

REVISIÓN

## Towards a Comprehensive Assessment of Water Quality in Colombia: Challenges and Proposals in the Face of Emerging Contaminants

### Hacia una Evaluación Integral de la Calidad del Agua en Colombia: Desafíos y Propuestas Frente a los Contaminantes Emergentes

José Luis Guataquira Rincón<sup>1</sup>, René Ricardo Cuéllar Rodríguez<sup>1</sup>, Laura Daniela Palomino Boshell<sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup>Corporación Universitaria Del Meta, Facultad de Ingeniería Ambiental. Villavicencio - Meta, Colombia.

**Citar como:** Guataquira Rincón JL, Cuéllar Rodríguez RR, Palomino Boshell LD. Towards a Comprehensive Assessment of Water Quality in Colombia: Challenges and Proposals in the Face of Emerging Contaminants. Environmental Research and Ecotoxicity. 2023; 2:56. <https://doi.org/10.56294/ere202356>

Enviado: 10-09-2022

Revisado: 28-01-2023

Aceptado: 12-05-2023

Publicado: 13-05-2023

Editor: Prof. Dr. William Castillo-González 

#### ABSTRACT

**Introduction:** water quality has been recognized as a crucial factor for public health and environmental balance. In Colombia, current regulations have established physical, chemical and microbiological parameters for its evaluation, as defined by Resolution 2115 of 2007. However, the change in environmental, urban and industrial dynamics has generated the need for more updated methods capable of accurately reflecting the real condition of the water resource.

**Development:** water Quality Indices (WQI), such as the WQFI, WQINSF, DWQI, among others, have served as useful tools for the interpretation and communication of water quality. These indices were constructed from traditional parameters such as dissolved oxygen, coliforms, turbidity and pH. However, their narrow focus has left out compounds currently detectable thanks to the advancement of analytical science: emerging contaminants (ECs). These include pharmaceuticals, pesticides, hormones and viruses, whose presence has not only become more frequent, but also more dangerous to human health and aquatic biodiversity.

**Conclusions:** given the growing risk posed by ECs, the need to integrate these compounds into monitoring schemes was raised. Methods such as the AMOEBA index or the ICAUCA adapted for the Cauca river offer more contextualized solutions. Thus, it became evident that water quality assessment requires a dynamic and inclusive approach that articulates traditional variables with new threats, also taking into account regional, social and regulatory aspects to ensure access to safe water.

**Keywords:** Water Quality; Emerging Contaminants; EQI Indices; Environmental Assessment; Public Health.

#### RESUMEN

**Introducción:** la calidad del agua ha sido reconocida como un factor crucial para la salud pública y el equilibrio ambiental. En Colombia, la normatividad vigente ha establecido parámetros físicos, químicos y microbiológicos para su evaluación, como lo define la Resolución 2115 de 2007. Sin embargo, el cambio en las dinámicas ambientales, urbanas e industriales ha generado la necesidad de métodos más actualizados, capaces de reflejar de forma precisa la condición real del recurso hídrico.

**Desarrollo:** los Índices de Calidad del Agua (ICA), como el IRCA, WQINSF, DWQI, entre otros, han servido como herramientas útiles para la interpretación y comunicación de la calidad del agua. Estos índices se construyeron a partir de parámetros tradicionales como oxígeno disuelto, coliformes, turbidez y pH. No obstante, su enfoque limitado ha dejado por fuera compuestos actualmente detectables gracias al avance de la ciencia analítica: los contaminantes emergentes (CE). Estos incluyen productos farmacéuticos, pesticidas, hormonas y virus, cuya presencia no solo se ha vuelto más frecuente, sino también más peligrosa para la salud humana y la biodiversidad acuática.

**Conclusiones:** dado el creciente riesgo que representan los CE, se planteó la necesidad de integrar estos

compuestos en los esquemas de monitoreo. Métodos como el índice AMOEBA o el ICAUCA adaptado para el río Cauca, ofrecen soluciones más contextualizadas. Así, se evidenció que la evaluación de la calidad del agua requiere un enfoque dinámico e inclusivo, que articule variables tradicionales con nuevas amenazas, teniendo en cuenta también aspectos regionales, sociales y normativos para garantizar el acceso a agua segura.

**Palabras clave:** Calidad del Agua; Contaminantes Emergentes; Índices ICA; Evaluación Ambiental; Salud Pública.

## INTRODUCCIÓN

La calidad del agua es un componente esencial para garantizar la salud pública y la sostenibilidad ambiental. <sup>(1,2,3,5,6)</sup> En Colombia, el control de este recurso vital se encuentra reglamentado por la Resolución 2115 de 2007, que establece los parámetros físicos, químicos y microbiológicos que deben ser evaluados para asegurar su aptitud para el consumo humano. <sup>(7,8,9)</sup> Sin embargo, el crecimiento urbano, el desarrollo industrial, la expansión agrícola y los cambios en las dinámicas ambientales han introducido nuevos retos en la gestión de la calidad del agua, evidenciando la necesidad de métodos de evaluación más integrales y actualizados. <sup>(10,11,12,13)</sup>

En este contexto, los Índices de Calidad del Agua (ICA) han sido una herramienta clave para simplificar la evaluación de múltiples variables en un solo valor numérico que facilite la toma de decisiones, la comunicación con la comunidad y el diseño de políticas públicas. <sup>(14,15,16)</sup> Estos índices integran parámetros como oxígeno disuelto, turbiedad, pH, coliformes fecales, entre otros, permitiendo clasificar el estado del recurso hídrico y establecer acciones correctivas cuando sea necesario. <sup>(17,18,19,20)</sup> Algunos de los índices más relevantes a nivel nacional e internacional incluyen el IRCA (Índice de Riesgo de Calidad del Agua), el WQI (Water Quality Index) de la Fundación Nacional de Saneamiento, el DWQI (Drinking Water Quality Index) desarrollado por la ONU, y adaptaciones locales como el ICAUCA para el río Cauca. <sup>(21,22,23)</sup>

Pese a su utilidad, estos índices presentan limitaciones. <sup>(24,25,26)</sup> Muchos de ellos se basan en parámetros convencionales que no contemplan la presencia de contaminantes emergentes (CE), <sup>(27,28,29)</sup> compuestos químicos y microbiológicos cuya detección reciente ha revelado potenciales riesgos para la salud humana y el ecosistema, pero que aún no están regulados. <sup>(30,31,32)</sup> Ejemplos de estos contaminantes incluyen fármacos, productos de cuidado personal, pesticidas, hormonas, entre otros, los cuales pueden ingresar al ciclo del agua a través de vertimientos domésticos, agrícolas, industriales y hospitalarios. <sup>(33,34,35,36)</sup>

La inclusión de los CE en los esquemas de monitoreo y evaluación representa un desafío metodológico y normativo, <sup>(37,38)</sup> pero también una necesidad urgente para asegurar una gestión integral del recurso hídrico. <sup>(39)</sup> En este sentido, el presente trabajo propone una revisión de los índices de calidad del agua más utilizados, así como el análisis de la posibilidad de integrar nuevas variables que reflejen de manera más precisa la realidad de las fuentes de abastecimiento. La finalidad es contribuir al fortalecimiento de los mecanismos de control, a la protección de la salud humana y a la sostenibilidad del recurso hídrico en los entornos rurales y urbanos del país.

## DESARROLLO

### MARCO TEÓRICO

En Colombia se establecen sistemas para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano según la resolución 2115 del 2007, que establece los límites aceptables de las características físicas, químicas y microbiológicas que pueden ser un factor de riesgo para la salud de los humanos y la infraestructura.

#### Parámetros físicos

Son los que tienen una menor relevancia en cuanto a la calidad del agua, estos pueden modificar el aspecto del agua. Los cambios en el aspecto, olor y sabor en el agua de consumo humano pueden señalar cambios en la calidad del agua cruda (sin tratar) de la fuente o deficiencias en las operaciones de tratamiento. Los parámetros físicos de mayor importancia son; turbiedad, color aparente, conductividad y pH. <sup>(40)</sup>

#### Parámetros químicos

Son los de mayor importancia ya que pueden producir efectos adversos sobre la salud tras periodos de exposición prolongados, y son pocos los pueden ocasionar problemas de salud como resultado de una exposición única. La actividad agrícola contamina cuando emplea fertilizantes que son arrastrados hacia las aguas, especialmente nitratos y nitritos. Además, el uso inadecuado de agroquímicos contribuye a contaminar el agua con sustancias tóxicas para los humanos. Las actividades domésticas pueden contribuir principalmente en detergentes, grasas y aceites, solventes, desinfectantes, materia orgánica. Y las actividades industriales

pueden aportar sustancias orgánicas, inorgánicas, solventes, detergentes, metales pesados tóxicos para los humanos como arsénico, plomo, mercurio y cromo.<sup>(40)</sup>

### Parámetros microbiológicos

Los mayores riesgos microbianos son los derivados del consumo de agua contaminada con excrementos humanos o animales. Los excrementos pueden ser fuente de patógenos, como bacterias, virus, protozoos, helmintos y otros organismos. Los patógenos fecales son los que más preocupan a la hora de fijar metas de protección de la salud relativas a la inocuidad microbiana. Se producen con frecuencia variaciones acusadas y bruscas de la calidad microbiológica del agua. Pueden producirse aumentos repentinos de la concentración de patógenos que pueden aumentar considerablemente el riesgo de enfermedades y pueden desencadenar brotes de enfermedades transmitidas por el agua; además, pueden exponerse a la enfermedad numerosas personas antes de que se detecte la contaminación microbiana.<sup>(40)</sup>

Los virus son causantes de aproximadamente el 70 % de la EDA, principalmente el Rotavirus, Norovirus, Adenovirus (serotipos 40 and 41), Astrovirus y Enterovirus, a las bacterias se les atribuye entre el 10 y 20 %, por *Campylobacter jejuni*, *Salmonella* (animal/no tifoidea), *Shigella*, *Yersinia enterocolitica*, *Escherichia coli* (enteropatógena y enterotoxigénica), *Yersinia pseudotuberculosis*, *Clostridium difficile*, *Salmonella typhi* y *Salmonella paratyphi*, *Vibrio cholerae*, y los parásitos, específicamente protozoos, comprenden menos del 10 %, con *Giardia lamblia*, *Cryptosporidium*, *Entamoeba histolytica*, *Dientamoeba fragilis*, *Blastocystis hominis* y *Helminths Strongyloides stercoralis*.<sup>(41)</sup>

En Colombia el microorganismo identificado más frecuentemente en niños menores de 5 años con EDA es el rotavirus.<sup>(31,36,39)</sup> Las bacterias más frecuentemente implicadas son *Escherichia coli* (entero-patógena, y enterotoxigénica, principalmente) y *Salmonella* (alrededor del 10 %); con menor frecuencia se aíslan *Campylobacter* y *Shigella* (menos de 6 %) y no se identifica microorganismo patógeno hasta en 45 % de los niños en quienes se busca etiología de la EDA.<sup>(41)</sup>

### Índices de Calidad del Agua

**Tabla 1.** Clasificación de los índices de calidad según la información de análisis<sup>(42)</sup>

Grupo	Indicadores	Tipo de información que analiza
1	En la fuente	Calidad de agua generada por presiones (contaminantes) en fuentes discretas
	Punto diferente a la fuente	Calidad del agua generada por fuentes difusas
2	Medidas simples	Comprenden varios parámetros individuales del agua, que pueden ser usados como indicadores de su calidad
	Basados en criterios o estándares	Correlación de la calidad del agua con los niveles estándar que han sido establecidos para la preservación de los acuíferos y usos del recurso hídrico.
	Multiparámetro	Determinados por el concepto colectivo de expertos
	Multiparámetros empíricos	Construidos a partir del análisis estadístico de las mediciones de calidad del agua
3	Para cuerpos lentos	Desarrollados para este tipo de acuíferos
4	Vida acuática	Analizan las reacciones de tolerancia de la biota acuática a los contaminantes y condiciones del cuerpo hídrico
	Uso del agua	Evalúan el agua respecto a usos para consumo humano o agricultura
	Basados en la percepción	Comprenden la opinión pública y los usos que tendrá el recurso hídrico

**Tabla 2.** Clasificación de los índices de calidad según el uso del recurso hídrico<sup>(42)</sup>

Uso del recurso hídrico	Tipo de información que analizan
Manejo del recurso	Proporcionan información para la toma de decisiones sobre las prioridades establecidas para el recurso hídrico
Clasificación de áreas	Comparar el estado del recurso en diferentes áreas geográficas
Cumplimiento de la normatividad	Determinar si se está superando los límites de contaminación de los cuerpos hídricos según la normatividad ambiental o políticas públicas vigentes
Tendencia	Evaluar si la calidad ambiental mejora o disminuye en el tiempo
Información pública	Concientizar y educar a la población sobre el manejo del recurso hídrico
Investigación científica	Analizar un conjunto de datos que pueden tener relación con la calidad del recurso hídrico, reducir los parámetros a aquellos que lo afectan y proporcionar información sobre el estado actual

El cálculo de los ICA se fundamenta en tres pasos consecutivos, primero la selección de parámetros, segundo la determinación del subíndice para cada parámetro, y tercero la determinación del índice por agregación de los subíndices, tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de los ICA				
Paso	Observación	Fuente	Parámetro	Objetivo
Primero Selección de parámetros	Depende del criterio de un experto, de la información disponible, criterios de tiempo, localización e importancia como estándar de calidad	Walski (1974)	OD, temperatura, coliformes, pH, SS, color, olor, turbidez, transparencia, nitratos, fosfatos, grasas	características organolépticas, efecto sobre la vida acuática y la salud humana
		D u n n e t t e (1979)	OD, DBO, DQO	Nivel de oxígeno
			NO2-N, NO3, -N, ortofosfatos	Eutrofización
			Coliformes totales y fecales	Aspectos de salud
Dinius (1987)	Temperatura, OD, DQO, alcalinidad total, color, dureza total, pH, conductividad, cloruros y nitratos	Temperatura, transparencia, sólidos totales	Características físicas	
Segundo Determinación del subíndice para cada parámetro	Transformación de las variables de una escala dimensional a una adimensional para permitir su agregación	Fernández y Solano (2005)	Valor nominal	Comparación del valor del parámetro con un estándar
		Del Río (1986)	Parámetro en número decimal, diagramas o tablas de calibración	Para cada parámetro se hace su propio grafico en el que se indica la correlación entre el parámetro y su valor en escala de calidad (valore entre 0 y 100, o entre 0 y 1)
			Métodos experiencia propi	Curvas desarrolladas por un mismo autor para distintos parámetros
			Método Delphi	Construcción a partir del promedio de la opinión de varios expertos
Tercero Determinación del índice por agregación de los subíndices	La integración de los subíndices determina el ICA, que puede darse por medio de expresiones de agregación matemática	Van Helmond y Breukel, (1997)	Promedio ponderado	$ICA = 1/n \sum_{i=1}^n Q_i$
			Promedio aritmético ponderado	$ICA = \sum_{i=1}^n Q_i \times W_i$
			Promedio geométrico no ponderado	$ICA = (\prod_{i=1}^n Q_i)^{1/n}$
			Promedio geométrico ponderado	$ICA = (\prod_{i=1}^n Q_i)^{W_i}$
			Subíndice mínimo	$ICA = \min(q_1, q_2, \dots, q_n)$
			Subíndice máximo	$ICA = \max(q_1, q_2, \dots, q_n)$
			Promedio no ponderado modificado	$ICA = 1/100 \times (1/n \sum_{i=1}^n Q_i)^2$
			Promedio ponderado modificado	$ICA = 1/100 \times (1/\sum_{i=1}^n Q_i \times W_i)^2$

### Índice de Riesgo de Calidad del Agua (IRCA)

Para el cálculo del IRCA según el artículo 12 del Decreto 2115 de 2007 se asignará el puntaje de riesgo contemplado en tabla 4 para cada característica física, química y microbiológica, por no cumplir con los valores máximos permitidos.

