de variables de calidad involucradas en el cálculo del indicador; n es igual a cinco.

Tabla 21. Rangos y categorías del índice de alteración de la calidad (IACAL) (Orjuela & López, 2013).

Rango IACAL	Categoría IACAL	Calificación de la presión
$1,0 \leq \text{IACAL} \leq 1,5$	1	Baja
$1,5 < \text{IACAL} \leq 2,5$	2	Moderada
$2,5 < \text{IACAL} \leq 3,5$	3	Media – alta
$3,5 < \text{IACAL} < 4,5$	4	Alta
$4,5 \leq \text{IACAL} \leq 5,0$	5	Muy alta

De acuerdo con los resultados presentados en el Estudio Nacional del Agua 2018 (IDEAM, 2019), en la zona hidrográfica Magdalena – Cauca es en donde se ejercen las mayores presiones por carga contaminante sobre la calidad de agua. Estas presiones se ven reflejadas en las 21 subzonas hidrográficas (SZH) con categoría muy alta del IACAL, para condiciones hidrológicas promedio. Estas SZH son: río Fortalecillas y otros, río Bogotá, río Coello, río Totare, alto río Cauca, río Palo, río Guachal (Bolo–Fraile y Párraga), ríos Amaime y Cerrito, ríos Tuluá y Morales, río La Vieja, río Otún, y otros directos al Cauca, río Chinchiná, río Quinamayo y otros directos al Cauca, ríos Lili, Meléndez y Cañaveralejo, ríos Arroyohondo, Yumbo, Mulalo, Vijes, Yotoco, Mediacanoa y Piedras, ríos Guadalajara y San Pedro, ríos Las Cañas, Los Micos y Obando, río Porce, canal del Dique margen derecho, directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura al mar Caribe, ciénaga Mallorquín.

Índice de calidad ambiental en el beneficio del café (ICAPBHC). Para valorar el impacto ambiental ocasionado por el manejo, disposición y tratamiento de los subproductos del café sobre los recursos naturales, en términos de DQO o DBO_5 , generados en el proceso de beneficio del café, y determinar las estrategias y acciones necesarias para disminuir su impacto sobre el medio ambiente, se generó el Índice de Calidad Ambiental en el Proceso de Beneficio Húmedo del Café (ICAPBHC) (Rodríguez et al., 2015). Este indicador se generó considerando cada una de las etapas del proceso de beneficio en las cuales se genera contaminación orgánica, asignándole una ponderación de acuerdo al impacto contaminante generado.

Por ejemplo, el despulpado y el transporte de la pulpa con agua y su disposición a cielo abierto o en procesadores no techados, es responsable del 74% del potencial contaminante de los subproductos del café. Mediante el despulpado y el transporte de la pulpa sin agua y su descomposición en procesadores techados, con recirculación o tratamiento de lixiviados, puede evitarse este 74% del potencial contaminante, que al ser convertido a fracción genera un valor de 0,74.

La escala del indicador se mueve en el rango entre cero (0) y uno (1), en la cual un valor de cero (0) es indicador del máximo impacto ambiental adverso sobre los recursos naturales, mientras que un valor de uno (1) es indicador de un buen manejo, valorización y tratamiento de los subproductos del beneficio, sin generación de impactos adversos sobre el ecosistema cafetero. En la Tabla 22 se presentan las categorías del índice.

Tabla 22. Categorías del índice de calidad ambiental en el beneficio húmedo del café (ICAPBHC) (Rodríguez et al., 2015).

IMAPBHC	Categoría
> 0,90	Muy alta
0,70– 0,90	Alta
0,46 – 0,69	Moderada
0,20 – 0,45	Baja
< 0,20	Muy baja

Índices de la calidad biológica del agua

Tienen como ventaja, frente a los índices físico-químicos, que sus respuestas no son instantáneas, son eficientes frente a perturbaciones sutiles, su metodología es sencilla y de bajo costo, y tienen precisión taxonómica. Los índices basados en la cantidad y diversidad de macroinvertebrados presentes en el agua son los más utilizados.

Los macroinvertebrados tienen ciclos de vida lo suficientemente largos como para que se detecten los cambios temporales causados por las perturbaciones, pero lo suficientemente cortos como para permitir la observación de patrones de recolonización después de una perturbación. Adicionalmente, son relativamente fáciles y económicos de recolectar, particularmente si se realiza un muestreo cualitativo y adaptado a los experimentos necesarios para el biomonitorio y los métodos para analizar los datos están bien establecidos (Abbasi & Abbasi, 2011).

Los macroinvertebrados bentónicos son en gran parte no móviles, ubicuos y relativamente abundantes, presentes en hábitats lóticos y lénticos. Existen a menudo muchas especies dentro de una comunidad con diferentes sensibilidades a perturbaciones y tiempos de reacción relativamente rápidos, lo que permite un espectro de respuestas, graduadas y reconocibles, a una perturbación ambiental (Abbasi & Abbasi, 2011).

En consecuencia, se han desarrollado numerosos índices bióticos para la evaluación de ecosistemas fluviales, lo cuales se basan en macroinvertebrados acuáticos. En la Tabla 23 se presenta una descripción resumida de los índices bióticos más utilizados.

Índice *Biological Monitoring Working Party* (BMWP). Es un método sencillo y rápido para evaluar la calidad del agua usando los macroinvertebrados como bioindicadores. Este índice se basa en la presencia o ausencia de los organismos, identificados hasta nivel de familia. Los macroinvertebrados son organismos que se encargan de la eliminación de la hojarasca y de otros contaminantes orgánicos que entran al agua, permitiendo conservar la calidad de la misma, también son depredadores y controlan la proliferación de organismos como el zooplancton o el fitoplancton que pueden causar grandes daños a la calidad del agua cuando proliferan en exceso. El índice BMWP fue modificado por Roldán (2003) a las condiciones ecológicas Colombianas.

Tabla 23. Descripción general de los principales índices bióticos, basados en macroinvertebrados acuáticos (Abbasi & Abbasi, 2011). *ASPT: Puntuación media por taxón.

Índice Biótico	Biotipos Muestreados	Equipos de muestreo	Protocolo de muestreo	Nivel taxonómico	Rango de puntuación	Regiones en las que se utiliza
Índice Biótico de Beck	Todos, combinados	No definido	No cuantitativo	Especies	0-0,40	-
Índice Biótico de Trent	Todos, combinados	Red hand	No cuantitativo	Familia, género y especies	0-10	-
Índice Biotique	Lóticos y lénticos, separados	Red hand y surber	Semicuantitativo	Familia, género y especies	0-10	-
Puntuación Biótica de Chandler	Piedras en la corriente	Red hand (1000 µm)	Semicuantitativo	Género y especies	No reportado	Estados Unidos
Índice Biótico de Chutter	Piedras en la corriente	Red hand y surber	Cuantitativo	Familia, género y especies	0-10	-
Índice Biótico de Hilsenhoff	Piedras en la corriente	Red hand	Cuantitativo >100	Género y especies	0-10	Estados Unidos
Índice BMWP (<i>Biological Monitoring Working Party</i>)	Todos, combinados	Red hand	No cuantitativo / semicuantitativo	Familia	0- 0,20	Reino Unido, Finlandia, Suecia
Índice Biótico Belga	Todos, combinados	Red hand	No cuantitativo	Familia y género	0-10	Bélgica y países cercanos

Continúa...

... Continuación Tabla 23.

Índice Biótico	Biotipos Muestreados	Equipos de muestreo	Protocolo de muestreo	Nivel taxonómico	Rango de puntuación	Regiones en las que se utiliza
Índice de la Comunidad de Macroinvertebrados	Piedras en la corriente	Red hand y surber	No cuantitativo	Género	0-200	Nueva Zelanda
BMWP ibérico	Lóticos y lenticos junto y separados	Red hand	No cuantitativo	Familia	0-0,20 0-10 (ASPT*)	España, Italia
Índice de los ríos de Vaud, 1995	Piedras en la corriente	Red hand	Semicuantitativo	Familia y género	0-20	Suiza Occidental
Índice de la corriente de invertebrados	No reportados	Red hand	No cuantitativo, 100 organismos	Familia	0-10	Australia
Índice de la fauna de arroyo Danés	Todos, combinados	Red hand (500 µm)	Semicuantitativo, 12 muestras	Familia y género	0-7	Dinamarca, Suecia
Índice Biótico de los Balcanes	Todos, combinados	Red benthos	Cuantitativo	Familia, subfamilia y género	0-5	Serbia

Entre los macroinvertebrados acuáticos hay especies muy tolerantes a la contaminación del agua y otras muy susceptibles o que no la toleran. Con este método se asigna un puntaje a los organismos encontrados en el agua, que va desde uno (1) a diez (10), la mayor o menor puntuación asignada a un organismo está en función de su mayor o menor sensibilidad a la contaminación orgánica y con la suma de los puntajes obtenidos y la ayuda de una tabla de referencia (Tabla 24) puede determinarse la calidad del agua superficial.

Tabla 24. Clasificación de las aguas y su significado ecológico de acuerdo con el índice BMWP (Álvarez, 2005).

Valor del BMWP	Clase	Calidad	Significado
>150	1	Buena	Aguas muy limpias
123 - 149			Aguas no contaminadas
71 - 122	2	Aceptable	Aguas ligeramente contaminadas
46 - 70	3	Dudosa	Aguas moderadamente contaminadas
21 - 45	4	Crítica	Aguas muy contaminadas
< 20	5	Muy crítica	Aguas fuertemente contaminadas

Índice EPT. Se calcula mediante la utilización de tres grupos de macroinvertebrados: Ephemeroptera (E), Plecóptera (P) y Trichoptera (T), que son indicadores de la calidad de agua, debido a que son más sensibles a la contaminación.

El análisis consiste en tomar la abundancia total de los tres órdenes a evaluar y dividirlo por la abundancia de los taxones en general, y multiplicar este valor por 100 (**Ecuación <12>**), el cual se compara con valores de referencia (Tabla 25) para obtener la categoría de la calidad del agua (Carrera & Fierro, 2001).

$$\text{Índice EPT} = \frac{EPT_{total}}{Abundancia\ total} \times 100 \quad <12>$$

Tabla 25. Categorías del índice EPT (Carrera & Fierro, 2001).

Índice EPT	Categoría
75% - 100%	Muy Buena
50% - 74%	Buena
25% - 49%	Regular
0% - 24%	Mala

Índice de valoración de hábitat (SVAP)

Un río o quebrada muestra condiciones ecológicas especiales, las cuales pueden evaluarse de forma visual para verificar el estado actual de un cauce. El índice de valoración de la calidad de agua (SVAP) provee un diagnóstico significativo en cuanto al conocimiento de la condición del hábitat ripario y calidad hídrica, además de servir para monitorear estas variables a largo plazo, al momento de implementar acciones de manejo tendientes al mejoramiento de estas condiciones (Rodríguez et al., 2018).

El índice SVAP aplica un sistema de puntuación (que varía entre uno y diez) y evalúa 15 variables como: apariencia del agua, sedimentos, zona ribereña (ancho y calidad), sombra, pozas, condición del cauce, alteración hidrológica (desbordes), hábitat para peces y macro-invertebrados, estabilidad de las orillas, barreras al movimiento de peces, presión de actividades pesqueras, presencia de desechos sólidos, presencia de excretas de origen animal y aumento de nutrientes de origen orgánico, siendo un método que no requiere equipos o instrumentos de alta tecnología para su uso, es replicable y puede ser fácilmente

desarrollado por personal no experto. Puntajes bajos están relacionados con condiciones adversas para la calidad de la fuente hídrica y puntajes altos se relacionan con condiciones de calidad (Rodríguez et al., 2018).

Luego de realizados los registros para cada uno de los puntos de muestreo valorados, se realizan los cálculos del índice para cada uno de estos, según la fórmula de puntaje total/número de criterios evaluados. Finalmente, para cada cuerpo de agua superficial se determina el promedio del valor obtenido a través de los dos puntos de muestreo considerados. A cada valor final del índice se le asigna una categoría de calidad de acuerdo a los rangos y a las categorías del índice condensadas en la Tabla 26.

Tabla 26. Categorías del índice de valoración de hábitat (SVAP) (United States Department of Agriculture [USDA], 2012).

Valor SVAP	Categoría
9,0 – 10,0	Excelente
7,0 – 8,9	Buena
5,0 – 6,9	Regular
3,0 – 4,9	Mala
1,0 – 2,9	Muy mala

Indicadores e índices de la cantidad y calidad de agua

Existen algunos índices que incorporan indicadores de cantidad y de calidad de agua. Entre ellos se destacan:

Huella Hídrica (HH). Es un indicador que representa la apropiación humana del agua, que se evidencia en el impacto en términos de consumo y contaminación del agua por parte de los seres humanos; en otras palabras, se refiere al consumo y contaminación del agua con fines productivos. Por uso consuntivo se entiende aquel en el cual el agua ya no se encuentra disponible para otros usos, sea porque: (1) se ha evaporado; (2) se ha transferido a otra cuenca; (3) se ha incorporado a un producto; (4) se ha contaminado. Por el contrario, el uso no consuntivo es aquel que permite un nuevo aprovechamiento del agua, por ejemplo, la hidrogenación (Zárate et al., 2017).

La HH de un producto es el volumen de agua utilizada para producir el producto, medidos a lo largo de la cadena de suministro. Es un indicador multidimensional, que muestra los volúmenes de consumo de agua por fuentes y volúmenes de contaminación, por cada tipo de contaminación, y cuyos componentes de huella hídrica total pueden ser especificados geográfica y temporalmente (Hoekstra et al., 2011). En la **Ecuación <13>** se presenta la fórmula para su cálculo.

$$HH_{total} = HH_{verde} + HH_{azul} + HH_{gris} \quad <13>$$

Tomando como base el manual de evaluación de HH (Hoekstra et al., 2011), la HH_{total} está conformado por tres indicadores representados por los colores azul, verde y gris; los indicadores de HH_{azul} y HH_{verde} se utilizan para evaluar consumos de agua, mientras que la HH_{gris} se relaciona con el nivel de contaminación.

Rodríguez et al. (2020) reportan que la HH_{total} promedio del café de Colombia, para un ciclo completo de cultivo (siembra nueva-renovación) y una densidad de siembra de 10.000 árboles/ha, evaluada en tres Estaciones Experimentales de Cenicafe, fue de 4.456,72 L kg⁻¹ café verde (cv), representando la HH_{verde} un porcentaje del 78,24% (3.486,82 L kg⁻¹ cv), la HH_{gris} el 21,54% (959,84 L kg⁻¹ de cv) y la HH_{azul} el 0,23% (10,06 L kg⁻¹ cv).

Índice Global de Calidad (KPI_{21}). Es un índice multiparámetro desarrollado por Rodríguez et al. (2018), para evaluar la calidad global del agua en microcuencas cafeteras de Colombia. Fue construido utilizando el índice de calidad físico-química (NSF-WQI), el índice biótico BMWP para Colombia (BMWP/Col) y el índice de valoración de hábitat (SVAP), con ponderaciones iguales. En la **Ecuación <14>** se presenta la expresión para su determinación y en la Tabla 27 los rangos del índice y sus diferentes categorías.

$$KPI_{21} = \left(\frac{NSF - WQI}{100} * 0,333 + \frac{BMWP}{Col} * 0,333 + \frac{SVAP}{10} * 0,333 \right) \quad <14>$$

Tabla 27. Categorías del índice global de calidad (KPI_{21}) (Rodríguez et al., 2018).

Valor KPI_{21}	Categoría
0,90 – 1,00	Excelente
0,70 – 0,89	Buena
0,50 – 0,69	Media
0,30 – 0,49	Regular
0,00 – 0,29	Mala

Otros Índices

Otros índices desarrollados en Colombia para el monitoreo del agua, están relacionados con el índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano y los índices de vulnerabilidad por desabastecimiento.

Índice de riesgo de la calidad del agua (IRCA). El IRCA se refiere al índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano, el cual es un instrumento básico para garantizar la calidad del agua. Está definido en la Resolución 2115 del 2007, expedida por el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial.

Para el cálculo de este índice de riesgo se asignan unos valores (puntaje de riesgo) para aquellas características del agua que no cumplan con los valores establecidos en la Resolución. Las características consideradas y los puntajes de riesgo se condensan en la Tabla 28. Para el cálculo del IRCA se utiliza la **Ecuación <15>**.

$$IRCA(\%) = \frac{\sum \text{Puntajes de riesgo de las características no aceptables}}{\sum \text{Puntajes de riesgo de todas las características analizadas}} \times 100 \quad <15>$$

Tabla 28. Puntajes de Riesgo de acuerdo a la Resolución 2115 del 2007 (MAVDT, 2007).

Característica	Puntaje de riesgo
Color aparente	6
Turbidez	15
pH	1,5
Cloro residual libre	15
Alcalinidad total	1
Calcio	1
Fosfatos	1
Manganeso	1
Molibdeno	1
Magnesio	1
Zinc	1
Dureza total	1

Continúa...

... Continuación Tabla 28.

Característica	Puntaje de riesgo
Sulfatos	1
Hierro total	1,5
Cloruros	1
Nitratos	1
Nitritos	3
Aluminio	3
Fluoruros	1
COT	3
Coliformes totales	15
<i>Escherichia coli</i>	25
Sumatoria de puntajes asignados	100

El valor del IRCA es cero cuando se cumple con los valores aceptables para cada una de las características anteriores contempladas en la resolución, y de 100 puntos cuando no se cumple con ellos.

De acuerdo con los resultados del IRCA se define la clasificación del nivel del riesgo del agua suministrada para el consumo humano (Tabla 29).

Tabla 29. Categorías del índice de riesgo de la calidad del agua (IRCA) (MAVDT, 2007).

Valor del IRCA	Nivel de Riesgo
0,0 – 5,0	Sin riesgo
5,1 – 14,0	Riesgo bajo
14,1 – 35,0	Riesgo medio
35,1 – 80,0	Riesgo alto
80,1 – 100,0	Inviabile sanitariamente

En la Figura 4 se presentan los resultados promedios del IRCA para los Departamentos de Colombia, tanto para la zona urbana como para la zona rural (Ministerio de Salud y Protección Social, 2019).

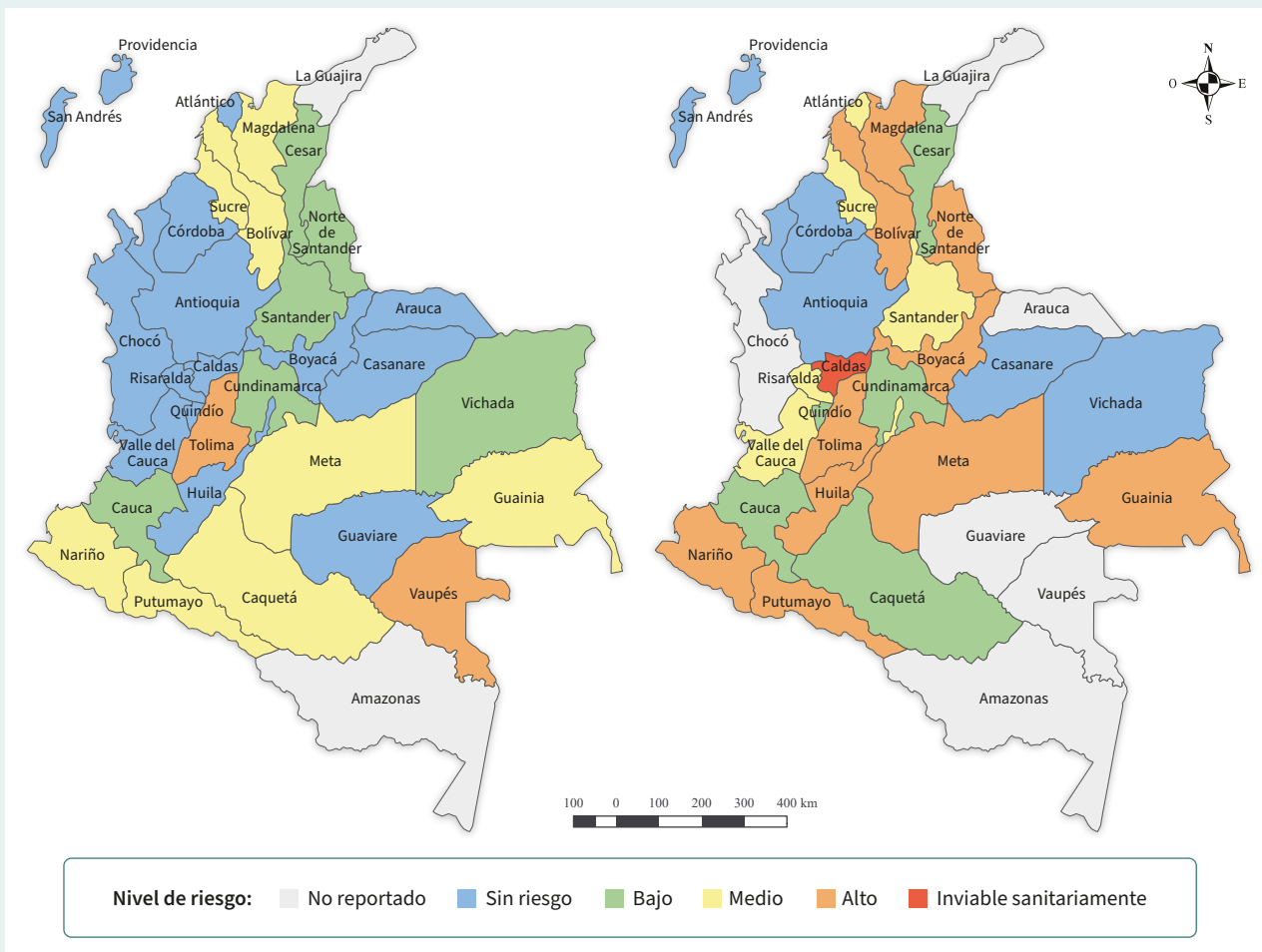


Figura 4. Niveles del IRCA departamental del año 2017 para la zona urbana y rural, respectivamente (Ministerio de Salud y Protección Social, 2019).

Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento (IVH). Este índice, utilizado en los Estudios Nacionales del Agua, se calcula a partir de una matriz de relación entre el índice de regulación hídrica y el índice de uso de agua. El IVH mide el grado de fragilidad del sistema hídrico para mantener una oferta que permita el abastecimiento de agua de sectores usuarios del recurso, tanto en condiciones hidrológicas promedio como extremas de año seco. Las categorías de este índice se presentan en la Tabla 30 (IDEAM, 2019). En la Figura 5 se presenta el mapa con los resultados del índice para las diferentes zonas geográficas de Colombia (IDEAM, 2019).

Las subzonas con alta o muy alta vulnerabilidad hídrica al desabastecimiento se concentran en la cuenca Magdalena–Cauca. En particular, tienen una muy alta vulnerabilidad al desabastecimiento, tanto en condiciones hidrológicas promedio como en extremas de año

seco, en las subzonas de la cuenca del río Cauca: ríos Lili–Meléndez y Cañaveralejo, ríos Guabas, Sabaletas y Sonsón, ríos Arroyohondo, Yumbo, Mulalo, Vijes, Yotoco, Mediacanoa y Piedras, ríos Amaime y Cerrito, río Piendamó y río Guachal (Bolo–Fraile y Párraga) (IDEAM, 2019).

Tabla 30. Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico (IVH) (IDEAM, 2015). (Las celdas en colores rojo, naranja, amarillo, verde y azul representan las categorías del índice).

Vulnerabilidad del recurso hídrico. Relación entre el índice de retención y regulación hídrica (IRH) y el índice de uso del agua (IUA)						
IUA % (Demanda/oferta)		Categorías del índice de retención y regulación hídrica				
Rango IUA	Categoría IUA	Muy alta	Alta	Media	Baja	Muy baja
< 1	Muy Bajo	Media	Media	Media	Baja	Muy baja
1 - 10	Bajo	Media	Media	Media	Baja	Muy baja
10 - 20	Moderado	Alta	Alta	Media	Media	Baja
20 - 50	Alto	Muy alta	Alta	Alta	Media	Baja
50 - 100	Muy Alto	Muy alta	Muy alta	Alta	Media	Media
> 100	Crítico	Muy alta	Muy alta	Muy alta	Alta	Alta

Índice de vulnerabilidad del territorio a la disponibilidad hídrica (IVTDH). Es un índice multiparámetro, desarrollado por Rodríguez et al. (2018), para evaluar la vulnerabilidad del territorio a la disponibilidad de agua (IVTDH), ante la amenaza climática, considerando aspectos tales como: el caudal ecológico, el indicador de Falkenmark, el índice de calidad físico-químico del agua (ICA-NSF), el índice biológico BMWP/Col y el índice de calidad de hábitat (SVAP). En la **Ecuación <16>** se presenta la expresión para su determinación y en la Tabla 31 los rangos del índice y sus diferentes categorías.

$$IVTH = \frac{Q_m + Q_{cal} + Q_e}{\# hab * 1700} * KPI_{21} \quad <16>$$

Donde:

Q_m = Caudal medio en el cuerpo de agua, en $m^3 s^{-1}$.

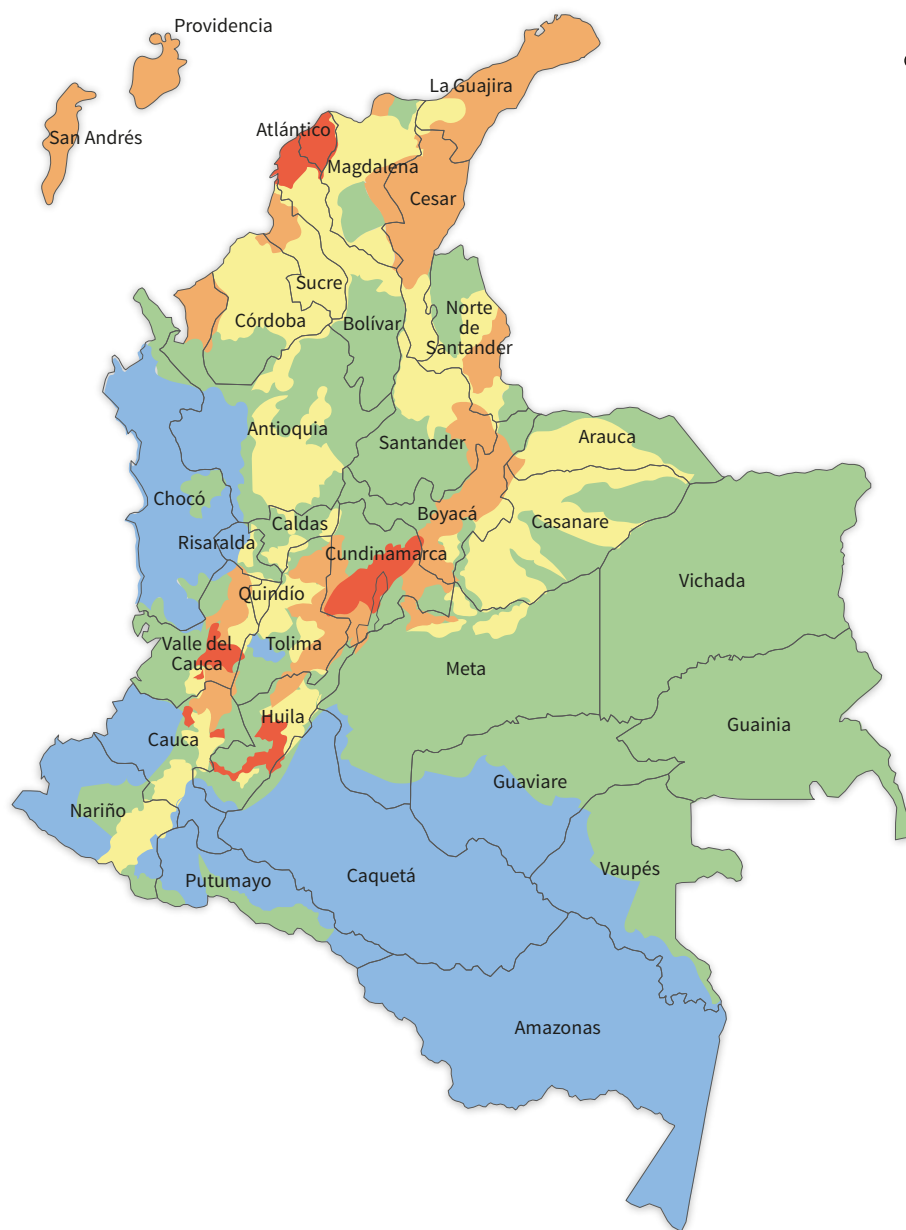
Q_{cal} = Caudal que se debe preservar para mantener la calidad del agua = $0,25Q_m$.

Q_e = Caudal ecológico, calculado como el 25% del caudal mínimo promedio.

hab = Número de habitantes con influencia directa en el cuerpo de agua.

1700 = Constante de Falkenmark.

$KPI_{21} = (ICA-NSF/100 + BMWP/123 + SVAP/10)/3$.



Índice de vulnerabilidad hídrica al desabastecimiento (IVA) por subzona geográfica

■ No aplica	■ Muy baja	■ Baja	■ Moderada	■ Alta	■ Muy alta
-------------	------------	--------	------------	--------	------------

Figura 5. Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico año medio 2016 (IDEAM, 2019).

Tabla 31. Categorías del índice de vulnerabilidad del territorio a la disponibilidad hídrica (IVTDH) (Rodríguez et al., 2018).

Valor IVHT	Categoría
≥ 1	Sin vulnerabilidad
0,86 – 0,99	Vulnerabilidad baja
0,50 – 0,85	Vulnerabilidad media
0,49 -0,25	Vulnerabilidad alta
$< 0,25$	Vulnerabilidad extrema



Metodología

Selección de microcuencas

Para el presente estudio se seleccionaron 25 microcuencas cafeteras en los departamentos de Antioquia, Caldas, Valle del Cauca, Cauca y Nariño (cinco por departamento), en el marco del programa Gestión Inteligente del Agua (GIA) “Manos al Agua”. Para su selección se consideraron **factores fundamentales** (principales vertimientos, confluencia con ríos principales, políticas relacionadas con el recurso hídrico, zonas de desarrollo industrial y urbano existentes y potenciales, bocatomas de acueductos y distritos de riego, entre otros), **factores condicionantes** (limitaciones propias de cada localización y están relacionados con la dificultad de acceso, la seguridad de los equipos y del personal, la infraestructura existente, las características hidráulicas de la sección y tramo, la cercanía a estaciones hidrológicas existentes, la facilidad para realizar actividades hidrométricas y la facilidad para la recolección de muestras, entre otros) y **factores limitantes** (relacionados con el presupuesto y el equipo de medición, como capacidad, precisión, requerimientos de instalación, operación y mantenimiento, entre otros) (Rodríguez et al., 2018).

Las microcuencas seleccionadas en las cuales se realizaron los estudios de calidad físico-química aplicando índices, fueron:

- 🌊 **Departamento de Antioquia:** quebrada La Liborina (municipio de Abejorral); quebrada La Chaparrala (municipio de Andes); quebrada San Bartolo (municipio de Jardín); quebrada La Gulunga (municipio de Salgar); quebrada La Leona (municipio de Pueblorrico).
- 🌊 **Departamento de Caldas:** quebrada La Frisolera (municipio de Salamina); quebrada Edén-Barreño (municipio de Aguadas); quebrada Los Saínos (municipio de Marquetalia); río Pácora (municipio de Pácora); quebrada La Linda (municipio de Pensilvania).
- 🌊 **Departamento del Valle del Cauca:** río Platanares (municipio de Bolívar); río La Paila (municipio de Bugalagrande); río Barragán (municipio de Caicedonia); río San Marcos (municipio de Sevilla); río Bugalagrande (municipio de Tuluá).
- 🌊 **Departamento del Cauca:** río Capitanes (municipio de Balboa); quebrada La Chorrera (municipio de Inzá); río La Esmita (municipio La Sierra); quebrada El Marqués (municipio de Rosas); río Quilcacé (municipio de Sotará).
- 🌊 **Departamento de Nariño:** río Buesaquito (municipio de Buesaco); río Azufral (municipio de Consacá); quebrada La Fragua (municipio La Unión); quebrada El Ingenio (municipio de Sandoná); quebrada El Molino (municipio de San Lorenzo).

En las microcuencas seleccionadas se identificaron dos puntos de muestreo: el primero antes de que el cuerpo de agua ingresara a la zona cafetera y el segundo a la salida de la zona cafetera.

Los criterios utilizados para la selección de los puntos de muestreo estuvieron acordes a los establecidos por el IDEAM, en la Guía para muestreo de aguas superficiales del año 2002.

Tipo de muestreo y frecuencia

El muestreo de los cuerpos de agua de la zona cafetera se realizó tanto en época de cosecha de café (principal y de mitaca, dependiendo de la zona), en los meses pico de cosecha, como en la época sin cosecha. El objetivo del muestreo en épocas de cosecha fue determinar la calidad del agua en función del factor “beneficio húmedo del café y manejo de subproductos”. La medición en la época de no cosecha sirvió para comparar la calidad del agua en épocas de cosecha y sin cosecha. Se realizaron cuatro campañas de monitoreo, tal como se presenta en la Tabla 32.

Para la toma de las muestras de agua, las corrientes hídricas seleccionadas, en los dos puntos de monitoreo, se muestrearon en nueve puntos simultáneos, cada hora, durante cuatro horas, y se obtuvo una muestra integrada, es decir, conformada por la mezcla de muestras puntuales tomadas en los nueve puntos diferentes. Este tipo de muestreo integrado permite conocer cómo varía la composición del cuerpo de agua de acuerdo al ancho y a la profundidad. Para realizar el muestreo se utilizó una cinta métrica para medir el ancho de orilla a orilla de la corriente; el ancho se dividió en cuatro incrementos iguales, de manera que se obtuvieran tres verticales para la toma de la muestra, esto es a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de la sección transversal del cauce del cuerpo de agua. En cada vertical se tomaron muestras puntuales a tres profundidades (0,2; 0,6 y 0,8 m). En la Figura 6 se presenta el esquema utilizado para la toma de muestras.

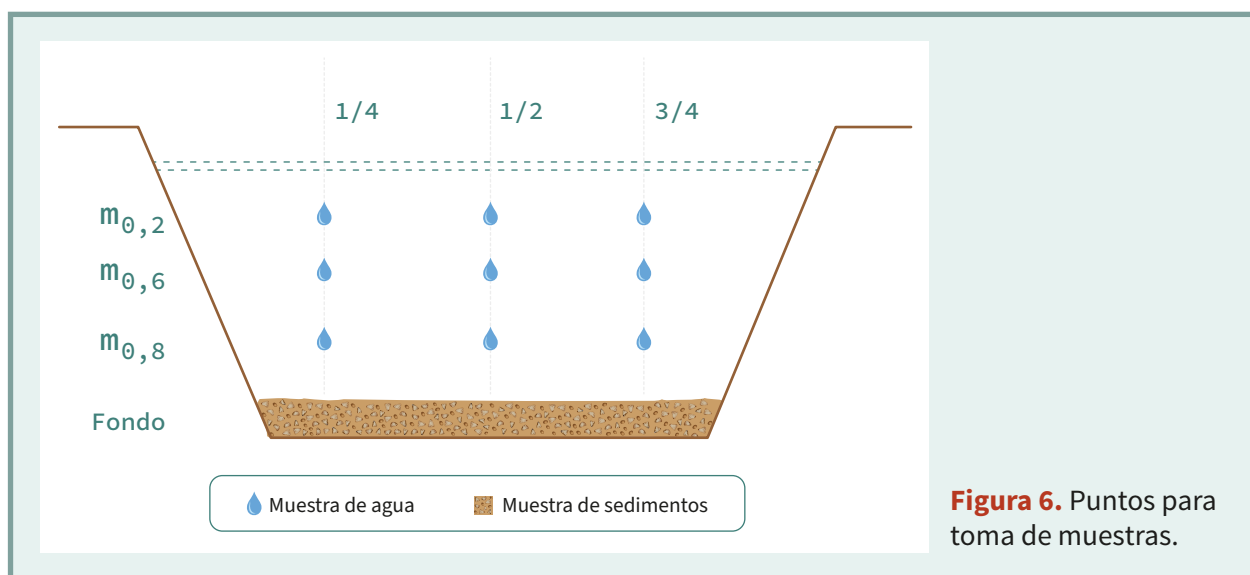


Figura 6. Puntos para toma de muestras.

Tabla 32. Información sobre las fechas de las campañas de monitoreo y el estado de cosecha de café.

Departamento	Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	
Antioquia	Pueblorrico	La Leona	1	20/06/2015	07/10/2015	16/06/2016	09/11/2016	
			2	19/06/2015	06/10/2015	17/06/2016	10/11/2016	
	Andes	La Chaparrala	1	12/06/2015	08/10/2015	18/06/2016	03/11/2016	
			2	13/06/2015	09/10/2015	20/06/2016	04/11/2016	
	Jardín	San Bartolo	1	10/06/2015	10/12/2015	21/06/2016	01/11/2016	
			2	11/06/2015	11/12/2015	22/06/2016	02/11/2016	
	Salgar	La Gulunga	1	17/06/2015	16/12/2015	14/06/2016	11/11/2016	
			2	18/06/2015	15/12/2015	15/06/2016	16/11/2016	
	Abejorral	La Liborina	1	23/06/2015	12/12/2015	08/06/2016	17/11/2016	
			2	14/06/2015	14/12/2015	09/06/2016	18/11/2016	
	Caldas	Salamina	La Frisolera	1	14/04/2015	17/10/2015	02/06/2016	19/10/2016
				2	15/04/2015	16/10/2015	03/06/2016	20/10/2016
		Aguadas	Edén-Bareño	1	28/04/2015	27/10/2015	18/05/2016	04/10/2016
				2	29/04/2015	28/10/2015	17/05/2016	05/10/2016
Marquetalia		Los Saínos	1	21/04/2015	21/10/2015	24/05/2016	11/10/2016	
			2	22/04/2015	20/10/2015	25/05/2016	12/10/2016	
Pácora		Pácora	1	16/04/2015	14/10/2015	20/05/2016	06/10/2016	
			2	17/04/2015	15/10/2015	19/05/2016	07/10/2016	
Pensilvania		La Linda	1	24/04/2015	23/10/2015	27/05/2016	13/10/2016	
			2	23/04/2015	22/10/2015	26/05/2016	14/10/2016	

Continúa...

... Continuación Tabla 32.

Departamento	Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	
Cauca	Balboa	Capitanes	1	14/05/2015	03/02/2016	10/05/2016	12/12/2016	
			2	13/05/2015	02/02/2016	11/05/2016	09/12/2016	
	Inzá	La Chorrera	1	06/05/2015	11/12/2015	04/05/2016	30/11/2016	
			2	07/05/2015	10/12/2015	05/05/2016	01/12/2016	
	La Sierra	La Esmita	1	16/05/2015	18/12/2015	19/05/2016	15/12/2016	
			2	15/05/2015	17/12/2015	20/05/2016	16/12/2016	
	Rosas	El Marqués	1	11/05/2015	15/12/2015	17/05/2016	13/12/2016	
			2	12/05/2015	16/12/2015	18/05/2016	14/12/2016	
	Sotará	Quilcacé	1	08/05/2015	14/12/2015	06/05/2016	05/12/2016	
			2	09/05/2015	12/12/2015	07/05/2016	06/12/2016	
	Nariño	Consacá	Azufra	1	06/05/2015	20/01/2016	23/05/2016	12/01/2017
				2	07/05/2015	21/01/2016	24/05/2016	13/01/2017
Sandoná		El Ingenio	1	09/05/2015	23/01/2016	25/05/2016	16/01/2017	
			2	08/05/2015	22/01/2016	26/05/2016	17/01/2017	
Buesaco		Buesaquito	1	12/05/2015	26/01/2016	27/05/2016	18/01/2017	
			2	11/05/2015	25/01/2016	28/05/2016	19/01/2017	
La Unión		La Fragua	1	13/05/2015	27/01/2016	02/06/2016	20/01/2017	
			2	14/05/2015	28/01/2016	03/06/2016	23/01/2017	
San Lorenzo		El Molino	1	16/05/2015	30/01/2016	31/05/2016	24/01/2017	
			2	15/05/2015	29/01/2016	01/06/2016	25/01/2017	

Continúa...

