

Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua

A review of physical-chemical parameters as water quality and contamination indicators

Natalia Eugenia Samboni Ruiz¹, Yesid Carvajal Escobar² y Juan Carlos Escobar³

RESUMEN

Con el fin de facilitar la interpretación de los datos físicos, químicos y biológicos, cada vez más agencias medio-ambientales, universidades e institutos recurren a los índices de calidad y contaminación del agua (ICA e ICO), los cuales mediante una expresión matemática que representa todos los parámetros valorados permiten evaluar el recurso hídrico. La elaboración y aplicación de cualquier indicador es específica para cada región o fuente en particular; pero su construcción básicamente consta de tres pasos fundamentales: la selección de las variables, la determinación de los subíndices para cada parámetro y la elección de la fórmula de agregación. Los variables que más se tienen en cuenta en este proceso son: pH, oxígeno disuelto, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), una forma de nitrógeno, fosfatos y sólidos totales (ST). Por lo tanto su uso no puede ser generalizado ya que se podría terminar realizando juicios subjetivos, además bajo un solo indicador no se puede evaluar la dinámica de un sistema, por lo que es importante también el estudio de cada variable individualmente. Este artículo presenta una revisión de los indicadores ICA e ICO más utilizados en algunos países de América y Europa, así como su diseño e interpretación, que se basan en parámetros físico-químicos para su evaluación.

Palabras clave: índice de calidad del agua, índice de contaminación del agua.

ABSTRACT

More environmental agencies, universities and institutes are turning to the water quality and contamination index to facilitate interpreting physical, chemical and biological data, thereby leading to evaluating resource by means of a mathematical expression representing all evaluated parameters. Constructing and applying any indicator is specific for each region or individual source; however, its construction basically consists of three fundamental steps: selecting variables, determining subscripts for each parameter and choosing the formula for adding it. The variables considered in this process are: pH, dissolved oxygen, biochemical oxygen demand (BOD), total nitrogen form, phosphates and total solids (TS). Their use cannot thus be generalised since subjective judgements would thus be made; also, a system's dynamics could not be evaluated using a single indicator, which is why studying each variable individually is also important. This article presents a review of the literature regarding water quality and contamination indexes used in some American and European countries and their design and interpretation based on physical and chemical parameters for evaluating them.

Keywords: water quality index, water contamination index.

Recibido: mayo 28 de 2007

Aceptado: octubre 22 de 2007

Introducción

La supervivencia del hombre como especie se debe en parte al aprovechamiento de los recursos naturales; sin embargo, la falta de planeación y el desconocimiento de las posibles consecuencias de un mal aprovechamiento trajeron consigo la contaminación del ambiente natural. El recurso hídrico (necesario para la vida) ha sido fuertemente afectado por

sustancias cada vez más agresivas y difíciles de tratar debido a su naturaleza química de sustancias presentes en desperdicios que caen a las corrientes.

Por tal razón, agencias gubernamentales, ambientales, universidades y diversas organizaciones, se han preocupado por

¹ Químico. Aspirante a M.Sc., en Ingeniería sanitaria y ambiental. Investigadora, grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Desarrollo de Suelos, IREHISA. Universidad del Valle, Cali, Colombia. nasquim@yahoo.com

² Ingeniero agrícola. M.Sc., suelos y aguas. PhD., hidráulica y medio ambiente. Director, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad del Valle, Colombia. Profesor asociado, Universidad del Valle, Colombia. yecarvaj@univalle.edu.co

³ Ingeniero agrícola, Universidad del Valle. M.Sc., en recursos hídricos, Universidad de los Andes. Investigador, grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Desarrollo de Suelos, IREHISA, Universidad del Valle, Colombia. jucaescobar@yahoo.com

evaluar el impacto antrópico sobre los recursos hídricos a través del estudio de la naturaleza química, física y biológica del agua, mediante programas de monitoreo.

El tratamiento de los datos obtenidos en el monitoreo suele ser una tarea dispendiosa y en muchas ocasiones de difícil entendimiento para los diferentes actores involucrados en el proceso de la valoración de la calidad, pues en la actualidad los valores obtenidos deben permitir resolver diferentes tipos de conflictos como el uso del agua y la integridad ecológica de los sistemas acuáticos, los cuales involucran también aspectos socioeconómicos (Fernández y Solano, 2005).

La implementación de nuevas metodologías que involucren más de dos parámetros para la valoración de la calidad del agua toma cada vez más importancia, los índices de calidad del agua engloban varios parámetros en su mayoría físico-químicos y en algunos casos microbiológicos que permiten reducir la información a una expresión sencilla, conocida como: índices de calidad del agua (ICA) e índices de contaminación del agua (ICO).

Los trabajos de mayor envergadura se basan en la metodología Delphi, como el "The National Sanitation Foundation" (NSF), el que utiliza nueve parámetros en donde incluye la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), oxígeno disuelto (OD), coliformes fecales, nitratos (NO_3^-), pH, cambio de temperatura, sólidos disueltos totales (SDT), fosfatos totales y turbiedad (NSF, 2006).

En la actualidad los indicadores desarrollados involucran desde un parámetro hasta más de 30, pudiendo agruparse en diferentes categorías como: contaminación por materia orgánica e inorgánica, eutrofización, aspectos de salud, sustancias suspendidas y disueltas, nivel de oxígeno, características físico-químicas y sustancias disueltas. Este artículo presenta una revisión de literatura de diferentes ICA e ICO utilizados en Colombia y diferentes países de América y Europa.

