

INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA: EVOLUCIÓN Y TENDENCIAS A NIVEL GLOBAL

Mario Castro¹, Juniel Almeida², Julio Ferrer², Daissy Díaz³

¹ Investigador principal del grupo IACA. Correo electrónico: mario.castrof@ucc.edu.co

² Co-investigador del grupo IACA

Facultad de Ingeniería, Universidad Cooperativa de Colombia

³ Consultora ambiental. CAMVHIL S.A.S.

Bogotá, Colombia

Recibido: 30 de agosto del 2014. Aprobado: 28 de octubre del 2014.

Cómo citar este artículo: M. Castro, J. Almeida, J. Ferrer y D. Díaz, "Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global". *Ingeniería Solidaria*, vol. 10, n.º 17, pp. 111-124, en.-dic., 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.16925/in.v9i17.811>

Resumen. El proyecto de investigación "Variables de mayor impacto sobre los indicadores de calidad del agua" se viene desarrollando en la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Bogotá, desde enero del 2014. Como resultado de su desarrollo, se llevó a cabo una revisión de antecedentes para identificar aspectos relevantes en el diseño y construcción de un prototipo de *software* basado en conocimiento que contribuya a mejorar los procesos de gestión del recurso hídrico. El estudio de los indicadores de calidad del agua durante el período de análisis (1980-2014), es fundamental para evaluar la incidencia de variables bióticas y abióticas sobre un fenómeno/ambiente/área tan relevantes como la calidad del agua. Los autores analizan reportes experimentales suministrados por publicaciones especializadas y organizaciones gubernamentales del orden nacional e internacional. El análisis de la información revisada permitió establecer que una de las metodologías más importante para determinar la calidad del agua es el uso de indicadores ICA: herramienta matemática que permite transformar grandes cantidades de datos en una escala de medición única.

Palabras clave: calidad del agua, indicadores ambientales, índices de calidad del agua (ICA), desarrollo sostenible, sostenibilidad ambiental.

WATER QUALITY INDEXES: EVOLUTION AND TRENDS AT THE GLOBAL LEVEL

Abstract. The research project "Variables of Greatest Impact on Water Quality Indexes" ("Variables de mayor impacto sobre los indicadores de calidad del agua") has been underway is at the Bogotá campus of the Universidad Cooperativa de Colombia since January of 2014. Its preliminary result was a review of precedents to identify relevant aspects in the design and construction of a knowledge-based software prototype that would help to improve water resource management. The study of water quality indexes during the period of analysis (1980-2014) is of fundamental importance to evaluate the influence of biotic and abiotic variables on a phenomenon/environment/area as relevant as water quality. The authors analyzed experimental reports supplied by specialized publications and national and international governmental organizations. Analysis of the information showed that one of the most important methodologies to determine water quality is the use of ICA indexes, a mathematical tool that facilitates the transformation of large amounts of data into a single measurement scale.

Keywords: water quality, environmental indexes, water quality indexes (ICA), sustainable development, environmental sustainability.

INDICADORES DA QUALIDADE DA ÁGUA: EVOLUÇÃO E TENDÊNCIAS MUNDIAIS

Resumo. O projeto de pesquisa "Variáveis de maior impacto sobre os indicadores de qualidade da água" vem sendo desenvolvido na Universidade Cooperativa da Colômbia, sede Bogotá, desde janeiro de 2014. Como um primeiro resultado de seu desenvolvimento, realizou-se uma revisão de antecedentes para identificar aspectos relevantes no desenho e construção de um protótipo de software baseado em conhecimento que contribua para melhorar os processos de gestão do recurso hídrico. O estudo dos indicadores de qualidade da água durante o período de análise (1980-2014) é fundamental para avaliar a incidência de variáveis bióticas e abióticas sobre um fenômeno/ambiente/área tão relevante como a qualidade da água. Os autores analisam relatórios experimentais fornecidos por publicações especializadas e organizações governamentais nacionais e internacionais. A análise da informação revisada permitiu estabelecer que uma das metodologias mais importantes para determinar a qualidade da água é o uso de indicadores ICA: ferramenta matemática que permite transformar grandes quantidades de dados numa escala de medição única.

Palavras-chave: qualidade da água, indicadores ambientais, índices de qualidade da água (ICA), desenvolvimento sustentável, sustentabilidade ambiental.



1. Introducción

Una de las actividades más importantes para la gestión del recurso hídrico es el monitoreo periódico de los cuerpos de agua. Esta actividad permite la detección temprana de cambios en la calidad del recurso. Sin embargo, el “monitoreo no es sólo hacer mediciones: se reconoce cada vez más que los datos deben estar disponibles. La comunicación de los resultados implica una retroalimentación, y además, permite que la información recopilada sea utilizada en las decisiones de gestión” [1]. El monitoreo de las fuentes de agua se convierte en una herramienta de gran importancia para su vigilancia. Los indicadores ambientales nacieron como respuesta a la necesidad de obtener información relevante sobre diversos temas ambientales; los datos obtenidos se deben presentar en un formato que permita su análisis y que sea favorable para el uso de estadísticas.

El capítulo 40 de la *Agenda 21*, resultado de la Cumbre de la Tierra de las Naciones Unidas (1992), menciona que la diferencia en disponibilidad, calidad entre otras características de los datos, es cada vez mayor entre los países desarrollados y los países en desarrollo. “Esto ha obstaculizado gravemente la capacidad de los países de tomar decisiones informadas acerca del medio ambiente y el desarrollo” [2]. Entre las propuestas para compensar la desigualdad en información que se venía presentando, el Programa 21 plantea “la creación de indicadores para el desarrollo sostenible que proporcionen bases sólidas para la toma de decisiones a todos los niveles” [2]. La Organización de Cooperación de Desarrollo Económico (OECD, por sus siglas en inglés) ha trabajado “en la elaboración y utilización de la información ambiental reunida en indicadores ambientales y articulada a aspectos económicos y sociales” [3].

De acuerdo con la OECD [4], los indicadores ambientales tienen dos funciones principales:

1. Reducen el número de mediciones y los parámetros que normalmente se requieran para hacer una representación exacta de una situación y
2. Simplifican el proceso de comunicación de los resultados de la medición.

Igualmente, la OCDE [4] define indicador, índice y parámetro de la siguiente manera:

Indicador: parámetro o valor derivado de parámetros que proporciona información sobre la descripción

del estado de un fenómeno/ambiente/área, con un significado que se extiende más allá de un valor directamente relacionado con un parámetro.

Índice: un conjunto de parámetros o indicadores agregados o ponderados.

Parámetro: una propiedad que se mide o se observa.

Según Polanco [3], en los últimos 30 años, la OECD ha trabajado en la elaboración y utilización de la información ambiental reunida en indicadores ambientales, articulada a aspectos económicos y sociales.

2. Los indicadores en el marco Presión-Estado-Respuesta

Hay varios marcos de referencia alrededor de los cuales se pueden abordar los indicadores. “El marco Presión-Estado-Respuesta (PER) ha sido utilizado en el contexto de los trabajos del grupo sobre el Estado del Medio Ambiente. El marco PER se basa en un concepto de causalidad: actividades humanas ejercen presiones sobre el medio ambiente, el cambio de su calidad y la cantidad de los recursos naturales (el recuadro ‘STATE’). La sociedad responde a estos cambios a través del medio ambiente, condiciones económicas generales y políticas sectoriales (la ‘respuesta de la sociedad’). Estos últimos [el medio ambiente, la economía y la política] forman un bucle de retroalimentación a las presiones a través de las actividades humanas. En un sentido más amplio, estas medidas forman parte de un ciclo ambiental (política), que incluye problemas de percepción, formulación, seguimiento y evaluación de políticas” [5].

En la figura 1, se presenta el marco Presión-Estado-Respuesta (PER).