... Continuación Tabla 32.

Departamento	Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4
Valle del Cauca	Bolívar	Platanares	1	23/06/2015	20/10/2015	11/05/2016	01/10/2016
			2	22/06/2015	21/10/2015	12/05/2016	03/10/2016
	Caicedonia	Barragán	1	10/06/2015	16/10/2015	26/04/2016	20/09/2016
			2	11/06/2015	17/10/2015	27/04/2016	21/09/2016
	Sevilla	San Marcos	1	12/06/2015	14/10/2015	28/04/2016	22/09/2016
			2	13/06/2015	15/10/2015	29/04/2016	23/09/2016
	Tuluá	Bugalagrande	1	19/06/2015	22/10/2015	05/05/2016	29/09/2016
			2	20/06/2015	23/10/2015	06/05/2016	30/09/2016
	Bugalagrande	La Paila	1	18/06/2015	26/10/2015	03/05/2016	27/09/2016
			2	17/06/2015	27/10/2015	04/05/2016	28/09/2016

Sin cosecha de café

Cosecha de mitaca o fuera del pico de cosecha

Cosecha principal

Caracterización físico-química del agua

La medición de parámetros *in situ* (pH, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno, conductividad eléctrica, turbidez y temperatura) se realizó mediante una sonda multiparamétrica, un turbidímetro y un peachímetro (Figura 7). Los parámetros *in situ* se tomaron en las muestras puntuales, dado que su representatividad se pierde si se toman de muestras compuestas o integradas.

Para la medición de los parámetros *in situ*, el sensor se sumergió directamente en la mitad de la sección transversal a evaluar, a una profundidad entre 20 y 30 cm de la superficie, en una zona de poca turbulencia y se procedió con la lectura.

Todas las muestras de un mismo punto de muestreo se almacenaron en la misma nevera de almacenamiento, para evitar posibles confusiones con muestras de otros puntos; los recipientes se colocaron en posición vertical, con suficientes bolsas de hielo intercaladas, de tal manera que se alcanzara una temperatura cercana a los 4°C. Finalmente, se rotularon con la información de la persona, la fecha y la hora del muestreo. En la Tabla 33 se presentan las condiciones de preservación de las muestras antes de su análisis en el laboratorio (*ex situ*).



A



B



C



D



E



F

Figura 7. Determinación de parámetros *in situ* y toma de muestras para análisis *ex situ*.

A. Determinación del caudal; **B.** Toma de muestras de agua para la medición de parámetros *in situ*; **C.** Muestras compuestas para la determinación de parámetros *ex situ*; **D.** Medición del pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica a las muestras de agua; **E.** Recipientes y nevera para el almacenamiento y transporte de las muestras de agua para análisis *ex situ*; **F.** Preservación de las muestras de agua.

Para las caracterizaciones fisicoquímicas y microbiológicas *ex situ*, para determinar el índice de calidad del agua, se utilizaron las metodologías consignadas en el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA, WPCF, 1992). Los análisis y metodologías fueron:

- Demanda química de oxígeno (DQO): método de reflujo cerrado.
- Fosfatos: método absortométrico del ácido ascórbico.
- Nitratos: método absortométrico de reducción con cadmio.
- Sólidos totales (ST): método gravimétrico.
- Coliformes totales y coliformes fecales: método de filtración por membrana.

Tabla 33. Parámetros para la preservación de muestras de agua (Rodríguez et al., 2018).

Análisis	Material del recipiente	Volumen (mL)	Preservación	Almacenamiento máximo
DQO	Plástico o vidrio	100	Agregar (H ₂ SO ₄) hasta pH ≤ 2	Hasta 28 días
Sólidos totales	Plástico o vidrio	200	Refrigerar	Hasta 7 días
Fósforo	Vidrio	100	Agregar (H ₂ SO ₄) hasta pH ≤ 2	Hasta 28 días
Nitratos	Plástico o vidrio	200	Agregar (H ₂ SO ₄) hasta pH ≤ 2	Hasta 28 días
Microbiológicos	Vidrio estéril	200	Refrigerar	Hasta 30 horas

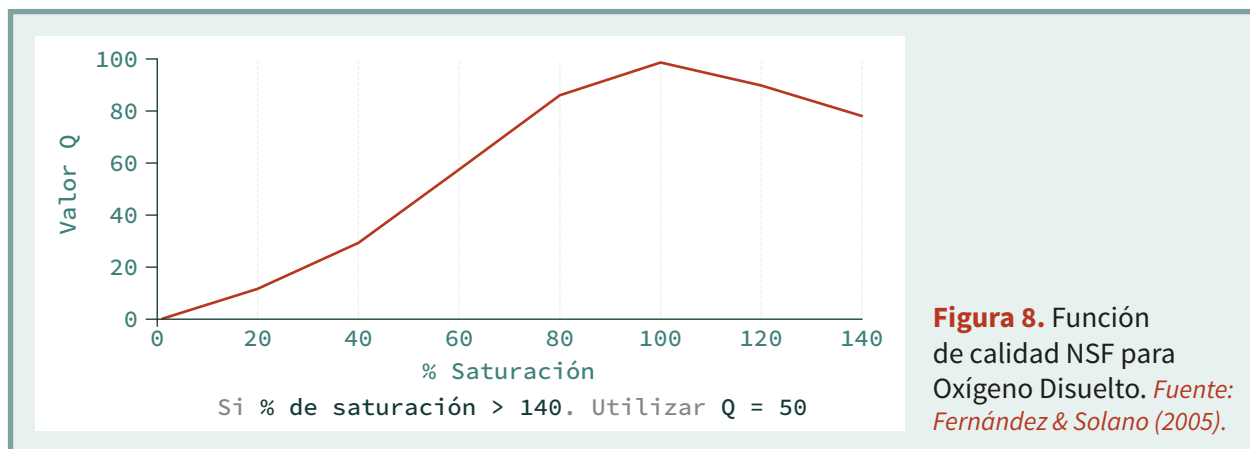
Índices de calidad físico-química evaluados

Para determinar la calidad físico-química del agua se evaluaron ocho índices, utilizando como referencia, para realizar la comparación de los resultados, el índice NSF-WQI por ser ampliamente utilizado a nivel mundial y por considerarse confiable en los estudios de calidad físico-química del agua superficial (Fernández et al., 2003).

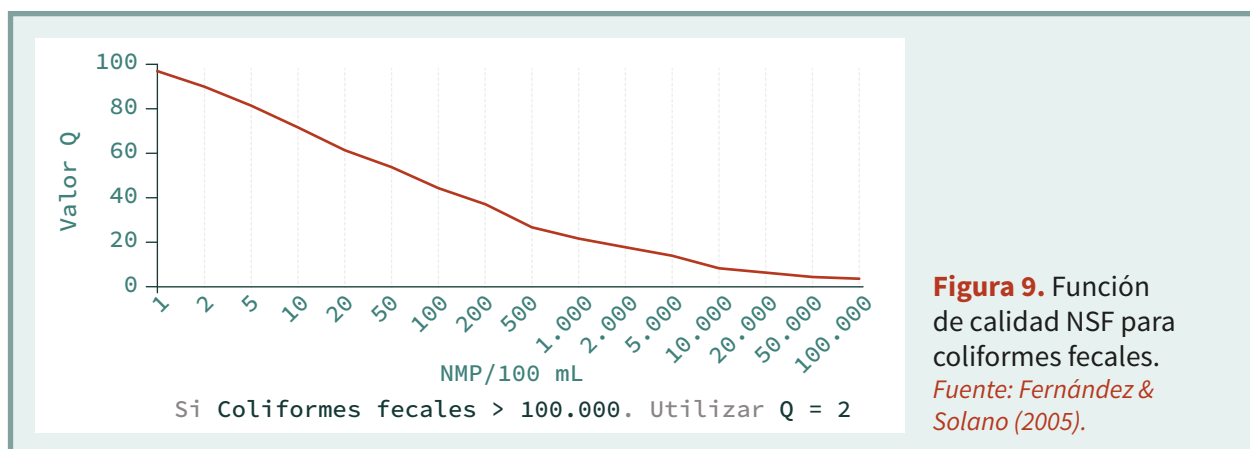
Metodología para el cálculo del NSF-WQI

Una vez obtenidos los parámetros físico-químicos *in situ* y *ex situ* de las corrientes de agua, se hace la transformación para obtener los valores de calidad (Qi), utilizando las siguientes funciones:

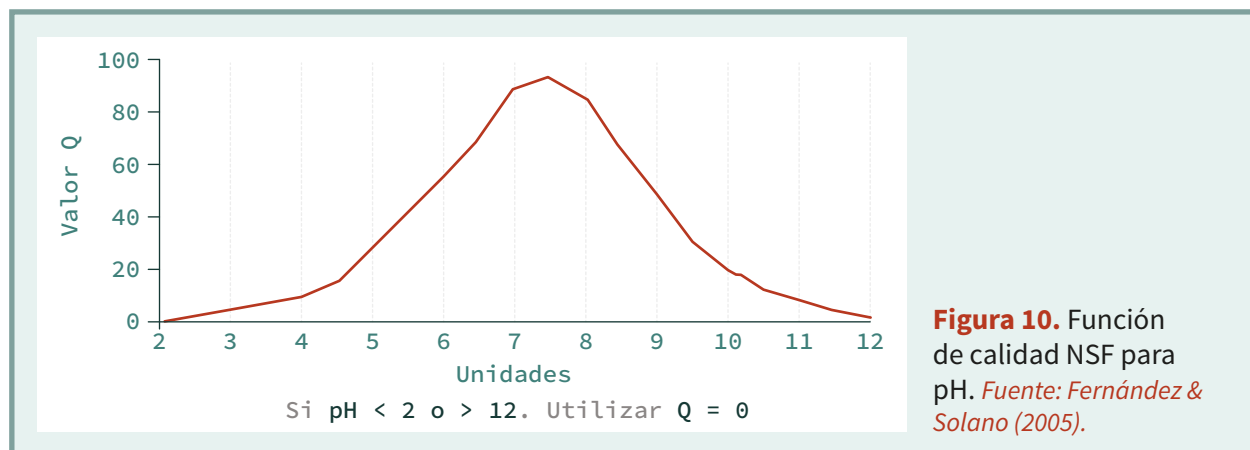
Función de calidad NSF para oxígeno disuelto



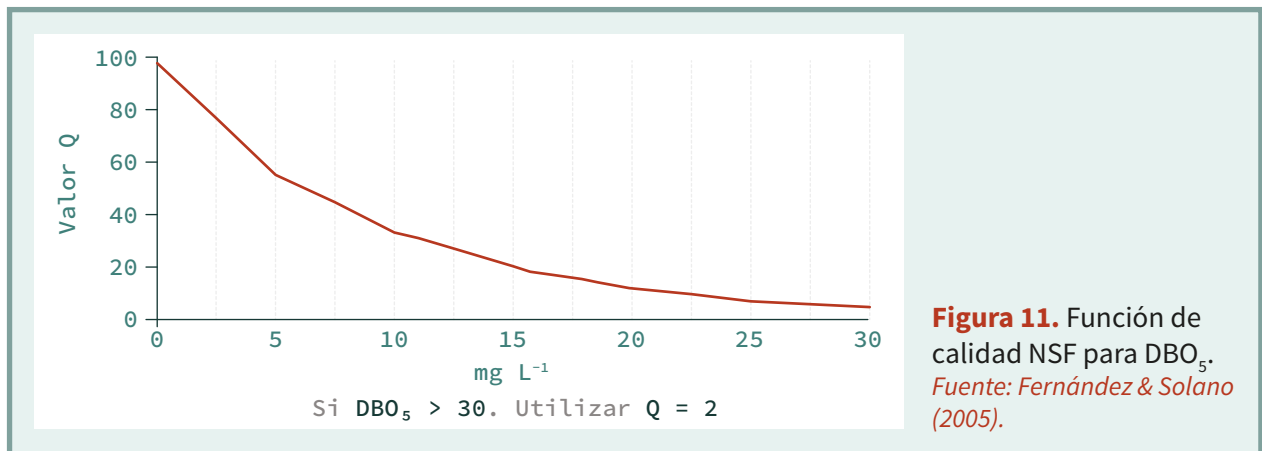
Función de calidad NSF para coliformes fecales



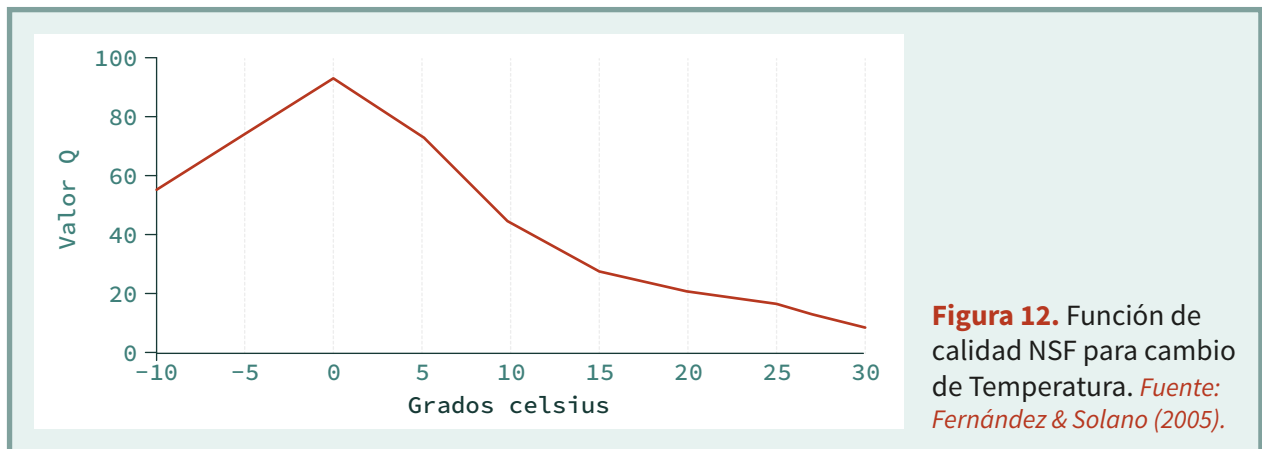
Función de calidad NSF para pH



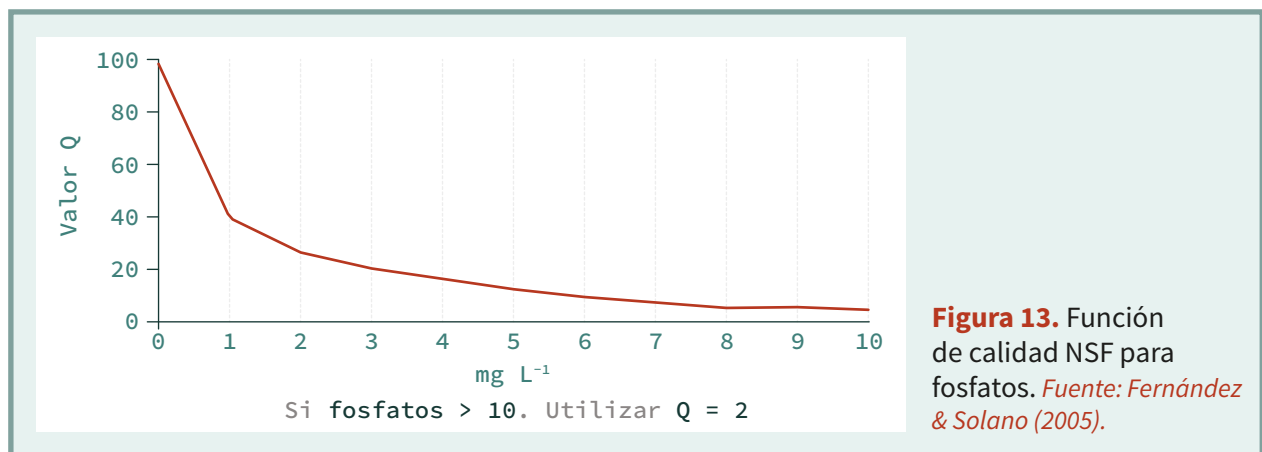
Función de calidad NSF para DBO_5



Función de calidad NSF para cambio de temperatura



Función de calidad NSF para fosfatos



Función de calidad NSF para nitratos

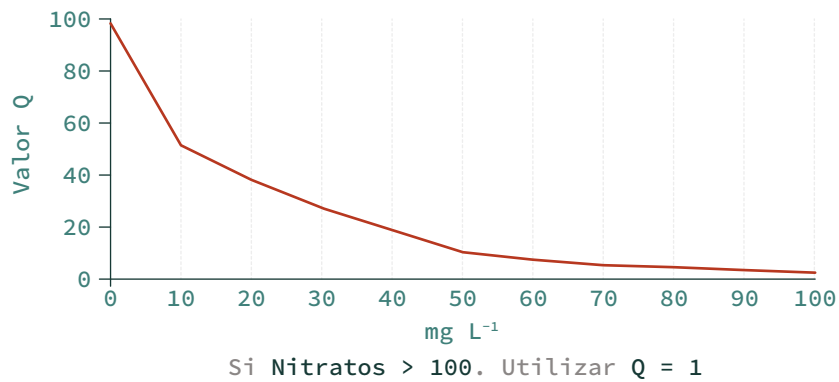


Figura 14. Función de calidad NSF para nitratos. Fuente: *Fernández & Solano (2005)*.

Función de calidad NSF para turbidez

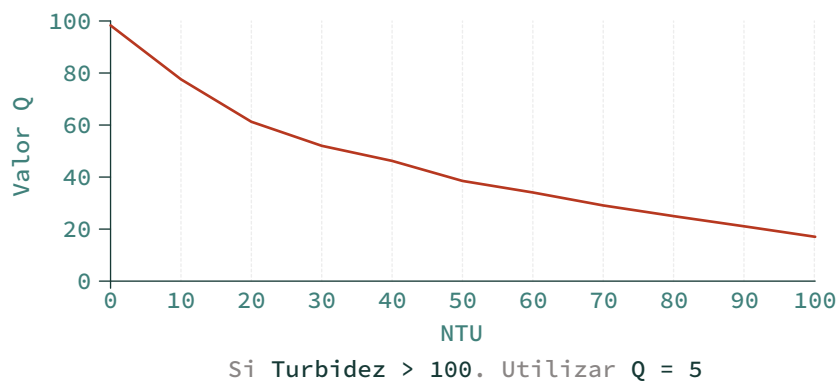


Figura 15. Función de calidad NSF para turbidez. Fuente: *Fernández & Solano (2005)*.

Función de calidad NSF para sólidos totales

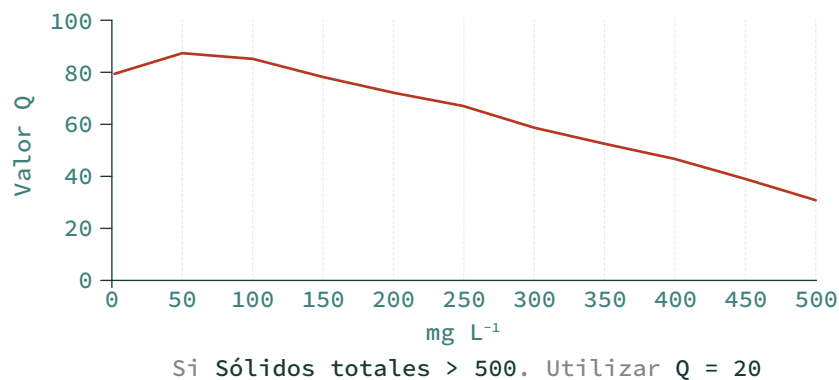


Figura 16. Función de calidad NSF para sólidos totales. Fuente: *Fernández & Solano (2005)*.

Una vez encontrados los valores de Calidad (Q_i) de cada variable, se multiplica por el factor de ponderación (W_i) presentado en la Tabla 12 y se hace la sumatoria respectiva (Ecuación <17>) para obtener el valor del índice, el cual se clasifica de acuerdo con las categorías de calidad presentadas en la Tabla 13.

$$NSF - WQI = \sum_{i=1}^n Q_i W_i \quad <17>$$

Donde:

NSF-WQI = Índice de calidad del agua.

Q_i = Valor de calidad de cada parámetro.

W_i : Factor de ponderación de cada parámetro.