Indicadores físico-químicos

La calidad de diferentes tipos de agua se ha valorado a partir de variables físicas, químicas y biológicas, evaluadas individualmente o en forma grupal.

Los parámetros físico-químicos dan una información extensa de la naturaleza de las especies químicas del agua y sus propiedades físicas, sin aportar información de su influencia en la vida acuática; los métodos biológicos aportan esta información pero no señalan nada acerca del contaminante o los contaminantes responsables, por lo que muchos investigadores recomiendan la utilización de ambos en la evaluación del recurso hídrico (Orozco *et al.*, 2005).

La ventaja de los métodos físico-químicos se basa en que sus análisis suelen ser más rápidos y pueden ser monitoreados con mayor frecuencia, en comparación con los métodos biológicos, basados en la observación y medición de ciertas comunidades de seres vivos en las aguas; además, la elección

de las especies debe ser cuidadosa ya que de esta depende la evaluación de la calidad del recurso, que generalmente solo se realiza para un uso determinado, a diferencia de las físico-químicas, que permiten una evaluación para diferentes tipos de uso.

Independiente del tipo de variables usadas en el monitoreo de una fuente, siempre se genera un gran número de datos, que requieren de un tratamiento e interpretación, tarea dispendiosa y de complejo entendimiento en el proceso de la valoración de la calidad ya que en muchas ocasiones se incurre en la pérdida de información o gastos que no justifican los resultados obtenidos.

Según Fernández y Solano, 2005, los resultados de un monitoreo deben permitir resolver diferentes tipos de conflictos como el uso del agua y la integridad ecológica de los sistemas acuáticos, los cuales involucran aspectos socioeconómicos, por lo que los ICA e ICO son una herramienta importante pues su cálculo involucra más de una variable, de tal manera que el uso correcto de estos indicadores permite utilizarlos para la evaluación de los programas de gestión de recursos hídricos.

Antecedentes

Los pioneros en generar una metodología unificada para el cálculo del índice de calidad (ICA) fueron Horton (1965) y Liebman (1969). Sin embargo, estos solo fueron utilizados y aceptados por las agencias de monitoreo de calidad del agua en los años setenta cuando los ICA tomaron más importancia en la evaluación del recurso hídrico.

El índice general de calidad del agua fue desarrollado por Brown *et al.* (1970) y mejorado por Deininger para la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos en 1975 (NAS, 1975). Con estos estudios, el Departamento Escocés para el Desarrollo (SSD), en colaboración con instituciones regionales para la preservación del agua, llevaron a cabo extensas investigaciones para evaluar la calidad del recurso en ríos de Escocia.

En 1970 los trabajos se basaron en la metodología Delphi, como el "The National Sanitation Foundation" (NSF), realizando el índice de calidad de agua (WQI), que en español es conocido como ICA, con base en nueve parámetros: DBO_5 , OD, coliformes fecales, NO_3^- -N, pH, cambio de temperatura, SDT, fósforo total y turbiedad (NSF, 2006). Este índice es en la actualidad uno de los más utilizados por agencias e instituciones en los Estados Unidos.

En 1978 Ott presentó una discusión detallada sobre la teoría de índices ambientales y su desarrollo así como una revisión sobre los índices. Según Cude (2001), desde 1978 hasta 1994, revisiones de literatura de los ICA desarrollados desde su introducción han revelado nuevos enfoques y proporcionado nuevas herramientas para el desarrollo de las investigaciones.

Entre los años de 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, 1996).

La Comunidad Europea desarrolló el índice universal de la calidad del agua (UWQI), utilizado para evaluar la calidad del agua superficial como fuente de agua potable. Este indicador se basa en doce variables: cadmio, cianuro, mercurio, selenio, arsénico, fluoruro, nitratos, OD, DBO₅, fósforo total, pH y coliformes totales (Boyacioglu, 2007).

Según Fernández y Solano (2005), en el mundo hay por lo menos 30 índices de calidad de agua que son de uso común, y consideran un número de variables que van de 3 a 72. Prácticamente todos estos índices incluyen al menos 3 de los siguientes parámetros: OD, DBO o demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno en forma amoniacal y de nitratos (NH₄-N y NO₃-N), fósforo en forma de ortofosfato (PO₄-P), pH y sólidos totales (ST).

La metodología Amoeba (A General Method Of Ecological and Biological Assessment), desarrollada por los Países Bajos, utiliza parámetros físico-químicos y biológicos que permiten la valoración ecológica y biológica de los sistemas acuáticos. Su desarrollo estuvo a cargo del Ministerio Holandés de Transporte, Obras Públicas y Manejo del Recurso Hídrico teniendo en cuenta la producción y rendimiento agrícola, la diversidad sustentable de especies y la normativa sustentable (Fernández y Solano, 2005).

España adoptó el índice de Lomantange y Provencher del estado de Québec (Canadá), en el que se utilizan 23 parámetros, 9 básicos y 14 complementarios. Este índice se fundamenta en el cumplimiento de requisitos de acuerdo al uso del recurso hídrico como: potabilización, contacto primario, riego y mantenimiento de la biodiversidad. El índice simplificado de calidad de agua (ISQA) también es uno de los más utilizados en España, este emplea parámetros como DQO, sólidos suspendidos totales (SST), conductividad y temperatura (Orozco, *et al.*, 2005).