La mayoría de los países aprobaron los indicadores de desarrollo sostenible (IDS) de la Comisión de Desarrollo Sostenible (CDS, organismo creado por la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo) o los desarrollaron autónomamente. “Utilizaron profusamente el marco ordenador Presión-Estado-Respuesta (PER) o Fuerza Motriz-Estado-Respuesta (FER), originalmente recomendado por la OECD y posteriormente adoptado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)” [6].

De acuerdo con Quiroga Martínez [6], históricamente, los indicadores se han clasificado en 3 tipos: indicadores de primera, segunda y tercera generación, los cuales se describen a continuación:

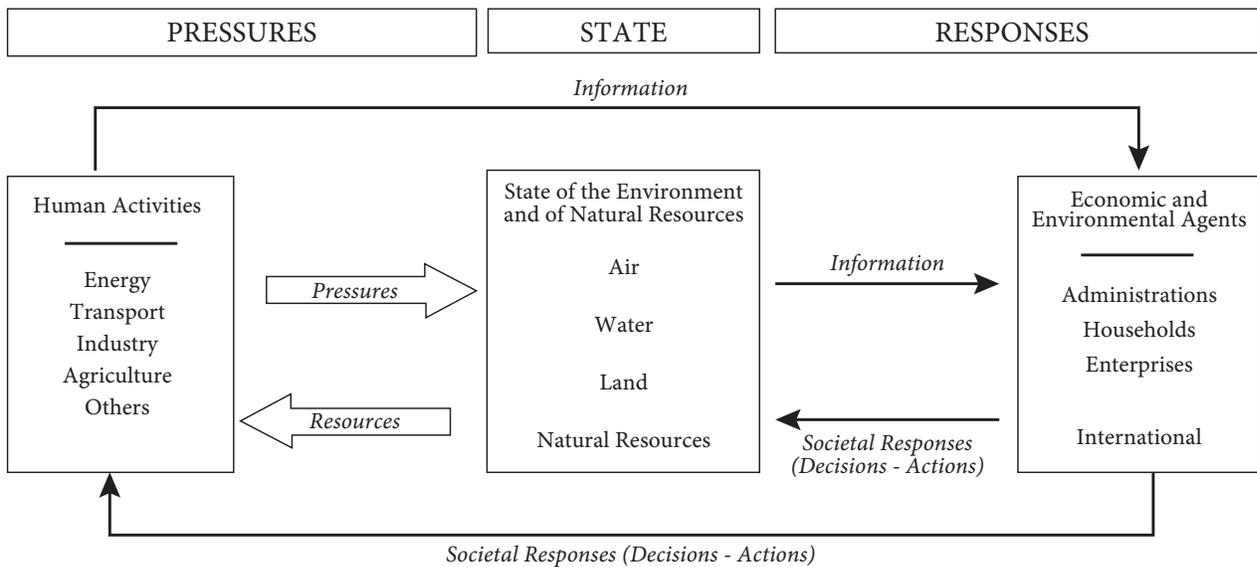


Figura 1. Marco Presión-Estado-Respuesta (PER)

Fuente: [5]

2.1 Indicadores ambientales de primera generación (1980 - presente)

Los indicadores de primera generación, también llamados indicadores ambientales (IA) o de sostenibilidad ambiental, dan cuenta del fenómeno complejo desde un sector productivo (minería, agricultura, forestal); bien desde la singularidad o desde un determinado número de fenómenos constitutivos de la complejidad ambiental (conteniendo variables de contaminación y de recursos naturales). Como ejemplo, se tiene indicadores ambientales tales como cobertura boscosa del territorio, calidad del aire de una ciudad, contaminación de agua por coliformes, deforestación, desertificación o cambio de uso de suelo.

Con la progresiva incorporación del discurso del desarrollo sostenible, la potencia de los IA ha sido mirada como parcial e insuficiente, por lo que muchos países han optado por trabajar en el enfoque IDS.

2.2 Indicadores de desarrollo sostenible o de segunda generación (1990 - presente)

La segunda generación de indicadores corresponde al desarrollo realizado desde el enfoque multidimensional del desarrollo sostenible. Se trata aquí de avanzar en el diseño e implementación de sistemas de IDS

compuestos por indicadores de tipo ambiental, social, económico e institucional.

Sin embargo, lo que se ha logrado a la fecha es presentar conjuntamente indicadores provenientes de las cuatro dimensiones, sin que estas realmente se vinculen en forma esencial. Por lo tanto, hasta el presente, los países que trabajan con este enfoque presentan indicadores económicos, sociales, ambientales e institucionales en forma simultánea pero no se realizan indicadores que en sí sean transversales o sinérgicos, o sea, que aborden más de una de las dimensiones del DS en forma simultánea.

2.3 Indicadores de sostenibilidad o de tercera generación

Aquí no se trata ya de tomar indicadores de distintos ámbitos y ponerlos juntos con la pretensión de que sean "sistema". Tampoco se trata de agregarlos mediante índices o buscando una unidad común de medición. De lo que se trata en estos indicadores es de dar cuenta del progreso en la sostenibilidad, o mejor aún, hacia la sostenibilidad del desarrollo en forma efectiva, utilizando un número limitado de indicadores verdaderamente vinculantes, que tengan incorporados, potenciándose sinérgicamente, dimensiones y sectores desde su origen.

Cabe decir que, en el mundo, nos encontramos entre la primera y segunda generación de indicadores, pues la mayoría de países están trabajando IAS/IDS de primera y segunda generación en forma simultánea, y al mismo tiempo se reconoce la necesidad de avanzar, en forma cooperativa y horizontal, en el desarrollo de la tercera generación en el tercer milenio.

3. Antecedentes de los indicadores de calidad del agua

Actualmente se considera el agua como un recurso esencial que requiere la máxima atención de los Estados por ser indispensable para la preservación de la vida y encontrarse expuesta al deterioro, en ocasiones irreversible, ocasionado por un uso irresponsable e intensivo del recurso.

Valdes, Samboni y Carvajal [7] comentan que, en la valoración y evaluación de la calidad del agua, se han empleado diversas metodologías entre las que se incluyen: comparación de las variables con la normatividad vigente; los indicadores ICA donde, a partir de un grupo de variables medidas, se genera un valor que califica y cualifica la fuente, y metodologías más elaboradas como la modelación.

La calidad del agua se mide de acuerdo con distintos parámetros mediante los cuales se cuantifica el grado de alteración de las cualidades naturales y se la clasifica para un uso determinado. Según Guillén, Teck, Kohlmann y Yeomans [8], el Índice de Calidad del Agua (ICA) indica el grado de contaminación del agua a la fecha del muestreo y está expresado como porcentaje del agua pura; así, agua altamente contaminada tendrá un cercano o igual a 0%, en tanto que el agua en excelentes condiciones tendrá un valor de este índice cercano al 100%.

El ICA se ha convertido en un instrumento fundamental para transmitir información sobre la calidad del recurso hídrico a las autoridades competentes y al público en general. El ICA es un indicador compuesto que integra información de varios parámetros de calidad del agua y presenta diferentes metodologías según su autor. Este índice es una herramienta matemática para la calidad y puede ser utilizado para transformar grandes cantidades de datos sobre la calidad del agua en una escala de medición única. Según Sharma y Chhipa [9], la calidad del agua se puede clasificar en

excelente, buena, pobre, muy pobre y no apta en función del valor ICA.

Oana [10] menciona que el tipo de calidad del agua se define en función de los valores de los parámetros físicos, químicos y biológicos. El establecimiento de la calidad antes del uso es crucial para diversos fines, tales como: agua potable, el agua utilizada en la agricultura, el agua utilizada para el ocio (pesca, natación) o agua que se utiliza en la industria.