**Tabla 4. Valores máximos aceptables y puntaje IRCA<sup>(43)</sup>**

Características	Expresados como	Valor máximo	Puntaje IRCA
Color aparente	UPC	15	6
Turbiedad	UNT	2	15
pH	H3O+	6,5 - 9	1,5
Color residual libre	mg Cl2 / L	0,3 - 2	15
Alcalinidad total	mg CaCO3 / L	200	1
Calcio	mg Ca / L	60	1
Fosfatos	mg PO43- / L	0,5	1
Manganeso	mg Mn / L	0,1	1
Molibdeno	mg Mo / L	0,07	1
Magnesio	mg Mg / L	36	1
Zinc	mg Zn / L	3	1
Dureza total	mg CaCO3 / L	300	1
Sulfatos	mg SO42- / L	250	1
Hierro total	mg Fe / L	0,3	1,5
Cloruros	mg Cl- / L	250	1
Nitratos	mg NO3- / L	10	1
Nitritos	mg NO2- / L	0,1	3
Aluminio	mg Al3+ / L	0,2	3
Fluoruros	mg F- / L	1	1
COT	mg COT- / L	5	3
Coliformes totales	UFC/100 cm3	0	15
Eschericha coli	UFC/100 cm3	0	25

El valor del IRCA es cero (0) puntos cuando cumple con los valores aceptables para cada una de las características físicas, químicas y microbiológicas contempladas en la presente Resolución y cien puntos (100) para el más alto riesgo cuando no cumple ninguno de ellos. Para el cálculo del Índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano (IRCA), ecuación 1.<sup>(43)</sup>

Ecuación 1: expresión para el cálculo del índice de riesgo de calidad del agua (IRCA) por muestra.<sup>(43)</sup>

$$IRCA = \frac{\sum \text{puntajes de riesgo asignado a las características no aceptables}}{\sum \text{puntajes de riesgo asignados a todas las características analizadas}} \times 100$$

**Tabla 5. Clasificación del nivel de riesgo en salud según el IRCA por muestra y el IRCA mensual y acciones que deben adelantarse<sup>(43)</sup>**

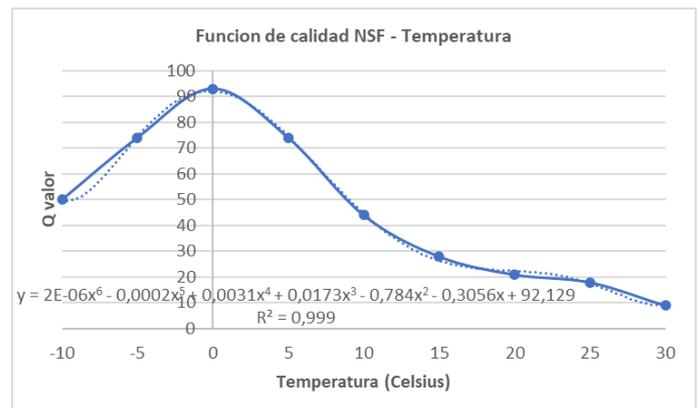
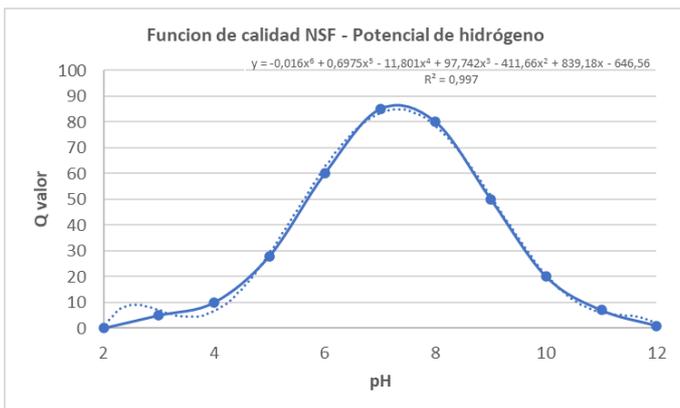
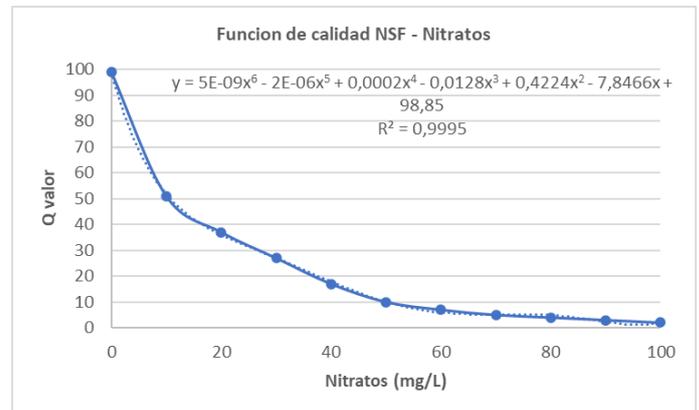
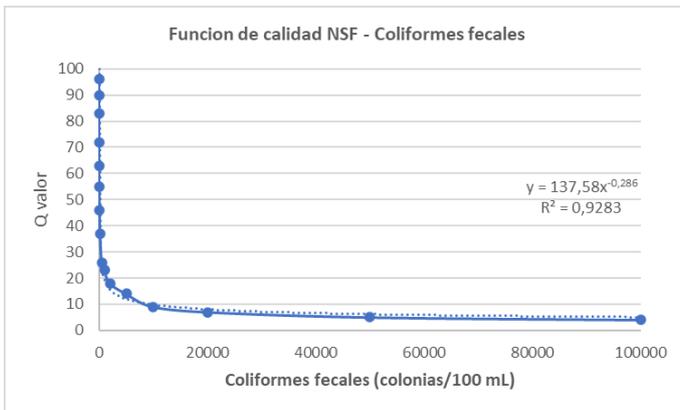
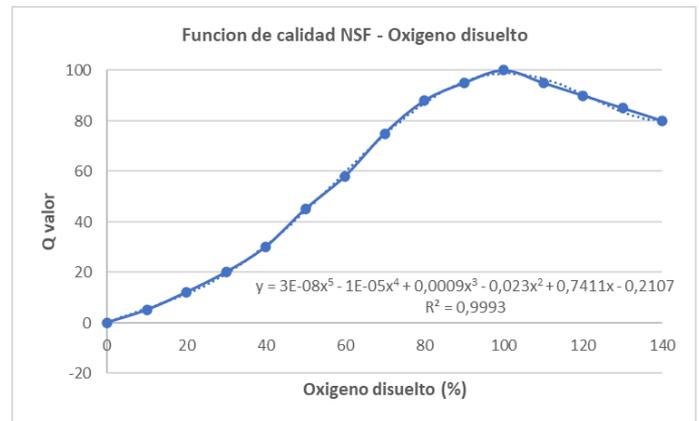
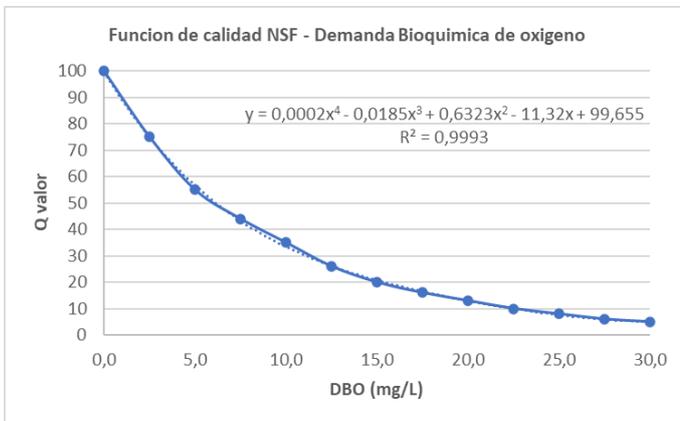
Clasificación IRCA (%)	Nivel de Riesgo	IRCA por muestra (Notificaciones que adelantará la autoridad sanitaria de manera inmediata)	IRCA mensual (Acciones)
80,1 - 100	Inviabile Sanitaria Mente	Informar a la persona prestadora, al COVE, Alcalde, Gobernador, SSPD, MPS, INS, MAVDT, Contraloría General y Procuraduría General.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia de la persona prestadora, alcaldes, gobernadores y entidades del orden nacional.
35,1 - 80	Alto	Informar a la persona prestadora, COVE, Alcalde, Gobernador y a la SSPD.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia de la persona prestadora y de los alcaldes y gobernadores respectivos.
14,1 - 35	Medio	Informar a la persona prestadora, COVE, Alcalde y Gobernador.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de la persona prestadora.
5,1 - 14	Bajo	Informar a la persona prestadora y al COVE.	Agua no apta para consumo humano, susceptible de mejoramiento.
0 - 5	Sin Riesgo	Continuar el control y la vigilancia.	Agua apta para consumo humano. Continuar la vigilancia.

Teniendo en cuenta los resultados del IRCA por muestra y del IRCA mensual, se define la siguiente clasificación del nivel de riesgo del agua suministrada para el consumo humano por la persona prestadora y se señalan las acciones que debe realizar la autoridad sanitaria competente, tabla 5.

**Índice de Calidad del Agua de la Fundación Nacional de Saneamiento (en inglés como: Water Quality Index The National Sanitation Foundation (WQINSF))**

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, en 1970 se planteó un índice de calidad que tiene en cuenta 3 usos: contacto directo del humano, contacto indirecto y el contacto con el agua remoto. Este está basado en la estructura del índice de Horton y en el método Delphi para definir los parámetros, pesos ponderados, subíndices li y su clasificación a ser empleados en el cálculo (panel de expertos). Adicionalmente, el índice fue desarrollado como una herramienta para caracterizar en forma general la calidad de las aguas, de tal forma que procesos físicos, químicos o biológicos que indican alta degradación de las aguas pueden ser enmascarados por otros que no sugieren contaminación alguna (o mínima).<sup>(44)</sup>

Este índice trabaja a partir de una función de valores relativos, en dónde se relaciona el valor medido y el valor permitido para un uso específico. Además, hace una relación entre mediciones en diferentes tiempos. El indicador analiza nueve parámetros de calidad del agua, siendo estos: oxígeno disuelto, coliformes fecales, pH, Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), Cambio de temperatura (desde 1 milla río arriba), fosfato total, nitrato, turbidez, y Sólidos totales.<sup>(44)</sup>



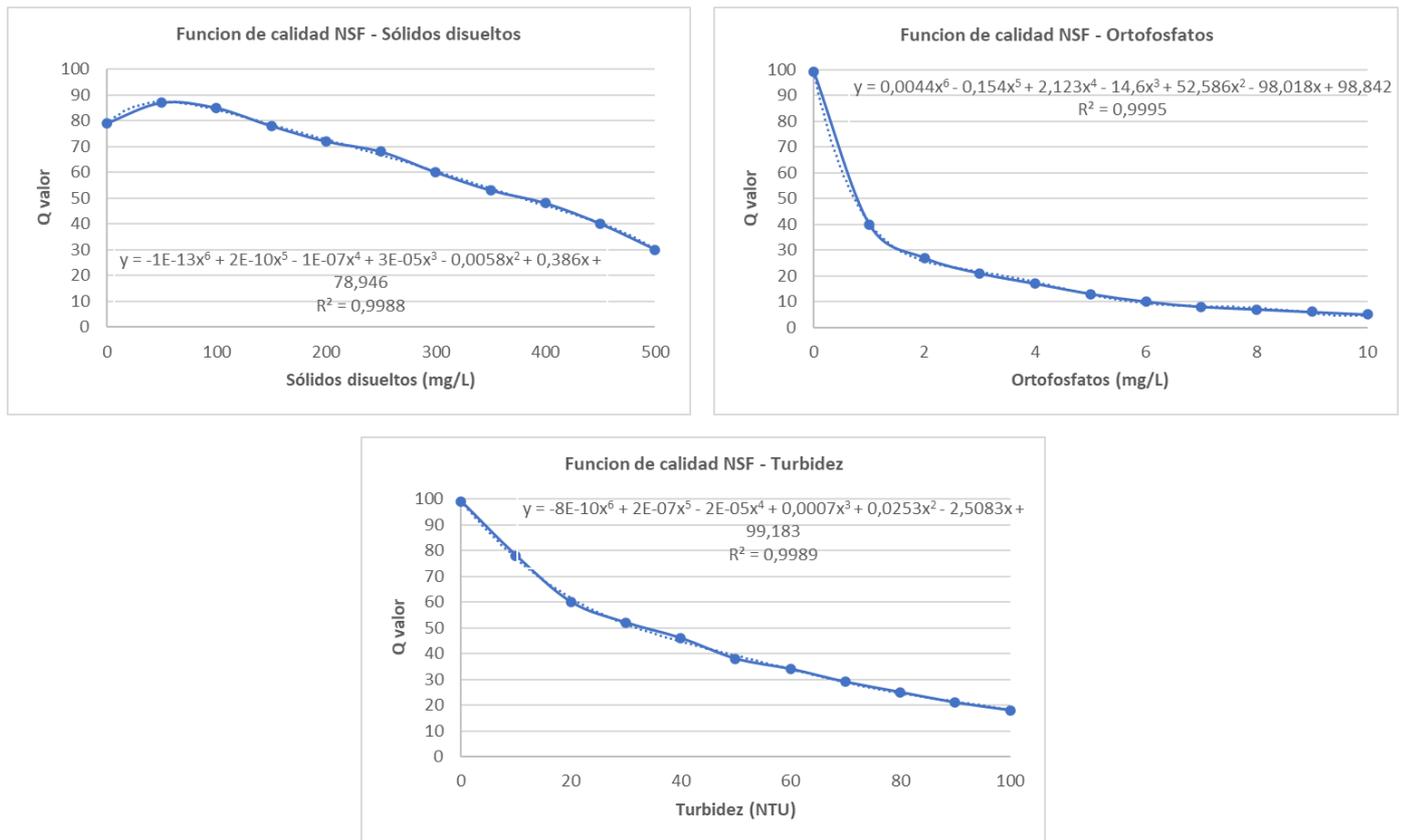


Figura 1. Gráficas de función de calidad NSF para obtener los Q valor de los parámetros de análisis del Indicador WQINSF<sup>(43)</sup>

Posteriormente se grafica el nivel de calidad del agua que oscila entre 0 (peor) y 100 (mejor) a partir de los datos brutos para cada conjunto de mediciones, se promedian los valores de cada curva y de esta manera obtener una curva de ponderación para cada parámetro. Y finalmente, los resultados de los nueve parámetros se comparan con las curvas y se obtiene un valor numérico o Q valor.<sup>(44)</sup>

Finalmente, para cada Q valor se multiplica por el factor de ponderación NSF según la ecuación 2. Ecuación 2: expresión para el cálculo del índice Índice WQINSF y valores de ponderación.<sup>(44)</sup>

$Q_i$ : Q valor para cada parámetro  
 $W_i$ : Valor de ponderación para cada parámetro

$$WQI_{NSF} = \sum_{i=1}^9 Q_i \times W_i$$

Parámetro de calidad	$W_i$
% Saturación de oxígeno disuelto	0,17
Coliformes fecales	0,16
pH	0,11
Demanda bioquímica de oxígeno	0,11
Nitratos	0,1
Fosfatos	0,1
Cambio en la temperatura	0,1
Turbiedad	0,08
Sólidos disueltos totales	0,07

**Tabla 6. Clasificación de calidad de agua en función del índice WQINSF<sup>(44)</sup>**

Valor del Índice	Clasificación	Leyenda
0-25	Muy mala	
26-50	Mala	
51-70	Media	
71-90	Buena	
91-100	Excelente	

Después de determinar el índice de calidad para el punto de muestreo, este se debe comparar con los rangos de clasificación de la calidad del agua, tabla 6.

**Dinius**

Desarrollados en Estados Unidos por Dinius, el primero en 1972 y el segundo en 1987, está conformado por 12 parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, adicionalmente está basado en el método Delphi y evalúa la calidad general del agua teniendo en cuenta su idoneidad para seis usos del agua: consumo humano (agua pública y abastecimiento), agricultura, pesca y vida acuática, industrial y recreación.<sup>(45)</sup>

Si como el ICA - NSF emplea para su cálculo el producto ponderado, comúnmente conocido como ecuación de tipo multiplicativo. Las concentraciones de cada parámetro se transforman en valores numéricos sin unidades aplicando las funciones de subíndice correspondientes.<sup>(45)</sup>

Luego, los valores del subíndice normalizados tienen asignados pesos de ponderación para cada parámetro que se combinan en una agregación multiplicativa, de la cual se deriva el índice general. El índice final de Dinius es un único valor numérico entre 0 y 100. Sin embargo, este valor no corresponde a una determinada clase de calidad sino a una diferente para cada uso del agua considerado, ecuación 2.<sup>(45)</sup>

Ecuación 3: expresión para el cálculo del índice Dinius y valores de ponderación.<sup>(45)</sup>

$$WQI_{Dinius} = \prod_{i=1}^{12} I_i^{W_i}$$

Parámetro de calidad	W <sub>i</sub>
Temperatura	0,077
Oxígeno disuelto (OD)	0,109
Demanda química de oxígeno (DQO)	0,097
Alcalinidad total	0,063
Color	0,063
Dureza total	0,065
pH	0,077
Conductividad	0,079
Cloruros	0,074
Nitratos	0,09
Coliformes totales	0,09
Coliformes fecales	0,116

I<sub>i</sub> es la escala de calidad del subíndice de la variable i (entre 0 y 100)

W<sub>i</sub> es el peso ponderado de la variable i (entre 0 y 1, y  $\sum_{i=1}^{12} W_i = 1$ )

El valor obtenido permite clasificar el recurso a partir de una escala de 5 rangos de clasificación de calidad del agua.