Metodología para el cálculo del I-WQI. Una vez obtenidos los parámetros físico-químicos *in situ* y *ex situ* de las corrientes de agua, se introducen sus valores en la Ecuación <7> para obtener el valor del índice, el cual se clasifica de acuerdo con las categorías de calidad presentadas en la Tabla 14.

Metodología para el cálculo del O-WQI. Una vez obtenidos los parámetros físico-químicos *in situ* y *ex situ* de las corrientes de agua, se hace la transformación para obtener los valores de calidad (SI_i), utilizando las siguientes ecuaciones:

Subíndice de Temperatura (SI_T)

Si $T \leq 11^\circ C$. Utilizar $SI_T = 100$

Para $11^\circ C < T \leq 29^\circ C$

Utilizar $SI_T = 76,54007 + 4,172431 * T - 0,1623171 * T^2 - 2,055666 * 10^{-3} * T^3$

Si $29^\circ C < T$. Utilizar $SI_T = 10$

Subíndice de Oxígeno (SI_{OD})

Para un porcentaje de saturación de oxígeno (DO_s) $\leq 100\%$ y:

Concentración de oxígeno disuelto (DO_c) $\leq 3,3 \frac{mg}{L}$. Utilizar $SI_{DO} = 10$

Si $3,3 \frac{mg}{L} < DO_c \leq 10,5 \frac{mg}{L}$. Utilizar $SI_{DO} = -80,28954 + 31,88249 * DO_c - 1,400999 * DO_c^2$

Si $10,5 \frac{mg}{L} \leq DO_c$. Utilizar $SI_{DO} = 100$

Para $100\% < DO_s \leq 275\%$. Utilizar $SI_{DO} = 100^{((DO_s - 100) * (-1,197429^{-2}))}$

Si $275\% < DO_s$. Utilizar $SI_{DO} = 10$

Subíndice de DBO (SI_{DBO})

Si $DBO \leq 8 \frac{mg}{L}$. Utilizar $SI_{DBO} = 100 \times e^{(DBO * (-0,199314))}$

Si $8 \frac{mg}{L} < DBO$. Utilizar $SI_{DBO} = 10$

Subíndice pH (SI_{pH})

Si $pH < 4$. Utilizar $SI_{pH} = 10$

Para $4 \leq pH < 7$. Utilizar $SI_{pH} = 2,628419 \times e^{(pH * 0,520025)}$

Si $7 \leq pH = 8$. Utilizar $SI_{pH} = 100$

Si $8 \leq pH = 11$. Utilizar $SI_{pH} = 100 \times e^{((pH - 8) * (-0,5187742))}$

Si $pH > 11$. Utilizar $SI_{pH} = 10$

Subíndice sólidos totales (SI_{ST})

Si $ST \leq 40 \frac{mg}{L}$. Utilizar $SI_{ST} = 100$

Si $40 \frac{mg}{L} < ST = 280 \frac{mg}{L}$. Utilizar $SI_{ST} = 123,43562 \times e^{(TS) \times (-5,29647 \times 10^{-3})}$

Si $ST > 280 \frac{mg}{L}$. Utilizar $SI_{ST} = 10$

Subíndice de coliformes fecales (SI_{CF})

Si $CF \leq 50 \frac{UFC}{100 mL}$. Utilizar $SI_{CF} = 98$

Si $50 \frac{UFC}{100 mL} < CF \leq 1600 \frac{UFC}{100 mL}$. Utilizar $SI_{CF} = 98 \times e^{((CF - 50) \times (-9,917754 \times 10^{-4}))}$

Si $CF > 1600 \frac{UFC}{100 mL}$. Utilizar $SI_{CF} = 10$

Subíndice de nutrientes (SI_N - SI_P)

N: Amonio y nitritos.

Si $N \leq 3 \frac{mg}{L}$. Utilizar $SI_N = 100 \times e^{(N \times (-0,460512))}$

Si $N > 3 \frac{mg}{L}$. Utilizar $SI_N = 10$

P: Fósforo total.

$$\text{Si } P \leq 0,25 \frac{\text{mg}}{\text{L}} . \text{ Utilizar } SI_p = 100 - 299,5406 \times P - 0,1384108 \times P^2$$

$$\text{Si } P > 0,25 \frac{\text{mg}}{\text{L}} . \text{ Utilizar } SI_p = 10$$

Una vez encontrados los valores de Calidad SI_i de cada variable se aplica la **Ecuación <8>** para obtener el valor del índice, el cual se clasifica de acuerdo con las categorías de calidad presentadas en la Tabla 15.

Metodología para el cálculo del ISQA. Una vez obtenidos los parámetros físico-químicos *in situ* y *ex situ* de las corrientes de agua, se hace la transformación para obtener los valores de calidad (E, A, B, C, D), utilizando las siguientes ecuaciones:

Temperatura (E)

E= Temperatura (°C) puede tomar valores comprendidos entre 0,8 y 1,0.

$$E = 1 \text{ Si } T \leq 20^\circ \text{C}$$

$$E = 1 - (T - 20) \times 0,0125 \text{ Si } T > 20^\circ \text{C}$$

Demanda química de oxígeno (A)

A= Demanda química de oxígeno (mg L^{-1}) puede tomar valores entre 0 y 30.

$$A = 30 - DQO \text{ Si } DQO \leq 10 \text{ mg L}^{-1}$$

$$A = 21 - (0,35 \times DQO) \text{ Si } 60 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \geq DQO > 10 \text{ mg L}^{-1}$$

$$A = 0 \text{ Si } DQO > 60 \text{ mg L}^{-1}$$

Sólidos suspendidos totales (B)

B= Sólidos Suspendidos Totales (mg L^{-1}) puede tomar valores entre 0 y 25.

$$B = 25 - (0,15 \times SST) \text{ Si } SST \leq 100 \text{ mg L}^{-1}$$

$$B = 17 - (0,07 \times SST) \text{ Si } 250 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \geq SST > 100 \text{ mg L}^{-1}$$

$$B = 0 \text{ Si } SST > 250 \text{ mg L}^{-1}$$

Oxígeno disuelto (C)

C= Oxígeno disuelto (mg L^{-1}) puede tomar valores comprendidos 0 y 25.

$$C = 2,5 \times O_2 \text{ Si } O_2 < 10 \text{ mg L}^{-1}$$

$$C = 25 \text{ Si } O_2 \geq 10 \text{ mg L}^{-1}$$

Conductividad eléctrica (D)

D=Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$) a 18°C . Si se mide a 25°C , se multiplica el valor por 0,86 para obtener la conversión a 18°C .

$$D = (3,6 - \log(CE)) \times 15,4 \text{ Si } CE \leq 4.000 \mu\text{S cm}^{-1}$$

$$D = 0 \text{ Si } CE > 4.000 \mu\text{S cm}^{-1}$$

*Cuando se obtengan valores de **D** mayores a 20 se asigna 20 al valor de calidad.

Una vez encontrados los valores de Calidad (E, A, B, C, D) de cada variable se aplica la **Ecuación <9>** para obtener el valor del índice, el cual se clasifica de acuerdo con las categorías de calidad presentadas en la Tabla 16.

Metodología para el cálculo de los índices del IDEAM. Una vez determinados los valores de los parámetros *in situ* y *ex situ*, se hace una transformación de las variables, para obtener valores de calidad utilizando las siguientes expresiones:

Valores de calidad (I_{OD}) para la variable oxígeno disuelto, expresada como porcentaje de saturación

Cuando el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto es menor o igual al 100%:

$$I_{OD} = 1 - (1 - 0,01 \times PS_{OD})$$

Cuando el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto es mayor al 100%:

$$I_{OD} = 1 - (0,01 \times PS_{OD} - 1)$$

Valores de calidad (I_{SST}) para la variable sólidos suspendidos totales, expresada en mg L^{-1}

$$I_{SST} = 1 - (-0,02 + 0,003 \times SST)$$

$$\text{Si } SST \leq 4,5 \text{ entonces } I_{SST} = 1$$

$$\text{Si } SST \leq 320 \text{ entonces } I_{SST} = 0$$

Valores de calidad (I_{DQO}) para la variable demanda química de oxígeno, expresada en mg L^{-1}

$$\text{Si } DQO \leq 20 \text{ entonces } I_{DQO} = 0,91$$

$$\text{Si } 20 < DQO \leq 25 \text{ entonces } I_{DQO} = 0,71$$

$$\text{Si } 25 < DQO \leq 40 \text{ entonces } I_{DQO} = 0,51$$

$$\text{Si } 40 < DQO \leq 80 \text{ entonces } I_{DQO} = 0,26$$

$$\text{Si } DQO > 80 \text{ entonces } I_{DQO} = 0,125$$

Valores de calidad (I_{CE}) para la variable Conductividad Eléctrica, expresada en $\mu\text{S cm}^{-1}$

$$I_{C.E.} = 1 - 10^{(3,26 + 1,34 \log_{10}(CE))}$$

$$\text{Si } I_{C.E.} < 0 \text{ entonces } I_{C.E.} = 0$$

Valores de calidad (I_{pH}) para la variable pH, expresada en unidades

$$\text{Si } pH < 4 \text{ entonces } I_{pH} = 0,1$$

$$\text{Si } 4 \leq pH \leq 7 \text{ entonces } I_{pH} = 0,02628419 \times e^{(pH * 0,520025)}$$

$$\text{Si } 7 < pH \leq 8 \text{ entonces } I_{pH} = 1$$

$$\text{Si } 8 < pH \leq 11 \text{ entonces } I_{pH} = 1 * e^{((pH - 8) * -0,518774)}$$

$$\text{Si } pH > 11 \text{ entonces } I_{pH} = 0,1$$

Valores de calidad ($I_{NT/PT}$) para la variable N_T/P_T

$$\text{Si } 15 \leq NT/PT \leq 20 \text{ entonces } I_{NT/PT} = 0,8$$

$$\text{Si } 10 < NT/PT < 15 \text{ entonces } I_{NT/PT} = 0,6$$

$$\text{Si } 10 < NT/PT \leq 10 \text{ entonces } I_{NT/PT} = 0,35$$

$$\text{Si } NT/PT \leq 5, \text{ ó } NT/PT > 20 \text{ entonces } I_{NT/PT} = 0,15$$

Una vez encontrados los valores de Calidad I_i de cada variable, se multiplica por el factor de ponderación (W_i) presentado en las Tablas 17 y 18 y se hace la sumatoria respectiva (Ecuación <10>) para obtener el valor del índice, el cual se clasifica de acuerdo con las categorías de calidad presentadas en la Tabla 19.

Metodología para el cálculo de los índices ICO. Una vez determinados los valores de los parámetros *in situ* y *ex situ*, se hace una transformación de las variables, para obtener valores de calidad utilizando las siguientes expresiones:

Índice de Contaminación por Materia Orgánica - ICOMO

Se calcula utilizando la **Ecuación <18>**.

$$ICOMO = \frac{1}{3} (I_{DBO_5} + I_{coliformes} + I_{oxígeno\%}) \quad <18>$$

Para la determinación de los valores de calidad I_i , se utilizan las siguientes expresiones:

$$I_{DBO_5} = -0,05 + 0,70 \log_{10} (DBO_5) \text{ mg L}^{-1}$$

$$\text{Si } DBO_5 > 30 \text{ (mg/L) entonces } I_{DBO_5} = 1$$

$$\text{Si } DBO_5 < 2 \text{ (mg/L) entonces } I_{DBO_5} = 0$$

$$I_{Coliformes\ Totales} = -1,44 + 0,56 \log_{10} (Col. Tot (NMP/100))$$

$$\text{Si } Coliformes\ Totales > 20.000 \text{ (NMP/100 mL) entonces } I_{coliformes} = 1$$

$$\text{Si } Coliformes\ Totales < 500 \text{ (NMP/100 mL) entonces } I_{coliformes} = 0$$

$$I_{Oxígeno\%} = 1 - 0,01 \times \text{Oxígeno\%}$$

$$\text{Si } Oxígeno > 100 \text{ (\%)} \text{ entonces } I_{oxígeno\%} = 0$$

Con los valores de calidad (I_i) se reemplazan en la **Ecuación <18>** para obtener el valor del índice, el cual se clasifica de acuerdo con las categorías de calidad presentadas en la Tabla 20.

Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos- ICOSUS.

Se calcula utilizando la **Ecuación <19>**.

$$I_{COSUS} = -0,02 + 0,0003 * \text{Sólidos Suspendidos} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \quad <19>$$

$$\text{Si } \text{Sólidos Suspendidos} > 340 \text{ (mg/L) entonces } I_{cosus} = 1$$

$$\text{Si } \text{Sólidos Suspendidos} < 10 \text{ (mg/L) entonces } I_{cosus} = 0$$

Una vez obtenido el valor del índice, se clasifica de acuerdo con las categorías de calidad presentadas en la Tabla 20.



Resultados y discusión

A partir de las diferentes campañas de monitoreo, se tomaron los datos *in situ* y *ex situ* de las características físico-químicas del agua presente en las 25 microcuencas seleccionadas para el estudio, y a través de las respectivas funciones de calidad y sus ponderaciones se obtuvieron los diferentes índices de calidad.

La primera campaña de monitoreo se estableció como la línea base de la calidad del agua de las microcuencas y a partir de esta fecha se iniciaron con diferentes estrategias para mejorar la calidad del agua superficial a través del Programa Gestión Inteligente del Agua (GIA) “Manos al Agua”, el cual integró parámetros clave, que incidieron en la protección y conservación de los recursos hídricos en las zonas productoras de café, para contribuir al desarrollo rural sostenible, con cuatro pilares estratégicos: 1. Agua Responsabilidad de Todos; 2. Agua para una Caficultura Sostenible; 3. Ecosistemas Hídricos Estratégicos; 4. Decisiones Responsables Frente al Agua.

El Proyecto GIA se implementó en 25 microcuencas cafeteras, con un área total de 148.754 ha, seleccionadas de acuerdo con su importancia y ubicación estratégica en el territorio, con el fin de mejorar la disponibilidad de agua en cantidad y calidad, y buscar disminuir la vulnerabilidad del territorio a la disponibilidad hídrica afectada por el cambio climático y la contaminación, y contribuir de esta manera a mantener la permanencia de la caficultura en el tiempo.

Este proyecto involucró la sensibilización y capacitación a 11.631 familias caficultoras de las microcuencas a través de herramientas lúdicas, elaboradas considerando el nivel de escolaridad y la edad de las personas que formaron parte de la población objetivo y con el apoyo de profesionales del Servicio de Extensión de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

Los instrumentos para el mejoramiento de la calidad y la cantidad de agua en las microcuencas involucraron: la reforestación (más de 350 ha), la aplicación de 50 acciones de restauración ecológica con obras de bioingeniería y del manejo integrado del suelo, la instalación de plantas de tratamiento para las aguas residuales de las viviendas y para las aguas residuales del beneficio del café en los pobladores cercanos a las fuentes de agua, el monitoreo hidroclimático mediante la instalación de 25 estaciones climatológicas automáticas y tres estaciones hidrológicas, con el propósito de generar alertas tempranas que le entregaran a los pobladores información oportuna sobre la dinámica del agua en la zona y de esta forma pudieran optimizar sus labores agrícolas y sus necesidades básicas y de seguridad.

En la línea base del Proyecto GIA se encontró que muy pocos caficultores tenían sistemas de tratamiento para el agua residual doméstica, lo cual genera un impacto ambiental negativo en el suelo y el agua. En el monitoreo dinámico realizado a los cuerpos de agua en las microcuencas del proyecto se demostró que los efluentes domésticos tienen un impacto más alto en la contaminación del agua de lo que se esperaba, por lo tanto, es importante realizar un tratamiento a estos efluentes.

En el proyecto se realizaron aproximadamente 1.708 intervenciones en sistemas de tratamiento de agua residual doméstica, que representaron una disminución de la contaminación en un 37% en términos de carga orgánica.

En la línea base se encontró que muy pocas fincas cuentan con tratamiento para las aguas residuales del café, por lo que se realizó una gran contribución para mejorar el tratamiento de las aguas residuales del café, con varias alternativas: fosas de recirculación, sistemas anaeróbicos y filtros verdes. Se realizaron alrededor de 1.638 intervenciones en sistemas de tratamiento de aguas residuales del beneficio del café, distribuidas entre tratamiento primario, secundario y humedales artificiales, lo que permitió una reducción de la contaminación en un 29,5%.

Este proyecto involucró el abastecimiento de agua a los productores mediante la implementación de nanofiltros y su uso eficiente a través del ahorro de agua mediante el uso de dispositivos instalados en las viviendas y en las infraestructuras de los beneficiaderos de café.

Adicionalmente, se utilizó la estrategia de enfocar las implementaciones en el 25% del total de las fincas ubicadas en las microcuencas seleccionadas, considerando el grado de afectación directo a los cuerpos de agua. Para ello, se seleccionaron las fincas ubicadas en las zonas de intervención priorizadas, que estaban situadas a menos de 200 m de los cuerpos de agua y que generaban un impacto negativo significativo sobre el recurso hídrico.

Resultados para el índice NSF-WQI

Los resultados del valor del índice de calidad NSF-WQI para las cuatro campañas de monitoreo y su promedio se presentan en la Tabla 34.

A través del índice NSF-WQ1 se determinó, para las microcuencas del Departamento de Antioquia, un valor promedio inicial de calidad físico-química del agua de 81,80 (Categoría Buena) para los puntos 1 (antes de ingreso del agua a la zona cafetera) y un valor de 76,80 (Categoría Buena) para los puntos 2 (a la salida del agua de la zona cafetera). Después de dos años de monitoreo (cuatro campañas) y la implementación de un Proyecto de Gestión Integral del Agua (GIA) en la zona cafetera, (implementado después del punto 1 y evaluado en el punto 2), se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 76,00 (Categoría Buena) para los puntos 1 y de 70,45 (Categoría Media) para los puntos 2, numéricamente inferior al valor del punto 2 encontrado en la línea base, lo cual se explica porque el primer monitoreo, que se utilizó como línea base, se realizó en los 2 puntos de monitoreo en época sin cosecha de café, tal como se presenta en la Tabla 32.

El valor del índice de calidad encontrado en el punto 1 tiene influencia en el valor del índice de calidad encontrado en el punto 2, dado que el cuerpo de agua no tiene la capacidad de

autodepurarse completamente en el transecto entre los 2 puntos de monitoreo y adicionalmente recibe las descargas de las aguas residuales domésticas, agrícolas y de producción animal, de los pobladores de la microcuenca. Por lo tanto, una disminución en el índice de calidad en el punto 1 afecta negativamente el valor del índice de calidad en el punto 2.

Para el caso concreto de las microcuencas de Antioquia, el valor promedio del índice de calidad en el punto 2, después de las implementaciones, no presentó un valor mayor al encontrado en la línea base, por las dos razones expuestas: 1. El monitoreo que se utilizó como línea base se realizó en época sin cosecha de café y 2. El deterioro paulatino del índice de calidad en el punto 1 afectó el valor del índice de calidad del punto 2.

Para el caso de las microcuencas del Departamento de Caldas, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 83,00 (Categoría Buena) y para los puntos 2 fue de 68,40 (Categoría Media). Después de cuatro campañas de monitoreo y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 75,10 (Categoría Buena) para los puntos 1 y de 69,55 (Categoría Media) para los puntos 2. En estas microcuencas se observa un deterioro de la calidad físico-química del agua en los puntos 1 (no intervenidos por el programa) y un mejoramiento en la calidad físico-química del agua en los puntos 2 (en los cuales se aplicó el programa).

Tabla 34. Resultados del valor del índice NSF-WQI en 25 microcuencas cafeteras durante cuatro campañas de muestreo.

Índice NSF-WQI							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Departamento de Antioquia							
Pueblorrico	La Leona	1	82,00	78,00	74,00	73,00	76,75
		2	76,00	68,00	73,00	68,00	71,25
Andes	La Chaparrala	1	87,00	75,00	74,00	72,00	77,00
		2	77,00	68,00	68,00	66,00	69,75
Jardín	San Bartolo	1	73,00	68,00	73,00	68,00	70,50
		2	73,00	63,00	67,00	59,00	65,50
Salgar	La Gulunga	1	85,00	78,00	76,00	70,00	77,25
		2	81,00	65,00	76,00	68,00	72,50
Abejorral	La Liborina	1	82,00	78,00	75,00	79,00	78,50
		2	77,00	71,00	75,00	70,00	73,25

Continúa...