Citando a Kumar, Kumar, Prakash y Kumar [11], podemos apuntar que “el ICA es un número adimensional que combina múltiples factores de calidad del agua en un solo número por valores de la normalización a la subjetiva curvas de gasto”. Según Walsh y Wheeler [12], este indicador ha tenido un uso generalizado desde su creación y es empleado por varios Estados y países.

Si revisamos a Lumb, Halliwell y Sharma [13], vemos que los intentos de clasificar el agua de acuerdo con su grado de pureza se remontan a mediados del siglo XX con los estudios de Horton en la década del sesenta y Landwehr en la del setenta. Más adelante, Ott y Steinhart revisaron más de veinte índices de calidad del agua que fueron utilizados hasta finales de los setenta.

Desde 1965, cuando Horton [14] propuso el primer índice de calidad del agua, una gran cantidad de consideraciones se han dado al desarrollo de métodos de índice. Según Liou, Lo y Wang [15], los índices definen una curva de gasto único para cada variable, por el que sus valores se interpretan mediante un cuestionario, en términos de unidades de calidad conceptuales, o algún conjunto de normas. Varios tipos de métodos aritméticos que se han utilizado han incluido la agregación de datos de monitoreo de la calidad para producir un índice general de calidad.

A continuación se presenta una descripción de los ICA más empleados a lo largo del tiempo.

3.1 ICA según Horton

De acuerdo con Rodríguez [16], Horton propone el uso de ICA para estimar patrones o condiciones de contaminación acuática, y es pionero en la generación de una metodología unificada para su cálculo. Ott [17] menciona que el índice general de calidad del agua de Horton utiliza diez variables, incluyendo las comúnmente monitoreadas, tales como oxígeno disuelto (DO), recuento de coliformes, pH, conductancia específica, alcalinidad, contenido de cloruro y la temperatura.

El índice se utiliza, en primer lugar, con el propósito de revelar los cambios físicos y químicos ocurridos a nivel de la calidad de las corrientes de agua. Oana [10] apunta que, después de las actividades de vigilancia y gestión de la calidad, se intentó indicar a través de métodos matemáticos el estado global de la calidad de las aguas superficiales con la ayuda de un índice cualitativo.

3.2 El INSF

Siguiendo el trabajo de Horton, la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF, por las siglas en inglés) creó una variable del ICA varios años más tarde [12], [18]. Según Behar, Zúñiga de Cardozo y Rojas [19], en 1970, Brown, MacClelland, Deininger y Tozer, apoyados por la National Sanitation Foundation de los Estados Unidos de Norteamérica, proponen un índice basado en la estructura del índice de Horton, conocido como Índice de Calidad de Agua de la NSF (NSWQI). La NSF cita: “La clasificación consideró las características que debe presentar la fuente de captación para su destinación para consumo humano” [20].

En 1970, Brown reunió a un grupo de 142 reconocidos expertos en gestión de la calidad del agua provenientes de diferentes lugares de EE.UU. Tres cuestionarios se enviaron por correo a cada participante. En el primer cuestionario, se pidió a los panelistas que consideraran 35 analitos para su posible inclusión en un ICA y añadieran cualquier otro analito que a su juicio debía ser incluido. También se les pidió que calificaran los analitos en una escala de 1 (la más alta significancia) a 5 (la significancia más baja). El propósito del segundo cuestionario era obtener un consenso sobre la significancia de cada analito. De estas dos primeras respuestas se derivan nueve analitos para su inclusión en el ICA. En el tercer cuestionario, se pidió a los panelistas dibujar una curva de gastos para cada uno de los nueve analitos. Los niveles de la calidad del agua (wq) de 0 a 100 se indican en el eje *y* de cada gráfico, mientras que el aumento de los niveles de cada analito particular, se indica en el eje *x*. Luego se promediaron todas las curvas para producir una sola línea para cada analito. El análisis estadístico de las puntuaciones habilitó a Brown para asignar pesos a cada analito, donde la suma de los pesos es igual a 1 [21], [22].

En las tablas 1 y 2 se presentan los nueve parámetros y sus pesos correspondientes.

Tabla 1. ICA NSF Analitos y pesos

Analito	Peso ICA
Oxígeno disuelto	0,17
Coliformes fecales	0,15
pH	0,12
DBO ₅	0,10
Nitratos	0,10
Fosfatos totales	0,10
Δt °C de equilibrio	0,10
Turbiedad	0,08
Sólidos totales	0,08

Fuente: [21]

Tabla 2. Palabras descriptoras y rangos de valor del ICA

Palabra descriptoras	Rango numérico
Muy mala	0-25
Mala	26-50
Media	51-70
Buena	71-90
Excelente	91-100

Fuente: [21]

Torres, Cruz y Patiño [23] llaman la atención sobre el hecho de que “el INSF, a pesar de haber sido desarrollado en Estados Unidos, es ampliamente empleado en el mundo y ha sido validado y/o adaptado en diferentes estudios”.

Aroner [24] señala que la metodología básica utilizada en la determinación de las clases de valores del índice de la calidad del agua fue descrita por primera vez por la Agencia de Protección Ambiental, Región 10, EE.UU. (períodos 1978/1979; 1979/1980), que utilizó varios intervalos de valores con el fin de exponer la importancia de cada parámetro en el cálculo del índice y, posteriormente, se estipuló la creación de un valor único —la del índice—.

3.3 ICA de Oregon (owqi)

La ciencia de la calidad del agua ha mejorado notablemente desde la introducción del owqi en la década de 1970. Fue mejorado en 1995 para reflejar los avances en el conocimiento de la calidad del agua y en el diseño de los índices de calidad del agua. Es ampliamente utilizado y mantenido por el Departamento de Calidad Ambiental de Oregon (DEC). El owqi se ha utilizado para informar sobre el estado de calidad del agua y

las tendencias de Oregon a los legisladores estatales y otros responsables de las políticas de recursos hídricos.

Cude [25] observa que el owqi analiza un grupo de variables de calidad del agua definido y produce un valor general describiendo la calidad del agua para los ríos y corrientes de Oregon. Las variables de calidad del agua incluidas en el owqi son temperatura, oxígeno disuelto (porcentaje de saturación y concentración), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), pH, sólidos totales, amonio y nitratos, fósforo total y coliformes fecales. Fue diseñado para permitir la comparación de la calidad del agua entre diferentes tramos del mismo río o entre diferentes cuencas. Identifica y compara las condiciones de calidad del agua y tendencias en el espacio y el tiempo. El owqi puede ser usado para evaluar la eficacia de las actividades de gestión de calidad del agua. Más importante, el owqi mejora la comprensión y comunicación de cuestiones generales de calidad del agua e ilustra la necesidad y la eficacia de prácticas de protección.

3.4 ICA según Dinius

Según Bharti [26], Dinius [27] hizo un intento por diseñar un sistema de contabilidad social rudimentaria que midiera los costos y el impacto de los esfuerzos de control de la contaminación y se aplica ese índice a título ilustrativo a los datos de varios arroyos en Alabama, EE.UU.

González, Caicedo y Aguirre [28] citan que se “planteó un ICA conformado por nueve variables fisicoquímicas y dos microbiológicas; por su parte el ICA-INSF (Índice del National Science Foundation) está constituido por ocho variables fisicoquímicas y un elemento biótico: las coliformes fecales”.

Otro índice multiplicativo de calidad del agua, diseñado específicamente para la toma de decisiones fue desarrollado por Dinius [29] utilizando el método de índice presentado por Delphi. Torres, Cruz y Patiño [23] mencionan que este indicador, “a diferencia del ICA-NSF, cuya clasificación está orientada a aguas destinadas a ser empleadas como fuente de captación para consumo humano, considera 5 usos del recurso: consumo humano, agricultura, pesca y vida acuática, industrial y recreación”.