Para el caso latinoamericano, el desarrollo y aplicación de estos índices se ha dado con más auge en México, desarrollando diversos ICA. El índice INDIC-SEDUE fue el primero en aplicarse en México, en Jalisco y tuvo un uso común en la antigua Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología en el Departamento de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental de la Subdelegación de Ecología de la Delegación Sedue-Jalisco. Este ICA está basado en el índice desarrollado por Dinius y adaptado y modificado por la Dirección General de Protección y Ordenación Ecológica (DGPOE) de la Sedue (Montoya *et al.*, 1997).

En el 2004 los países que integran la Comunidad Andina (CAN) elaboraron una metodología para la medición de la calidad de los recursos hídricos en la que se incluyen variables e indicadores para aguas superficiales, subterráneas y costeras; la propuesta tiene como fin desarrollar un *software* adecuado a los países que integran la CAM (OEA, 2004).

En el Perú, en forma general se han aplicado dos indicadores: el ICA-NSF y un modelo desarrollado en Cuba por Jorge García, Atilio Beato y Joaquín Gutiérrez, en el cual se considera, además de los parámetros del ICA-NSF, la conductividad eléctrica cloruros y el nitrógeno amoniacal (OEA, 2004).

Chile en 1999 inició un programa de "Monitoreo, educación sanitaria y ambiental" para la recuperación y protección de los cuerpos de agua, considerando el ISQA. En el año 2000, con el monitoreo del río Chile en 18 estaciones, se elaboraron dos ICA para esta corriente (ICA-extendido e ICA-simplificado); su construcción tuvo en cuenta los parámetros representativos a los usos del agua y a la minimización de los costos de análisis (Debels, *et al.*, 2005).

Brasil utiliza el ICA desarrollado por la Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental de Brasil, que modificó el ICA-NSF a condiciones propias del trópico, para la evaluación de la calidad del agua de ríos con destinación del recurso para uso doméstico (CETESB, 2006).

En Colombia, de acuerdo con el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2000), la medición de parámetros físico-químicos es una actividad rutinaria. Sin embargo, no ha sido así el cálculo de índices de calidad de agua, aunque; estos están siendo aplicados 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 (Fernández y Solano, 2005).

En el 2002, diferentes entidades que conforman el Sistema de Información Ambiental Colombiano, incursionaron sobre la base de los índices desarrollados por Rojas (1991), Behar *et al.* (1997), Ramírez y Viña (1998), en los que se han desarrollado catorce indicadores ambientales, de los cuales tres corresponden a la oferta hídrica, dos a la sostenibilidad del recurso, seis a la calidad del agua dulce y tres ICÁ adicionales para las aguas marinas y costeras (IDEAM *et al.*, 2002).

A pesar del gran esfuerzo realizado en Colombia, algunos de estos indicadores, especialmente los de calidad del agua, apenas están planteados debido a la poca densidad de puntos de colección de datos y su falta de sistematización y estandarización (IDEAM *et al.*, 2002).

Es importante resaltar el trabajo realizado por la Corporación Regional del Valle del Cauca (CVC) y la Universidad del Valle, quienes 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, DBO₅, nitrógeno total, fósforo total, ST, SST y coliformes fecales (CVC-Univalle, 2004).

Los ICA son una herramienta útil para la toma de decisiones, por lo que es necesario el monitoreo continuo de cada variable que permita adecuar el índice a niveles regional y local, como es el caso del Icauaca.

Finalmente, hay que destacar el trabajo realizado en el 2005 por el grupo de Investigación de Ciencias Naturales en la línea de investigación, valoración y monitoreo de la calidad ambiental de la Universidad de Pamplona, que trabajo el software ICAtes V1.0, en el cual se incluyen una gran variedad de ICA e ICO, se discriminados por país y autor.

Clasificación y uso de los índices

De acuerdo a Ball y Church (1980), los índices pueden clasificarse en diez categorías, orientadas de acuerdo a su uso dentro de cuatro grupos, así:

Grupo I, se aplica a los sensores e incluye dos categorías:

Indicadores en la fuente: reportan la calidad de agua generada por sensores en fuentes discretas.

Indicadores en un punto diferente a la fuente: reportan la calidad del agua generada por fuentes difusas.

Grupo II, miden la capacidad de estrés:

Indicadores de medidas simples: incluyen muchos atributos y componentes individuales del agua, que pueden ser usados como indicadores de su calidad.

Indicadores basados en criterios o estándares: correlacionan las medidas de calidad del agua con los niveles estándar o normales que han sido determinados para la preservación y usos adecuados del agua.

Los índices multiparámetro: se determinan por la opinión colectiva o individuales de expertos.

Los índices multiparámetros empíricos: son establecidos por el uso de las propiedades estadísticas de las mediciones de calidad del agua.

Grupo III, indicadores para lagos: específicamente desarrollados para este tipo de sistemas.

Grupo IV, tiene en cuenta las consecuencias:

Indicadores de la vida acuática: basados en diferentes reacciones de tolerancia de la biota acuática a varios contaminantes y condiciones.

Indicadores del uso del agua: evalúan el agua respecto a usos como abastecimiento y agricultura.

Indicadores basados en la percepción: se determinan por la opinión público y los usos de los cuerpos de agua.