... Continuación Tabla 34.

Índice NSF-WQI							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Departamento de Caldas							
Salamina	La Frisolera	1	93,00	74,00	66,00	68,00	75,25
		2	68,00	73,00	67,00	68,00	69,00
Aguadas	Edén-Bareño	1	79,00	76,00	71,00	72,00	74,50
		2	66,00	71,00	65,00	71,00	68,25
Marquetalia	Los Saínos	1	83,00	78,00	75,00	80,00	79,00
		2	67,00	73,00	72,00	70,00	70,50
Pácora	Pácora	1	74,00	70,00	69,00	67,00	70,00
		2	68,00	68,00	65,00	69,00	67,50
Pensilvania	La Linda	1	86,00	76,00	68,00	77,00	76,75
		2	73,00	76,00	70,00	71,00	72,50
Departamento del Cauca							
Balboa	Capitanes	1	86,00	73,00	72,00	79,00	77,50
		2	84,00	64,00	62,00	79,00	72,25
Inzá	La Chorrera	1	85,00	76,00	75,00	84,00	80,00
		2	71,00	70,00	70,00	71,00	70,50
La Sierra	La Esmita	1	86,00	79,00	79,00	74,00	79,50
		2	84,00	79,00	78,00	79,00	80,00
Rosas	El Marqués	1	85,00	73,00	80,00	78,00	79,00
		2	74,00	74,00	80,00	76,00	76,00
Sotará	Quilcacé	1	76,00	78,00	70,00	76,00	75,00
		2	77,00	73,00	50,00	78,00	69,50

Continúa...

... Continuación Tabla 34.

Índice NSF-WQI							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Departamento de Nariño							
Consacá	Azufra	1	77,00	69,00	66,00	78,08	72,52
		2	62,00	57,00	59,00	68,43	61,61
Sandoná	El Ingenio	1	83,00	70,00	73,00	87,06	78,27
		2	62,00	64,00	69,00	78,69	68,42
Buesaco	Buesaquito	1	67,00	73,00	76,00	68,76	71,19
		2	56,00	65,00	74,00	68,20	65,80
La Unión	La Fragua	1	71,00	73,00	72,00	72,87	72,22
		2	62,00	61,00	69,00	69,60	65,40
San Lorenzo	El Molino	1	89,00	77,00	76,00	81,71	80,93
		2	72,00	74,00	73,00	79,40	74,60
Departamento del Valle del Cauca							
Bolívar	Platanares	1	78,00	75,00	67,00	69,00	72,25
		2	77,00	71,00	69,00	70,00	71,75
Caicedonia	Barragán	1	54,00	77,00	70,00	76,00	69,25
		2	60,00	69,00	65,00	78,00	68,00
Sevilla	San Marcos	1	88,00	75,00	71,00	70,00	76,00
		2	80,00	77,00	69,00	73,00	74,75
Tuluá	Bugalagrande	1	80,00	72,00	71,00	72,00	73,75
		2	53,00	69,00	65,00	76,00	65,75
Bugalagrande	La Paila	1	77,00	76,00	61,00	69,00	70,75
		2	64,00	70,00	65,00	70,00	67,25

Calidad excelente	Calidad buena	Calidad media	Calidad mala
--------------------------	----------------------	----------------------	---------------------

En las microcuencas del Departamento del Cauca, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 83,60 (Categoría Buena) y para los puntos 2 fue de 78,00

(Categoría Buena). Después de cuatro campañas de monitoreo y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 78,20 (Categoría Buena) para los puntos 1 y de 73,65 (Categoría Buena) para los puntos 2.

Se resalta, nuevamente, que el valor del índice de calidad encontrado en el punto 1, pasando de 83,60 en la línea base a 78,20 (5,40 unidades de diferencia), sin intervenciones de GIA en esta zona, tiene influencia en el valor del índice de calidad encontrado en el punto 2, pasando de 78,00 en la línea base a 73,65 (4,35 unidades de diferencia) con intervenciones de GIA en esta zona.

En las microcuencas del Departamento de Nariño, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 77,40 (Categoría Buena) y para los puntos 2 fue de 62,80 (Categoría Media). Después de cuatro campañas de monitoreo y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 75,03 (Categoría Buena) para los puntos 1 y de 67,17 (Categoría Media) para los puntos 2. En estas microcuencas se observa un deterioro de la calidad físico-química del agua en los puntos 1 (no intervenidos por el programa) y un mejoramiento en la calidad físico-química del agua en los puntos 2 (en los cuales se aplicó el programa).

En las microcuencas del Departamento del Valle del Cauca, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 75,40 (Categoría Buena) y para los puntos 2 fue de 66,80 (Categoría Media). Después de cuatro campañas de monitoreo y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 72,40 (Categoría Buena) para los puntos 1 y de 69,50 (Categoría Media) para los puntos 2. En estas microcuencas se observa un deterioro de la calidad físico-química del agua en los puntos 1 (no intervenidos por el programa) y un mejoramiento en la calidad físico-química del agua en los puntos 2 (en los cuales se aplicó el programa).

Finalmente, para el promedio de las 25 microcuencas evaluadas, aplicando el índice de calidad físico-química NSF-WQI, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 80,24 (Categoría Buena) y para los puntos 2 fue de 70,56 (Categoría Media). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 75,35 (Categoría Buena) para los puntos 1 y de 70,06 (Categoría Media) para los puntos 2, numéricamente inferior al valor del punto 2 encontrado en la línea base. En estas microcuencas se observa un mayor deterioro de la calidad físico-química del agua en los puntos 1 (no intervenidos por el programa), respecto a los puntos 2 (en los cuales se aplicó el programa). Tal como ya se ha expresado, una disminución en el índice de calidad en el punto 1 afecta negativamente el valor del índice de calidad en el punto 2.

En las Figuras 17 a 21 se presenta el aspecto de los puntos de muestreo de agua en las microcuencas de Antioquia durante las cuatro campañas de monitoreo.



Figura 17. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca La Chaparrala, Andes, Antioquia. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 18. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca La Leona, Pueblorrico, Antioquia. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 19. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca La Gulunga, Salgar, Antioquia. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 20. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca La Liborina, Abejorral, Antioquia. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 21. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca San Bartolo, Jardín, Antioquia. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.

Resultados para el índice IDEAM-ICA-5V

Los resultados del valor del índice de calidad IDEAM-ICA-5V para las cuatro campañas de monitoreo y su promedio se presentan en la Tabla 35.

A través del índice IDEAM-ICA-5V se determinó, para las microcuencas del Departamento de Antioquia, un valor promedio inicial de calidad físico-química del agua de 0,88 (Categoría Buena) para los puntos 1 (antes de ingreso del agua a la zona cafetera) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y un valor de 0,86 (Categoría Buena) para los puntos 2 (a la salida del agua de la zona cafetera) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de dos años de monitoreo (cuatro campañas) y la implementación del Proyecto GIA en la zona cafetera (implementado después del punto 1 y evaluado en el punto 2), se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,84 (Categoría Buena) para los puntos 1 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,80 (Categoría Buena) para los puntos 2 (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQ1).

Tabla 35. Resultados del valor del índice IDEAM-ICA-5V en 25 microcuencas cafeteras durante cuatro campañas de muestreo.

Índice IDEAM-ICA-5 Variables							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Departamento de Antioquia							
Pueblorrico	La Leona	1	0,87	0,94	0,84	0,87	0,88
		2	0,91	0,91	0,86	0,77	0,86
Andes	La Chaparrala	1	0,94	0,94	0,87	0,81	0,89
		2	0,92	0,84	0,83	0,63	0,81
Jardín	San Bartolo	1	0,81	0,73	0,74	0,73	0,75
		2	0,74	0,75	0,75	0,65	0,72
Salgar	La Gulunga	1	0,92	0,92	0,79	0,79	0,86
		2	0,90	0,87	0,85	0,64	0,81
Abejorral	La Liborina	1	0,84	0,90	0,78	0,78	0,82
		2	0,85	0,86	0,78	0,78	0,82

Continúa...

... Continuación Tabla 35.

Índice IDEAM-ICA-5 Variables							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Departamento de Caldas							
Salamina	La Frisolera	1	0,86	0,84	0,73	0,71	0,78
		2	0,58	0,79	0,70	0,69	0,69
Aguadas	Edén-Bareño	1	0,66	0,73	0,65	0,63	0,67
		2	0,58	0,69	0,62	0,78	0,67
Marquetalia	Los Saínos	1	0,92	0,91	0,82	0,95	0,90
		2	0,73	0,92	0,82	0,60	0,77
Pácora	Pácora	1	0,91	0,88	0,79	0,75	0,83
		2	0,70	0,82	0,74	0,77	0,76
Pensilvania	La Linda	1	0,93	0,91	0,80	0,97	0,90
		2	0,91	0,93	0,82	0,85	0,88
Departamento del Cauca							
Balboa	Capitanes	1	0,89	0,80	0,81	0,77	0,82
		2	0,92	0,72	0,73	0,74	0,78
Inzá	La Chorrera	1	0,90	0,88	0,76	0,77	0,83
		2	0,69	0,73	0,74	0,66	0,70
La Sierra	La Esmita	1	0,93	0,91	0,88	0,74	0,87
		2	0,80	0,69	0,70	0,69	0,72
Rosas	El Marqués	1	0,85	0,82	0,82	0,69	0,79
		2	0,80	0,81	0,75	0,72	0,77
Sotará	Quilcacé	1	0,84	0,87	0,72	0,77	0,80
		2	0,83	0,80	0,53	0,85	0,75
Departamento de Nariño							
Consacá	Azufra	1	0,58	0,58	0,44	0,49	0,52
		2	0,57	0,44	0,40	0,53	0,49

Continúa...

... Continuación Tabla 35.

Índice IDEAM-ICA-5 Variables							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Sandóná	El Ingenio	1	0,87	0,91	0,76	0,83	0,84
		2	0,64	0,69	0,74	0,72	0,70
Buesaco	Buesaquito	1	0,82	0,93	0,79	0,65	0,80
		2	0,62	0,75	0,74	0,68	0,70
La Unión	La Fragua	1	0,86	0,88	0,79	0,80	0,83
		2	0,74	0,75	0,77	0,71	0,74
San Lorenzo	El Molino	1	0,90	0,92	0,79	0,79	0,85
		2	0,75	0,71	0,79	0,78	0,76
Departamento del Valle del Cauca							
Bolívar	Platanares	1	0,89	0,88	0,76	0,77	0,82
		2	0,87	0,84	0,73	0,76	0,80
Caicedonia	Barragán	1	0,58	0,81	0,78	0,71	0,72
		2	0,51	0,76	0,73	0,71	0,68
Sevilla	San Marcos	1	0,90	0,87	0,79	0,79	0,84
		2	0,83	0,85	0,72	0,71	0,78
Tuluá	Bugalagrande	1	0,87	0,83	0,69	0,79	0,80
		2	0,54	0,78	0,67	0,77	0,69
Bugalagrande	La Paila	1	0,85	0,83	0,65	0,83	0,79
		2	0,84	0,72	0,56	0,70	0,70

Calidad buena	Calidad aceptable	Calidad regular	Calidad mala
----------------------	--------------------------	------------------------	---------------------

Para el caso de las microcuencas del Departamento de Caldas, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,86 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,70 (Categoría Media) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,82

(Categoría Buena) para los puntos 1 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,75 (Categoría Buena) para los puntos 2 (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI).

En las microcuencas del Departamento del Cauca, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,88 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,81 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,82 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) para los puntos 1 y de 0,74 (Categoría Buena) para los puntos 2 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI).

En las microcuencas del Departamento de Nariño, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,81 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,66 (Categoría Media) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,77 (Categoría Buena) para los puntos 1 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,68 (Categoría Media) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) para los puntos 2.

En las microcuencas del Departamento del Valle del Cauca, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,82 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,72 (Categoría Buena) (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,79 (Categoría Buena) para los puntos 1 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,73 (Categoría Buena) para los puntos 2 (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI).

Finalmente, para el promedio de las 25 microcuencas evaluadas, aplicando el índice de calidad físico-química IDEAM-ICA-5V, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,85 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,75 (Categoría Buena) (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,81 (Categoría Buena) para los puntos 1 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,74 (Categoría Buena) para los puntos 2 (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI).

En las Figuras 22 a 26 se presenta el aspecto de los puntos de muestreo de agua en las microcuencas de Caldas durante las cuatro campañas de monitoreo.

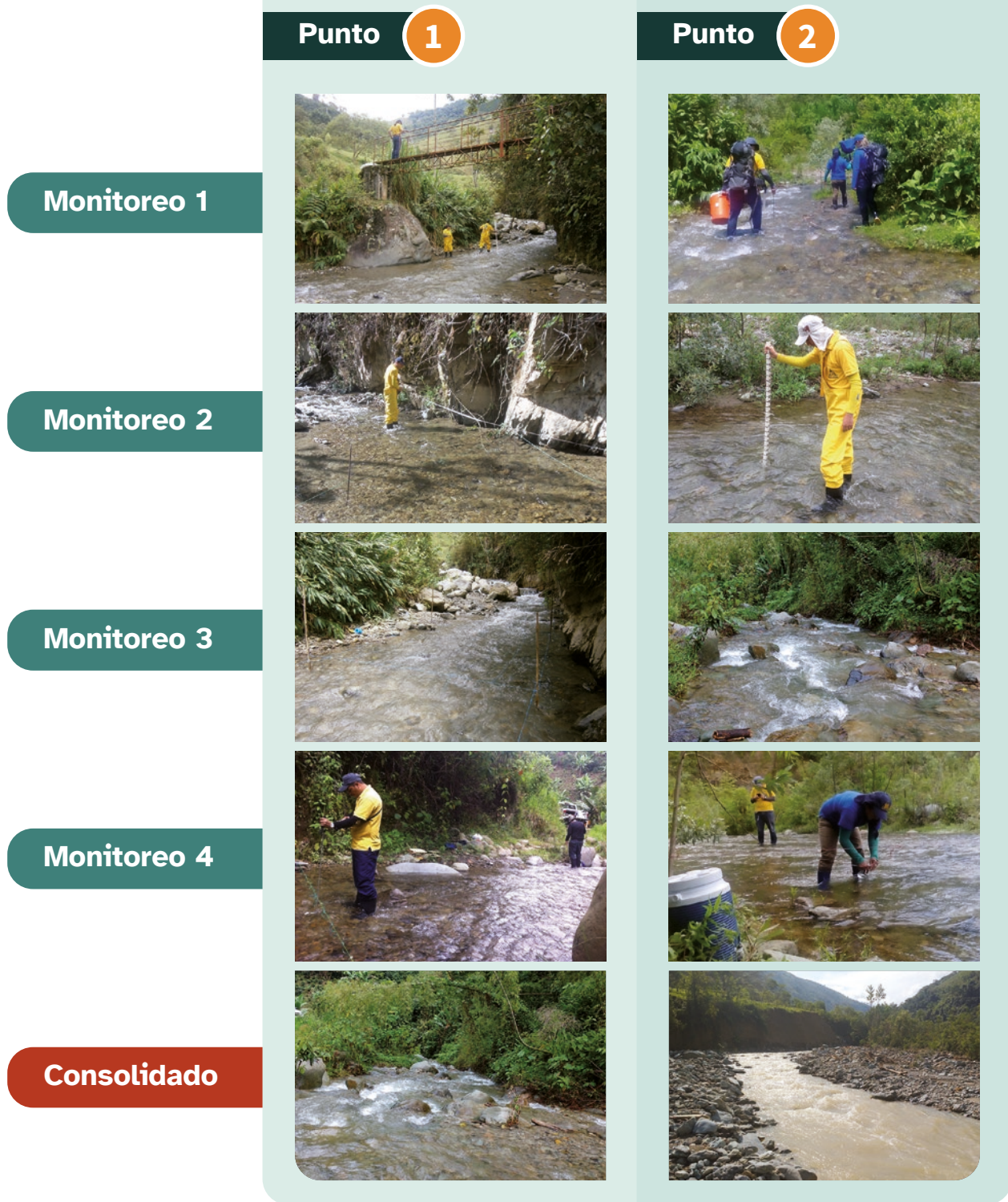


Figura 22. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca La Frisolera, Salamina, Caldas. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 23. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca Los Saínos, Marquetalia, Caldas. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 24. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca La Linda, Pensilvania, Caldas. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 25. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca Edén-Bareño, Aguadas, Caldas. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 26. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca Río Pácora, Pácora, Caldas. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.

Resultados para el índice IDEAM-ICA-6V

Los resultados del valor del índice de calidad IDEAM-ICA-6V para las cuatro campañas de monitoreo y su promedio se presentan en la Tabla 36.

A través del índice IDEAM-ICA-6V se determinó, para las microcuencas del Departamento de Antioquia, un valor promedio inicial de calidad físico-química del agua de 0,79 (Categoría Buena) para los puntos 1 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y un valor de 0,78 (Categoría Buena) para los puntos 2 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de dos años de monitoreo (cuatro campañas) y la implementación del Proyecto GIA en la zona cafetera, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,76 (Categoría Buena) para los puntos 1 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,72 (Categoría Buena) para los puntos 2 (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI).

Para el caso de las microcuencas del Departamento de Caldas, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,77 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,65 (Categoría Media) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,73 (Categoría Buena) para los puntos 1 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,68 (Categoría Media) para los puntos 2 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI).

Tabla 36. Resultados del valor del índice IDEAM-ICA-6V en 25 microcuencas cafeteras durante cuatro campañas de muestreo.

Índice IDEAM-ICA-6 Variables							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Departamento de Antioquia							
Pueblorrico	La Leona	1	0,78	0,92	0,76	0,83	0,82
		2	0,78	0,78	0,77	0,66	0,75
Andes	La Chaparrala	1	0,80	0,84	0,78	0,72	0,79
		2	0,90	0,72	0,75	0,57	0,74
Jardín	San Bartolo	1	0,77	0,63	0,67	0,63	0,67
		2	0,71	0,64	0,65	0,56	0,64

Continúa...

... Continuación Tabla 36.

Índice IDEAM-ICA-6 Variables							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Salgar	La Gulunga	1	0,86	0,90	0,68	0,79	0,81
		2	0,80	0,75	0,73	0,59	0,72
Abejorral	La Liborina	1	0,73	0,84	0,67	0,70	0,73
		2	0,73	0,78	0,70	0,70	0,73
Departamento de Caldas							
Salamina	La Frisolera	1	0,74	0,80	0,62	0,61	0,69
		2	0,50	0,75	0,61	0,59	0,61
Aguadas	Edén-Bareño	1	0,57	0,66	0,59	0,58	0,60
		2	0,61	0,63	0,57	0,70	0,63
Marquetalia	Los Saínos	1	0,90	0,81	0,70	0,84	0,82
		2	0,70	0,86	0,73	0,59	0,72
Pácora	Pácora	1	0,78	0,75	0,75	0,64	0,73
		2	0,60	0,70	0,64	0,70	0,66
Pensilvania	La Linda	1	0,87	0,78	0,69	0,86	0,80
		2	0,86	0,83	0,70	0,80	0,80
Departamento del Cauca							
Balboa	Capitanes	1	0,77	0,72	0,70	0,66	0,71
		2	0,79	0,62	0,62	0,67	0,68
Inzá	La Chorrera	1	0,77	0,79	0,69	0,77	0,75
		2	0,59	0,70	0,66	0,57	0,63
La Sierra	La Esmita	1	0,80	0,82	0,75	0,64	0,75
		2	0,77	0,70	0,60	0,63	0,67
Rosas	El Marqués	1	0,72	0,71	0,70	0,59	0,68
		2	0,72	0,77	0,68	0,62	0,70
Sotará	Quilcacé	1	0,72	0,78	0,65	0,66	0,70
		2	0,71	0,72	0,49	0,73	0,66

Continúa...

... Continuación Tabla 36.