Los subíndices del índice Dinius fueron desarrollados a partir de una revisión de la literatura científica publicada. Dinius examinó la calidad del agua descrita por diversas autoridades y diferentes niveles de variables contaminantes, y a partir de esta información genera

11 ecuaciones subíndice (tabla 3). El índice se calcula como la suma ponderada de los subíndices, como el índice de Horton, y la versión de aditivo de la NSF.

Tabla 3. Funciones Subíndice de Índice Dinius

S.No	Parameter	Subindex
1	Dissolved Oxygen (%)	$I_1 = x$
2	Mala	$I_2 = 107x^{-0,642}$
3	Media	$I_3 = 100(x)^{-0,3}$
4	Buena	$I_4 = 100(5x)^{-0,3}$
5	Excelente	$I_5 = 535x^{-0,3565}$
6	Muy mala	$I_6 = 125,8x^{-0,207}$
7	Mala	$I_7 = 101,974 \cdot 0,00132x$
8	Media	$I_8 = 108x^{-0,178}$
9	Buena	$I_9 = 10^{0,2335+0,44x}$, $x < 6,7$ $I_{10} = 100$, $6,7 \leq x \leq 7,58$ $I_{11} = 10^{4,22-0,293x}$, $x > 7,58$
10	Excelente	$I_{12} = -4(x_a - x_a) + 112$, $x_a = \text{actual temp}$, $x_a = \text{std. Temp}$
11	Excelente	$I_{13} = 108x^{-0,288}$

Fuente: [30]

Samboni, Carvajal y Escobar [18] muestran que, desde 1978 hasta 1994, revisiones de literatura de los ICA realizadas desde su introducción han revelado nuevos enfoques y proporcionado nuevas herramientas para el desarrollo de las investigaciones. Entre 1995 y 1996 se desarrollaron indicadores especiales para una cuenca o región: en 1995, con la Estrategia de Evaluación Ambiental de Florida (The Strategic Assessment of Florida's Environment - SAFE), que formuló un índice especial para la Florida; en 1996, el Índice de British Columbia (BCWQI) de Canadá y el desarrollo del Programa de Mejoramiento de la Cuenca Baja de Miami (WEP).

3.5 Índice universal de la calidad del agua (UWQI)

Según Miravet, Ramírez, Montalvo, Delgado y Perigó [31], Mingo Magro, en 1981, propuso un índice de calidad que pondera 23 variables físico-químicas y microbiológicas que pueden ser a su vez “básicas” o “complementarias”, de acuerdo con el uso del agua. En España, el índice más empleado es el Índice de Calidad General (ICG), desarrollado por el antiguo Ministerio de Obras Públicas (MOPU), en 1983. Este índice es un valor adimensional obtenido a partir de 23 parámetros

de calidad de las aguas, procesados mediante ecuaciones lineales.

Beamonte, Casino, Veres y Bermúdez [32] encontraron que las directivas de la Unión Europea (UE) definen un conjunto de características físico-químicas para determinar la calidad del agua, junto a sendas escalas que permiten categorizar en niveles dicha calidad, y que son de aplicación obligada en todos los países miembros.

Boyacioglu [33] menciona un nuevo índice denominado “índice universal de la calidad del agua” (UWQI, Universal Water Quality Index) que tiene ventajas sobre los índices preexistentes al reflejar la idoneidad del agua para uso específico. Índices anteriores se han desarrollado principalmente con el fin de evaluar la calidad del agua corriente para usos recreativos de carácter general. Además, no se basaban en las normas nacionales de un país en particular y está limitada su aplicación en el interior del país de origen. El UWQI tiene en cuenta en total 12 parámetros: coliformes totales, cadmio, cianuro, mercurio, selenio, arsénico, fluoruros, nitratos, oxígeno disuelto, pH, DBO, y fósforo total.

Fernández, Ramírez y Solano [34] encontraron que en Europa los aportes han provenido de estudios como los de van Helmond y Breukel en 1996, quienes demostraron que por lo menos 30 índices de calidad de agua son de uso común alrededor del mundo, y consideran un número de variables entre 3 y 72, con la inclusión frecuente de por lo menos 3 de los siguientes parámetros: O_2 , DBO o DQO, NH_4-N , PO_4-P , NO_3-N , pH y sólidos totales; igualmente, en Croacia, Stambuk-Giljanovic, en 1999, observó que a través de los años varios índices de calidad de agua han sido formulados con objetivos propios. Otros estudios como los de Cooper HW DO y Richardson, en Sudáfrica y Australia se han ocupado de hacer revisiones con el fin de generar sus respectivos índices para estuarios.

4. Indicadores de calidad del agua en Colombia

En Colombia, de acuerdo con el Estudio Nacional del Agua realizado por el IDEAM en el 2000, la medición de parámetros físico-químicos es una actividad rutinaria. Sin embargo, Samboni, Carvajal y Escobar [18] estudiaron que el cálculo de índices de calidad de agua no es una actividad tan rutinaria como se cree, aunque, se aplican regularmente en la industria del petróleo

y algunas corporaciones autónomas regionales en las ciudades de Bogotá, Barranquilla, Bucaramanga, Cali y Manizales, estimando los ICA e ICO en sus programas de monitoreo.

4.1 Indicador de contaminación del agua

Según Samboni, Carvajal y Reyes [35], este indicador fue desarrollado a partir de estudios fisicoquímicos, microbiológicos y limnológicos realizados en la industria petrolera para condiciones de ríos de Colombia. Utiliza las variables de DBO_5 , coliformes totales y porcentaje de saturación de oxígeno: las dos primeras reflejan fuentes diversas de contaminación orgánica y la tercera expresa la respuesta ambiental del cuerpo a este tipo de polución.

Ramírez, Restrepo y Viña desarrollan cuatro indicadores de contaminación para la caracterización de aguas continentales, argumentando que algunas de las variables incluidas en los ICA no deberían ser tenidas en cuenta; es el caso de la temperatura, ya que puede variar naturalmente con la altitud. “De igual modo, las impurezas aparentes constituyen una variable cualitativa subjetiva al observador, que incluye entre otros, olor o apariencia. Al respecto, Behar plantea inquietudes por la presencia de la temperatura y los nitratos en el ICA” [36].

En esta metodología utilizada para el desarrollo de sus ICO, se realizó una selección de estudios limnológicos elaborados por la industria petrolera del país. Sobre estos estudios se llevó a cabo un Análisis de Componentes Principales (ACP).

Ramírez, Restrepo y Viña [36] establecen que el procedimiento seguido en la formulación de los ICO fue similar al empleado en el desarrollo de los ICA:

- Selección de variables físicas y químicas.
- Asignación de valores de calidad (0 a 1) a diferentes concentraciones de las variables, o establecimiento de una relación (ecuación) entre índice-variable, con base en legislaciones o parámetros definidos por diversos autores para diferentes usos del agua.

Como resultado de estos análisis, se obtuvo el Índice de Contaminación por Mineralización (ICOMI), el Índice de Contaminación por Materia Orgánica (ICOMO), el Índice de Contaminación por Sólidos Suspendedos (ICOSUS) y el Índice de Contaminación Trófico (ICOTRO).

4.1.1 Icauca

Según el IDEAM [37], el río Cauca es la segunda fuente de mayor importancia del país, ya que un 25% de la población se ubica en su área de influencia, localizándose en su cuenca 183 municipios de los departamentos de Cauca, Valle del Cauca, Quindío, Risaralda, Caldas, Antioquia, Córdoba, Sucre y Bolívar. Torres, Cruz, Patiño, Escobar y Pérez [38] reportan que en este río se han aplicado o adaptado ICA de amplio uso internacional; Rojas adaptó el ICA-NSF a las condiciones específicas del río, enfatizando en el uso de sus aguas para consumo humano previo tratamiento.