Según Ott (1978), los ICA e ICO son una herramienta que se tiene en la actualidad para disminuir e interpretar la información generada en el monitoreo de una fuente, y hace una clasificación de acuerdo a sus usos, así:

- **Manejo del recurso**, en este caso los índices pueden proveer información a personas que toman decisiones sobre las prioridades del recurso.
- **Clasificación de áreas**, los índices son usados para comparar el estado del recurso en diferentes áreas geográficas.
- **Aplicación de normatividad**, en situaciones específicas y de interés, es posible determinar si se está sobrepasando la normatividad ambiental y las políticas existentes.
- **Análisis de la tendencia**, el análisis de los índices en un periodo de tiempo puede mostrar si la calidad ambiental está disminuyendo o mejorando.
- **Información pública**, los índices pueden tener utilidad en acciones de concientización y educación ambiental.
- **Investigación científica**, tiene el propósito de simplificar una gran cantidad de datos de manera que se pueda analizar fácilmente y proporcionar una visión de los fenómenos medioambientales.

Diseño de los índices

Los indicadores ICA e ICO básicamente son una expresión de un número de parámetros que permiten valorar el recurso hídrico para un determinado uso, estos son presentados en forma de número, rango, descripción verbal, símbolo o color. Para Ball y Church (1980), el cálculo de los índices tanto ICA e ICO se basan en tres pasos consecutivos, que son:

1. Selección de parámetros o variables: se puede considerar entre dos o n-parámetros. La elección depende en gran medida del criterio de un experto, como también de la información existente, los criterios de tiempo, localización y su importancia como estándar de calidad. Para Del Río (1986), la determinación de las variables se basa esencialmente en la calcificación realizada por los siguientes autores:

Walski (1974) utiliza las variables OD, temperatura, coliformes, pH, SS, turbidez, transparencia, nitratos, fosfatos, grasas, color y olor, mediante las cuales se puede evaluar de la fuente las características organolépticas, efecto sobre la vida acuática y la salud humana.

Dunnette (1979) propone la selección de variables de acuerdo a cinco categorías (Tabla 1); estas también se pueden definir teniendo en cuenta el tipo de uso de la fuente, por ejemplo, agua para consumo, recreación, riego, industria, etc. Por lo que es importante definir un grado de jerarquía.

La metodología Delphi, que de acuerdo a Dinius (1987) es la más usada en el diseño de índices de calidad, propone la escogencia y conformación de un panel de expertos tales como, agencias de vigilancia, académicos y otros, que tengan relación con la calidad del agua, quienes seleccionan

las variables de acuerdo a su criterio individual y finalmente escogen las de mayor recurrencia.

Tabla 1. Selección de variables por Dunnette (1979)

Categorías	Variables que las representan
Nivel de oxígeno	OD, DBO, DQO
Eutrofización	NO ₂ -N, NO ₃ -N, ortofosfatos
Aspectos de salud	Coliformes totales y fecales
Características físicas	Temperatura, transparencia, sólidos totales

2. Determinación del subíndice para cada parámetro:

tiene como propósito la transformación de las variables de una escala dimensional a una adimensional para permitir su agregación. Según Fernández y Solano (2005), se pueden utilizar varios métodos :

- *Valor nominal o numérico*, previa comparación del valor del parámetro con un estándar o criterio.
- *Parámetro en número decimal, diagramas o tablas de calibración*: en este caso se debe desarrollar para cada parámetro su propio diagrama, en el que se indique la correlación entre el parámetro y su valor en escala de calidad. Esta escala generalmente está entre 0 y 100, aunque también se acostumbra esclarlos entre 0 y 1. Según Del Río (1986), las curvas construidas se basan en cuatro métodos:

Método basado en la experiencia propi: es muy subjetivo debido a que no solamente se encuentran grandes diferencias de criterio entre autores distintos, sino también entre las curvas desarrolladas por un mismo autor para distintos parámetros.

El método Delphi: para su construcción se usa el promedio de la opinión de varios expertos.

Curvas basadas en ecuaciones matemáticas: se parte de una fórmula matemática con la cual se desarrolla la curva de calidad respectiva para cada parámetro o a partir de las curvas generadas se desarrolla la fórmula matemática respectiva.

Curvas basadas en la normatividad: se generan las curvas a partir de los valores de los parámetros recogidos en diferentes normatividades. El principal objetivo de este método es buscar la objetividad y la aceptación por parte de los expertos.

- *Parámetro bajo formulación matemática*: con el fin de convertir los valores del parámetro de acuerdo a varias escalas con las que los valores del parámetro conservan sus unidades originales.

La etapa más importante en la construcción del índice es la determinación de los subíndices. De acuerdo Ott (1978) las funciones matemáticas para realizar este proceso pueden ser: lineales, lineales segmentadas (incluyen funciones de umbral), no lineal y segmentada no lineal

3. **Determinación del índice por agregación de los subíndices**: una vez se tiene la información homogeneizada de todos los parámetros seleccionados, hay que mirar la manera de unificar la información final; la integración de los subíndices determina el índice de calidad de agua, que puede darse por medio de fórmulas de agregación matemática que comúnmente corresponden a una función promedio (Tabla 2).

Tabla 2. Fórmulas de agregación.

Método	Fórmula
Promedio ponderado	$ICA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$
Promedio aritmético ponderado	$ICA = \sum_{i=1}^n q_i w_i$
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	$ICA = \frac{1}{100} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \right)^2$
Promedio ponderado modificado	$ICA = \frac{1}{100} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i w_i \right)^2$

Fuente: Van Helmond y Breukel, 1997

Antes de pasar a las fórmulas casi todos los autores consideran que unos parámetros son más importantes que otros, y por lo tanto se les asigna un peso relativo a cada variable, teniendo en cuenta la opinión de expertos o la importancia como indicadores de los cambios de la calidad del agua (Del Río, 1986).