Índice IDEAM-ICA-6 Variables							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Departamento de Nariño							
Consacá	Azufral	1	0,49	0,50	0,38	0,45	0,46
		2	0,49	0,38	0,35	0,49	0,43
Sandoná	El Ingenio	1	0,75	0,78	0,65	0,71	0,72
		2	0,58	0,60	0,63	0,62	0,61
Buesaco	Buesaquito	1	0,70	0,79	0,68	0,56	0,68
		2	0,54	0,64	0,64	0,59	0,60
La Unión	La Fragua	1	0,74	0,76	0,71	0,69	0,72
		2	0,63	0,64	0,69	0,64	0,65
San Lorenzo	El Molino	1	0,77	0,82	0,68	0,75	0,76
		2	0,64	0,65	0,68	0,70	0,67
Departamento del Valle del Cauca							
Bolívar	Platanares	1	0,76	0,79	0,68	0,69	0,73
		2	0,78	0,83	0,66	0,69	0,74
Caicedonia	Barragán	1	0,50	0,70	0,67	0,65	0,63
		2	0,55	0,68	0,63	0,61	0,62
Sevilla	San Marcos	1	0,77	0,78	0,68	0,68	0,73
		2	0,79	0,81	0,70	0,65	0,74
Tuluá	Bugalagrande	1	0,75	0,79	0,64	0,71	0,72
		2	0,47	0,78	0,58	0,66	0,62
Bugalagrande	La Paila	1	0,73	0,79	0,56	0,71	0,70
		2	0,83	0,65	0,49	0,60	0,64

Calidad buena

Calidad aceptable

Calidad regular

Calidad mala

En las microcuencas del Departamento del Cauca, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,76 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,72 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,72 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) para los puntos 1 y de 0,67 (Categoría Media) para los puntos 2 (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI).

En las microcuencas del Departamento de Nariño, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,69 (Categoría Media) (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,58 (Categoría Media) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,67 (Categoría Media) para los puntos 1 (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,59 (Categoría Media) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) para los puntos 2.

En las microcuencas del Departamento del Valle del Cauca, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,70 (Categoría Media) (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,68 (Categoría Media) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,70 (Categoría Media) para los puntos 1 (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,67 (Categoría Media) para los puntos 2 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI).

Finalmente, para el promedio de las 25 microcuencas evaluadas, aplicando el índice de calidad físico-química IDEAM-ICA-6V, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,74 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,68 (Categoría Media) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,72 (Categoría Buena) para los puntos 1 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,67 (Categoría Media) para los puntos 2 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI).

En las Figuras 27 a 31 se presenta el aspecto de los puntos de muestreo de agua en las microcuencas de Cauca durante las cuatro campañas de monitoreo.



Figura 27. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca Capitanes, Balboa, Cauca. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 28. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca La Chorrera, Inzá, Cauca. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 29. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca La Esmita, La Sierra, Cauca. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 30. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca El Marqués, Rosas, Cauca. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 31. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca Quilcacé, Sotará, Cauca. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.

Resultados para el índice ICO-ICOMO

Los resultados del valor del índice de calidad ICO-ICOMO para las cuatro campañas de monitoreo y su promedio se presentan en la Tabla 37.

A través del índice ICO-ICOMO se determinó, para las microcuencas del Departamento de Antioquia, un valor promedio inicial de calidad físico-química del agua de 0,11 (Categoría Excelente) para los puntos 1 (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y un valor de 0,13 (Categoría Excelente) para los puntos 2 (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de dos años de monitoreo (cuatro campañas) y la implementación del Proyecto GIA en la zona cafetera, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,24 (Categoría Buena) para los puntos 1 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,32 (Categoría Buena) para los puntos 2 (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI).

Para el caso de las microcuencas del Departamento de Caldas, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,09 (Categoría Excelente) (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,32 (Categoría Buena) (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,27 (Categoría Buena) para los puntos 1 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,35 (Categoría Buena) para los puntos 2 (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI).

Tabla 37. Resultados del valor del índice ICO-ICOMO en 25 microcuencas cafeteras durante cuatro campañas de muestreo.

Índice ICO-ICOMO							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Departamento de Antioquia							
Pueblorrico	La Leona	1	0,25	0,16	0,30	0,38	0,27
		2	0,19	0,33	0,35	0,34	0,30
Andes	La Chaparrala	1	0,00	0,19	0,27	0,34	0,20
		2	0,15	0,47	0,50	0,42	0,39
Jardín	San Bartolo	1	0,31	0,33	0,33	0,35	0,33
		2	0,26	0,40	0,44	0,43	0,38

Continúa...

... Continuación Tabla 37.

Índice ICO-ICOMO							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Salgar	La Gulunga	1	0,00	0,20	0,32	0,31	0,21
		2	0,05	0,21	0,30	0,55	0,28
Abejorral	La Liborina	1	0,00	0,08	0,33	0,35	0,19
		2	0,02	0,41	0,31	0,33	0,27
Departamento de Caldas							
Salamina	La Frisolera	1	0,00	0,27	0,41	0,39	0,27
		2	0,34	0,24	0,33	0,41	0,33
Aguadas	Edén-Bareño	1	0,25	0,14	0,33	0,34	0,27
		2	0,38	0,25	0,53	0,35	0,38
Marquetalia	Los Saínos	1	0,00	0,14	0,31	0,16	0,15
		2	0,37	0,26	0,31	0,34	0,32
Pácora	Pácora	1	0,19	0,41	0,63	0,66	0,47
		2	0,33	0,39	0,42	0,52	0,41
Pensilvania	La Linda	1	0,00	0,16	0,31	0,21	0,17
		2	0,17	0,18	0,33	0,49	0,29
Departamento del Cauca							
Balboa	Capitanes	1	0,02	0,34	0,32	0,33	0,25
		2	0,01	0,33	0,64	0,33	0,33
Inzá	La Chorrera	1	0,01	0,27	0,29	0,27	0,21
		2	0,08	0,52	0,50	0,32	0,36
La Sierra	La Esmita	1	0,07	0,12	0,27	0,32	0,20
		2	0,10	0,29	0,30	0,31	0,25
Rosas	El Marqués	1	0,07	0,20	0,31	0,34	0,23
		2	0,25	0,40	0,29	0,34	0,32

Continúa...

... Continuación Tabla 37.

Índice ICO-ICOMO							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Sotará	Quilcacé	1	0,17	0,19	0,31	0,25	0,23
		2	0,08	0,28	0,48	0,22	0,27
Departamento de Nariño							
Consacá	Azufral	1	0,05	0,15	0,34	0,29	0,21
		2	0,47	0,57	0,49	0,31	0,46
Sandóná	El Ingenio	1	0,00	0,24	0,30	0,25	0,20
		2	0,52	0,46	0,32	0,33	0,41
Buesaco	Buesaquito	1	0,40	0,21	0,33	0,33	0,32
		2	0,46	0,49	0,32	0,33	0,40
La Unión	La Fragua	1	0,31	0,17	0,35	0,27	0,27
		2	0,54	0,25	0,40	0,33	0,38
San Lorenzo	El Molino	1	0,00	0,16	0,33	0,30	0,20
		2	0,33	0,33	0,34	0,31	0,33
Departamento del Valle del Cauca							
Bolívar	Platanares	1	0,10	0,30	0,60	0,59	0,40
		2	0,05	0,34	0,35	0,38	0,28
Caicedonia	Barragán	1	0,38	0,19	0,43	0,35	0,34
		2	0,63	0,24	0,62	0,33	0,45
Sevilla	San Marcos	1	0,00	0,20	0,42	0,37	0,25
		2	0,12	0,13	0,28	0,33	0,22
Tuluá	Bugalagrande	1	0,04	0,33	0,29	0,28	0,24
		2	0,48	0,43	0,32	0,33	0,39
Bugalagrande	La Paila	1	0,05	0,20	0,42	0,30	0,24
		2	0,26	0,27	0,30	0,33	0,29

Calidad excelente	Calidad buena	Calidad media	Calidad mala
-------------------	---------------	---------------	--------------

En las microcuencas del Departamento del Cauca, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,07 (Categoría Excelente) (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,10 (Categoría Excelente) (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,22 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) para los puntos 1 y de 0,31 (Categoría Buena) para los puntos 2 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI).

En las microcuencas del Departamento de Nariño, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,15 (Categoría Excelente) (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,46 (Categoría Media) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,24 (Categoría Buena) para los puntos 1 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,40 (Categoría Buena) (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI) para los puntos 2.

En las microcuencas del Departamento del Valle del Cauca, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,11 (Categoría Excelente) (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,31 (Categoría Buena) (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,29 (Categoría Buena) para los puntos 1 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,33 (Categoría Buena) para los puntos 2 (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI).

Finalmente, para el promedio de las 25 microcuencas evaluadas, aplicando el índice de calidad físico-química ICO-ICOMO, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,11 (Categoría Excelente) (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,27 (Categoría Buena) (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,25 (Categoría Buena) para los puntos 1 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,34 (Categoría Buena) para los puntos 2 (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI).

En las Figuras 32 a 36 se presenta el aspecto de los puntos de muestreo de agua en las microcuencas de Nariño durante las cuatro campañas de monitoreo.



Figura 32. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca Buesaquito, Buesaco, Nariño. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 33. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca Azufral, Consacá, Nariño. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 34. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca La Fragua, La Unión, Nariño. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 35. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca El Molino, San Lorenzo, Nariño. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 36. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca El Ingenio, Sandoná, Nariño. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.

Resultados para el índice ICO-ICOSUS

Los resultados del valor del índice de calidad ICO-ICOSUS para las cuatro campañas de monitoreo y su promedio se presentan en la Tabla 38.

A través del índice ICO-ICOSUS se determinó, para las microcuencas del Departamento de Antioquia, un valor promedio inicial de calidad físico-química del agua de 0,03 (Categoría Excelente) para los puntos 1 (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y un valor de 0,04 (Categoría Excelente) para los puntos 2 (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de 2 años de monitoreo (cuatro campañas) y la implementación del Proyecto GIA en la zona cafetera, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,03 (Categoría Excelente) para los puntos 1 (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,04 (Categoría Excelente) para los puntos 2 (dos categorías superiores a la encontrada con el índice NSF-WQI).

Para el caso de las microcuencas del Departamento de Caldas, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,03 (Categoría Excelente) (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,03 (Categoría Excelente) (dos categorías superiores a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,02 (Categoría Excelente) para los puntos 1 (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,08 (Categoría Excelente) para los puntos 2 (dos categorías superiores a la encontrada con el índice NSF-WQI).

Tabla 38. Resultados del valor del índice ICO-ICOSUS en 25 microcuencas cafeteras durante cuatro campañas de muestreo.

Índice ICO-ICOSUS							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Departamento de Antioquia							
Pueblorrico	La Leona	1	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03
		2	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Andes	La Chaparrala	1	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03
		2	0,04	0,04	0,00	0,10	0,04
Jardín	San Bartolo	1	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03
		2	0,05	0,03	0,04	0,03	0,04

Continúa...

... Continuación Tabla 38.

Índice ICO-ICOSUS							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Salgar	La Gulunga	1	0,03	0,03	0,03	0,00	0,02
		2	0,03	0,03	0,02	0,10	0,05
Abejorral	La Liborina	1	0,03	0,03	0,02	0,00	0,02
		2	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03
Departamento de Caldas							
Salamina	La Frisolera	1	0,03	0,00	0,00	0,03	0,01
		2	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01
Aguadas	Edén-Bareño	1	0,03	0,04	0,02	0,00	0,02
		2	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04
Marquetalia	Los Saínos	1	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
		2	0,03	0,03	0,02	1,00	0,27
Pácora	Pácora	1	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03
		2	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03
Pensilvania	La Linda	1	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03
		2	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03
Departamento del Cauca							
Balboa	Capitanes	1	0,02	0,02	0,03	0,04	0,03
		2	0,02	0,03	0,06	0,05	0,04
Inzá	La Chorrera	1	0,00	0,03	0,02	0,05	0,02
		2	1,00	0,03	0,02	0,07	0,28
La Sierra	La Esmita	1	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04
		2	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
Rosas	El Marqués	1	0,04	0,04	0,04	0,07	0,05
		2	0,03	0,02	0,04	0,04	0,03

Continúa...

... Continuación Tabla 38.

Índice ICO-ICOSUS							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Sotará	Quilcacé	1	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03
		2	0,03	0,03	1,00	0,04	0,27
Departamento de Nariño							
Consacá	Azufra	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
		2	1,00	1,00	1,00	0,08	0,77
Sandoná	El Ingenio	1	0,02	0,03	0,04	0,00	0,02
		2	1,00	0,04	0,04	0,05	0,28
Buesaco	Buesaquito	1	0,04	0,03	0,03	0,10	0,05
		2	1,00	0,03	0,03	0,06	0,28
La Unión	La Fragua	1	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03
		2	0,03	0,03	0,04	0,07	0,04
San Lorenzo	El Molino	1	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03
		2	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Departamento del Valle del Cauca							
Bolívar	Platanares	1	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03
		2	0,02	0,04	0,04	0,03	0,03
Caicedonia	Barragán	1	0,11	0,04	0,03	0,03	0,05
		2	1,00	0,04	0,04	0,03	0,28
Sevilla	San Marcos	1	0,03	0,05	0,03	0,03	0,04
		2	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03
Tuluá	Bugalagrande	1	0,00	0,03	0,02	0,02	0,02
		2	1,00	0,03	0,03	0,03	0,27
Bugalagrande	La Paila	1	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03
		2	0,05	0,04	0,03	0,03	0,04

Calidad excelente	Calidad buena	Calidad mala	Calidad muy mala
--------------------------	----------------------	---------------------	-------------------------

En las microcuencas del Departamento del Cauca, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,03 (Categoría Excelente) (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,22 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,03 (Categoría Excelente) (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI) para los puntos 1 y de 0,13 (Categoría Excelente) para los puntos 2 (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI).

En las microcuencas del Departamento de Nariño, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,22 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,61 (Categoría Mala) (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,23 (Categoría Buena) para los puntos 1 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,28 (Categoría Buena) (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI) para los puntos 2.

En las microcuencas del Departamento del Valle del Cauca, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,04 (Categoría Excelente) (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,42 (Categoría Media) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,03 (Categoría Excelente) para los puntos 1 (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,13 (Categoría Excelente) para los puntos 2 (dos categorías superiores a la encontrada con el índice NSF-WQI).

Finalmente, para el promedio de las 25 microcuencas evaluadas, aplicando el índice de calidad físico-química ICO-ICOSUS, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 0,07 (Categoría Excelente) (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 0,26 (Categoría Buena) (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 0,07 (Categoría Excelente) para los puntos 1 (una categoría superior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 0,13 (Categoría Excelente) para los puntos 2 (dos categorías superiores a la encontrada con el índice NSF-WQI).

En las Figuras 37 a 41 se presenta el aspecto de los puntos de muestreo de agua en las microcuencas del Valle del Cauca durante las cuatro campañas de monitoreo.



Figura 37. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca Bugalagrande, Tuluá, Valle del Cauca. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 38. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca Barragán, Caicedonia, Valle del Cauca. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 39. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca San Marcos, Sevilla, Valle del Cauca. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 40. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca Platanares, Bolívar, Valle del Cauca. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.



Figura 41. Aspecto de los puntos de muestreo de la microcuenca La Paila, Bugalagrande, Valle del Cauca. A través del seguimiento fotográfico se presenta la condición del hábitat ripario y de la calidad hídrica en los puntos 1 y 2 de monitoreo, durante las cuatro campañas de muestreo, como un diagnóstico visual del comportamiento de la microcuenca durante el tiempo de estudio.

Resultados para el índice O-WQI

Los resultados del valor del índice de calidad O-WQI para las cuatro campañas de monitoreo y su promedio se presentan en la Tabla 39.

A través del índice O-WQI se determinó, para las microcuencas del Departamento de Antioquia, un valor promedio inicial de calidad físico-química del agua de 82,48 (Categoría Media) para los puntos 1 (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y un valor de 74,22 (Categoría Mala) para los puntos 2 (dos categorías inferiores a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de dos años de monitoreo (cuatro campañas) y la implementación del Proyecto GIA en la zona cafetera, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 74,63 (Categoría Mala) para los puntos 1 (dos categorías inferiores a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 64,82 (Categoría Mala) para los puntos 2 (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI).

Para las microcuencas del Departamento de Caldas, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 78,85 (Categoría Mala) (dos categorías inferiores a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 60,10 (Categoría Mala) (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 70,46 (Categoría Mala) para los puntos 1 (dos categorías inferiores a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 60,15 (Categoría Mala) para los puntos 2 (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI).

Tabla 39. Resultados del valor del índice O-WQI en 25 microcuencas cafeteras durante cuatro campañas de muestreo.

Índice O-WQI							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Departamento de Antioquia							
Pueblorrico	La Leona	1	79,64	77,89	75,83	66,60	74,99
		2	73,37	57,52	67,14	66,76	66,20
Andes	La Chaparrala	1	90,28	71,25	72,20	77,12	77,71
		2	74,92	59,33	63,97	53,32	62,88
Jardín	San Bartolo	1	77,23	64,83	68,99	68,87	69,98
		2	62,55	51,45	57,11	57,74	57,21

Continúa...

... Continuación Tabla 39.

Índice O-WQI							
Municipio	Microcuena	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Salgar	La Gulunga	1	82,17	71,72	69,65	68,29	72,96
		2	83,10	67,28	75,90	48,57	68,71
Abejorral	La Liborina	1	83,09	80,70	72,41	73,77	77,49
		2	77,17	58,74	71,41	69,02	69,09
Departamento de Caldas							
Salamina	La Frisolera	1	87,21	61,46	59,58	64,19	68,11
		2	56,74	56,92	62,27	57,43	58,34
Aguadas	Edén-Bareño	1	57,41	71,16	58,76	61,22	62,14
		2	46,44	54,78	44,71	55,28	50,30
Marquetalia	Los Saínos	1	87,52	77,80	75,92	77,31	79,64
		2	62,46	63,23	72,09	62,68	65,12
Pácora	Pácora	1	76,48	56,47	61,67	59,90	63,63
		2	64,12	51,59	60,24	59,71	58,91
Pensilvania	La Linda	1	85,61	79,70	76,62	73,25	78,80
		2	70,72	72,47	71,72	57,36	68,07
Departamento del Cauca							
Balboa	Capitanes	1	82,93	76,49	72,95	74,19	76,64
		2	86,24	64,53	56,60	68,94	69,08
Inzá	La Chorrera	1	87,21	65,06	74,04	69,80	74,03
		2	68,94	54,39	58,61	67,65	62,40
La Sierra	La Esmita	1	85,26	79,97	78,55	70,77	78,64
		2	70,08	60,90	65,88	66,44	65,83
Rosas	El Marqués	1	83,16	69,11	73,22	67,46	73,23
		2	69,70	54,28	67,05	70,79	65,46

Continúa...

... Continuación Tabla 39.

Índice O-WQI							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Sotará	Quilcacé	1	72,45	75,19	70,82	70,78	72,31
		2	77,27	68,92	48,94	70,78	66,48
Departamento de Nariño							
Consacá	Azufra	1	72,85	63,71	61,77	62,30	65,16
		2	45,83	45,45	45,52	62,57	49,84
Sandón	El Ingenio	1	90,65	65,22	74,73	76,90	76,88
		2	43,91	51,08	67,81	69,63	58,11
Buesaco	Buesaquito	1	62,30	73,30	78,54	64,30	69,61
		2	47,21	49,86	72,73	66,80	59,15
La Unión	La Fragua	1	63,43	73,21	73,05	70,81	70,12
		2	53,88	64,48	64,58	68,48	62,85
San Lorenzo	El Molino	1	87,91	77,58	75,69	77,10	79,57
		2	70,00	63,66	74,03	74,82	70,63
Departamento del Valle del Cauca							
Bolívar	Platanares	1	73,16	61,12	57,00	56,52	61,95
		2	72,42	51,89	63,40	52,05	59,94
Caicedonia	Barragán	1	48,29	71,10	55,12	67,57	60,52
		2	41,15	61,18	53,92	69,29	56,39
Sevilla	San Marcos	1	84,07	70,59	62,67	71,49	72,20
		2	74,77	65,93	62,33	74,76	69,45
Tuluá	Bugalagrande	1	73,74	53,24	65,41	70,58	65,74
		2	56,04	51,80	58,41	73,60	59,96
Bugalagrande	La Paila	1	74,26	63,02	49,13	61,89	62,07
		2	51,37	50,81	53,82	61,11	54,27

Calidad excelente	Calidad buena	Calidad media	Calidad mala	Calidad muy mala
-------------------	---------------	---------------	--------------	------------------

En las microcuencas del Departamento del Cauca, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 82,20 (Categoría Media) (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 74,45 (Categoría Mala) (dos categorías inferiores a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 74,97 (Categoría Mala) (dos categorías inferiores a la encontrada con el índice NSF-WQI) para los puntos 1 y de 65,85 (Categoría Mala) para los puntos 2 (dos categorías inferiores a la encontrada con el índice NSF-WQI).