Samboni, Carvajal y Escobar [18] mencionan que en el proyecto de caracterización y modelación matemática del río Cauca (PMC) desarrollaron el índice de calidad para el río Cauca denominado Icauca, en el que se consideran diez variables que son: pH, OD, color, turbiedad, DBO_5 , nitrógeno total, fósforo total, sólidos totales (ST), sólidos suspendidos totales (SST) y coliformes fecales.

Según Torres, Cruz y Patiño [23], la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y la Universidad del Valle adaptaron el Icauca a las condiciones ambientales del río Cauca en el tramo Salvajina-La Virginia. El índice se basó en el comportamiento de la calidad del agua del río en este tramo y en la revisión de diferentes ICA desarrollados a nivel mundial a partir de los cuales se definieron los parámetros, subíndices y ecuaciones para ser considerados en este.

4.2 Sistema Nacional de Indicadores Ambientales

En el Ministerio del Medio Ambiente [39] se puede encontrar el Decreto Ley 2811 de 1974, Código de Recursos Naturales Renovables (CRNR), que, en su libro I, parte III, título IV, artículos 20 a 24, consagra el sistema de información ambiental. El artículo 20 lista una serie de temas mínimos sobre los cuales se debe reunir información en el sistema (hidrológico, clima, suelos, geología, fauna, bosques, etc.).

“Los indicadores ambientales de Colombia elaborados por el IDEAM se ajustan al modelo PER (Presión-Estado-Respuesta), implementado por el Programa de las Naciones Unidas (PNUMA) y la Comisión de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas para la construcción de indicadores ambientales y de sostenibilidad” [39]. “El Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) del IDEAM cubre la colección de datos, los estudios e investigaciones relacionados con los recursos naturales renovables y la presión antrópica sobre los recursos de agua, aire y atmósfera, biodiversidad y suelo, en los ámbitos continental y marino. Como sistema, se orienta a generar información sobre el estado (calidad y cantidad) de los recursos; el ambiente y los ecosistemas; el uso y aprovechamiento; la vulnerabilidad de los recursos naturales; los servicios ambientales en el país y de las sociedades expuestas a los fenómenos naturales y la sostenibilidad ambiental” [40].

El SIAC se encuentra conformado por subsistemas de información enumerados en la tabla 4.

Tabla 4. Subsistemas de información del SIAC

A nivel nacional	A nivel regional
<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de Información Forestal Nacional – SNIF • Sistema de Información sobre Uso de Recursos Naturales Renovables – SIUR <ul style="list-style-type: none"> - Registro Único Ambiental – RUA - Registro de Generadores de Residuos o Desechos Peligrosos – Respel • Sistema de Información sobre Biodiversidad en Colombia - SIB • Sistema de Información del Recurso Hídrico – SIRH • Sistema de Información Ambiental Marina – SIAM • Sistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE • Sistema Nacional de Información de Vivienda y Desarrollo Territorial – SNIVDT 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de Información Ambiental Territorial de la Amazonía Colombiana - SIAT AC • Sistema de Información Ambiental Territorial del Pacífico Colombiano – SIAT PC

Fuente: elaborado por autores de acuerdo con la información presentada en la página Web del SIAC, IDEAM [40]

4.3 Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH)

El Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH) “es el conjunto que integra y estandariza el acopio, registro, manejo y consulta de datos, bases de datos, estadísticas, sistemas, modelos, información documental y bibliográfica, reglamentos y protocolos que facilita la gestión integral del recurso hídrico” [41].

Los proveedores de Información del SIRH [42] son: IDEAM: tiene la responsabilidad de compilar la información a nivel nacional, la operación de la red básica nacional de monitoreo, identificar y desarrollar las fuentes de datos, la gestión y el procesamiento de datos y difundir el conocimiento sobre el recurso hídrico.

INVEVAR: debe coordinar y efectuar el monitoreo y seguimiento del recurso hídrico marino y costero que alimentará el SIRH.

Autoridades ambientales regionales y urbanas y Sistema de Parques Nacionales deberán realizar el monitoreo y seguimiento del recurso hídrico en el área de su jurisdicción.

Titulares de licencias, permisos y concesiones: están obligados a recopilar y a suministrar sin costo alguno la información sobre su utilización a las autoridades ambientales competentes.

El Sistema de Información del Recurso Hídrico trabaja en torno a 4 áreas temáticas: oferta, demanda, calidad y gestión del recurso.

4.4 Indicadores del recurso hídrico

Se presentan tres fuentes principales de información de indicadores del recurso hídrico.

1. Línea Base de Indicadores Ambientales del 2002
2. Resolución 0643 del 2004
3. Estudio Nacional del Agua (ENA) del 2010

Los siguientes son los indicadores relacionados con el recurso hídrico disponibles en el país.

4.5 Línea base de indicadores ambientales del 2002 [43]

4.5.1 Oferta hídrica

1. Variación de la escurriencia con respecto a la condición media de referencia
2. Índice de aridez
3. Índice de recursos y reservas de agua subterránea

4.5.2 Calidad del agua

1. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)₅
2. Potencial de asimilación de carga orgánica biodegradable en corrientes superficiales
3. Déficit de oxígeno disuelto en corrientes superficiales
4. Variación de concentración de sedimentos en suspensión
5. Variación de la carga de sedimentos en suspensión
6. Aguas subterráneas - evolución de la conductividad eléctrica (CE) en los acuíferos del país

4.5.3 Calidad de las aguas marinas y costeras

1. Calidad de las aguas marinas y costeras para la preservación de flora y fauna ICAPFF
2. Calidad de las aguas marinas y costeras para recreación, actividades náuticas y playas ICARAP
3. Calidad de las aguas marinas y costeras para la recepción de vertimientos ICARV

4.5.4 Sostenibilidad del recurso

1. Índice de escasez de agua
2. Vulnerabilidad por disponibilidad de agua

4.6 Resolución 0643 de 2004 [44]

4.6.1 Indicadores de desarrollo sostenible

1. Población en alto riesgo por desabastecimiento de agua
2. Índice de escasez
3. Consumo de agua en los sectores productivos (industrial, comercial, agrícola y pecuario) medido como consumo de agua, en metros cúbicos, sobre producción o hectáreas

4.6.2 Indicadores ambientales

1. Caudal mínimo anual de la corriente en cada boca-toma de acueductos en centros poblados, medido en litros por segundo (l/seg)
2. Índice de calidad de agua en la corriente, aguas arriba de las bocatomas de cabeceras municipales
3. Consumo de agua per cápita (residencial), medido en litros por habitante por día, (l/hab/día)
4. Consumo de agua por unidad de producción (industrial y comercial)
5. Consumo de agua en el sector agrícola (por hectárea) y pecuario (por cabeza)
6. Accesibilidad a agua potable para consumo humano
7. Disponibilidad efectiva de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas.