**Tabla 7. Clasificación de calidad de agua en función del índice WQIDINIUS<sup>(45)</sup>**

Valor del Índice	Clasificación	Leyenda
0-40	Muy mala	
41-50	Mala	
51-80	Media	
81-90	Buena	
91-100	Excelente	

**Índice de calidad del agua potable (en inglés como: como Drinking Water Quality Index (DWQI))**

El Índice de programación ambiental de las Naciones Unidas (en inglés como: United Nation Environment Programme, (UNEP)) en 2007 hace parte de uno de los índices más recientes, el cual propone una estructura de cálculo orientada a una evaluación más amplia de calidad del agua (variación en el tiempo y el espacio) en el cual se evalúa para un periodo de tiempo determinado - usualmente un año- el número de parámetros que exceden un punto de referencia (normatividad vigente de acuerdo con el uso estudiado), el número de registros que superan este punto y la magnitud en que se supera esta referencia. Se aplica a las fuentes de abastecimiento a ser usadas para producir agua potable y que fue desarrollado ante la necesidad de evaluar la situación mundial de las fuentes de captación.<sup>(46)</sup>

Al ser un índice desarrollado en los últimos años contempla parámetros como los metales pesados, los cuales están relacionados con el riesgo químico y cuya evaluación se centra en la destinación del recurso para consumo humano previa potabilización.<sup>(46)</sup>

Esta selección de parámetros se dio según recomendaciones de la guía de la OMS para monitoreo y evaluación de la calidad química del agua potable en los cuales los parámetros son agrupados en dos categorías: salud y aceptabilidad, razón por la cual el DWQI se subdivide en dos índices, el ICA salud (en inglés como: Human Water Quality Index - HWQI) y el ICA aceptación (en inglés como: Aceptation Water Quality Index - AWQI), los cuales consideran parámetros relacionados con la problemática a evaluar.<sup>(45)</sup>

El proceso realizado es igual al Índice de Calidad del Agua del Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (en inglés como: Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME\_WQI)) el cual fue desarrollado para simplificar el reporte de los datos de calidad de las aguas. Es una herramienta para generar resúmenes de los datos de calidad útiles tanto para técnicos como para políticos, así como para el público en general interesado en ese conocimiento. No es un sustituto de los análisis detallados de la calidad de las aguas.<sup>(46)</sup>

Este índice se basa en la determinación de tres factores que representan alcance, frecuencia y amplitud. El alcance (F1) define el porcentaje de variables que tienen valores fuera del rango de niveles deseables para el uso que se esté evaluando respecto al total de variables consideradas. La frecuencia (F2) se halla por la relación entre la cantidad de valores fuera de los niveles deseables respecto al total de datos de las variables estudiadas. Mientras la amplitud es una medida de la desviación que existe en los datos, determinada por la magnitud de los excesos de cada dato fuera de rango al compararlo con su umbral, ecuación 3.<sup>(46)</sup>

Ecuación 3: expresión para el cálculo del Drinking Water Quality Index (DWQI).<sup>(46)</sup>

$$DWQI = 100 - \left( \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right)$$

F1: Alcance  
F2: Frecuencia  
F3: Amplitud

**Alcance:**

$$F_1 = \frac{\# \text{ de variables fuera del rango}}{\text{Total de variables}} * 100$$

**Amplitud:**

$$F_3 = \left( \frac{nse}{0.01(nse) + 0,01} \right) * 100$$

**Frecuencia:**

$$F_2 = \frac{\# \text{ de datos fuera del rango}}{\text{Total de datos}} * 100$$

**Suma normalizada de excesos**

$$nse = \frac{\sum \text{Rango de exceso}}{\text{Total de datos}}$$

$$\text{Rango de exceso} = \left( \frac{\text{Valor excedido}}{\text{rango}} \right) - 1$$

Para la clasificación del agua después del cálculo del índice se utiliza:

Valor del Índice	Clasificación	Leyenda
0-44	Pobre	
45-64	Marginal	
65-79	Regular	
80-94	Buena	
95-100	Excelente	

### Índice simplificado de calidad del agua (ISQA)

En España, Queralt en el año 1982 desarrolló el índice simplificado de calidad del agua (ISQA) para las cuencas de Cataluña, el cual se basó en 5 parámetros fisicoquímicos y planteó una clasificación de la calidad del agua para 6 usos específicos del recurso, entre los cuales se destaca el abastecimiento para consumo humano. El ISQA es un número adimensional que permite operar con muy pocos parámetros analíticos y a la vez ofrece garantía en los resultados, ecuación 4.<sup>(47)</sup>

Ecuación 4: expresiones para el cálculo del índice simplificado de calidad del agua (ISQA).

$$ISQA = T(A+B+C+D)$$

En donde:

T: es función de la temperatura del agua del río medida en °C. su valor asignado varía entre 0,8 y 1.

- Si  $t \leq 20^\circ\text{C}$  entonces  $T = 1$
- Si  $t > 20^\circ\text{C}$  entonces  $T = 1 - (t - 20) * 0,0125$

A: es función de la oxidabilidad y corresponde al oxígeno consumido en una oxidación con  $\text{MnO}_4\text{K}$  en ebullición y medio ácido, (a) expresada en mg/L (DQO). Incluye el contenido orgánico, tanto si es natural como si no lo es. Varía entre 0 y 30.

- Si  $a \leq 10$  entonces  $A = 30 - a$
- Si  $60 > a > 10$  entonces  $A = 21 - (0,35 * a)$
- Si  $a > 60$  entonces  $A = 0$

B: es función de la materia en suspensión (sólidos suspendidos SST) en mg/L que puede separarse por filtración. Este parámetro incluye polución orgánica, inorgánica, industrial y/o urbana. Tiene mucha influencia en la fotosíntesis. Varía entre 0 y 25.

- Si  $SST \leq 100$  entonces  $B = 25 - (0,15 * SST)$
- Si  $250 > SST > 100$  entonces  $B = 17 - (0,07 * SST)$
- Si  $SST > 250$  entonces  $B = 0$

C: es función del oxígeno disuelto ( $\text{O}_2$ ) en el agua en mg/L. Su concentración está en relación con la oxibilidad y con el contenido de materia orgánica biodegradable. Varía entre 0 y 25.

- $C = 2,5 * \text{O}_2 \text{ disuelto}$
- Si  $\text{O}_2 \text{ disuelto} \leq 10$  entonces  $C = 25$

D: es función de la conductividad eléctrica expresada en  $\mu\text{S}/\text{CM}$  (C) a  $18^\circ\text{C}$ . Mide la concentración de sales inorgánicas. Si la conductividad se ha medido a  $25^\circ\text{C}$  para convertirla a  $18^\circ\text{C}$  se debe multiplicar por 0,86. Varía entre = y 20.

- Si conductividad  $\leq 4000$  entonces
- $D = (3,6 - \text{Log } c) * 15,4$
- Si es  $> 4000$  entonces  $D = 0$

El rango de valores de este índice va de 0 para valores pésimos hasta 100 para valores óptimos, tabla 9.

Valor del Índice	Clasificación	Leyenda
0-25	Muy mala	
26-50	Mala	
51-70	Media	
71-90	Buena	
91-100	Excelente	

*Índice de Calidad del Agua Bruta para Fines de Abastecimiento Público (en portugués como: Índice de Qualidade das Águas Brutas para Fins de Abastecimento Público (IAP))*

Este índice se calcula en los puntos de muestreo de los ríos y embalses utilizados para el suministro público de agua. Es el producto resultante de dos índices, IQA (índice de calidad de agua) e ISTO (índice de sustancias tóxicas y organolépticas) y está conformado por diferentes funciones de agregación; el IQA, al ser una adaptación del ICA-NSF, emplea una ecuación basada en el promedio ponderado y en el caso del ISTO, la ecuación emplea el producto de la ponderación de los dos subíndices mínimos más críticos del grupo de sustancias tóxicas (ST) por la ponderación obtenida a través de la media aritmética de los subíndices del grupo de sustancia organolépticas (SO).<sup>(48)</sup>

El índice es compuesto por tres grupos principales de variables:

- IQA - CETESB: grupo de variables básicas (temperatura del agua, pH, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, coliformes termotolerantes, nitrógeno total, fósforo total, residuo total y turbidez).<sup>(48)</sup>
- ISTO - ST: variables que indican la presencia de sustancias tóxicas (potencial de formación de trihalometano THM, número de cianobacterias, cadmio, plomo, cromo total, mercurio y níquel).<sup>(48)</sup>
- ISTO - SO: grupo de variables que afectan a la calidad organoléptica (hierro, manganeso, aluminio, cobre y zinc).<sup>(48)</sup>

Las variables que indican la presencia de sustancias tóxicas y que afectan a la calidad organoléptica están agrupadas en el índice de sustancias tóxicas y organolépticas ISTO utilizado para determinar el IAP, a partir del IQA original (CETESB).<sup>(48)</sup>

Para cada parámetro se establecen curvas de calidad que asigna ponderaciones que varían de 0 a 1. Las curvas de calidad son hechas utilizando dos niveles de calidad ( $q_i$ ) que se asocian a los valores numéricos 1 y 0,5, respectivamente, como el límite inferior (LI) y el límite superior (LS). De esta manera, se consideró el límite inferior para cada una de estas variables como los estándares de potabilidad establecidos en la Ordenanza No 888 de 2021 del Ministerio de Salud, y para el límite superior se consideraron los estándares de calidad del agua dulce clase 3 de la Resolución CONAMA No 357 de 2005.<sup>(48)</sup>

En los casos en que el estándar de calidad de agua fuera igual al estándar de potabilidad, se adopta un nivel de concentración para el límite superior que fuera posible de ser removido por medio del tratamiento convencional. Por ejemplo, de acuerdo con la OMS, el cromo tiene una tasa de eliminación en el tratamiento convencional que varía de 0 al 30 %. Al aplicar una tasa de eliminación promedio del 15 % al límite inferior, se obtiene un límite superior de 0,059 mg/L. Entonces, si el valor medido  $\leq$  LI entonces  $q_i = 1$ , de lo contrario  $q_i = 0,5(\text{Valor medido} - \text{LI})/(\text{LS} - \text{LI})$ .<sup>(48)</sup>

Las bandas de variación de calidad ( $q_i$ ), que se asignan a los valores medidos reflejan las siguientes condiciones de calidad del agua cruda destinada al abastecimiento público:

- Valor medido  $\leq$  LI: aguas adecuadas para consumo humano.
- $\text{LI} < \text{Valor medido} \leq \text{LS}$ : aguas adecuadas para tratamiento convencional o avanzado.
- Valor medido  $>$  LS: Aguas que no deben someterse únicamente a un tratamiento convencional.

En la siguiente tabla se relacionan los límites inferiores y superiores adoptados para las variables:

Tabla 10. Límite inferior y superior según la variable de estudio para el índice ISTO <sup>(48)</sup>				
Grupo	Variable	Unidad	Límite inferior	Límite superior
Tóxicos	Cadmio	mg/L	0,003	0,01
	Plomo	mg/L	0,01	0,033
	Cromo total	mg/L	0,05	0,059
	Níquel	mg/L	0,02	0,025
	Mercurio	mg/L	0,001	0,002
	THM	ug/L	373	461
Organolépticos	Aluminio	mg/L	0,2	2
	Cobre	mg/L	2	8
	Hierro	mg/L	0,3	5
	Manganeso	mg/L	0,1	0,5
	Zinc	mg/L	5	5,9

En ambientes lenticos, una característica importante de la calidad del agua para el suministro público es la participación del componente biológico (algas). Con el apoyo de regulaciones como la Ordenanza de potabilidad No 518/2004 del Ministerio de Salud y resolución CONAMA No 357/2005, establecieron estándares de calidad para el número de células de cianobacterias, y decidió incluir esta variable en el ISTO. En los puntos de muestreo ubicados en ambientes lenticos y utilizados para el suministro público, el número de células de cianobacterias es una variable obligatoria para el cálculo del IAP; en los demás puntos, es opcional. Por lo tanto, a través de las curvas de calidad, se determinan los valores de calidad normalizados,  $q_i$  para cada una de las variables del ISTO.<sup>(48)</sup>

La ponderación del grupo de sustancias tóxicas (ST) se obtiene multiplicando los dos valores mínimos más críticos del grupo de variables que indican la presencia de estas sustancias en el agua. Luego, la ponderación del grupo de sustancias organolépticas (SO) es obtenida a través de la media aritmética de las calidades estandarizadas de las variables pertenecientes a este grupo. Posteriormente, el ISTO es el resultado del producto de los grupos de sustancias tóxicas y de aquellas que alteran la calidad organoléptica del agua. Luego el IQA se calcula mediante la producción ponderada de las calidades del agua correspondientes a las variables que componen el índice, y finalmente, el IAP es calculado a partir del producto entre el antiguo ICA y el ISTO.<sup>(48)</sup>

Ecuación 5: expresión para el cálculo del ST del ISTO.<sup>(48)</sup>

$$\text{ST} = \text{Min-1} (q_{\text{THMFP}}; q_{\text{Cd}}; q_{\text{Cr}}; q_{\text{Pb}}; q_{\text{Ni}}; q_{\text{Hg}}; \text{QNCC}) \times \text{Min-2} (q_{\text{THMFP}}; q_{\text{Cd}}; q_{\text{Cr}}; q_{\text{Pb}}; q_{\text{Ni}}; q_{\text{Hg}}; \text{QNCC})$$

ST: valor de sustancias tóxicas.

qTHMFP; qCd; qCr; qPb; qNi; qHg; QNCC: valores de calidad normalizados  $q_i$  de Cadmio, Plomo, Cromo total, Níquel, y Mercurio respectivamente.

Ecuación 6: expresión para el cálculo del SO del ISTO.<sup>(48)</sup>

SO = Media aritmética ( $q_{Al}$ ;  $q_{Cu}$ ;  $q_{Zn}$ ;  $q_{Fe}$ ;  $q_{Mn}$ )

SO: valor de sustancias orgánicas.

qAl; qCu; qZn; qFe; qMn valores de calidad normalizados  $q_i$  de Cadmio, Aluminio, Cobre, Hierro, Manganeseo, Zinc respectivamente.

Ecuación 7: expresiones para el cálculo del índice de riesgo de calidad del agua (ISTO).<sup>(48)</sup>

ISTO = ST x SO

ISTO índice de riesgo de calidad del agua.

ST: valor de sustancias tóxicas.

SO: valor de sustancias orgánicas.

Ecuación 8: expresiones para el cálculo del índice de riesgo de calidad del agua ( $IQA_{CETESB}$ , Brasil).<sup>(48)</sup>

$$IQACETESB = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i}$$

Donde:

IQA: Índice de calidad del agua, un numero entre 0 y 100.

$q_i$ : calidad del  $i$ -ésimo parámetro, un numero entre 0 y 100, obtenido de la respectiva curva media de variación de calidad, en función de su concentración o medida.

$W_i$ : peso correspondiente al  $i$ -ésimo parámetro, un numero entre 0 y 1, atribuido en función de su importancia para la conformación global de calidad.

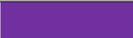
$n$ : número de variables que entran al cálculo de IQA.

Ecuación 9: expresiones para el cálculo del índice de riesgo de calidad del agua (IAP).<sup>(48)</sup>

IAP =  $IQA_{CETESB} \times ISTO$

IQA: Índice de calidad del agua.

ISTO índice de riesgo de calidad del agua.