En las microcuencas del Departamento de Nariño, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 75,43 (Categoría Mala) (dos categorías inferiores a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 52,17 (Categoría Muy Mala) (dos categorías inferiores a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 72,27 (Categoría Mala) para los puntos 1 (dos categorías inferiores a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 60,12 (Categoría Mala) (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI) para los puntos 2.

En las microcuencas del Departamento del Valle del Cauca, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 70,70 (Categoría Mala) (dos categorías inferiores a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 59,15 (Categoría Muy Mala) (dos categorías inferiores a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 64,50 (Categoría Mala) para los puntos 1 (dos categorías inferiores a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 60,00 (Categoría Mala) para los puntos 2 (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI).

Finalmente, para el promedio de las 25 microcuencas evaluadas, aplicando el índice de calidad físico-química O-WQI, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 77,93 (Categoría Mala) (dos categorías inferiores a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 64,02 (Categoría Mala) (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 71,36 (Categoría Mala) para los puntos 1 (dos categorías inferiores a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 62,19 (Categoría Mala) para los puntos 2 (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI).

Resultados para el índice I-WQI

Los resultados del valor del índice de calidad I-WQI para las cuatro campañas de monitoreo y su promedio se presentan en la Tabla 40.

El índice I-WQI aplicado a las 25 microcuencas, marcó para las cuatro campañas de monitoreo y para los dos puntos evaluados, en la mayoría de los casos, valores entre 1 y 2, categorizando la calidad del agua de las microcuencas, en la categoría media que significa que se requiere de un manejo de las cargas totales máximas diarias de los vertimientos que llegan a la microcuenca.

Para el Departamento de Antioquia, en la campaña 1, en la microcuenca La Chaparrala, municipio de Andes y en la campaña 3 en el punto 1 de la microcuenca La Liborina, municipio de Abejorral, se presentaron valores del índice superiores a 2 que significa una alta calidad del agua. Igual categoría se determinó en el punto 1 de la microcuenca La Linda en Pensilvania, Caldas en la primera campaña de muestreo, en el punto 2 de la microcuenca La Esmita, en La Sierra, Cauca, durante la segunda campaña de muestreo, en el punto 1 de la microcuenca El Molino, en San Lorenzo, Nariño, durante la cuarta campaña de muestreo y en la microcuenca de San Marcos, Sevilla, Valle del Cauca, en la primera campaña de muestreo y en los puntos 1 de las microcuencas de Barragán, Caicedonia y San Marcos, Sevilla, Valle del Cauca, durante la segunda campaña de muestreo.

Tabla 40. Resultados del valor del índice I-WQI en 25 microcuencas cafeteras durante cuatro campañas de muestreo.

Índice I-WQI							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Departamento de Antioquia							
Pueblorrico	La Leona	1	1,91	1,96	1,84	1,71	1,86
		2	1,80	1,51	1,75	1,60	1,66
Andes	La Chaparrala	1	2,35	1,81	1,86	1,77	1,95
		2	2,01	1,58	1,52	1,64	1,69
Jardín	San Bartolo	1	1,81	1,65	1,77	1,53	1,69
		2	1,76	1,54	1,64	1,58	1,63
Salgar	La Gulunga	1	1,87	1,89	1,87	1,75	1,84
		2	1,81	1,45	1,75	1,48	1,62
Abejorral	La Liborina	1	1,79	1,89	2,05	1,81	1,89
		2	1,60	1,57	1,85	1,76	1,69

Continúa...

... Continuación Tabla 40.

Índice I-WQI							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Departamento de Caldas							
Salamina	La Frisolera	1	1,96	1,86	1,65	1,62	1,77
		2	1,81	1,92	1,75	1,58	1,76
Aguadas	Edén-Bareño	1	1,83	1,90	1,73	1,72	1,79
		2	1,73	1,76	1,64	1,52	1,66
Marquetalia	Los Saínos	1	1,95	1,85	1,72	1,78	1,83
		2	1,85	1,87	1,76	1,75	1,81
Pácora	Pácora	1	1,86	1,76	1,40	1,34	1,59
		2	1,84	1,79	1,57	1,56	1,69
Pensilvania	La Linda	1	2,09	1,78	1,45	1,86	1,79
		2	1,91	1,84	1,71	1,56	1,75
Departamento del Cauca							
Balboa	Capitanes	1	1,76	1,77	1,77	1,71	1,75
		2	1,58	1,67	1,43	1,81	1,62
Inzá	La Chorrera	1	1,63	1,72	1,92	1,87	1,79
		2	1,70	1,58	1,66	1,62	1,64
La Sierra	La Esmita	1	1,87	1,82	1,76	1,68	1,78
		2	1,96	2,03	1,85	1,80	1,91
Rosas	El Marqués	1	1,55	1,69	1,72	1,79	1,69
		2	1,91	1,64	1,93	1,65	1,78
Sotará	Quilcacé	1	1,92	1,81	1,89	1,78	1,85
		2	1,86	1,79	1,47	1,68	1,70
Departamento de Nariño							
Consacá	Azufra	1	1,67	1,63	1,63	1,70	1,66
		2	1,41	1,37	1,62	1,63	1,51
Sandoná	El Ingenio	1	1,75	1,64	1,82	1,92	1,78
		2	1,47	1,57	1,69	1,75	1,62

Continúa...

... Continuación Tabla 40.

Índice I-WQI							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Buesaco	Buesaquito	1	1,67	1,72	1,90	1,81	1,77
		2	1,43	1,51	1,92	1,77	1,66
La Unión	La Fragua	1	1,69	1,72	1,88	1,93	1,81
		2	1,50	1,48	1,75	1,84	1,64
San Lorenzo	El Molino	1	1,81	1,80	1,96	2,01	1,89
		2	1,73	1,87	1,78	1,78	1,79
Departamento del Valle del Cauca							
Bolívar	Platanares	1	1,63	1,64	1,39	1,41	1,52
		2	1,72	1,78	1,64	1,59	1,68
Caicedonia	Barragán	1	1,48	2,11	1,70	1,85	1,79
		2	1,50	1,81	1,40	1,80	1,63
Sevilla	San Marcos	1	2,27	2,04	1,74	1,73	1,94
		2	2,03	1,91	1,94	1,81	1,92
Tuluá	Bugalagrande	1	1,86	1,77	1,98	1,92	1,88
		2	1,45	1,72	1,69	1,86	1,68
Bugalagrande	La Paila	1	1,59	1,75	1,49	1,51	1,59
		2	1,73	1,83	1,73	1,76	1,76

Calidad alta	Calidad moderada
--------------	------------------

Para el promedio de las 25 microcuencas evaluadas, aplicando el índice de calidad físico-química I-WQI, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 1,82 (Categoría Media) (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 1,72 (Categoría Media) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 1,78 (Categoría Media) para los puntos 1 (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 1,70 (Categoría Media) para los puntos 2 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI).

Resultados para el índice ISQA

Los resultados del valor del índice de calidad ISQA para las cuatro campañas de monitoreo y su promedio se presentan en la Tabla 41.

A través del índice ISQA se determinó, para las microcuencas del Departamento de Antioquia, un valor promedio inicial de calidad físico-química del agua de 79,22 (Categoría Buena) para los puntos 1 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y un valor de 72,72 (Categoría Buena) para los puntos 2 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de dos años de monitoreo (cuatro campañas) y la implementación del Proyecto GIA en la zona cafetera, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 69,88 (Categoría Media) para los puntos 1 (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 64,46 (Categoría Media) para los puntos 2 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI).

Para las microcuencas del Departamento de Caldas, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 82,81 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 57,62 (Categoría Media) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 72,41 (Categoría Buena) para los puntos 1 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 60,81 (Categoría Media) para los puntos 2 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI).

En las microcuencas del Departamento del Cauca, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 82,41 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 75,36 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 68,84 (Categoría Media) (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI) para los puntos 1 y de 63,01 (Categoría Media) para los puntos 2 (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI).

En las microcuencas del Departamento de Nariño, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 74,50 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 49,19 (Categoría Mala) (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 61,93 (Categoría Media) para los puntos 1 (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 50,79 (Categoría Media) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) para los puntos 2.

Tabla 41. Resultados del valor del índice ISQA en 25 microcuencas cafeteras durante cuatro campañas de muestreo.

Índice ISQA							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Departamento de Antioquia							
Pueblorrico	La Leona	1	74,49	76,82	68,91	67,31	71,88
		2	73,11	69,79	67,35	58,12	67,09
Andes	La Chaparrala	1	86,69	70,50	70,44	59,51	71,78
		2	75,06	63,04	68,54	38,13	61,19
Jardín	San Bartolo	1	61,38	55,82	62,04	59,38	59,65
		2	56,43	64,02	59,17	59,15	59,69
Salgar	La Gulunga	1	84,29	70,65	63,94	68,54	71,85
		2	84,97	71,90	68,56	39,60	66,26
Abejorral	La Liborina	1	89,23	82,55	63,55	61,68	74,25
		2	74,02	76,31	64,72	57,20	68,06
Departamento de Caldas							
Salamina	La Frisolera	1	90,75	76,96	64,27	60,50	73,12
		2	57,14	68,49	59,81	59,23	61,17
Aguadas	Edén-Bareño	1	64,99	73,48	64,15	61,59	66,05
		2	52,18	65,01	49,84	73,51	60,14
Marquetalia	Los Saínos	1	93,15	79,87	63,98	75,67	78,17
		2	58,59	72,33	62,53	38,63	58,02
Pácora	Pácora	1	77,28	69,30	67,76	59,59	68,48
		2	46,14	66,66	58,38	62,20	58,34
Pensilvania	La Linda	1	87,86	77,86	64,26	74,99	76,24
		2	74,05	73,08	57,87	60,46	66,37
Departamento del Cauca							
Balboa	Capitanes	1	86,11	60,62	60,12	56,39	65,81
		2	87,51	59,58	49,34	49,25	61,42

Continúa...

... Continuación Tabla 41.

Índice ISQA							
Municipio	Microcuena	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Inzá	La Chorrera	1	92,53	77,94	68,27	60,76	74,87
		2	61,50	63,62	66,23	48,54	59,97
La Sierra	La Esmita	1	79,77	79,69	68,59	54,06	70,53
		2	75,04	60,66	61,52	57,96	63,79
Rosas	El Marqués	1	78,68	67,34	59,15	47,52	63,17
		2	71,37	75,35	62,72	56,20	66,41
Sotará	Quilcacé	1	74,97	79,47	60,24	64,52	69,80
		2	81,39	63,65	39,29	69,45	63,45
Departamento de Nariño							
Consacá	Azufra	1	51,42	40,30	24,72	34,33	37,69
		2	41,70	30,08	29,85	39,02	35,16
Sandoná	El Ingenio	1	92,15	71,15	62,10	73,94	74,83
		2	49,54	53,60	54,94	49,39	51,87
Buesaco	Buesaquito	1	69,06	72,63	59,27	40,13	60,27
		2	41,12	63,23	59,21	46,32	52,47
La Unión	La Fragua	1	72,39	75,90	59,36	59,24	66,72
		2	56,63	65,72	56,19	46,98	56,38
San Lorenzo	El Molino	1	87,48	74,21	54,52	64,44	70,16
		2	56,94	55,45	58,92	60,91	58,05
Departamento del Valle del Cauca							
Bolívar	Platanares	1	86,74	69,37	59,25	63,44	69,70
		2	82,30	64,80	52,90	63,65	65,91
Caicedonia	Barragán	1	42,06	71,36	60,19	54,79	57,10
		2	36,04	64,66	52,67	59,04	53,10
Sevilla	San Marcos	1	84,87	66,27	61,21	60,18	68,13
		2	78,78	72,79	66,07	56,65	68,57

Continúa...

... Continuación Tabla 41.

Índice ISQA							
Municipio	Microcuenca	Punto	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio
Tuluá	Bugalagrande	1	85,30	69,84	67,24	67,43	72,45
		2	42,10	68,12	62,94	61,28	58,61
Bugalagrande	La Paila	1	81,73	76,04	63,98	69,82	72,89
		2	57,53	64,89	61,62	54,56	59,65

Calidad excelente	Calidad buena	Calidad media	Calidad mala	Calidad muy mala
-------------------	---------------	---------------	--------------	------------------

En las microcuencas del Departamento del Valle del Cauca, el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 76,14 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 59,35 (Categoría Media) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 68,05 (Categoría Media) para los puntos 1 (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 61,17 (Categoría Media) para los puntos 2 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI).

Finalmente, para el promedio de las 25 microcuencas evaluadas, aplicando el índice de calidad físico-química ISQA el valor promedio inicial de calidad físico-química para los puntos 1 fue de 79,01 (Categoría Buena) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI) y para los puntos 2 fue de 62,85 (Categoría Media) (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI). Después de cuatro campañas y la implementación del Proyecto GIA, se determinó, en promedio, un valor de calidad físico-química del agua de 68,22 (Categoría Media) para los puntos 1 (una categoría inferior a la encontrada con el índice NSF-WQI) y de 60,05 (Categoría Media) para los puntos 2 (igual categoría a la encontrada con el índice NSF-WQI).

Comparación de los diferentes índices de calidad evaluados respecto al NSF-WQI

En la Tabla 42 se condensan los valores promedio de categorías de calidad encontradas para los cuatro muestreos, realizados en dos puntos, de las 25 microcuencas seleccionadas, utilizando los ocho índices de calidad evaluados. Se fija como referencia el índice físico-químico de calidad NSF-WQI. El mismo color encontrado con los diferentes índices es un indicativo de la misma categoría de calidad.

De los datos condensados en la Tabla 42 se puede apreciar como los índices de calidad ICA-IDEAM-5V, ICA-IDEAM-6V, ICO-ICOMO, I-WQI, ISQA muestran para los dos puntos de monitoreo y las 25 microcuencas evaluadas, valores de calidad físico-química iguales o con una categoría superior o inferior a la obtenida con el índice NSF-WQI. Los índices ICO-ICOSUS y O-WQI muestran en la mayoría de los casos valores de índice de calidad una y dos categorías por encima (ICO-ICOSUS) y dos categorías por debajo (O-WQI) a las encontradas con el índice NSF-WQI.

Resultados similares fueron reportados por Fernández et al. (2003), al comparar la calidad físico-química del agua obtenida con el NSF-WQI y la obtenida con I-WQI, O-WQI, ICO-ICOMO e ICO-ICOSUS.

Los índices NSF-WQI, IDEAM 5V, IDEAM 6V, O-WQI e ISQA mostraron un mayor deterioro en la calidad del agua en los puntos 1 (antes de ingresar el agua a la zona cafetera), los cuales no estuvieron sometidos al Proyecto GIA, al comparar la calidad del agua obtenida en el primer monitoreo y la obtenida del promedio de las cuatro campañas de monitoreo. De igual forma, estos mismos índices mostraron un menor deterioro en la calidad del agua en los puntos 2 (a la salida del agua a la zona cafetera), los cuales estuvieron sometidos al Proyecto GIA, al comparar la calidad del agua obtenida en el primer monitoreo y la obtenida del promedio de las cuatro campañas de monitoreo. Lo anterior permite inferir la importancia de la implementación de Programas de Gestión Integral del Recurso Hídrico para recuperar en cantidad y calidad la disponibilidad del agua de las microcuencas cafeteras.

Tabla 42. Comparación de los índices de calidad físico-química evaluados con respecto al NSF-WQI. Valores promedio de las cuatro campañas de muestreo.

Comparación entre Índices										
Municipio	Microcuenca	Punto	NSF-WQI	IDEAM 5 V	IDEAM 6 V	ICOMO	ICOSUS	I-WQI	O-WQI	ISQA
Departamento de Antioquia										
Pueblorrico	La Leona	1	76,75	0,88	0,82	0,27	0,03	1,86	74,99	71,88
		2	71,25	0,86	0,75	0,30	0,03	1,66	66,20	67,09
Andes	La Chaparrala	1	77,00	0,89	0,79	0,20	0,03	1,95	77,71	71,78
		2	69,75	0,81	0,74	0,39	0,04	1,69	62,88	61,19
Jardín	San Bartolo	1	70,50	0,75	0,67	0,33	0,03	1,69	69,98	59,65
		2	65,50	0,72	0,64	0,38	0,04	1,63	57,21	59,69

Continúa...

... Continuación Tabla 42.

Comparación entre Índices										
Municipio	Microcuenca	Punto	NSF-WQI	IDEAM 5 V	IDEAM 6 V	ICOMO	ICOSUS	I-WQI	O-WQI	ISQA
Salgar	La Gulunga	1	77,25	0,86	0,81	0,21	0,02	1,84	72,96	71,85
		2	72,50	0,81	0,72	0,28	0,05	1,62	68,71	66,26
Abejorral	La Liborina	1	78,50	0,82	0,73	0,19	0,02	1,89	77,49	74,25
		2	73,25	0,82	0,73	0,27	0,03	1,69	69,09	68,06
Departamento de Caldas										
Salamina	La Frisolera	1	75,25	0,78	0,69	0,27	0,01	1,77	68,11	73,12
		2	69,00	0,69	0,61	0,33	0,01	1,76	58,34	61,17
Aguadas	Edén-Bareño	1	74,50	0,67	0,60	0,27	0,02	1,79	62,14	66,05
		2	68,25	0,67	0,63	0,38	0,04	1,66	50,30	60,14
Marquetalia	Los Sáinos	1	79,00	0,90	0,82	0,15	0,03	1,83	79,64	78,17
		2	70,50	0,77	0,72	0,32	0,27	1,81	65,12	58,02
Pácora	Pácora	1	70,00	0,83	0,73	0,47	0,03	1,59	63,63	68,48
		2	67,50	0,76	0,66	0,41	0,03	1,69	58,91	58,34
Pensilvania	La Linda	1	76,75	0,90	0,80	0,17	0,03	1,79	78,80	76,24
		2	72,50	0,88	0,80	0,29	0,03	1,75	68,07	66,37
Departamento del Cauca										
Balboa	Capitanes	1	77,50	0,82	0,71	0,25	0,03	1,75	76,64	65,81
		2	72,25	0,78	0,68	0,33	0,04	1,62	69,08	61,42
Inzá	La Chorrera	1	80,00	0,83	0,75	0,21	0,02	1,79	74,03	74,87
		2	70,50	0,70	0,63	0,36	0,28	1,64	62,40	59,97
La Sierra	La Esmita	1	79,50	0,87	0,75	0,20	0,04	1,78	78,64	70,53
		2	80,00	0,72	0,67	0,25	0,03	1,91	65,83	63,79

Continúa...

... Continuación Tabla 42.

Comparación entre Índices										
Municipio	Microcuenca	Punto	NSF-WQI	IDEAM 5 V	IDEAM 6 V	ICOMO	ICOSUS	I-WQI	O-WQI	ISQA
Rosas	El Marqués	1	79,00	0,79	0,68	0,23	0,05	1,69	73,23	63,17
		2	76,00	0,77	0,70	0,32	0,03	1,78	65,46	66,41
Sotará	Quilcacé	1	75,00	0,80	0,70	0,23	0,03	1,85	72,31	69,80
		2	69,50	0,75	0,66	0,27	0,27	1,70	66,48	63,45
Departamento de Nariño										
Consacá	Azufra	1	72,52	0,52	0,46	0,21	1,00	1,66	65,16	37,69
		2	61,61	0,49	0,43	0,46	0,77	1,51	49,84	35,16
Sandón	El Ingenio	1	78,27	0,84	0,72	0,20	0,02	1,78	76,88	74,83
		2	68,42	0,70	0,61	0,41	0,28	1,62	58,11	51,87
Buesaco	Buesaquito	1	71,19	0,80	0,68	0,32	0,05	1,77	69,61	60,27
		2	65,80	0,70	0,60	0,40	0,28	1,66	59,15	52,47
La Unión	La Fragua	1	72,22	0,83	0,72	0,27	0,03	1,81	70,12	66,72
		2	65,40	0,74	0,65	0,38	0,04	1,64	62,85	56,38
San Lorenzo	El Molino	1	80,93	0,85	0,76	0,20	0,03	1,89	79,57	70,16
		2	74,60	0,76	0,67	0,33	0,03	1,79	70,63	58,05
Departamento del Valle del Cauca										
Bolívar	Platanares	1	72,25	0,82	0,73	0,40	0,03	1,52	61,95	69,70
		2	71,75	0,80	0,74	0,28	0,03	1,68	59,94	65,91
Caicedonia	Barragán	1	69,25	0,72	0,63	0,34	0,05	1,79	60,52	57,10
		2	68,00	0,68	0,62	0,45	0,28	1,63	56,39	53,10

Continúa...