4.7 Estudio Nacional del Agua 2010 [45]

1. Índice de Aridez (IA) (El Índice de Aridez propuesto en la Línea Base de Indicadores Ambientales 2002 es el mismo propuesto por el ENA 2010 ($IA = (ETP - ETR) / ETP$))
2. Índice de retención y regulación hídrica (IRH)
3. Índice de uso del agua (IUA)
4. Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento (IVH)
5. Índice de calidad de agua (ICA)
6. Índice de alteración potencial de la calidad (IACAL)

4.8 Sistema de indicadores hídricos regionales

Según el IDEAM [39], el sistema de indicadores regionales está integrado por los seis índices definidos en el ENA 2010 mencionados y seis índices que complementan la evaluación en los temas de agua subterránea, condiciones de calidad, amenaza y vulnerabilidad de los sistemas hídricos y del recurso por variabilidad climática y contaminación. En otro estudio, el IDEAM [38] plantea que este conjunto de indicadores hídricos dan cuenta del estado y dinámica del agua, las presiones, efectos en la disponibilidad de la variabilidad

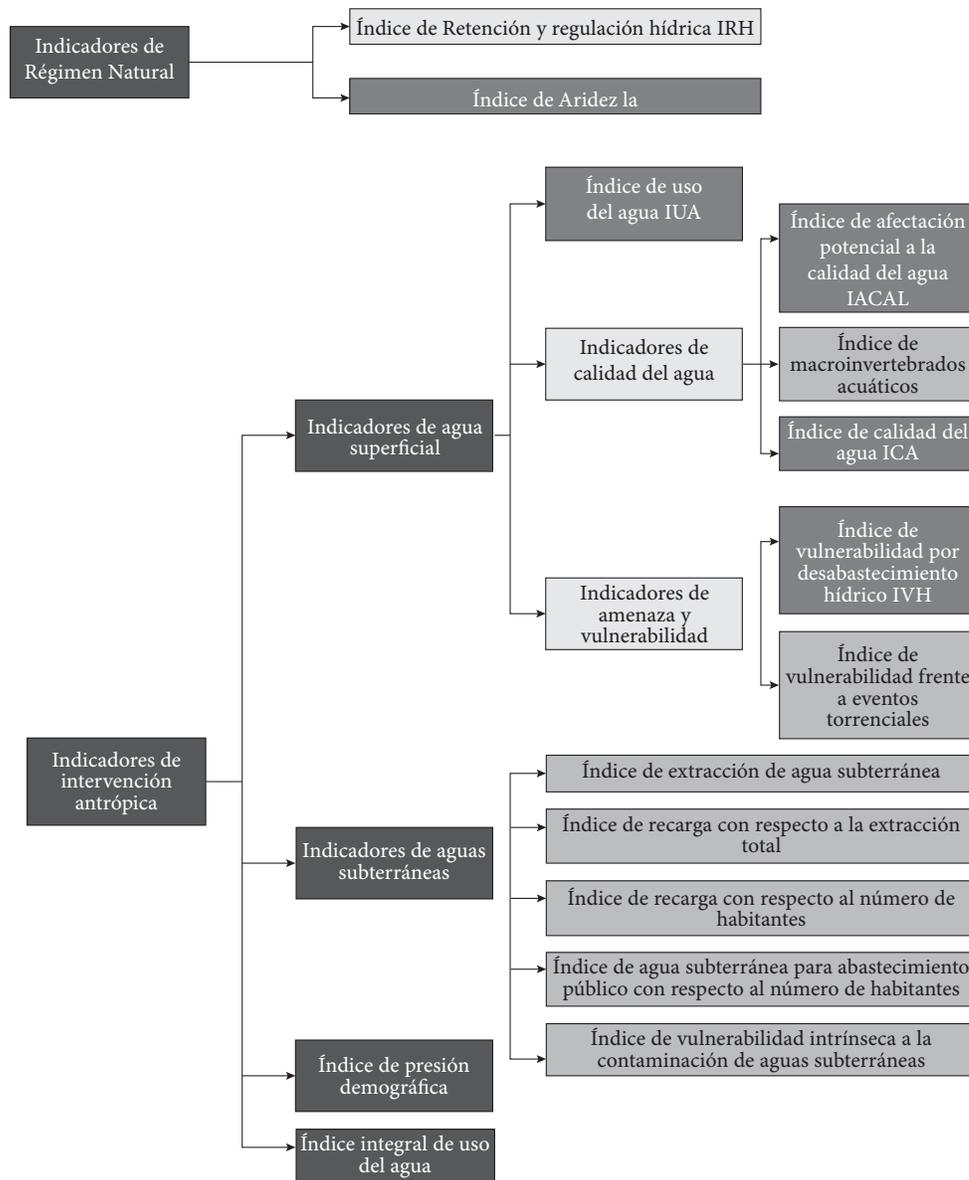


Figura 2. Sistema de indicadores hídricos regionales

Fuente: Marco conceptual y metodológico para las evaluaciones regionales del agua IDEAM [46]

hidrológica y deben aplicarse a cada unidad de análisis definida por la corporación.

En la figura 2 se presenta el conjunto de indicadores propuesto por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

4.8.1 Índice de calidad del agua en corrientes superficiales (ICA)

Según el IDEAM [47], el índice de calidad del agua es el valor numérico que califica en una de cinco categorías la calidad del agua de una corriente superficial, con base en las mediciones obtenidas para un conjunto de cinco o seis variables, registradas en una estación de monitoreo j en el tiempo t .

En las tablas 5 y 6 se resumen las variables involucradas en el cálculo del indicador.

Tabla 5. Variables y ponderaciones para el caso de 5 variables

Variable	Unidad de medida	Ponderación
Oxígeno disuelto, OD	% Saturación	0,2
Sólidos suspendidos totales, SST	mg/l	0,2
Demanda química de oxígeno, DQO	mg/l	0,2
Conductividad eléctrica, CE	μ S/cm	0,2
pH	Unidades de pH	0,2

Fuente: [40]

Tabla 6. Variables y ponderaciones para el caso de 6 variables

Variable	Unidad de medida	Ponderación
Oxígeno disuelto, OD	% Saturación	0,17
Sólidos suspendidos totales, SST	mg/l	0,17
Demanda química de oxígeno, DQO	mg/l	0,17
NitrógenoTotal - NT/Fosforo Total PT	-	0,17
Conductividad eléctrica, CE	μ S/cm	0,17
pH	Unidades de pH	0,15

Fuente: [47]

Los valores optativos que el indicador puede llegar a tomar han sido clasificados en categorías. De acuerdo con cada valor, se califica la calidad del agua de las corrientes superficiales, a las que se ha asignado un color como señal de alerta. En la tabla 7 se registra la relación entre valores y calificación.

Cuerpos de agua superficiales con tipos de contaminación y orígenes muy diferentes, pueden quedar registrados en una misma categoría de calidad. El número y tipo de variables incluidas en el cálculo y la construcción de las ecuaciones o curvas funcionales para calcular los subíndices de calidad dependen del conocimiento técnico de las instituciones sobre los valores de las variables a las condiciones de línea base o sin intervención. Estas a su vez dependen, entre otras condiciones, de la hidrogeología de los cauces, de las actividades económicas particulares de la zona y de la capacidad operativa e instrumental con la que cuentan.

Tabla 7. Calificación de la calidad del agua según los valores que tome el ICA

Categorías de valores que puede tomar el indicador	Calificación de la calidad del agua	Señal de alerta
0,00 – 0,25	Muy mala	Rojo
0,26 – 0,50	Mala	Naranja
0,51 – 0,70	Regular	Amarillo
0,71 – 0,90	Aceptable	Verde
0,91 – 1,00	Buena	Azul

Fuente: [47]

5. Conclusiones

Según López y Palací [48], el estudio de la calidad del agua y, en especial, de aquellas aguas destinadas al uso o consumo humano, resulta imprescindible para garantizar su buen estado y la seguridad de todas aquellas personas que vayan a aprovecharla, así como para

mantener la biodiversidad de las especies que habitan en su entorno.

Una clara muestra de este interés se refleja en las múltiples investigaciones que tienen como objetivo principal analizar la calidad del agua, definir y utilizar indicadores que permitan llevar a cabo dicho análisis, estudiar la vertiente económica que conlleva la calidad

de la misma, e incluso ha dado lugar a líneas de investigación en las que se deja patente la importancia de su estudio como una pieza clave que permita el crecimiento de los distintos destinos turísticos.