Tabla 11. Clasificación de calidad de agua en función del índice IAP <sup>(48)</sup>		
Valor del Índice	Clasificación	Leyenda
<19	Pésimo	
19-36	Mala	
36-51	Regular	
51-79	Buena	
79-100	Optima	

### El proyecto AMOEBA

El Método General de Evaluación Ecológica y Biológica (AMOEBA) consiste en un método general de valoración ecológica y biológica originado en el proyecto de cooperación internacional entre la oficina central para el control de la contaminación de la India y el programa de cooperación internacional del gobierno Holandés, enfocándose en establecer un programa de monitoreo en el Rio Yamuna en la India, debido a la urgente necesidad de implementar técnicas adecuadas para determinar la calidad del agua.<sup>(49)</sup>

AMOEBa es una representación gráfica de la descripción y valoración de ecosistemas acuáticos. Este método da una visión del estado ecológico de un sistema en relación con una situación de referencia y es útil para ser usado por realizadores de políticas ambientales y personas que toman decisiones.<sup>(49)</sup>

La valoración de la calidad del agua del río Yamuna, estuvo basada en datos de monitoreos químicos, bacteriológicos y ecológicos, los cuales fueron:

- Índice de contaminación bacteriana (BPI Bacterial pollution index).
- Índice de contaminación por nutrientes (NPI Nutrient pollution index).
- Índice de producción-respiración (PRI Production respiration index).
- Índice de contaminación orgánica (OPI Organic pollution index).
- Índice saprobio bentónico (BSI Benthic saprobity index).
- Índice de diversidad biológica (BDI Biological diversity index).
- Índice de contaminación industrial (IPI Industrial pollution index).
- Índice de contaminación por pesticidas (PPI Pesticide pollution index).

En este aspecto se asume que el ecosistema no manipulado o escasamente manipulado, ofrece las mejores garantías para la preservación de estos valores, es decir, se convierte en un sistema de referencia. Los métodos pueden basarse en la comparación cronológica, en la cual, el estado de referencia es un periodo en el pasado, donde los disturbios en el sistema no fueron significativos como hoy.<sup>(49)</sup>

Cada uno de estos índices es derivado de un conjunto de variables que pueden variar acorde con los requerimientos regionales. El peso dado a cada una de las variables por índice es igual, así como el peso de cada índice relativo a otros índices. Todos los índices individuales son expresados en una escala de 0-100, donde 0 indica la peor condición ambiental imaginable y 100 demuestra un ambiente completamente natural que no está influenciado por el hombre.<sup>(49)</sup>

El valor objetivo es el valor deseable de cada índice en el cual la protección ambiental y el desarrollo sustentable se logran. Cuando el valor del índice se incrementa o llega a su valor deseado, la calidad del agua mejora. Cuando el valor objetivo aun es visible, indica que las condiciones ambientales se desvían negativamente de las condiciones deseadas. Si la región roja no es visible, las condiciones ambientales son iguales o mejores que los valores deseables y ninguna acción de protección adicional es necesaria, tabla 12.<sup>(49)</sup>

Índice	Valor deseable
BPI Bacterial pollution index	90
NPI Nutrient pollution index	70
PRI Production respiration index	70
OPI Organic pollution index	70
BSI Benthic saprobity index	60-80
BDI Biological diversity index	70
IPI Industrial pollution index	90
PPI Pesticide pollution index	90

La magnitud del índice individual y del valor deseable es expresada en un radio de magnitud variable que es escalado para unificar el radio del valor objetivo de cada índice, ecuación 10.

Ecuación 10: expresiones para el cálculo del índice de riesgo de calidad del agua (IAP).<sup>(49)</sup>

$$\text{Valor del índice es reescalado} = \frac{\text{Valor del índice}}{\text{Valor objetivo}} \times 100$$

La figura AMOEBA, es un tipo de radar en la que la magnitud de los índices y las escalas son proporcionales a los radios. Luego de reescalar el radio de todos los índices, su valor individual demostrará si excede o está dentro de los límites estipulados, figura 2.<sup>(49)</sup>

Posteriormente, los valores son representados, el valor del índice reescalado es representado en verde dentro del círculo cuyo exterior representa el valor objetivo. Cuando la zona roja del círculo es visible, indica que las condiciones ambientales se desvían negativamente de las condiciones deseables. El ancho del sector entre ellos (índice-objetivo) está relacionado con los aspectos específicos de contaminación y proporciona una pista sobre las acciones correctivas que deben tomarse.<sup>(49)</sup>

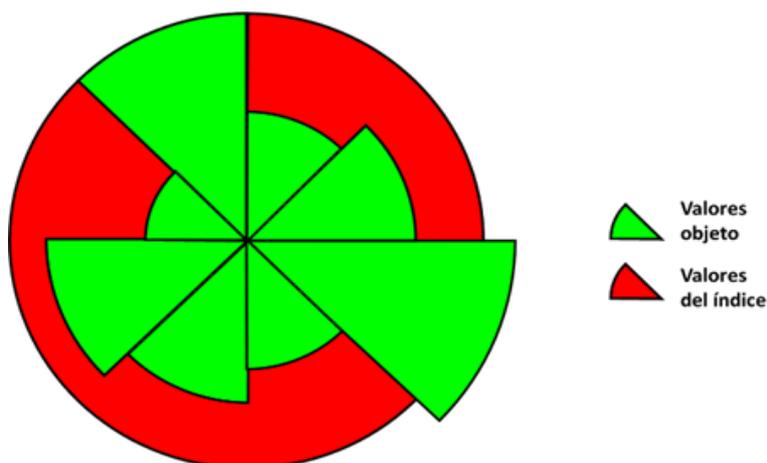


Figura 2. Radar para la representación de los índices y valores objeto en el proyecto AMOEBA<sup>(49)</sup>

**Índice de contaminación bacteriana (Bacterial pollution index BPI)**

El número de bacterias termo-tolerantes es mensualmente evaluado bajo el Numero más Probable (NMP) por tubos múltiples de fermentación o mediante la técnica de filtración de membrana. El numero hallado es transformado a un índice de calidad de agua de 0 a 100 por comparación con la función de calidad a continuación, donde 100 representa condiciones perfectas y 0 condiciones inaceptables de cargas de bacterias fecales. La función de calidad sugerida está basada en la categoría del “Mejor Uso Designado”.<sup>(49)</sup>

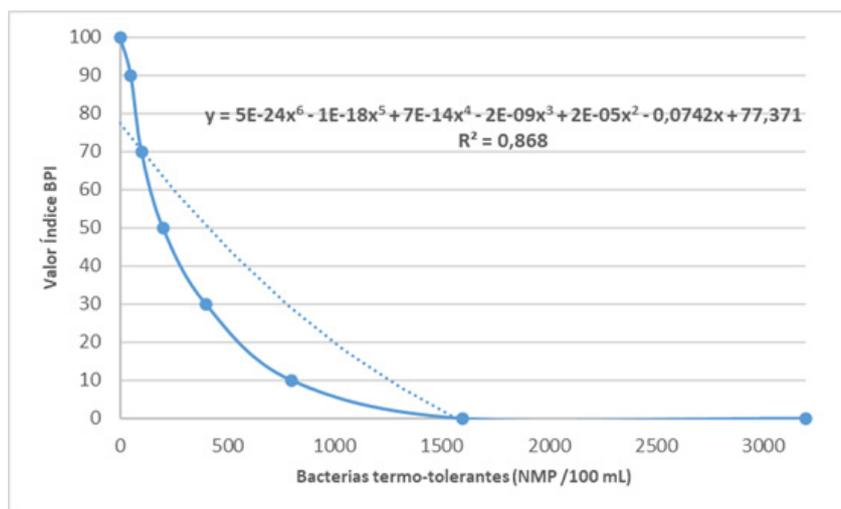


Figura 3. Función de Calidad AMOEBA BPI<sup>(49)</sup>

**Índice de contaminación por nutrientes (Nutrient Pollution Index NPI)**

El índice de contaminación por nutrientes es calculado de medidas mensuales de las siguientes variables: Amonio, nitrógeno total, nitritos más nitratos, fosforo total, ortofosfatos, pH, clorofila a, conductividad y turbidez ecuación 8, y figuras 4 a 12.

Ecuación 11: expresiones para el cálculo del índice de contaminación por nutrientes (NPI).<sup>(49)</sup>

$$NPI = e^{\sum_1^n \ln (PQI)_n \cdot W_n}$$

Donde:

PQI = índice de calidad para el n-ésimo parámetro, consistente en un numero adimensional entre 0 y 100. Estos índices de calidad son derivados de curvas de calidad de las variables, que son construidas de acuerdo con los valores objetivo de acuerdo con referencias.

Wn = factor de ponderación para el n-ésimo parámetro. Debe ser igual a 1/n = 1/9. En caso de valores reportados o faltantes, Wn debe calcularse de acuerdo con el número de variables existentes.