... Continuación Tabla 42.

Comparación entre Índices										
Municipio	Microcuenca	Punto	NSF-WQI	IDEAM 5 V	IDEAM 6 V	ICOMO	ICOSUS	I-WQI	O-WQI	ISQA
Sevilla	San Marcos	1	76,00	0,84	0,73	0,25	0,04	1,94	72,20	68,13
		2	74,75	0,78	0,74	0,22	0,03	1,92	69,45	68,57
Tuluá	Bugalagrande	1	73,75	0,80	0,72	0,24	0,02	1,88	65,74	72,45
		2	65,75	0,69	0,62	0,39	0,27	1,68	59,96	58,61
Bugalagrande	La Paila	1	70,75	0,79	0,70	0,24	0,03	1,59	62,07	72,89
		2	67,25	0,70	0,64	0,29	0,04	1,76	54,27	59,65

Calidad excelente	Calidad buena	Calidad media	Calidad mala	Calidad muy mala
-------------------	---------------	---------------	--------------	------------------

En la Tabla 43 se presentan los parámetros estadísticos descriptivos de la comparación de los siete índices de calidad aplicados en el presente estudio, con respecto al índice NSF-WQI.

Tabla 43. Variación de los índices de calidad físico-química evaluados con respecto al NSF-WQI.

Parámetro	IDM5V	IDM6V	ICOMO	ICOSUS	IDAHO	OREGON	ISQA
Muestreo 1							
Promedio (%)	10,31	9,55	13,45	36,84	21,01	8,19	10,92
Máximo (%)	31,25	36,36	38,33	100,00	39,22	31,42	39,93
Mínimo (%)	0,00	1,16	1,35	4,30	7,96	0,22	0,13
Datos	50	50	50	50	50	50	50
Desviación estándar	7,21	7,99	8,29	28,59	8,01	8,27	9,86
Coefficiente de variación (%)	69,87	83,65	61,66	77,61	38,11	100,98	90,31
Intervalo de confianza	2,00	2,21	2,30	7,92	2,22	2,29	2,73

Continúa...

... Continuación Tabla 43.

Parámetro	IDM5V	IDM6V	ICOMO	ICOSUS	IDAHO	OREGON	ISQA
Muestreo 2							
Promedio (%)	15,89	8,21	10,58	36,89	19,11	12,21	7,95
Máximo (%)	33,85	33,33	31,43	100,00	27,11	27,41	47,23
Mínimo (%)	2,82	0,00	1,35	22,78	8,66	0,14	0,05
Datos	50	50	50	50	50	50	50
Desviación estándar	7,79	6,71	7,14	15,70	4,44	8,81	9,39
Coefficiente de variación (%)	49,01	81,74	67,49	42,55	23,26	72,14	118,09
Intervalo de confianza	2,16	1,86	1,98	4,35	1,23	2,44	2,60
Muestreo 3							
Promedio (%)	9,97	8,60	11,68	40,94	18,00	8,25	15,13
Máximo (%)	33,33	42,42	46,38	100,00	32,37	31,22	62,55
Mínimo (%)	0,00	0,00	0,00	20,00	2,00	0,13	0,79
Datos	50	50	50	50	50	50	50
Desviación estándar	7,06	8,66	11,27	17,39	6,19	7,10	10,92
Coefficiente de variación (%)	70,85	100,66	96,49	42,47	34,39	85,98	72,20
Intervalo de confianza	1,96	2,40	3,12	4,82	1,72	1,97	3,03
Muestreo 4							
Promedio (%)	9,42	11,81	11,08	35,02	21,74	9,44	21,10
Máximo (%)	37,24	42,37	49,25	100,00	33,33	28,57	56,03
Mínimo (%)	0,00	0,00	0,00	13,10	10,73	1,28	0,25

Continúa...

... Continuación Tabla 43.

Parámetro	IDM5V	IDM6V	ICOMO	ICOSUS	IDAHO	OREGON	ISQA
Datos	50	50	50	50	50	50	50
Desviación estándar	7,36	8,24	10,26	16,46	5,48	6,78	13,31
Coefficiente de variación (%)	78,13	69,81	92,56	46,99	25,23	71,89	63,06
Intervalo de confianza	2,04	2,29	2,84	4,56	1,52	1,88	3,69
Muestras 1 a 4							
Promedio (%)	11,40	9,54	11,70	37,42	19,96	9,52	13,78
Máximo (%)	37,24	42,42	49,25	100,00	39,22	31,42	62,55
Mínimo (%)	0,00	0,00	0,00	4,30	2,00	0,13	0,05
Datos	200	200	200	200	200	200	200
Desviación estándar	7,76	8,00	9,37	20,19	6,30	7,90	11,97
Coefficiente de variación (%)	68,07	83,81	80,13	53,96	31,57	82,92	86,85
Intervalo de confianza	1,08	1,11	1,30	2,80	0,87	1,09	1,66

Los índices de mejor comportamiento, al compararlos con el NSF-WQI y tener categorías de calidad similares y que podrían ser aplicados en el monitoreo de la calidad físico-química del agua, por involucrar menos parámetros que el NSF-WQI y, por lo tanto, tener menos costos fueron:

El ICO-ICOMO, índice que sólo involucra tres parámetros: demanda química de oxígeno, coliformes totales y porcentaje de saturación de oxígeno. Su valor promedio de variación respecto a los valores encontrados con el índice NSF-WQI fue de 11,70% (n= 200) (con un valor máximo de 49,25% y un valor mínimo de 0,00%) y un intervalo de confianza de 1,30.

El ISQA, índice que involucra cinco parámetros: temperatura, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica. Su valor promedio de variación respecto a los valores encontrados con el índice NSF-WQI fue de 13,78% (n= 200) (con un valor máximo de 62,55% y un valor mínimo de 0,05%) y un intervalo de confianza de 1,66.

El ICA-IDEAM-5V índice que involucra cinco parámetros: demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y pH. Su valor promedio de variación respecto a los valores encontrados con el índice NSF-WQI fue de 11,40% (n= 200) (con un valor máximo de 37,24% y un valor mínimo de 0,00%) y un intervalo de confianza de 1,08.

El ICA-IDEAM-6V índice que involucra seis parámetros: demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH y la relación N_T/P_T . Su valor promedio de variación respecto a los valores encontrados con el índice NSF-WQI fue de 9,54% (n= 200) (con un valor máximo de 42,42% y un valor mínimo de 0,00%) y un intervalo de confianza de 1,11.

De los resultados presentados en la Tabla 43, el índice O-WQI, presentó un valor promedio de variación de 9,52% y un intervalo de confianza de 1,09, respecto al NSF-WQI, pero la asignación de las categorías de calidad muestra diferencias muy grandes con respecto a las asignadas al índice NSF-WQI, por lo que, en la mayoría de los casos, sus valores de calidad están dos escalas de calidad por debajo a las encontradas con el NSF-WQI.

Con el fin de disminuir los valores de los coeficientes de variación (CV) de los índices de calidad evaluados se recomienda realizar las campañas de monitoreo de calidad de agua en condiciones similares (ya sean climáticas como relacionadas con el período de cosecha), de forma que los resultados sean comparables dentro de la misma campaña y entre campañas. Se recomienda que la duración del tiempo de muestreo para un mismo punto se aumente de las cuatro horas utilizadas en la presente metodología a varios días.



Consideraciones finales

La determinación de la calidad físico-química de un cuerpo de agua es un proceso que involucra la determinación de un gran número de parámetros, por lo que resulta ser una actividad costosa. A través de la generación de índices de calidad físico-química (que seleccionan las variables que mayor influencia tienen sobre la calidad del recurso hídrico) y mediante el uso de ecuaciones, se logra transformar los valores obtenidos en los análisis de los diferentes parámetros, en valores de calidad que, combinados con las ponderaciones que se asignan a las variables seleccionadas, permiten obtener unos valores que pueden ser categorizados en rangos, permitiendo conocer la calidad del agua en un momento determinado.

La ventaja que ofrece el uso de los índices de calidad físico-química del agua es que permiten la comparación de la calidad en diferentes lugares y momentos, y facilitan la valoración de los vertidos contaminantes y de los procesos de autodepuración.

A través del Programa Gestión Integral del Agua “Manos al Agua” se realizaron inversiones en 25 microcuencas cafeteras implementando una Gestión Integral del Recurso Hídrico, durante cinco años, en las microcuencas seleccionadas, que incluyeron la sensibilización y capacitación de los habitantes de la cuenca, la implementación de Buenas Prácticas Agrícolas, aunado a programas de reforestación y tratamiento de las aguas residuales generadas en la cuenca (tanto las domésticas como las provenientes del beneficio del café).

Para la determinación del efecto de la implementación del programa de gestión integral del recurso hídrico sobre la calidad del agua en las microcuencas se utilizó el índice de calidad de la Fundación Nacional de Saneamiento de los Estados Unidos (NSF-WQI). Adicionalmente, se evaluaron siete índices de calidad físico-química que se utilizan en Colombia y otros países, comparando los resultados obtenidos con ellos respecto al NSF-WQI, buscando seleccionar índices con respuestas similares y que involucren menor número de parámetros con el fin de disminuir los costos de la caracterización de la calidad físico-química de los cuerpos de agua.

Los resultados obtenidos en la investigación permitieron determinar que la mayoría de los índices aplicados mostraron un mayor deterioro en la calidad del agua en los puntos 1 (antes de ingresar el agua a la zona cafetera), los cuales no estuvieron sometidos al Proyecto GIA, al comparar la calidad del agua obtenida en el primer monitoreo, que se utilizó como línea base, respecto a la obtenida del promedio de las cuatro campañas de monitoreo. De igual forma, la mayoría de los índices mostraron un menor deterioro en la calidad del agua en los puntos 2 (a la salida del agua a la zona cafetera), los cuales estuvieron sometidos al Proyecto GIA, al comparar la calidad del agua obtenida en el primer monitoreo, que se utilizó como línea base, respecto a la obtenida del promedio de las cuatro campañas de monitoreo. Lo anterior permite inferir la importancia de la implementación de Programas de Gestión Integral del Recurso Hídrico para recuperar en cantidad y calidad la disponibilidad del agua de las microcuencas cafeteras.

Para lograr el objetivo de mejorar la calidad y la cantidad del agua en las microcuencas, el Proyecto GIA involucró la sensibilización y capacitación a 11.631 familias caficultoras pobladoras de las mismas, la reforestación, la aplicación de acciones de restauración ecológica con obras de bioingeniería y del manejo integrado del suelo, la instalación de plantas de tratamiento para las aguas residuales de las viviendas y para las aguas residuales del beneficio del café en los pobladores cercanos a las fuentes de agua y el monitoreo hidroclimático, con el propósito de generar alertas tempranas que le entreguen a los pobladores información oportuna acerca de la dinámica del agua en la zona y de esta forma optimizar sus labores agrícolas y sus necesidades básicas y de seguridad.

La metodología para evaluar la calidad del agua superficial mediante la utilización de índices, ha demostrado ser útil para evaluar el impacto de la actividad cafetera sobre los cuerpos de agua. Esta metodología es recomendada para otras zonas cafeteras donde no hay información acerca de la calidad del agua superficial. Se recomienda realizar un monitoreo más frecuente y a un horizonte de tiempo no menor a 5 años.

Los índices de mejor comportamiento, al compararlos con el NSF-WQI y tener categorías de calidad similares, que podrían ser aplicados en el monitoreo de la calidad físico-química del agua, por involucrar menos parámetros que el NSF-WQI y por lo tanto tener menos costos fueron el ICOMO, ICA-IDEAM 5 Variables, ICA-IDEAM 6 Variables y el ISQA.

Literatura citada

Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2011). Water quality indices based on bioassessment: The biotic indices. *Journal of Water and Health*, 9(2), 330-348. <https://doi.org/10.2166/wh.2011.133>

Álvarez-Arango, L. F. (2005). *Metodología para la utilización de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua* (Proyecto Andes 05-01-24843-0424PS). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <http://hdl.handle.net/20.500.11761/31357>

American Public Health Association [APHA], American Water Works Association [AWWA], & Water Pollution Control Facility [WPCF]. (1992). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Ediciones Díaz de Santos.

Bas Cerdá, M. C. (2014). *Estrategias metodológicas para la construcción de indicadores compuestos en la gestión universitaria* [Tesis doctoral]. Editorial Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/35330>

Bustamante, I., Sanz, J. M., Goy, J. L., González-Hernández, F. M., Encabo, J. L., & Mateos, J. (2002). Estudio de la calidad de las aguas superficiales en los espacios naturales del sur de las provincias de Salamanca y Ávila. Aplicaciones del índice ISQA. *Geogaceta*, 31, 103-106. <http://hdl.handle.net/10272/9483>

Carrera Reyes, C., & Fierro Peralbo, K. (2001). *Manual de monitoreo de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua* (O. Zambrano, Ed.). EcoCiencia. <https://ecociencia.org/manual-de-monitoreo-los-macroinvertebrados-acuaticos-como-indicadores-de-la-calidad-del-agua/>

Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. (2013). Manual para el Diseño y la Construcción de Indicadores. Instrumentos principales para el monitoreo de programas sociales de México. CONEVAL. <https://www.coneval.org.mx/InformesPublicaciones/Paginas/Mosaicos/Manual-para-el-diseno-y-la-construccion-de-indicadores.aspx>

Corporación Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia [CTA], Good Stuff International [GSI-LAC], Agencia Suiza Para El Desarrollo y La Cooperación [COSUDE], Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2015). *Evaluación Multisectorial de la Huella Hídrica en Colombia. Resultados por subzonas hidrográficas en el marco del Estudio Nacional del Agua 2014*. Editorial CTA. http://documentacion.IDEAM.gov.co/openbiblio/bvirtual/023272/HH_ENA2014.pdf

Falkenmark, M. (2003). *Tec Background Papers No. 9: Water management and ecosystems: Living with change*. Global Water Partnership. <http://hdl.handle.net/10535/4993>

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2017). *Estadísticas cafeteras. FNC*. <https://federaciondefcafeteros.org/wp/estadisticas-cafeteras/>

Fernández, N., Ramírez, A., & Solano, F. (2003). Índices fisicoquímicos de calidad del agua. Un estudio comparativo. En Universidad del Valle (Organizador), *Conferencia Internacional Usos Múltiples del Agua: Para la Vida y el Desarrollo Sostenible* (pp. 211–219). Instituto Cinara, Cali, Colombia. <http://www.ingenieroambiental.com/4014/fisic.pdf>

Fernández, N., Solano, F. (2005) *Índices de calidad y de contaminación del agua*. Universidad de Pamplona. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The water footprint assesment manual: Setting the global standard*. Earthscan. <https://waterfootprint.org/en/resources/publications/water-footprint-assessment-manual/>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2010). Estudio Nacional del Agua 2010. IDEAM. <http://documentacion.IDEAM.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/021888.htm>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2015). Estudio Nacional del Agua 2014. IDEAM. <http://documentacion.IDEAM.gov.co/openbiblio/bvirtual/019252/ESTUDIONACIONALDELAGUA.pdf>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. IDEAM. <https://cta.org.co/descargables-biblionet/agua-y-medio-ambiente/Estudio-Nacional-del-Agua-2018.pdf>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MAVDT]. (2002) *Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas*. https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dml_download&p=3834

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2011). *Hoja metodológica del indicador índice de calidad del agua (versión 1)*: Sistema de indicadores ambientales de Colombia, indicadores de calidad del agua superficial. <http://www.IDEAM.gov.co/documents/11769/646961/3.02+HM+%C3%8Dndice+Calidad+Agua.pdf/310580af-1ed1-4cbf-ade3-9d8c529c4220>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2013) *Hoja metodológica del indicador Índice de alteración potencial de la calidad del agua (versión 1)*. Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia. <http://www.IDEAM.gov.co/documents/11769/646961/3.03+HM+%2Bndice+Alteraci%C3%B3n+Potencial+Calidad+Agua.pdf/d634d46e-a27d-4117-9797-722088154ecf>

Ministerio de Agricultura (1984). *Decreto número 1594 de 1984. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.* https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_1594_de_1984.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS] (2015). Decreto Único 1076 de 2015 Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible <https://www.minambiente.gov.co/index.php/normativa/decretos?id=2093>.

Ministerio de Protección Social (2007). *Decreto 1575 de 2007 Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.* <https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Disponibilidad-del-recurso-hidrico/Decreto-1575-de-2007.pdf>

Ministerio de Protección Social-Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (2007). Resolución 2115 de 2007. *Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.* https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf

Ministerio de Salud y Protección Social. (2019). *Informe Nacional de la calidad del agua para consumo humano -INCA 2017.* <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/calidad-del-agua-inca-2017.pdf>

Ramírez, A., Restrepo, R., & Cardeñosa, M. (1999). Índices de contaminación para caracterización de aguas continentales y vertimientos. *Formulaciones. CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(5), 89–99. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53831999000100008

Ramírez, A., Restrepo, R., & Viña, G. (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulación y aplicación. *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(3), 135-153. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53831997000100009

Roldán, G. A. (2013). *La Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: Propuesta para el uso del método BMWP/Col*. Editorial Universidad de Antioquia. <https://www.worldcat.org/title/bioindicacion-de-la-calidad-del-agua-en-colombia-propuesta-para-el-uso-del-metodo-bmwp-col/oclc/777320536>

Rodríguez-Valencia, N., Galeano, J., & Quintero-Yepes, L. (2018). *Aumentando la resiliencia a eventos climáticos extremos en el sector cafetero colombiano: Evaluación de la vulnerabilidad del territorio cafetero a la disponibilidad hídrica. Acuerdo de Subvención IDRC - FNC - Cenicafé. Convenio N° 107400-007*. Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/959>

Rodríguez-Valencia, N., Quintero-Yepes, L., Castañeda, S. A., Trejos, J. F., Ospina, C. M., Menza, H. D., García, A., Romero, M. A., Lince, L. A., & Sarmiento, N. G. (2020). *Informe de la determinación experimental de la huella hídrica del café de Colombia (Proyecto GIA)*. Cenicafé.

Rodríguez-Valencia, N., Quintero-Yepes, L., Gomez, G. A., Bohórquez, V. L., González, C. M., Osorio, A. F., García, A., & Harmsen, J. (2018). *Guía para la evaluación de la calidad del agua superficial en microcuencas cafeteras de Colombia*. Cenicafé. https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/proyecto_gia_manos_al_agua/publicaciones_guia_para_la_evaluacion_de_la_calidad_del_agua_superficial_en

Rodríguez-Valencia, N., Sanz, J. R., Oliveros, C. E., & Ramírez, C. A. (2015). *Beneficio del café en Colombia: Prácticas y estrategias para el ahorro uso eficiente del agua y el control de la contaminación hídrica en el proceso de beneficio húmedo del café*. Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/659>

United States Department of Agriculture [USDA]. (2017). *Stream visual assessment protocol version 2. Colorado* (National Biology Handbook: Subpart B – Conservation Planning, Part 614, Amend 3, December 2009). https://efotg.sc.egov.usda.gov/references/public/CO/SVAP2_CO.pdf

Wilkes University. (2017). *Center for environmental quality: Environmental engineering and earth sciences calculating NSF water quality index*. <https://water-research.net/index.php/water-treatment/water-monitoring/monitoring-the-quality-of-surfacewaters>

Zárate Torres, E., Fernández Poulussen, A., & Kuiper, D. (2017). *Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica*. IICA. <http://repositorio.iica.int/handle/11324/2996>





Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia

www.cenicafe.org



ISBN: 978-958-8490-71-7



9 789588 490717