Conforme a estudios de United Nations [49], resulta necesario que la información sobre el agua provenga de todas las partes de la sociedad, desde las comunidades globales hasta las organizaciones multilaterales globales, pasando por los agricultores, los urbanistas, las compañías de agua potable y de tratamiento de aguas residuales, los gestores en caso de desastres, las empresas, la industria y los ecologistas. Por norma general, la disponibilidad de datos es especialmente pobre cuando se trata de la calidad de las aguas subterráneas y del agua en general. Es fundamental establecer sistemas sostenibles para la recopilación y difusión de datos, así como establecer los foros para el intercambio de esta información. Un objetivo clave es reducir la incertidumbre sobre los recursos hídricos y su uso con el fin de mejorar la gestión de riesgos. Se ha desarrollado una amplia gama de indicadores para supervisar el estado, el uso y la gestión de los recursos hídricos. Junto con las tendencias en el uso del agua, el uso eficaz del agua de los diferentes sectores, medido en términos de producción por unidad de uso de agua, puede ser un indicador útil.

Fernández y Solano [50] afirman que prácticamente todos estos índices incluyen por lo menos tres de los siguientes parámetros: O_2 , DBO o DQO, NH_4^- , PO_4^- , NO_3^- , pH y sólidos totales.

Fernández, Ramírez y Solano [50], en el 2003; Valcarcel, Alberro y Frías [22], en el 2009, y Tyagi, Sharma, Singh y Dobhal [51], en el 2013, concuerdan en que los ICA tienen en común los siguientes tres pasos para su cálculo:

1. Selección de parámetros: esto se lleva a cabo por el juicio de expertos profesionales, agencias, gobiernos o instituciones que se determinen en el ámbito legislativo (usualmente entre 2 y 73 variables).
2. Determinación de la función de calidad (curva) de cada parámetro considerado como el Sub-Index: se transforma a valores de la escala no dimensionales de las variables de las diferentes unidades (ppm, la saturación porcentaje, recuento/volumen).
3. Agregación con expresión matemática: esto se utiliza con frecuencia a través de la aritmética o las medias geométricas.

Si bien el desarrollo de los ICA ha jugado un papel muy importante en el contexto ecológico y medio ambiental, sus debilidades constituyen un obstáculo importante para su aplicación, ya que al concentrarse en un único número la cualidad de un cuerpo de agua, se produce una inmensa pérdida de información (en concordancia con [19]) y con ello, se enmascara la condición real y los cambios que se suceden sobre un curso hídrico.

Lumb, Sharma y Bibeault [52] sostienen al respecto: “Todos los índices tienen una u otra limitación y la búsqueda de uno perfecto sigue siendo un desafío”.

Este trabajo nos brinda una visión global y particular de las variables que pueden estar involucradas en el cálculo de los ICA, lo cual aporta directamente a los objetivos propuestos por los investigadores en el proyecto “Variables de mayor impacto sobre los Indicadores de Calidad del agua”, puesto que es la base para un posterior análisis estadístico de los datos disponibles (CAR e IDEAM) donde podremos determinar cuáles realmente están teniendo el impacto mayor sobre los indicadores que actualmente manejan en este ámbito las autoridades ambientales.

Esta será a su vez la base para el desarrollo del *software* que resultará como uno de los productos de este proyecto de investigación.

Referencias

- [1] T. Burt, N. Howden y F. Worrall, “On the importance of very long-term water quality records”, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, vol. 1, n.º 1, pp. 41-48, 2014.
- [2] Organización de las Naciones Unidas, Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, *Agenda 21*, 1992. [En línea]. Disponible en: <http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/>
- [3] C. Polanco, “Indicadores ambientales y modelos internacionales para toma de decisiones”, *Gestión y Ambiente*, vol. 9, n.º 2, pp. 27-41, Ag. 2006.
- [4] Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD, *OECD Environmental Indicators: Development, Measurement and Use*, 2003. [En línea]. Disponible en: <http://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/24993546.pdf>
- [5] Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD, *OECD Core set of Indicators for Environmental Performance Reviews*, París, 1993. Disponible en: <http://enrin.grida.no/htmls/armenia/soe2000/eng/oecdind.pdf>

- [6] R. Quiroga, *Indicadores ambientales y de desarrollo sostenible: avances y perspectivas para América Latina y el Caribe*, Santiago de Chile: Naciones Unidas-CEPAL, 2007. [En línea]. Disponible en: <http://www.cepal.org/deype/publicaciones/xml/4/34394/lcl2771e.pdf>
- [7] J. Valdes, N. E. Samboni y Y. Carvajal, “Desarrollo de un indicador de la calidad del agua usando estadística aplicada, caso de estudio: subcuenca Zanjón Oscuro”, *Revista Tecno Lógicas*, n.º 26, pp. 165-180, 2011.
- [8] V. Guillén, H. Teck, B. Kohlmann y J. Yeomans, “Microorganismos como bioindicadores de la Calidad del Agua”, *Tierra tropical: sostenibilidad, ambiente y sociedad*, vol. 8, n.º 1, pp. 65-93, 2012.
- [9] S. Sharma y R. C. Chhipa, “Evaluation and Optimization of Water Quality Index for Ground Water Source of North West Jaipur and Agglomerates”, *International Journal of Chemical Sciences*, vol. 10, n.º 4, pp. 2297-2305, 2012.
- [10] I. Oana, “Water Quality Index - Assessment Method of the Motru River Water Quality (Oltenia, Romania)”, vol. 13, pp. 74-83, 2010. [En línea]. Disponible en: <http://analegeo.ro/wp-content/uploads/2010/12/5-IONUS-Oana.pdf>
- [11] P. Kumar, A. Kumar, B. Prakash y M. Kumar, “Water Quality Indices Used for Water Resources Vulnerability Assessment Using GIS Technique: A Review”, *Scopus Compendex and Geobase Elsevier*, vol. 6, n.º 6(1), pp. 1594-1600, Dec. 2013.
- [12] P. Walsh y W. Wheeler, “Water Quality Index Aggregation and Cost Benefit Analysis”, National Center for Environmental Economics, July 2012. [En línea]. Disponible en: [http://yosemite.epa.gov/ee/epa/eed.nsf/ec2c5e0aaed27ec385256b330056025c/742fc3186556087885257a3300538f8b/\\$FILE/2012-05.pdf](http://yosemite.epa.gov/ee/epa/eed.nsf/ec2c5e0aaed27ec385256b330056025c/742fc3186556087885257a3300538f8b/$FILE/2012-05.pdf)
- [13] A. Lumb, D. Halliwell y T. Sharma, “Application of CCME Water Quality Index to Monitor Water Quality: A Case Study of the Mackenzie River Basin, Canada”, *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 113, n.º 1-3, pp. 411-429, Feb. 2006.
- [14] R. Horton, “An Index Number System for Rating Water Quality”, *Journal of Water Pollution Control Federation*, vol. 37, 1965.
- [15] S. M. Liou, S. L. Lo y S. H. Wang, “A Generalized Water Quality Index for Taiwan”, *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 96, n.º 1-3, pp. 35-52, Aug. 2004.
- [16] E. Rodríguez, A. Ramos, Z. Romero y M. Hernández, “Aplicación de un Índice de Calidad Acuática en Cuerpos de Agua de Tabasco, Mexico”, *CEPIS*, 1997.
- [17] W. R. Ott, “Water Quality Indices: A Survey of Indices Used in The United States”, US Environmental Protection Agency, Jan. 1978.
- [18] N. E. Samboni, Y. Carvajal y J. C. Escobar, “Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua”, *Ingeniería e Investigación*, vol. 27, n.º 3, pp. 172-181, Dic. 2007.
- [19] R. Behar, M. Zúñiga de Cardozo y O. Rojas, “Análisis y Valoración del Índice de Calidad de Agua (ICA) de la NSF: Caso Ríos Cali y Meléndez”, *Ingeniería y Competitividad*, vol. 1, n.º 1, pp. 17-27, Sept. 1997.
- [20] National Sanitation Foundation, 2006. [En línea]. Disponible en: <http://www.nsf.org/consumer-resources>
- [21] M. Wills y K. N. Irvine, “Application of the National Sanitation Foundation Water Quality Index in Cazenovia Creek, NY, Pilot Watershed Management Project”, *Middle States Geographer*, pp. 95-104, 1996. [En línea]. Disponible en: http://www.msaag.org/wp-content/uploads/2013/04/12_Wills_Irvine.pdf
- [22] L. Valcarcel, N. Alberro y D. Frías, “El Índice de Calidad de Agua como herramienta para la gestión de los recursos hídricos”, *Medio Ambiente y Desarrollo. Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente*, n.º 16, pp. 1-5, 2009.
- [23] P. Torres, C. H. Cruz y P. J. Patiño, “Índices de calidad del agua en fuentes superficiales utilizadas para la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica”, *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 8, n.º 15, pp. 79-94, Jul.-Dic. 2009.
- [24] E. Aroner, “WQHydro: Water Quality-Hydrology Statistics/Graphics/Analysis Package. WQHydro Consulting”, Portland, Oregon, 2002.
- [25] C. Cude, “The Oregon Water Quality Index (owqi) - A Communicator of Water Quality Information”, 2001. [En línea]. Disponible en: http://www.oregon.gov/odf/indicators/docs/owqi_communicator.pdf
- [26] K. D. Bharti, “Water quality indices used for surface water vulnerability assessment”, *International Journal of Environmental Sciences*, vol. 2, n.º 1, pp. 154-173, Sept. 2011.
- [27] S. H. Dinius, “Social accounting system for evaluating water resources”, *Water Resources Research*, vol. 8, n.º 5, pp. 1159-1177, 1972.
- [28] V. Gonzáles Meléndez, O. Caicedo Quintero y N. Aguirre Ramírez, “Aplicación de los Índices de Calidad de Agua NSF, DINIUS y BMWP en la quebrada La Ayurá, Antioquia, Colombia”, *Gestión y Ambiente*, vol. 16, n.º 1, pp. 97-108, Mayo 2013.
- [29] S. H. Dinius, “Design of an Index of Water Quality”, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 23, pp. 833-843, 1987.
- [30] S. A. Abbasi, “Water Quality Indices, State of the Art Report, National Institute of Hydrology, scientificcon-