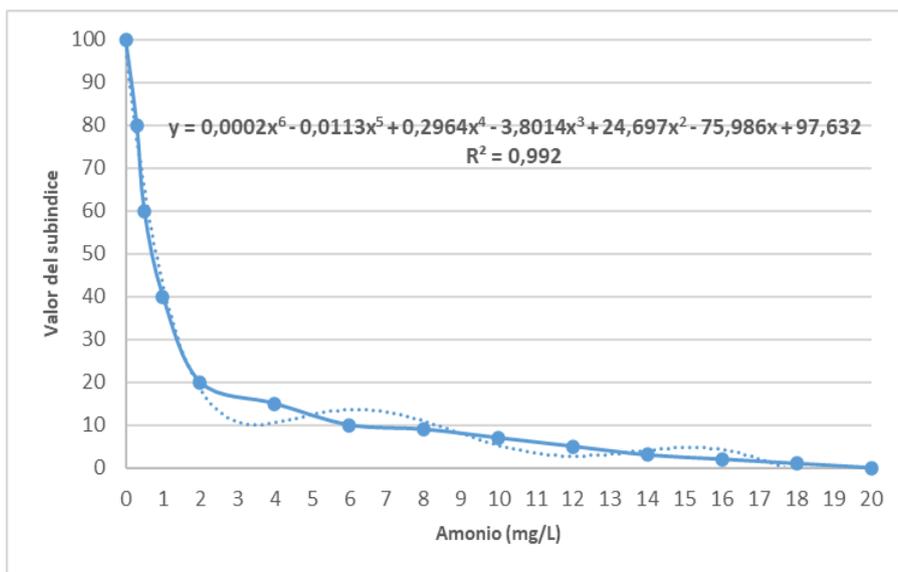


Figura 4. Función de Calidad Amonio<sup>(49)</sup>

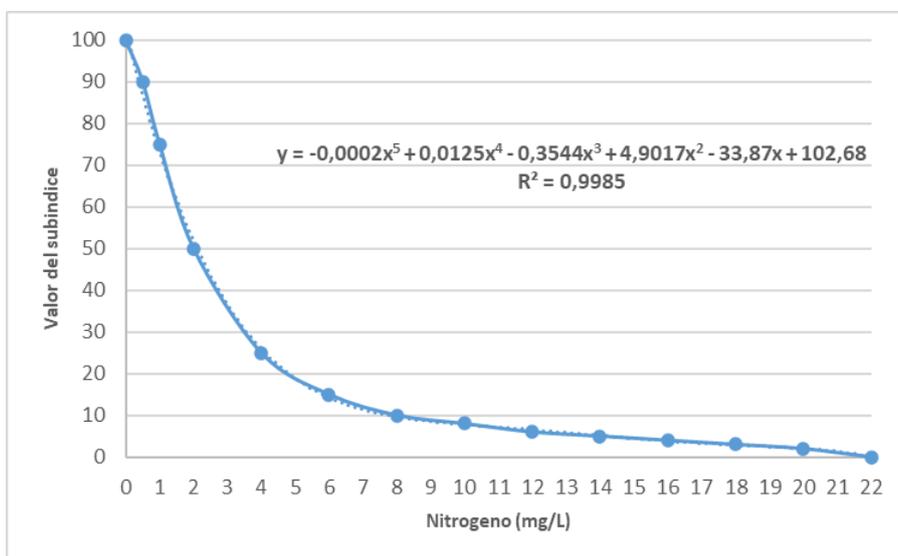


Figura 5. Función de Calidad Nitrogeno Total Keldahl<sup>(49)</sup>

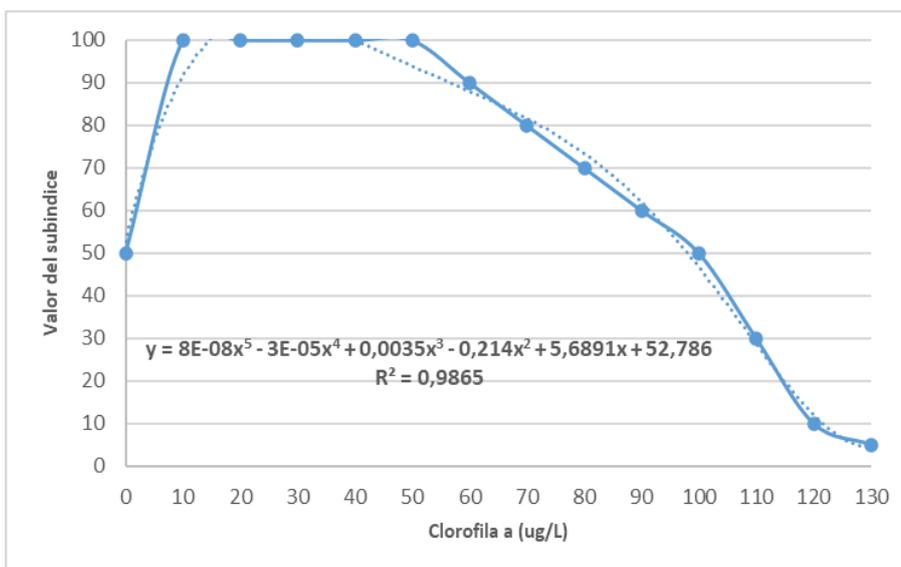


Figura 6. Función de Calidad AMOEBA Clorofila a<sup>(49)</sup>

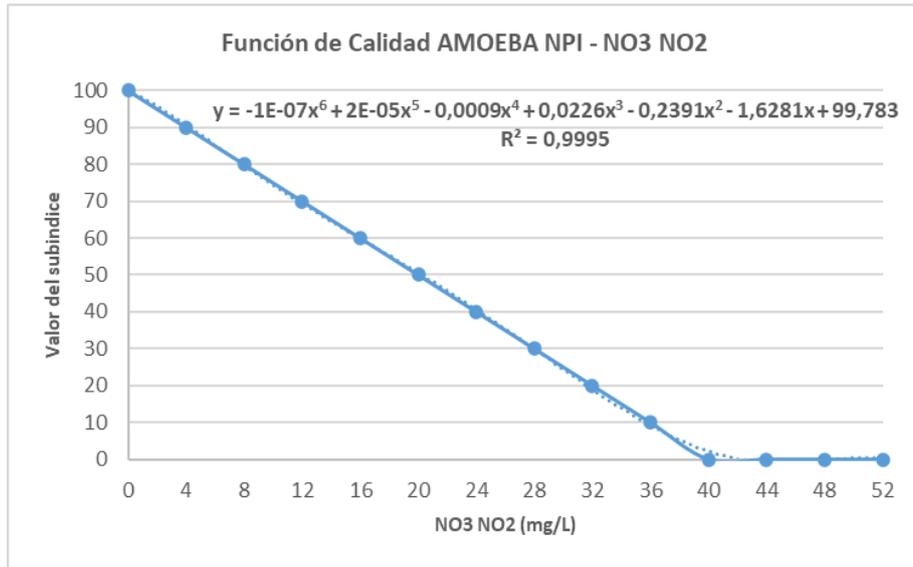


Figura 7. Función de Calidad AMOEBA NO3 NO2<sup>(49)</sup>

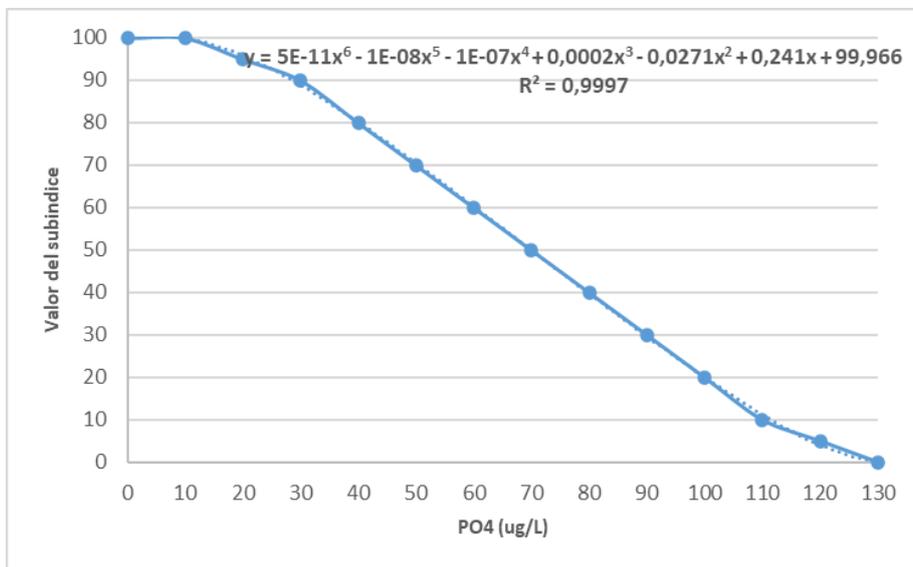


Figura 8. Función de Calidad Ortofosfatos<sup>(49)</sup>

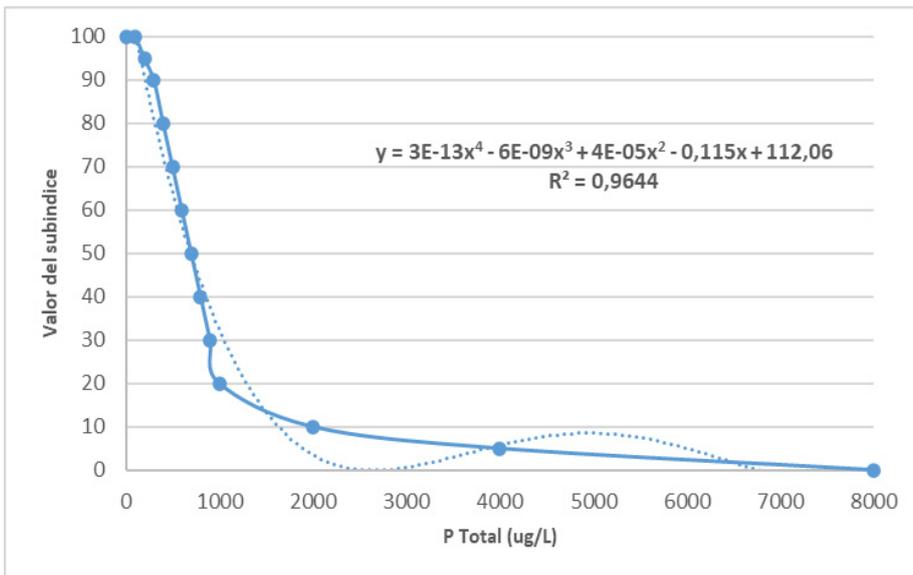


Figura 9. Función de Calidad Fósforo Total<sup>(49)</sup>

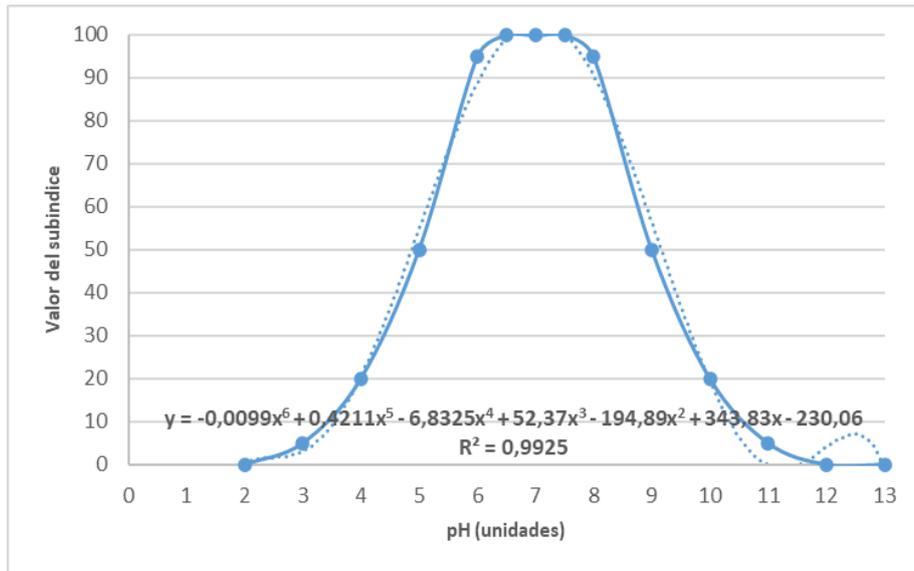


Figura 10. Función de Calidad pH<sup>(49)</sup>

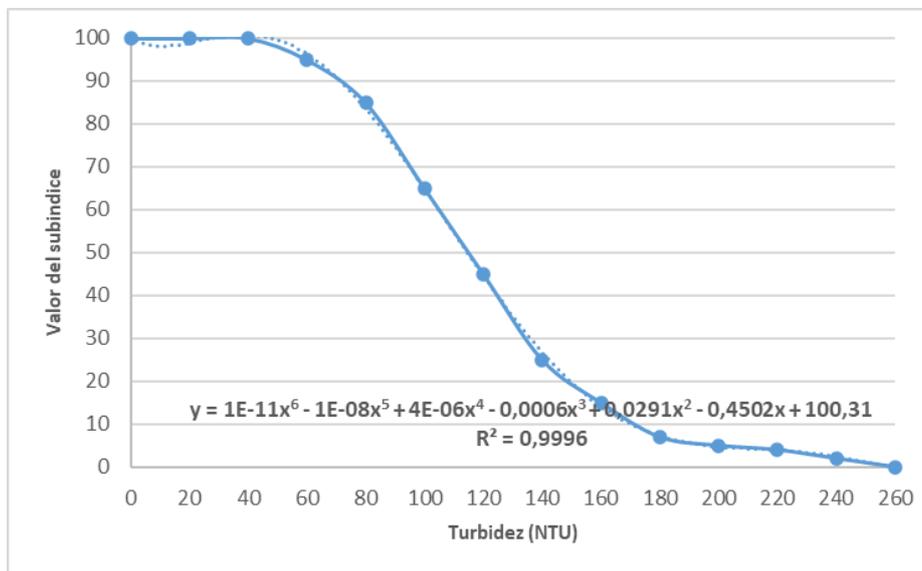


Figura 11. Función de Calidad Turbidez<sup>(49)</sup>

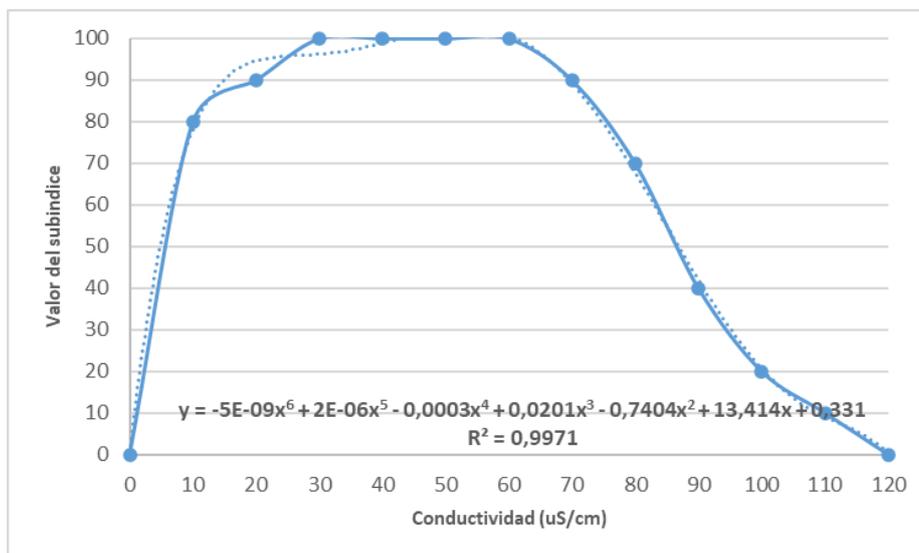


Figura 12. Función de Calidad Conductividad<sup>(49)</sup>

Índice de contaminación orgánica (Organic Pollution Index OPI)

El índice está relacionado con la disponibilidad de oxígeno y se calcula a partir de las variables de amonio, DBO, DQO, OD y temperatura. El amonio es influenciado por los niveles de nutrientes y oxígeno (incluido en los índices: OPI y NPI), las concentraciones medidas son transformadas a un índice de calidad, en una escala de 0 a 100 por comparación con una función de calidad, donde 100 representa condiciones perfectas y 0 condiciones inaceptables. La expresión corresponde a un promedio geométrico de las variables.<sup>(49)</sup>

Ecuación 12: expresiones para el cálculo del índice de contaminación por nutrientes:

(OPI) – AMOEBA [49].

$$OPI = e^{\sum_{i=1}^n Ln(PQI)_n + w_n}$$

OPI: índice de contaminación orgánica.

PQI Ln: índice de calidad para el n-ésimo parámetro, el cual es un número adimensional entre 0 y 100.

Wn: factor de ponderación para el n-ésimo parámetro. Todas las variables tienen un peso igual a 1/n. en caso de valores no registrados, Wn debe ser calculado de acuerdo con el número de valores faltantes. Nótese que la suma de todos los factores de ponderación debe ser igual a 1.

Las funciones de calidad se muestran en las figuras 13 a 17.

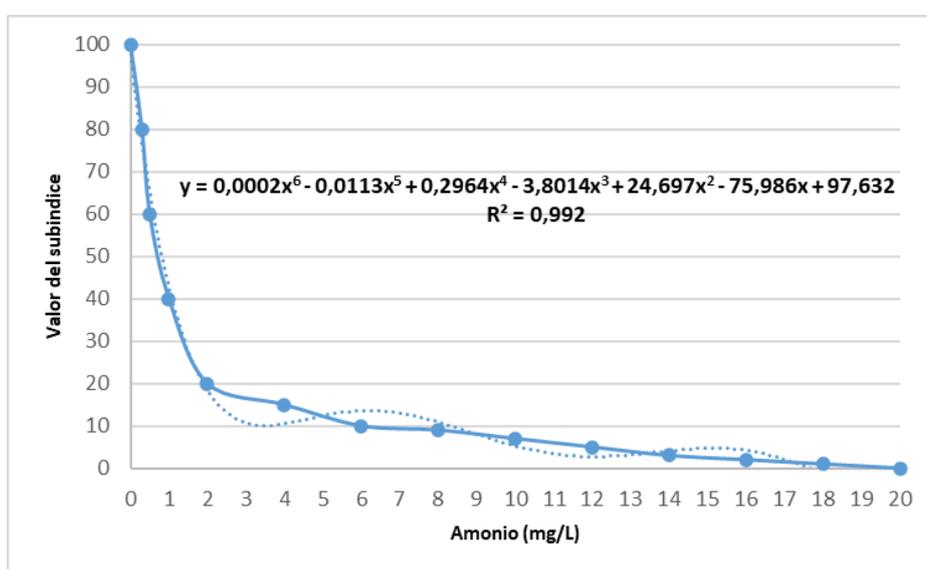


Figura 13. Función de Calidad Amonio Total<sup>(49)</sup>

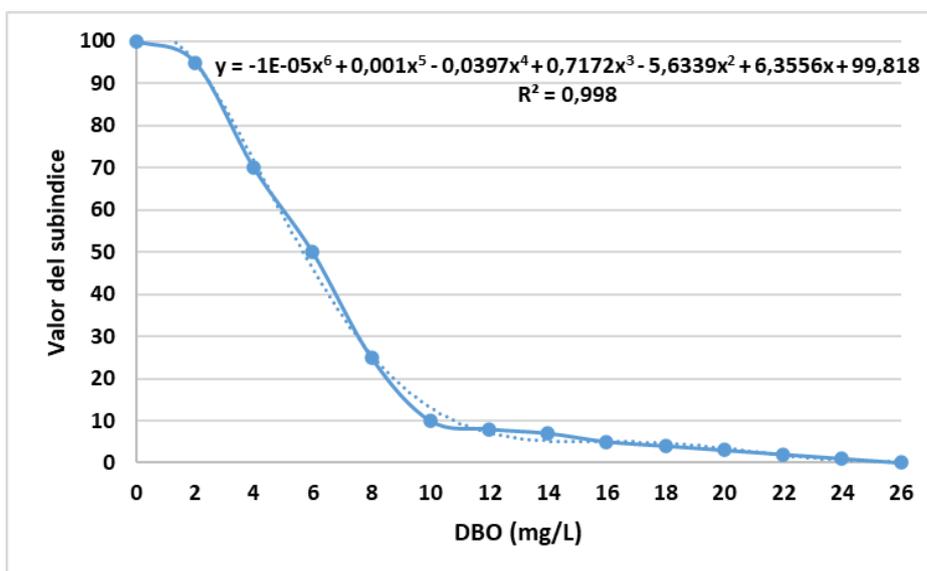


Figura 14. Función de Calidad DBO<sup>(49)</sup>

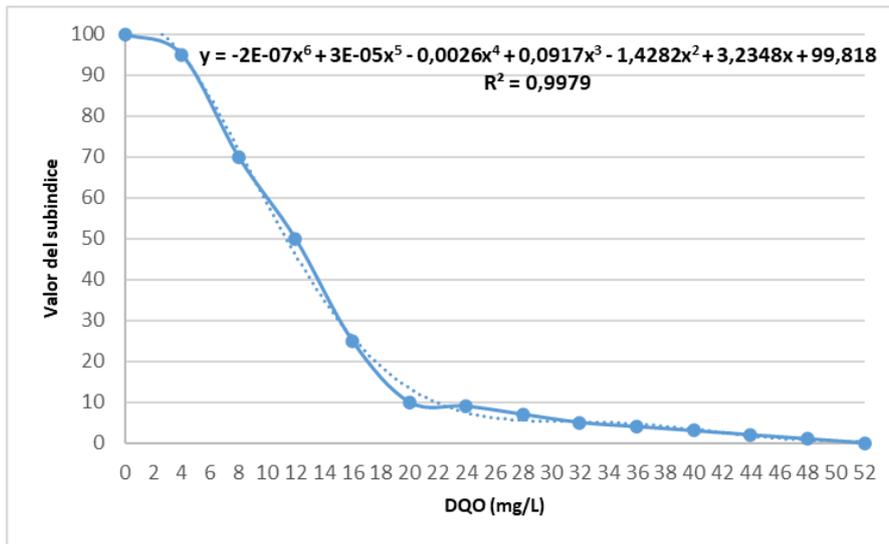


Figura 15. Función de Calidad DQO<sup>(49)</sup>

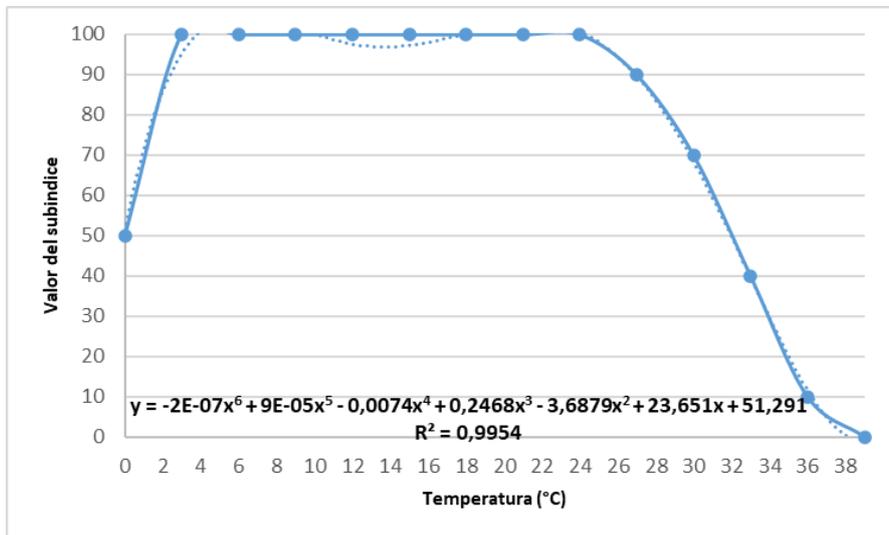


Figura 16. Función de Calidad Temperatura<sup>(49)</sup>

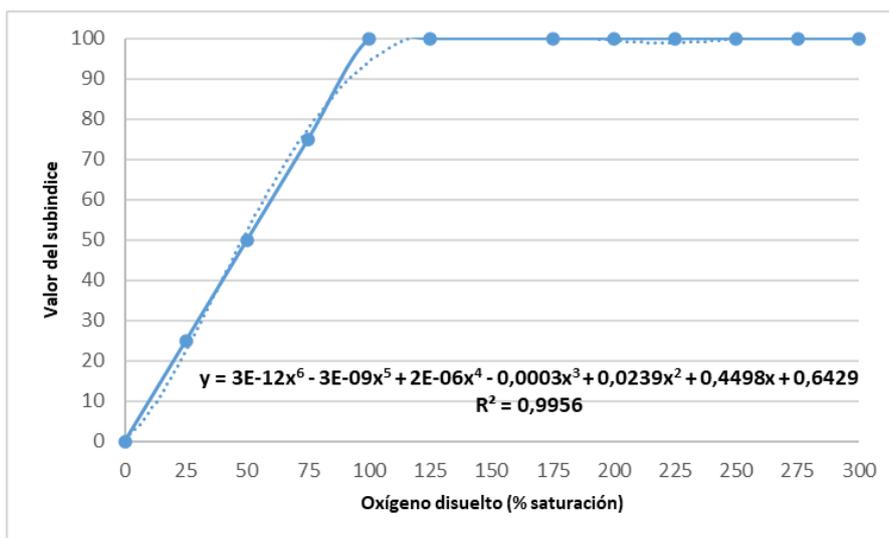


Figura 17. Función de Calidad OD<sup>(49)</sup>

*Índice de contaminación industrial (Industrial Pollution Index IPI)*

Las variables para incluir en el índice deben ser regional o localmente seleccionados de un estudio intensivo

y de duración determinada de los contaminantes industriales. En adición a la fracción disuelta en agua, puede ser importante incluir la fracción adherida a los sedimentos y la fracción acumulada en los organismos. Las variables son compuestos como: metales pesados, aceites, PAH, compuestos fenólicos, cianidas, PB, etc, igualmente se recomienda su medición mensual. La curva de calidad del parámetro usada para la construcción del índice puede ser construida a partir de metodología de evaluación de riesgos en el ecosistema, basadas en pruebas de toxicidad sobre el compuesto de interés, ecuación 13.<sup>(49)</sup>