Básicamente existen dos enfoques para calcular un ICA: (i) el producto ponderado; en este método los pesos dan importancia a los puntajes y todos son ponderados de acuerdo a la importancia de los pesos y luego multiplicados, evitando el encubrimiento que se presenta cuando se calcula un valor satisfactorio, aunque el subíndice sea insatisfactorio; (ii) la suma ponderada; en esta cada puntaje es multiplicado por un peso y los productos son sumados para obtener el índice, si los pesos son iguales para cada puntaje, el valor del índice es llamado valor aritmético no ponderado. Si la suma de

los pesos no son iguales entonces se conoce como valor aritmético de la calidad del agua (Ball y Church, 1980).

Finalmente, el valor obtenido mediante la fórmula de agregación de variables debe ser interpretado mediante una escala general de calidad o polución, para lo cual los diferentes autores toman un escala de 0 a 10 ó 0 a 100, define rangos de calidad, estos en algunos casos se les asigna un color .

En las Tablas 3 y 4 se presenta un resumen de los índices ICA e ICO, revisados en la literatura, que emplean parámetros físico-químicos y microbiológicos para su evaluación. Se clasificaron teniendo en cuenta su país de origen, el tipo de variables físico-químicas usadas y el método de agregación en el cálculo del índice.

Tabla 3. Índices de calidad del agua.

ICA	Variables incluidas	Tipo de estimación
Estados Unidos		
NSF	Temperatura, pH, OD, DBO, SDT, turbiedad, coliformes fecales, NO ₃ -N y fosfatos total	Curvas - Promedio ponderado
Dinius (1987)	Temperatura (aire-superficie), pH, OD, DBO, color, conductividad, NO ₃ -N, alcalinidad, dureza, cloruros, coliformes totales y fecales	Ecuación - Media geométrica ponderada
Agua de Oregon OWQI	Temperatura, pH, OD, DBO, ST, NO ₂ -N, NO ₃ -N, NH ₄ -N, fosfatos totales y coliformes fecales	Ecuaciones - Cuadrado de la media armónica
Idaho	OD, turbidez, fosfatos totales, coliformes fecales y conductividad	Ecuación - Proporción logarítmica
Canadá		
British Columbia	Se basa en consecución de objetivos los cuales son los límites seguros de las variables dadas por la normatividad.	Fórmulas - Raíz cuadrada de la sumatoria
México		
León (1998)	Diferencia de Temperatura, pH, OD, DBO ₅ , DQO, SST, NO ₃ -N, NH ₄ -N, fosfatos, alcalinidad, dureza, fenoles, cloruros, coliformes totales y fecales	Fórmulas - Promedio geométrico ponderado
Montoya (1997)	Conductividad, pH, OD, DBO ₅ , ST, SST, NO ₂ -N, NO ₃ -N, NH ₄ -N, Turbiedad, color, alcalinidad, dureza, cloruros, grasas y aceites, fosfatos, detergentes, coliformes totales y fecales	Ecuaciones - Promedio ponderado
Brasil		
CETESB (2002)	Temperatura, pH, OD, DBO ₅ , ST, turbiedad, coliformes fecales, nitrógeno total y fósforo total	Curvas - Promedio ponderado
Colombia		
Behar et al. (1997)	OD, DBO ₅ y coliformes fecales	Curvas - Promedio ponderado
Rojas (1991)	pH, OD, DBO ₅ , ST, turbiedad y coliformes fecales	
Icauca	pH, OD, color, turbiedad, DBO ₅ , nitrógeno total, fósforo total, ST, SST y coliformes fecales	
España		
Calidad general ICG	Considera 23 parámetros, 9 Básicos (coliformes totales, OD, DQO, DBO ₅ , conductividad, fosfatos totales, SST, NO ₃ -N, y pH) y 14 complementarios	Grafica - Promedio aritmético ponderado
Simplificado (ISQA)	Temperatura, OD, DQO, SST y conductividad	Curva - Sumatoria
Comunidad Europea		
UWQI	Cadmio, cianuro, mercurio, selenio, arsénico, fluoruro, NO ₃ -N, OD, DBO ₅ , fósforo total, pH y coliformes totales	Ecuación - Promedio aritmético ponderado

Fuente: Modificado Fernández et al., 2003

Se encuentra que las variables más utilizadas son: temperatura, pH, OD, DBO₅, nitrógeno en forma de NO₃ -N o total, fósforo en forma de ortofosfato o total, sólidos en forma de ST y SST.

La propuesta canadiense de British Columbia se basa en el logro de objetivos, dando un enfoque diferente al cálculo de los índices, lo que permite evaluar las estrategias de mejoramiento de calidad del agua tomadas por la agencia de control de una forma más directa.

La propuesta de los Países Bajos y la formulada en Colombia por Ramírez y Viña (1998), son muy similares, ya que proponen índices complementarios entre sí, los cuales se desagregan en varios índices de contaminación, por lo que en conjunto constituye una estrategia de valoración general de la calidad del agua. Estos índices permiten estudiar problemas particulares y evitan que problemas ambientales de contaminación queden enmascarados en torno a otras variables (Fernández et al., 2003).

De acuerdo al estudio realizado por House (1989), los métodos utilizados para el cálculo de un ICA, el promedio aritmético ponderado modificado y la suma ponderada modificada proveen los mejores resultados para la indexación de la calidad general del agua.

El promedio geométrico ponderado también se ha utilizado, especialmente cuando existe una gran variabilidad entre las muestras. Además, cuando estas tienen gran variabilidad o donde es importante tener en cuenta valores bajos, se recomienda utilizar una media armónica o su cuadrado. Esta última es la más sensible cuando hay un conjunto de datos con valores bajos, que toman mayor peso en el cálculo que los valores altos (Fernández et al., 2003).