- tribution no,” INCOH/SAR-25/2002, Roorkee: INCOH, pp 73-200.
- [31] M. E. Miravet, O. Ramírez, J. Montalvo, Y. Delgado y E. Perigó, “Índice numérico cualitativo para medir la calidad de las aguas costeras cubanas de uso recreativo”, *Serie Oceanológica*, n.º 5, pp. 45-56, 2009.
- [32] E. Beamonte, A. Casino, E. Veres y J. Bermúdez, “Un indicador global para la calidad del agua. Aplicación a las aguas superficiales de la Comunidad Valenciana”, *Estadística Española*, vol. 46, n.º 156, pp. 357-384, 2004.
- [33] H. Boyacioglu, “Development of a water quality index based on a European classification scheme”, *Water SA*, vol. 33, n.º 1, pp. 101-106, Enero 2007.
- [34] N. Fernández, A. Ramírez y F. Solano, “Índices Físico-químicos de Calidad del Agua - Un Estudio Comparativo”, *Conferencia internacional sobre usos múltiples del agua: para la vida y el desarrollo sostenible*, Cali, 2003.
- [35] N. E. Samboni, Y. Carvajal E y A. Reyes T, “Aplicación de los indicadores de calidad y contaminación del agua en la determinación de la oferta hídrica neta”, *Ingeniería y Competitividad*, vol. 13, n.º 2, pp. 49 - 60, 2011.
- [36] A. Ramírez, R. Restrepo y G. Viña, “Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. formulaciones y aplicación”, *Ciencia, Tecnología y Futuro*, vol. 1, n.º 3, pp. 135-153, 1997.
- [37] IDEAM, *El Medio Ambiente en Colombia*, 2ed. ed., Bogotá, IDEAM, 2001, pp. 151-156.
- [38] P. Torres, C. H. Cruz, P. Patiño, J. C. Escobar y A. Pérez, “Aplicación de índices de calidad de agua - ICA orientados al uso de la fuente para consumo humano”, *Ingeniería e Investigación*, vol. 30, n.º 3, pp. 86-95, Dic. 2010.
- [39] Ministerio de Medio Ambiente, “Conceptos, Definiciones e Instrumentos de la Información Ambiental de Colombia”, *Sistema de Información Ambiental de Colombia*, SIAC, , vol. 1, 2002.
- [40] IDEAM, *Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC)*. [En línea]. Disponible en: <https://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=69&conID=261> [Último acceso: 2013]
- [41] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, (2007, Abril 19), *Decreto 1323*, *Por el cual se crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico -SIRH-*. [En línea]. Disponible en: <http://www.leyex.info/leyes/Decreto1323de2007.htm>
- [42] IDEAM, *Sistema de Información del Recurso Hídrico SIRH*. [En línea]. Disponible en: <http://sirh.ideam.gov.co:8230/Sirh/pages/inicio.html>
- [43] IDEAM (2002), *Indicadores nacionales*. [En línea] Disponible en: https://www.siac.gov.co/contenido/contenido_imprimir.aspx?conID=1070&catID=695
- [44] Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, (2004, Junio 2). *Resolución 0643*, *Por medio de la cual se establecen los indicadores mínimos de que trata el artículo 11 del Decreto 1200 de 2004 y se adoptan otras disposiciones*. [En línea]. Disponible en: http://www.igac.gov.co/wps/wcm/connect/6fbf0a804d6147909e6c9e5fb5b7b042/resolucion_643_2004.pdf?MOD=AJPERES
- [45] IDEAM, (Diciembre 2010), *Estudio Nacional del Agua 2010*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá. [En línea]. Disponible en: https://www.siac.gov.co/documentos/DOC_Portal/DOC_Agua/3_Estado/20120928_Estado_agua_ENA-2010PrCap1y2.pdf
- [46] IDEAM, (2012, Agosto), *Proceso metodológico y aplicación para la definición de la estructura ecológica nacional: énfasis en servicios ecosistémicos - escala 1:500.000*, Bogotá. [En línea]. Disponible en: https://www.siac.gov.co/documentos/EstructuraEcologica500_informeIDEAM_ago2012-2.pdf
- [47] IDEAM, *Formato Común de Hoja Metodológica de Indicadores Ambientales Promedio de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) (Versión 1,00)*. *Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del agua superficial*. [En línea]. Disponible en: https://www.siac.gov.co/documentos/DOC_Portal/DOC_Siac/Indicadores%20Mayo%202014/HojasMetodologicas/3.16%20HM%20Promedio%20DBO%203.pdf
- [48] M. I. López y D. G. Palací, “Estudio multivariante de la calidad del agua: aplicación al río Júcar en el periodo 1990-2013”, *M+A. Revista Electrónica de Medio Ambiente*, vol. 15, n.º 1, pp. 37-52, 2014.
- [49] United Nations, “Overview of key messages; from the United Nations world water development report 4: managing water under uncertainty and risk”, 2012. [En línea]. Disponible en: <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/wwdr4-2012/>
- [50] N. J. Fernández y F. Solano, *Índices de Calidad y de Contaminación del Agua*, Universidad de Pamplona, 2005.
- [51] S. Tyagi, B. Sharma, P. Singh y R. Dobhal, “Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index”, *American Journal of Water Resources*, vol. 1, n.º 3, pp. 34-38, 2013.
- [52] A. Lumb, T. Sharma y J.-F. Bibeault, “A review of genesis and evolution of water quality index (wqi) and some future directions,” *Water Quality, Exposure and Health*, vol. 3, n.º 1, pp. 11-24, Jun. 2011.