Ecuación 13: expresiones para el cálculo del índice de contaminación industrial (IPI) - Proyecto AMOEBA.<sup>(49)</sup>

$$IPI = e^{\sum_1^n Ln(PQI)_n * w_n}$$

A continuación, se presenta las concentraciones seguras de contaminantes en los países bajos:

Tabla 13. Concentraciones seguras en agua y en sedimento para variables del índice de contaminación industrial IPI - Proyecto AMOEBA <sup>(49)</sup>		
Compuesto o nombre del grupo	Concentraciones seguras en agua (ug/L)	Concentraciones en sedimento (mg/kg dw)
Cadmio	0,16	14
Zinc	1,6	120
Níquel	1,4	7,4
Plomo	2	860
Mercurio	0,01	1,1
Cromo	2	270
Cobre	1,7	60
Arsénico	8,6	56
PCP	2	0,2
PAH	0,1	2
PCB (Aroclor 1248)	0,1	0,1
Aceites y grasas	50	?
Cianidas	50	12
Compuestos fenólicos	5	10

Las tablas 13 y 14 son las funciones de calidad, para el caso del cromo en agua y sedimento:

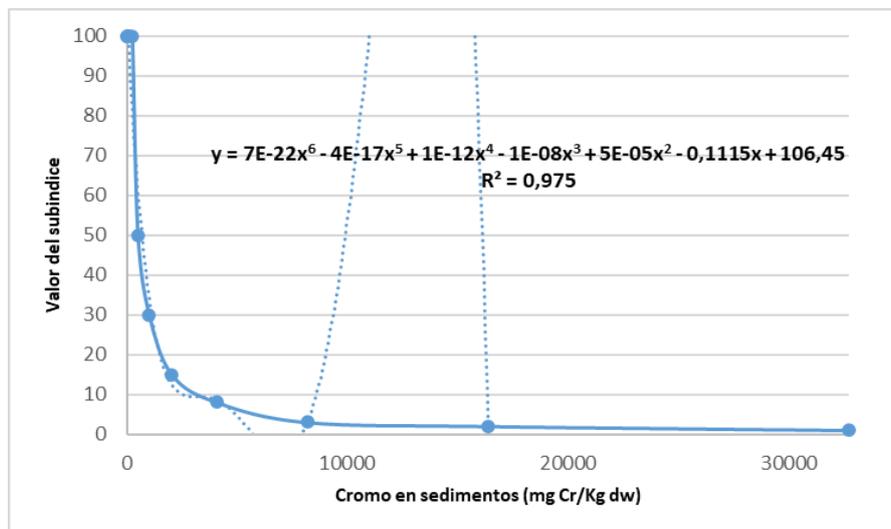


Figura 18. Función de Calidad AMOEBA IPI - Cromo en fracción disuelta<sup>(49)</sup>

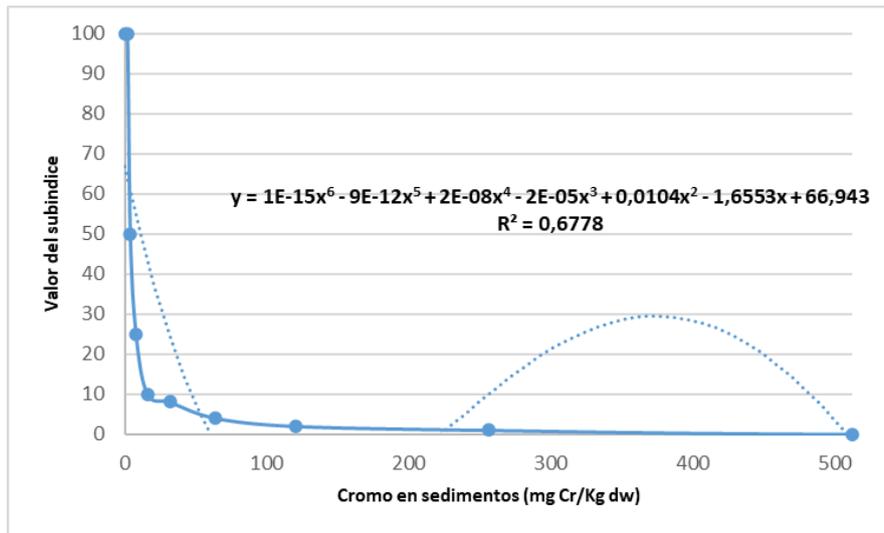


Figura 19. Función de Calidad AMOEBA IPI - Cromo en sedimentos<sup>(49)</sup>

**Índice de contaminación por pesticidas (Pesticide Pollution Index PPI)**

La expresión matemática y las abreviaciones son las mismas que las empleadas en el índice de contaminación por nutrientes, su ponderación se ajusta al número de variables. Las variables que incluye el índice son local o regionalmente seleccionados sobre determinaciones de contaminantes industriales o agrícolas, como organoclorados y fosforados, cuyas fracciones son determinadas en agua, sedimentos y organismos. Se recomienda, además, evaluaciones mensuales,<sup>(49)</sup> y como referente se pueden tener las concentraciones holandesas para pesticidas en agua y sedimento, tabla 14.

**Tabla 14. Concentraciones seguras en agua y en sedimento para compuestos del índice de contaminación por pesticidas PPI - Proyecto AMOEBA<sup>(49)</sup>**

Compuesto o nombre del grupo	Concentraciones seguras en agua (ng/L)	Concentraciones en sedimento (mg/kg dw)
HCH	500	150
DDT + derivados	100	100
Pesticidas órgano-P (Paration)	5	5
Dieldrin	50	40
TBTO	10	10
Aldrin	50	40
Endosulfan	10	10

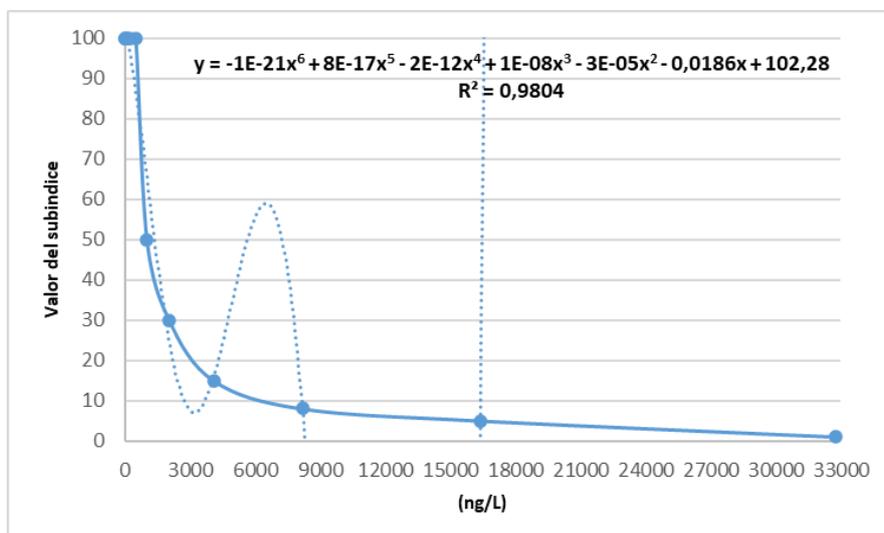


Figura 20. Función de Calidad HCH Fracción Disuelta<sup>(49)</sup>

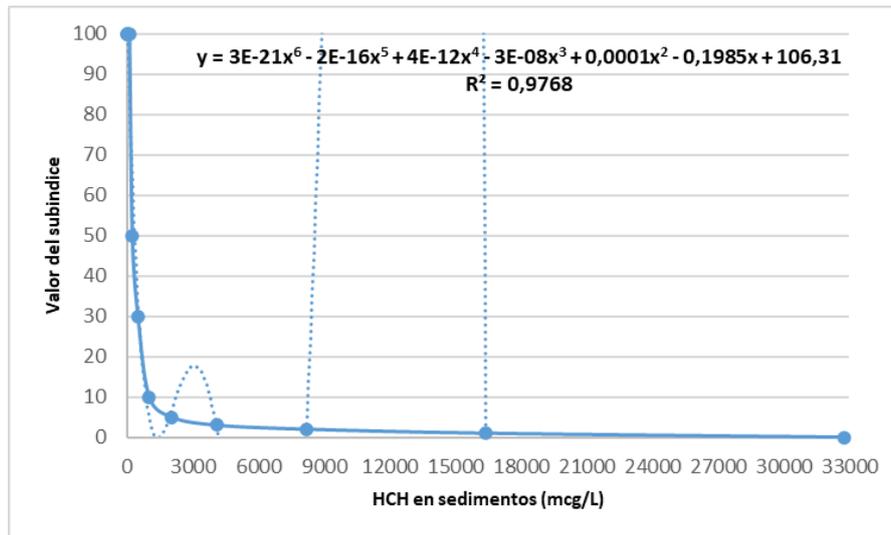


Figura 21. Función de Calidad HCH en sedimentos<sup>(49)</sup>

El valor objetivo aconsejado es de 90. Su alto valor se da por la dificultad de estimar el grado de acción del tóxico con certeza.

*Índice Saprobio de contaminación (The Benthic Saprobity Index BSI)*

Este índice puede ser evaluado acorde con el método desarrollado por The Biological Monitoring Working Party (BMWP). Este método involucra un inventario cualitativo de la presencia local de invertebrados bentónicos a nivel de familia. Todas las familias son clasificadas en una escala de 1 a 10, en relación con su referencia saprobia (disponibilidad de oxígeno) de calidad de agua. En la clase 1, las familias están principalmente en cuerpos de agua con marcada deficiencia de oxígeno, mientras que la clase 10 representa organismos que se restringen a cuerpos de agua con altos niveles de oxígeno. Esta determinación se hace con la ayuda de claves taxonómicas gráficas. Su dificultad consiste en la correcta identificación del organismo.<sup>(49)</sup>

Se acostumbra a hacer un muestreo micro-habitats en una sección del río para luego sumar y promediar el puntaje final de acuerdo con las familias encontradas en ese tramo al multiplicar este por un factor de 10, lo que proporciona una escala de 100.<sup>(49)</sup>

Como hecho de interés se halla que, bajo condiciones muy limpias, ríos de tierras bajas no siempre alcanzan altos puntajes como 8 a 19, lo que si se da continuamente en ríos de sistemas altos. Para evitar lo que se conoce como “el síndrome Belga”, el proyecto AMOEBA estableció valores que pueden ser regionalizados: ríos de Tierras Altas: alrededor de 80 y Tierras Bajas: Alrededor de 60.<sup>(49)</sup>

*Índice Biológico de Diversidad (The Biological Diversity Index BDI)*

El índice BDI, puede ser evaluado para el mismo periodo que el anterior, y cuantificarse de acuerdo con la metodología de comparaciones secuenciales de Cairns, el cual no necesita de herramientas taxonómicas, solo la simple observación. Cuando un animal es diferente al observado en la última muestra, una nueva muestra se inicia. Si no se encuentran diferencias, se detiene el muestreo.<sup>(49)</sup>

Ecuación 14: expresiones para el cálculo de la diversidad en el índice biológico de diversidad (BDI) - Proyecto AMOEBA.<sup>(49)</sup>

$$Diversidad = \frac{Número\ Total\ de\ Muestras}{No\ Total\ de\ Organismos}$$

*Índice de Producción-Respiración (The Production-Respiration Index PRI)*

Para el cálculo de este índice se tiene en cuenta el rango de producción-respiración descrito por Odum, adoptado por la American Public Health Association.

La producción primaria ha sido estimada por una medida de 24 horas del oxígeno disuelto (OD) de acuerdo con la siguiente fórmula:

Ecuación 15: expresiones para el cálculo del OD según Odum para el índice de producción-respiración (PRI) - Proyecto AMOEBA.<sup>(49)</sup>

$$OD = Producción - Respiración + Difusión$$

Si el delta OD, la difusión por unidad de área y el tiempo son conocidos, la curva diurna de producción puede ser estimada. La reducción del OD durante la noche, es atribuida a la respiración, entre tanto el incremento del OD en el día es el resultado de la producción primaria y la tasa de respiración. Si se asume que la tasa de respiración de día y noche es igual, la tasa de producción del día puede ser calculada. Las tasas de difusión positiva (entrada) o negativa (salida), se estima sobre la base de la temperatura y la profundidad promedio del río. Para estimar el cálculo de respiración y producción por unidad de área es necesario conocer la tasa de flujo o caudal del río.<sup>(49)</sup>

La proporción de P/R semeja una campana, que esta cercana a cero en el extremo inferior lo que significan condiciones saprobias; de 3 a 4, las condiciones son extremadamente eutróficas, y el valor de 1 implica un ecosistema en balance. Esta proporción puede ser convertida en un índice de producción-respiración por la comparación de la siguiente función de calidad que es análoga al método aplicado para el índice de contaminación bacteriana BPI. Valores alrededor de 70 muestran ecosistemas estables.<sup>(49)</sup>

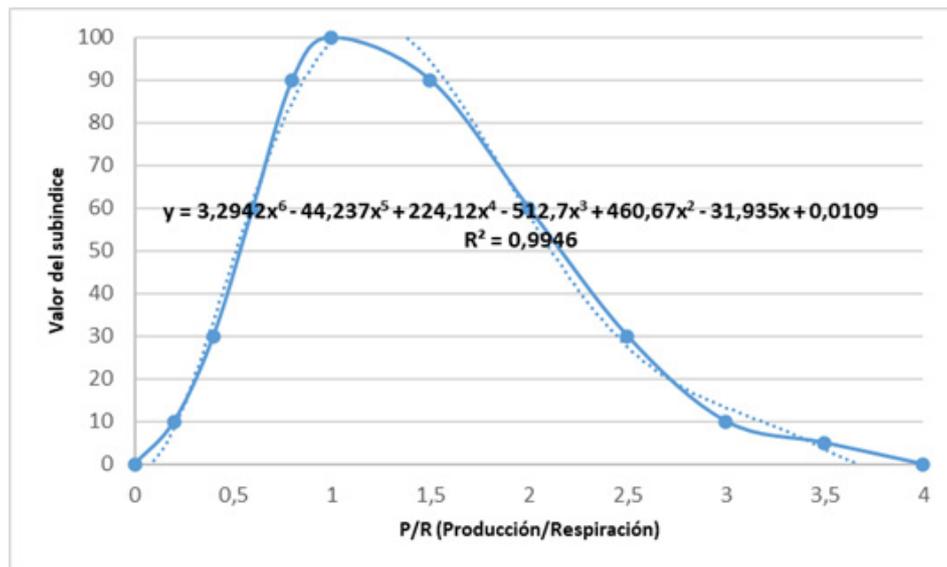


Figura 22. Función de Calidad P/R<sup>(49)</sup>

### Índice Universal de la Calidad del agua (en inglés como: Universal Water Quality Index (UWQI))

La metodología UWQI fue desarrollada y aplicada con el fin de obtener un índice método más sencillo para describir la calidad de las aguas superficiales utilizadas para el abastecimiento de agua potable, conformado por 11 parámetros fisicoquímicos y uno microbiológico. El cálculo se basa en las directivas de la Unión Europea para aguas a ser destinadas al consumo humano previo tratamiento, con el fin de facilitar su uso en los diferentes países que la conforman.<sup>(50)</sup>

Se calcula por una ecuación de tipo aditivo o suma ponderada que es menos sensible a variaciones extremas en la calidad del agua, condiciones que limitan su uso en la evaluación de la calidad del agua en fuentes superficiales sometidas a cambios súbitos y extremos en sus características físicas, químicas y microbiológicas, ecuación 16.<sup>(50)</sup>

Ecuación 16: expresiones para el cálculo del UWQI.<sup>(50)</sup>

$$UWQI = \sum_{i=1}^n W_i I_i$$

Donde:

Wi es el peso o porcentaje asignado al i-ésimo parámetro.