A continuación se presenta la base conceptual y la estimación para ICA-NSF.

ICA-NSF surge en los años setenta y en la actualidad es utilizado para supervisar la calidad de los ríos a través del tiempo y comparar aguas de abastecimiento en Estados Unidos y muchos países del Mundo (NSF, 2006). Para su desarrollo se seleccionaron 142 expertos en el tema de calidad de agua, quienes usaron la técnica de investigación Delphi, basada esencialmente en tres pasos.

- Probaron 35 variables de contaminación basados en el criterio profesional colectivo y los conocimientos del medio acuático o foco de con-

taminación, clasificadas en tres categorías de acuerdo a si el parámetro debía ser: “no incluido”, “indeciso” o “incluido”, a los que se les asignó un valor de 1 a 5, de acuerdo con su mayor o menor importancia, siendo uno la calificación más significativa (Ott, 1978; Brown et al., 1970).

- Evaluaron las respuestas de los expertos y se seleccionaron nueve variables de mayor importancia: OD, coliformes fecales, pH, DBO₅, SDT, NO₃-N, fosfatos, temperatura y turbidez.
- Se asignaron los pesos relativos o peso de importancia del parámetro (wi) correspondientes a los factores de contaminación en aguas de acuerdo al uso del agua e importancia de los parámetros en relación al riesgo que implique el aumento o disminución de su concentración.

Tabla 4. Índices de contaminación del agua.

ICO	Variables incluidas	Tipo de estimación
Países Bajos - Proyecto AMOEBA		
Bacterial (BPI)	Bacterias Termo-tolerantes	Curva – Lectura directa
Por nutrientes (NPI)	pH, amonio, nitrógeno total, NO ₂ -N, NO ₃ -N, fósforo total, ortofosfatos, clorofila, conductividad y turbidez	Curvas – Sumatoria ponderada modificada
Orgánica (OPI)	temperatura, DBO, DQO, OD y NH ₄ -N	Curvas – Ln de la sumatoria ponderada modificada
Industrial (IPI)	Contaminación industrial en agua y sedimentos	
Por pesticidas (PPI)	Contaminante agrícola en agua y sedimentos	Curvas – Lectura directa
Producción / Respiración (PRI)	Relación producción/ respiración en 24 horas	
Bentónico (BSI)	Comunidades bentónicas a nivel de familia	
Diversidad biológica (BDI)	Inventario comunidades biológicas	Tabla – Promedio porcentual
Colombia - Ramírez y Viña (1998)		
Mineralización ICOMI	Conductividad, dureza y alcalinidad	Ecuación - Promedio aritmético
Materia orgánica ICOMO	DBO, OD y coliformes totales	
Sólidos - ICOSUS	SST	Ecuación – Lectura directa
Trofia - ICOTRO	Fósforo total	Ecuaciones
Toxicidad - ICOTOX	Bioensayos (unidades tóxicas)	Ecuación – Lectura directa
ICOTEM	Temperatura (vertimiento y receptor)	
ICO-pH	pH	Ecuaciones – Lectura directa
Biológico - ICOBIO	Comunidades biológicas	
Hidrocarburos	Hidrocarburos aromáticos, alifáticos en peces y sedimentos	

Fuente: Modificado Fernández et al., 2003

Con esta última etapa se construyen niveles de calidad de agua en un rango de 0 a 100, siendo organizados en una gráfica en las ordenadas y los niveles de las variables en las abscisas, estas curvas son conocidas como relaciones funcionales o curvas de función (Gráficos 1 a 9), contruidos para los nuevos parámetros (Ott, 1978; Brown et al., 1970)

Para calcular el índice de calidad del agua agregado, se usa una suma lineal ponderada de los subíndices o una función

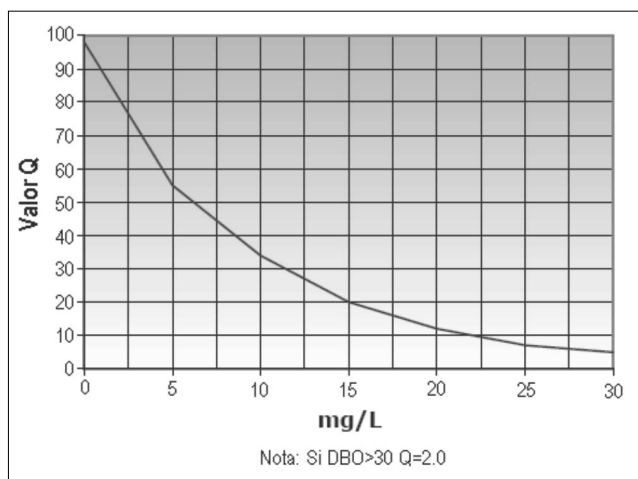


Gráfico 1. Curva de calidad de DBO

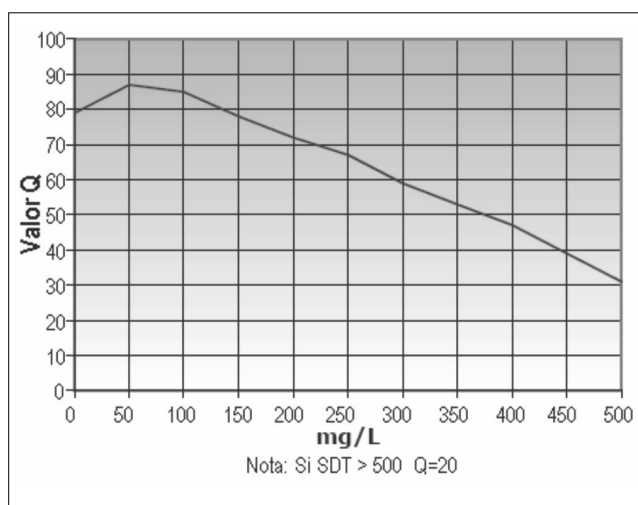


Gráfico 2. Curva de calidad de SDT

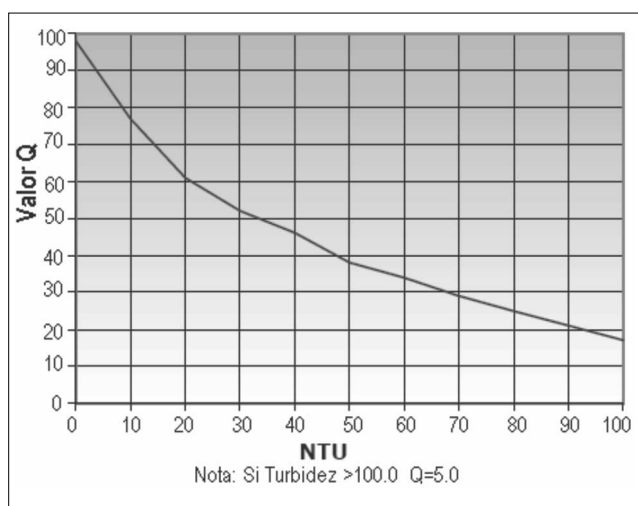


Gráfico 3. Curva de calidad de turbidez

de agregación del producto ponderado (ecuación 1), para lo cual se tiene en cuenta los pesos asignados de cada variable, que son: para el OD 0.17; coliformes fecales 0.15; pH 0.12; DBO₅ 0.10; NO₃-N 0.10; fosfatos 0.10; desviación de temperatura 0.10; turbiedad 0.08 y SDT 0.08 (Ott, 1978). El resultado obtenido se interpreta de acuerdo a la Tabla 5.