Ii es el subíndice del i-ésimo parámetro.

La asignación de pesos a las variables de calidad tuvo como factores: los parámetros químicos tuvieron un peso menor que los parámetros microbiológicos (porque los contaminantes microbianos pertenecen a la categoría de mayor impacto en la salud) y se da un peso alto a aquellos parámetros de conocida preocupación para la salud. Los pesos temporales oscilan entre 1 y 4 en una escala básica o media, de gran y muy gran importancia. Posteriormente, cada peso se dividió por la suma de todos los pesos para llegar al factor de peso final, tabla 15.<sup>(50)</sup>

**Tabla 15.** Pesos ponderados según el parámetro de calidad para el UWQI<sup>(50)</sup>

Categoría	Variable	Clasificación	Factor de peso
Peligro para la salud	Coliformes totales	4	0,114
	Cadmio	3	0,086
	Cianuro	3	0,086
	Mercurio	3	0,086
	Selenio	3	0,086
	Arsénico	4	0,113
	Fluoruro	3	0,086
	Nitrato-nitrógeno	3	0,086
Monitoreo operacional	OD	4	0,114
	pH	1	0,029
Agotamiento del oxígeno	DBO	2	0,057
	Total fosforo	2	0,057

El esquema de categorización del Índice se presenta a continuación:

**Tabla 16.** Clasificación de calidad de agua en función del índice UWQI<sup>(50)</sup>

Rango UWQI	Clasificación	Color
0 - 24	Pobre	
25 - 49	Marginal	
50 - 74	Regular	
75 - 94	Buena	
95 - 100	Excelente	

### Índice de Calidad para el río Cauca (ICAUCA)

En el ámbito regional y nacional, se han desarrollado diferentes estudios orientados a desarrollar o adaptar ICA acordes con las características ambientales de algunas fuentes superficiales. Rojas adaptó el ICA-NSF a las condiciones específicas del río Cauca, reduciendo el número de parámetros que lo conforman con base en el análisis del comportamiento de éstos en el tiempo y en el espacio y modificando los pesos porcentuales asignados a cada parámetro de acuerdo con su nivel de importancia en la evaluación de la calidad del agua del río Cauca.<sup>(51)</sup>

Para el caso del río Cauca se definió un ICA a partir de las condiciones y dinámicas presentes en el territorio, haciéndolo más preciso para el estudio de la calidad del agua de este cuerpo de agua, determinando como variables el oxígeno disuelto, coliformes fecales, turbiedad, DBO5, sólidos suspendidos totales, color, sólidos totales, pH, fosforo total, nitrógeno total.<sup>(51)</sup>

Ecuación 17: expresiones para el cálculo del índice de calidad para el río Cauca (ICAUCA).<sup>(50)</sup>

$$ICAUCA = \prod_{i=1}^N I_i^{W_i} = (I_1^{W_1})(I_2^{W_2}) \dots (I_n^{W_n})$$

i: corresponde a cada uno de los parámetros de calidad elegidos (OD, DBO5, ST, pH, etc).

Ii es una función especial definida para que la variable i transforme el valor real en un numero de calidad normalizado. Corresponde al subíndice del parámetro (se encuentra entre 0 y 100).

Wi corresponde al peso o porcentaje asignado a cada parámetro i.

Ecuaciones del subíndice y ponderación según cada parámetro para el índice de la calidad del agua ICAUCA se muestra en la tabla 17.

Los valores de las diferentes variables monitoreadas permiten establecer la clasificación de la calidad del agua según la tabla 17.

Parámetro	Ponderación (W)	Ecuación del subíndice
Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO5)	0,15	$I_{DBO5} = e^{(4,5824-0,1078 DBO5 + 2,4581 \cdot 10^{-14} e^{DBO5})}$ $DBO_5 > 30 \text{ mg/L}, I_{DBO5} = 2$
Porcentaje oxígeno disuelto (%Sat)	0,21	$I_{\%Sat} = e^{(1,3663+0,063 \%sat-0,000303 \%sat^2)}$ $Si \%Sat > 140, I_{\%Sat} = 50$
Turbiedad (Turb)	0,08	$I_{Turb} = e^{(4,561-0,0196 Turb + 2,4167 \cdot 10^{-5} Turb^2)}$ $Si Turb > 100 \text{ UNT}, I_{Turb} = 5$
Sólidos Totales (ST)	0,07	$I_{ST} = 1 / (0,0123 - 1,3545 \cdot 10^{-5} ST + 9,265 \cdot 10^{-8} ST^2)$ $Si ST > 500 \text{ mg/L}, I_{ST} = 20$
pH	0,08	$I_{pH} = e^{(-7,6434pH+18,5352 1/pH + 14,625(\ln(pH))^2)}$ $Si pH < 2 \text{ o } pH > 12 \text{ und } I_{pH} = 0$
Coliformes totales (CT)	0,15	$I_{CT} = e^{(4,5685-0,1305 \ln(CT)-0,0129 (\ln(CT))^2)}$ $Si CT > 10^5 / 100 \text{ ml}, I_{CT} = 2$
Nitrógeno total (NT)	0,08	$I_N = e^{(4,4706-0,043 NT+2,8813 \cdot 10^{-5} NT^2)}$ $Si NT > 100 \text{ mg/L}, I_{NT} = 1$
Fósforo Total (PT)	0,08	$I_{PT} = 1 / (0,0084 + 0,0143 PT + 0,00074 PT^2)$ $Si PT > 10 \text{ mg/L}, I_{PT} = 2$
Color	0,05	$I_{color} = 127 \text{ color}^{-0,2394}$
Sólidos suspendidos totales (SST)	0,05	$I_{SST} = -0,3005 SST + 102,11$ $Si SST \leq 10 \text{ mg/L}, I_{SST} = 100$ $Si SST \leq 340 \text{ mg/L}, I_{SST} = 2$

Tabla 18. Clasificación de calidad de agua en función del índice ICAUCA<sup>(51)</sup>

Rango ICAUCA	Clasificación	Color
0 - 20	Pésima	
20 - 35	Inadecuada	
35 - 50	Aceptable	
50 - 80	Buena	
80 - 100	Optima	

### Contaminantes emergentes (CE)

Compuestos químicos distinto origen y naturaleza, cuya presencia en el ambiente no es considerada importante en términos de distribución y/o concentración, pasando inadvertidos durante décadas, actualmente se están detectando tanto el avance de las técnicas de detección como por la acumulación durante este tiempo hasta tenerse concentraciones detectables y efectos percibibles, efectos con un impacto ecológico y a la salud humana adversos.<sup>(52,53,54)</sup>

Estos compuestos se pueden encontrar en aguas superficiales y aguas subterráneas de las cuales se hace la captación para consumo humano, estas pueden entrar a los cuerpos hídricos por el lavado de suelos por escorrentía o infiltración de los químicos aplicados en actividades agropecuarias (fertilizantes y plaguicidas),<sup>(55,56,57)</sup> o por vertimientos de actividades pecuarias (medicamentos y patógenos), industriales (agentes tensoactivos, solventes, grasas y aceites, plastificantes, metales pesados y aditivos industriales), de saneamiento de plantas de tratamiento de aguas residuales y rellenos sanitarios (compuestos orgánicos e inorgánicos complejos),<sup>(58,59,60)</sup> servicios salud hospitalarios (desinfectantes, antibióticos, analgésicos, antiherpentensivos, y hormonas esteroides), domésticas y tanques sépticos que presentan exfiltraciones que pueden contener entre (medicamentos antes mencionados, productos de cuidado personal, patógenos, grasas y aceites, detergentes, solventes, desinfectantes, drogas ilícitas, hormonas esteroides, cafeína, y nicotina).<sup>(52)</sup>

Estos compuestos pueden ser cancerígenos (inducen o aumentan la incidencia de cáncer), mutagénicos (aumentan la frecuencia de mutación en las células),<sup>(61,62,63)</sup> teratogénico (sustancia que puede producir alteraciones en el feto durante su desarrollo) o actuar alterando el sistema endocrino de los organismos (alterar la homeostasis hormonal que es importante para mantener las funciones vitales de crecimiento, reproducción y comportamiento).<sup>(52)</sup>

Por otro lado, hay una alta prevalencia de virus en el ambiente y por ende un importante impacto en la salud pública e importantes pérdidas económicas principalmente a través de la transmisión de virus por agua y alimentos por especies de Anenovirus, Poliovirus, Parchovirus, Virus de Norwalk, Virus de Sapporo, Virus de la

Hepatitis E, Rotavirus y Astrovirus.<sup>(53)</sup>

En este sentido, se ha propuesto también la identificación de virus humanos como potenciales indicadores de contaminación, donde el virus de la hepatitis E presenta una elevada prevalencia en áreas geográficas que se consideraban libres de cepas endémicas (se presentan casos clínicos esporádicos y reservorios animales),<sup>(64,65,66)</sup> se ha dado la detección de poliomavirus en prácticamente el 100 % de las muestras de agua relacionados con casos de ingestión de virus y/o genomas virales con potencial oncogénico. No obstante, el control de la contaminación viral emergente en el ambiente requiere la estandarización de técnicas moleculares y desarrollo del sistema de vigilancia que permita valorar parámetros víricos.<sup>(53)</sup>

### MARCO CONCEPTUAL

El actual índice de calidad de agua es objeto de discusión por el tipo de variables que mide, los rangos o valores máximos, y la ponderación del riesgo.<sup>(67,68)</sup> Respecto a las variables que mide, se encuentra que debería ampliarse las variables microbiológicas y químicas a analizar, puesto que los casos de enfermedades asociadas al agua de tipo biológico son crecientes y la proliferación de una gran diversidad de sustancias químicas de origen inorgánico u orgánico desarrolladas y usadas en diferentes ámbitos, y que se desconoce sus efectos en la salud.<sup>(54)</sup>

En relación con lo anterior, los CE corresponden, a contaminantes no regulados, que deben ser considerados en la regulación futura, la cual depende de investigaciones sobre los efectos potenciales a la salud, los ecosistemas y su incidencia. No obstante, para la mayoría de estos contaminantes emergentes, la incidencia, la contribución de riesgo y los datos eco-toxicológicos, no están disponibles.<sup>(69,70)</sup> Y donde la acumulación CE en el ambiente, las tasas transformación y remoción de estos son superadas por la introducción continua hace necesario un seguimiento más específico para garantizar la calidad del agua.<sup>(52)</sup>

En este sentido, el trabajo se alinea con las necesidades de considerar los CE como variables a considerar como parte del índice de calidad del agua, puesto que la acumulación y la reposición continua de los CE así como los riesgos ecológicos y a la salud humana ameritan su seguimiento, y con la consideración de aquellas sustancias que son probables para áreas rurales donde usualmente se realiza la captación de agua con fines de potabilización.

### MARCO LEGAL

A continuación, se relaciona y explica la normatividad legal vigente que tienen aplicabilidad en el desarrollo del proyecto.

**Tabla 19.** Marco normativo relacionado con el índice de riesgo a la calidad del agua

Norma	Ámbito que regula	Aplicabilidad en el trabajo de grado
Resolución 330 del 8 de junio de 2017	Adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS	Establece el IRCA como criterio para establecer los riesgos presentes y potenciales hacia el futuro de la microcuenca de abastecimiento
Resolución 4716 del 18 de noviembre de 2010	Establecer las condiciones, recursos y obligaciones mínimas que deben cumplir las autoridades sanitaria departamental, distrital y municipal categoría especial, 1,2, y 3 y ambiental competente para elaborar los Mapas de Riesgo de la calidad del agua para consumo humano	Frecuencias y numero de muestras para vigilancia y control de las características físicas, químicas y microbiológicas del mapa de riesgo de la calidad del agua para consumo humano
Resolución 2115 del 22 de junio de 2007	Señala las características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano	Establece las características físicas, químicas y microbiológicas a hacer seguimiento del agua para consumo humano
Decreto 1575 del 9 de mayo de 2007	Establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano	Establece el IRCA como instrumento básico para garantizar la calidad del agua para consumo humano La selección de las sustancias potencialmente tóxicas se basará en la información de terceros responsables y afectados por la presencia de esos tóxicos en el agua y los contaminantes que se generan en las actividades productivas de la región y pueden estar presentes en la fuente que abastece el sistema de suministro

## CONCLUSIONES

La calidad del agua es un pilar fundamental para la salud pública, la sostenibilidad ambiental y el desarrollo socioeconómico. En Colombia, el marco legal vigente, representado por normativas como la Resolución 2115 de 2007 y el Decreto 1575 del mismo año, ha permitido establecer parámetros mínimos de vigilancia y control de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para consumo humano. Sin embargo, la complejidad creciente de los factores que afectan la calidad del recurso hídrico hace evidente la necesidad de fortalecer y actualizar los métodos de evaluación tradicionales.

En este contexto, los índices de calidad del agua (ICA) han representado una herramienta clave para sintetizar la información técnica en indicadores comprensibles y útiles para la toma de decisiones. El IRCA, el WQINSF, el DWQI, el UWQI, entre otros, han contribuido a estandarizar el seguimiento del recurso y a orientar políticas públicas. No obstante, estos índices enfrentan limitaciones importantes: su enfoque predominante en parámetros convencionales deja de lado compuestos cuya presencia y efectos han sido reconocidos recientemente, conocidos como contaminantes emergentes (CE).

Estos CE, como fármacos, pesticidas, productos de cuidado personal, hormonas, microplásticos, y virus emergentes, han demostrado tener implicaciones significativas para la salud humana y los ecosistemas acuáticos, pese a no estar aún regulados. Su detección creciente gracias a avances analíticos pone de manifiesto una brecha entre la realidad actual del recurso hídrico y los métodos tradicionales de evaluación. Por tanto, resulta urgente integrar estos contaminantes en los esquemas de monitoreo y en los ICA, mediante metodologías como las planteadas en el índice AMOEBA o adaptaciones del ICA existentes a realidades locales, como el ICAUCA.

La adaptación e innovación en la evaluación de la calidad del agua requiere un enfoque integral y dinámico que combine parámetros tradicionales con nuevas variables, considere las particularidades regionales y promueva un monitoreo constante. Además, debe tenerse en cuenta la percepción social, la accesibilidad de la información y la utilidad práctica de los índices para distintos actores, desde autoridades hasta comunidades.

En conclusión, el desafío no radica solo en mejorar la medición de la calidad del agua, sino en avanzar hacia una gestión más preventiva, adaptativa e inclusiva, que garantice el acceso a agua segura para todas las poblaciones, en especial las rurales y vulnerables, y que asegure la conservación de los ecosistemas acuáticos a largo plazo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Suárez S, Molina E. El desarrollo industrial y su impacto en el medio ambiente. *Rev Cubana Hig Epidemiol.* 2014;52(3):357-63.
2. Arias J. Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Rev Investig Agrar Ambient.* 2017;8(1):151-67.
3. Ahmed M, Matsumoto M, Ozaki A, Thinh NV, Kurosawa K. Heavy metal contamination of irrigation water, soil, and vegetables and the difference between dry and wet seasons near a multi-industry zone. *Water.* 2019;11(3):583. <https://doi.org/10.3390/w11030583>
4. Manoj S, Thirumurugan M, Elango L. An integrated approach for assessment of groundwater quality in and around uranium mineralized zone, Gogi region, Karnataka, India. *Arab J Geosci.* 2017;10(24):557. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3321-5>
5. Jawad M, Arslan M, Siddique M, Ali S, Tahseen R, Afzal M. Potentialities of floating wetlands for the treatment of polluted water of river Ravi, Pakistan. *Ecol Eng.* 2019;133:167-76. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.022>
6. Bhuiyan A, Dampare B, Islam A, Suzuki S. Source apportionment and pollution evaluation of heavy metals in water and sediments of Buriganga River, Bangladesh, using multivariate analysis and pollution evaluation indices. *Environ Monit Assess.* 2015;187(4075):1-21. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4075-0>
7. Zhang J, Li H, Zhou Y, Dou L, Cai L. Bioavailability and soil-to-crop transfer of heavy metals in farmland soils: a case study in the Pearl River Delta, South China. *Environ Pollut.* 2018;235:710-9. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.106>
8. Sabogal L. El riesgo sanitario y la eficiencia de los sistemas de tratamiento en la selección de tecnologías para la potabilización del agua. Cali: Universidad del Valle; 2000.
9. Rojas R. Guía para la vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano. 2002.

10. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Sección 2. Evaluación y manejo del riesgo. En: Manual de evaluación y manejo de sustancias tóxicas en aguas superficiales. 2001. p. 46.
11. Guerra C. Ponderación de los riesgos de origen microbiano y químico en la desinfección del agua potable: la perspectiva panamericana. *Bol Oficina Sanit Panam*. 1993;115:451-4.
12. World Health Organization (WHO). Conquering suffering, enriching humanity. The world health report 1997. Geneva: WHO Graphics; 1997. p. 157.
13. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). El medio ambiente en Colombia. Bogotá: IDEAM; 2001.
14. Fernández N, Solano F. Índices de calidad y contaminación del agua. Pamplona: Universidad de Pamplona; 2008.
15. González T, Osorio I, Riascos A. Evaluación del proceso de reporte del IRCA a las plataformas SUI y SIVICAP web desde el marco del INCA en los años 2016-2019, caso de estudio: Magdalena, zona bananera. *Encuentro Int Educ Ing*. 2019.
16. Ministerio de Salud y Protección Social. Informe nacional de calidad del agua para consumo humano. 2021 [citado 2023 mar 31]. Disponible en: <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/informe-nacional-de-calidad-del-agua-para-consumo-humano-inca-2021.pdf>
17. Instituto Nacional de Salud. Estado de la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano en Colombia. 2019 [citado 2023 mar 31]. Disponible en: <https://www.ins.gov.co/BibliotecaDigital/estado-de-la-vigilancia-de-la-calidad-del-agua-para-consumo-humano-en-colombia-2019.pdf>
18. Carrasco D, Delgado Y, Cobos F. Contaminantes emergentes y su impacto en la salud. Emerging contaminants and its impact on the health. *Rev Fac Cienc Méd Univ Cuenca*. 2017;35(2):55-9.
19. González T, Osorio I, Riascos A. Evaluación del proceso de reporte del IRCA a las plataformas SUI y SIVICAP web desde el marco del INCA en los años 2016-2019, caso de estudio: Magdalena, zona bananera. *Encuentro Int Educ Ing*. 2019.
20. García C, García J, Rodríguez J, Pacheco R, García M. Limitaciones del IRCA como estimador de calidad del agua para consumo humano. *Rev Salud Pública*. 2018;20:204-7.
21. Cruz A, Rodríguez L. Análisis de los índices de riesgo de calidad de agua potable (IRCA) en Boyacá entre 2016-2019. *Agricolae Habitat*. 2021;4(1).
22. Romero J, Ibarra N. Valoración del índice de calidad del agua cruda (ICA), del índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano (IRCA), del índice de tratamiento (IT), del índice de continuidad (IC) y del índice de riesgo municipal por abastecimiento de agua para consumo humano por prestador (IRABAPP), para el periodo 2010-2011, de sistemas de tratamiento de agua potable. *Rev Esc Colomb Ing*. 2013;23(92):13-22.
23. Briñez K, Guarnizo C, Arias A. Calidad del agua para consumo humano en el departamento del Tolima. *Rev Fac Nac Salud Pública*. 2012;30(2):175-82.
24. Enríquez C, Torres A, Enciso F. Comportamiento del índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano y demanda de agua en el acueducto Yamboró, Pitalito - Huila. *Rev Investig Agroempresariales*. 2020;7.
25. Torres M, de Navia L. Calidad físico-química y microbiológica del agua del municipio de Bojacá, Cundinamarca. *Nova*. 2010;8(14).
26. Candelario M, Pinto L. Evaluación del agua para consumo humano utilizando el índice de riesgo de la calidad del agua en el municipio de Puerto Nariño (Amazonas). *Agricolae Habitat*. 2023;6(2):27-40.
27. González L. Evaluación del índice de riesgo de calidad de agua (IRCA) para la mejora de las condiciones de calidad del sistema de potabilización del acueducto de la vereda Quiche del municipio de Chiquinquirá-Boyacá. 2020.

28. Doncel J, Florex C. QIRCA: complemento de QGIS para calcular índices de riesgo de la calidad del agua para consumo humano-IRCA. 2018.
29. Torres F, Carvajal A. Cobertura de acueducto y alcantarillado, calidad del agua y mortalidad infantil en Colombia, 2000-2012 (No. 012228). Bogotá: Universidad de los Andes, Facultad de Economía, CEDE; 2014.
30. Jiménez L, Ramos J, Guio P. Análisis del índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano-IRCA y su relación con variables meteorológicas y ubicación geográfica para el departamento del Tolima en los años 2012-2013. *Publicaciones Investig.* 2016;10:69-81.
31. Jiménez C. Contaminantes orgánicos emergentes en el ambiente: productos farmacéuticos. *Rev Lasallista Investig.* 2011;8(2):143-53.
32. Jank L, Hoff R, Costa F, Pizzolato T. Simultaneous determination of eight antibiotics from distinct classes in surface and wastewater samples by solid-phase extraction and high-performance liquid chromatography electrospray ionisation mass spectrometry. *Int J Environ Anal Chem.* 2014;94(10):1013-37.
33. Spongberg A, Witter J, Acuña J, Vargas J, Murillo M, Umaña G, et al. Reconnaissance of selected PPCP compounds in Costa Rica surface waters. *Water Res.* 2011;45(20):6709-17.
34. Estrada E, Cortés J, González A, Calderón C, de Rivera M, Ramírez E, et al. Assessment of full-scale biological nutrient removal systems upgraded with physico-chemical processes for the removal of emerging pollutants present in wastewaters from Mexico. *Sci Total Environ.* 2016;571:1172-82.
35. Bujanow D, Pérez V, Gavilán J, Luis J. Estudio sobre la presencia y distribución de contaminantes emergentes en los acuíferos detríticos del río Guadalhorce. En: Unidos por el agua. Huelva: Club del Agua Subterránea; 2018. p. 701-8.
36. Vadillo I, Jiménez P, Aranda J, Denguir F, Luque J, Benavente J. Presencia y distribución de contaminantes emergentes en cuatro cuencas antropizadas del sur de la Península Ibérica. 2018.
37. Meléndez J, García Y, Galván V, de León LD, Vargas K, Mejía J, Ramírez RF. Contaminantes emergentes. Problemática ambiental asociada al uso de antibióticos. Nuevas técnicas de detección, remediación y perspectivas de legislación en América Latina. *Rev Salud Ambient.* 2020;20(1):53-61.
38. Martínez I, Soto J, Lahora A. Antibióticos como contaminantes emergentes. Riesgo ecotoxicológico y control en aguas residuales y depuradas. *Ecosistemas.* 2020;29(3):2070.
39. Ramírez L, Chicaiza S, Ramos A, Álvarez C. Detección de antibióticos betalactámicos, tetraciclinas y sulfamidas como contaminantes emergentes en los ríos San Pedro y Pita del cantón Rumiñahui. *LA GRANJA Rev Cienc Vida.* 2019;30(2):88-102.
40. Taborda D, Venegas W. Elaboración del mapa de riesgos de calidad del agua para consumo humano de la quebrada La Hoya en el municipio de Zipaquirá, Cundinamarca [trabajo de grado]. 2016.
41. Ministerio de Salud y Protección Social. Programa nacional de prevención, manejo y control de la infección respiratoria aguda y la enfermedad diarreica aguda. 2023 [citado 2023 mar 31]. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/ET/programa-nacional-ira-eda-2023.pdf>
42. Universidad de Pamplona. Capítulo II. Indicadores de calidad del agua. Generalidades. [s.f.] [citado 2023 mar 31]. Disponible en: [https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portaIG/home\\_10/recursos/general/pag\\_contenido/libros/06082010/icatest\\_capitulo2.pdf](https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portaIG/home_10/recursos/general/pag_contenido/libros/06082010/icatest_capitulo2.pdf)
43. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 2007.
44. Sutadian A, Muttill N, Yilmaz A, Perera J. Development of river water quality indices—a review. *Environ Monit Assess.* 2016;188:1-29.

45. Ardila N, Arriola E. Efecto de la quema de llantas en la calidad del agua de un tramo de la quebrada Piedras Blancas. *Tecnol Cienc Agua*. 2017;8(5):39-55.
46. Balmaseda C, García Y. Índice canadiense de calidad de las aguas para la cuenca del río Naranjo, provincia Las Tunas, Cuba. *Rev Cienc Téc Agropecu*. 2014;23(3):11-6.
47. de Bustamante J, Sanz J, Goy J. 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*. 2002 [citado 2023 mar 31]. Disponible en: <https://sge.usal.es/archivos/geogacetas/Geo31/Art26.pdf>
48. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Apêndice E. Índices de qualidade das águas, critérios de avaliação da qualidade dos sedimentos e indicador de controle de fontes. 2021 [citado 2023 mar 31]. Disponible en: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2022/11/Apendice-E-Indices-de-Qualidade-das-Aguas.pdf>
49. Fernández S. Índices de calidad (ICAs) y de contaminación (ICOs) del agua de importancia mundial. Capítulo III. Pamplona: Universidad de Pamplona; 2005.
50. Boyacioglu H. Development of a water quality index based on a European classification scheme. *Water SA*. 2007;33(1):101-6.
51. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, Dirección Técnica Ambiental. Objetivos de calidad del río Cauca - tramo Valle del Cauca. Documento técnico de soporte. 2023 [citado 2023 mar 31]. Disponible en: <https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2023-06/Res.%200298%20de%202023-%20Objetivos%20de%20calidad%20del%20r%C3%ADo%20Cuaca%20-%20Tramo%20Valle%20del%20Cauca.pdf>
52. Pachés A. Contaminantes emergentes. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia; 2020.
53. Bofill S, Clemente P, Albiñana N, Maluquer C, Hundesa A, Girones R. Efectos sobre la salud de la contaminación de agua y alimentos por virus emergentes humanos. *Rev Esp Salud Pública*. 2005;79:253-69.
54. Becerril J. Optimización de metodologías analíticas para la determinación de contaminantes emergentes en aguas de abastecimiento y residuales [tesis]. 2012.
55. Gómez O. Enfermedad diarreica aguda por *Escherichia coli* enteropatógenas en Colombia. *Rev Chil Infectol*. 2014;31(5):577-86.
56. Chaves D, Fernández J, Ospina I, López M, Moncada L, Reyes P. Tendencia de la prevalencia y factores asociados a la infección por *Giardia duodenalis* en escolares y preescolares de una zona rural de Cundinamarca. *Biomédica*. 2007;27(3):345-51.
57. Ekici A, Yilmaz H, Beyhan YE. Prevalencia de la criptosporidiosis en seres humanos y terneros, y detección molecular del *Cryptosporidium parvum*. *Rev MVZ Córdoba*. 2022;27(2):1-9.
58. Pérez E. Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica. *Rev Tecnol Marcha*. 2016;29(3):3-14.
59. Bolaños J, Cordero G, Segura G. Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *Rev Tecnol Marcha*. 2017;30(4):15-27.
60. Pabón S, Benítez R, Sarria R, Gallo J. Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Cienc Ing*. 2020;14(27):9-18.
61. Jiménez A, Santa L, Otazua M, Ayerdi M, Galarza A, Gallastegi M, et al. Ingesta de flúor a través del consumo de agua de abastecimiento público en la cohorte INMA-Gipuzkoa. *Gac Sanit*. 2018;32(5):418-24.
62. Menéndez C, Dueñas J. Los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales desde una visión no convencional. *Ing Hidrául Amb*. 2018;39(3):97-107.

63. Instituto Nacional de Salud. Informe técnico de vigilancia por laboratorio de *Cryptosporidium* spp. y *Giardia* spp. en aguas. 2019 [citado 2023 mar 31]. Disponible en: <https://www.ins.gov.co/buscador-eventos/Informacin%20de%20laboratorio/Informe-t%C3%A9cnico-de-vigilancia-por-laboratorio-de-Cryptosporidium-spp-y-Giardia-spp-en-aguas.pdf>

64. López L, Sánchez M, Baena M, González M, Urhán J. Verificación del método para la detección y cuantificación de *Clostridium perfringens* en agua potable mediante filtración por membrana. *Rev Politéc.* 2016;12(23):83-9.

65. Ramírez L, Londoño A. Estado del arte de la *Legionella pneumophila* en aguas termales. *Encuentro Int Educ Ing.* 2020.

66. Avendaño A, Arguedas C. Microcistina en plantas de tratamiento de agua para consumo humano en un ambiente tropical: el Área Metropolitana de Costa Rica. *Rev Biol Trop.* 2006;54(3):711-6.

67. Jiménez L, Barquero M, Jiménez K, Álvarez CV, Alvarado DM, Lizano LR, Achí R. Relación entre la presencia de colifagos en agua para consumo humano, las lluvias y las diarreas agudas en Costa Rica. *Rev Costarric Salud Pública.* 2015;24(2):160-7.

68. Ministerio de Salud y Protección Social. Informe nacional de calidad del agua para consumo humano INCA 2022. 2022 [citado 2023 mar 31]. Disponible en: <https://www.ins.gov.co/BibliotecaDigital/informe-nacional-de-calidad-del-agua-para-consumo-humano-colombia-2022.pdf>

69. CymitQuímica. Números CAS. 2023 [citado 2023 mar 31]. Disponible en: <https://cymitquimica.com/es/cas/>

70. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). Registros nacionales de plaguicidas y reguladores fisiológicos. 2023 [citado 2023 mar 31]. Disponible en: [https://www.ica.gov.co/areas/agricola/servicios/agricultura-ecologica-1/documentos/publicacion-bd\\_rn\\_rf\\_-31-mar-2022-1.aspx](https://www.ica.gov.co/areas/agricola/servicios/agricultura-ecologica-1/documentos/publicacion-bd_rn_rf_-31-mar-2022-1.aspx)

## FINANCIACIÓN

Ninguna.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

*Conceptualización:* José Luis Guataquira Rincón, René Ricardo Cuéllar Rodríguez, Laura Daniela Palomino Boshell.

*Curación de datos:* José Luis Guataquira Rincón, René Ricardo Cuéllar Rodríguez, Laura Daniela Palomino Boshell.

*Análisis formal:* José Luis Guataquira Rincón, René Ricardo Cuéllar Rodríguez, Laura Daniela Palomino Boshell.

*Investigación:* José Luis Guataquira Rincón, René Ricardo Cuéllar Rodríguez, Laura Daniela Palomino Boshell.

*Metodología:* José Luis Guataquira Rincón, René Ricardo Cuéllar Rodríguez, Laura Daniela Palomino Boshell.

*Administración del proyecto:* José Luis Guataquira Rincón, René Ricardo Cuéllar Rodríguez, Laura Daniela Palomino Boshell.

*Recursos:* José Luis Guataquira Rincón, René Ricardo Cuéllar Rodríguez, Laura Daniela Palomino Boshell.

*Software:* José Luis Guataquira Rincón, René Ricardo Cuéllar Rodríguez, Laura Daniela Palomino Boshell.

*Supervisión:* José Luis Guataquira Rincón, René Ricardo Cuéllar Rodríguez, Laura Daniela Palomino Boshell.

*Validación:* José Luis Guataquira Rincón, René Ricardo Cuéllar Rodríguez, Laura Daniela Palomino Boshell.

*Visualización:* José Luis Guataquira Rincón, René Ricardo Cuéllar Rodríguez, Laura Daniela Palomino Boshell.

*Redacción - borrador original:* José Luis Guataquira Rincón, René Ricardo Cuéllar Rodríguez, Laura Daniela Palomino Boshell.

*Redacción - revisión y edición:* José Luis Guataquira Rincón, René Ricardo Cuéllar Rodríguez, Laura Daniela Palomino Boshell.