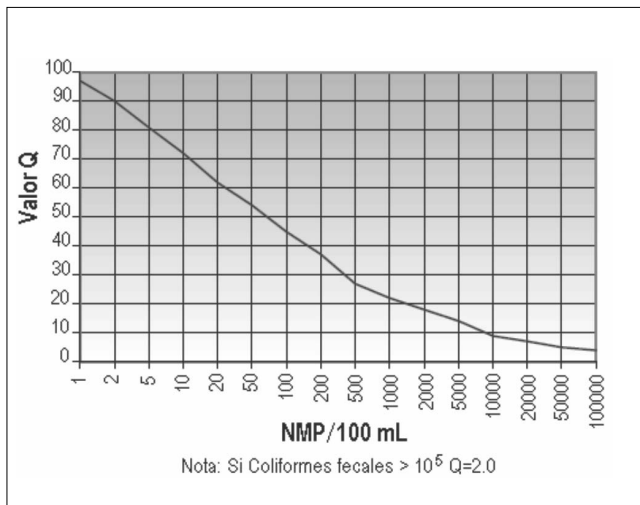


Gráfico 4. Curva de calidad de coliformes fecales

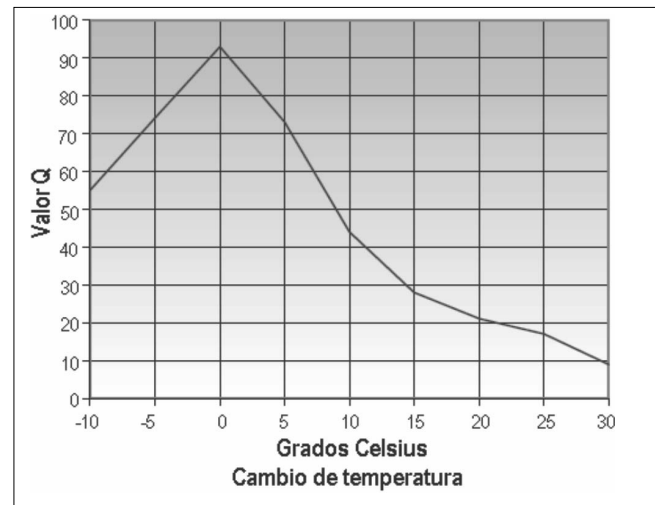


Gráfico 7. Curva de calidad de pH

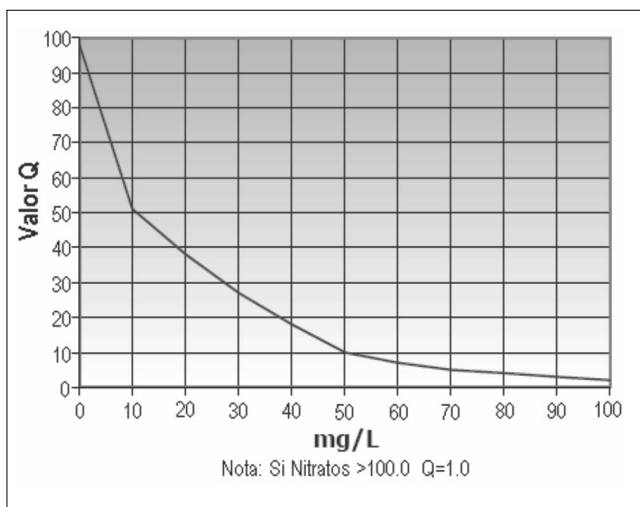


Gráfico 5. Curva de calidad de nitratos

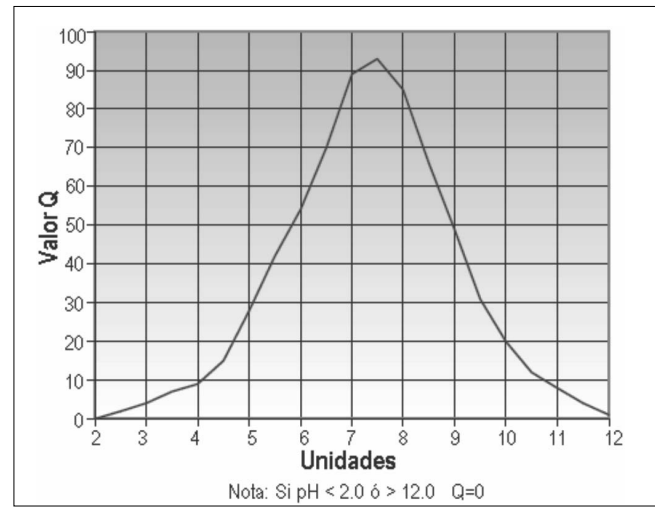


Gráfico 8. Curva de calidad de temperatura

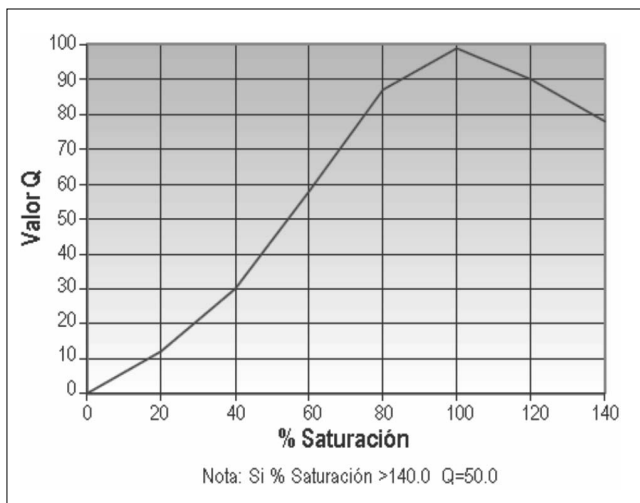


Gráfico 6. Curva de calidad de % OD

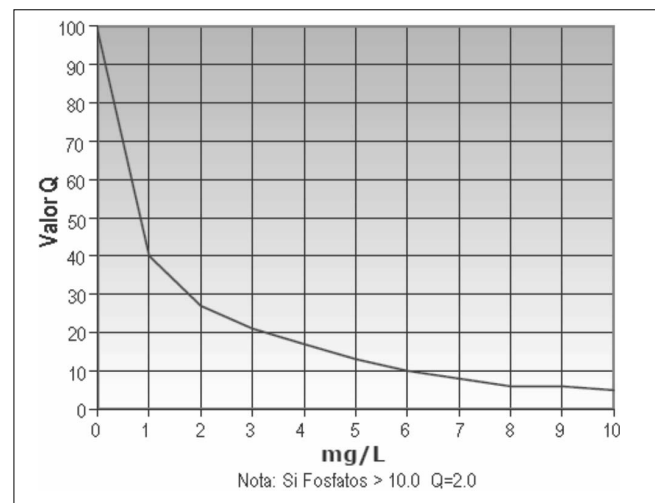


Gráfico 9. Curva de calidad de fosfatos

Fuente: Adoptado de www.nsf.org

Ecuación 1.

$$ICA_a = \sum_{i=1}^9 (Sub_i * w_i)$$

Donde Sub_i : subíndice del parámetro i

w_i : factor de ponderación para el subíndice i

Tabla 5. Escala de clasificación del ICA-NSF.

Rango	Escala de color
Excelente: 91-100	AZUL
Buena: 71-90	VERDE
Media: 51-70	AMARILLO
Mala: 26-50	NARANJA
Muy Mala: 0-25	ROJO

Fuente: Fernández y Solano, 2005

El ICA-NSF original se ha modificado para desarrollar índices de calidad de agua específicos para determinadas regiones o países. Algunos de estos indicadores y las variables que se incluyen y excluyen, son:

- OWQI, de Oregon, en el que se excluye a la turbiedad e incluyen los nitritos y el amonio.
- Río Des Moines (DRM WQI), en el que se excluyen a la temperatura, ST y turbiedad e incluyen los nitritos y el amonio.
- Sao Pablo Brasil (ICA CETESB), el nitrógeno en forma de nitratos se sustituye por nitrógeno total y los fosfatos se reemplazaron por el fósforo total.
- Rojas (1991), para la evaluación del río Cauca, en el Valle del Cauca, excluye parámetros como nitratos, fosfatos y temperatura.

Conclusiones

En la actualidad los indicadores de calidad y contaminación se presentan como una opción viable para la interpretación de variables físicas, químicas y biológicas de un programa de monitoreo, debido a que las diferentes variables son combinadas para generar un valor que puede ser interpretado fácilmente tanto por expertos como por la comunidad en general, permitiendo valorar las diferentes acciones tomadas a lo largo de la fuente.

A pesar de los esfuerzos hechos no existe un indicador universal limitando el uso de ciertos indicadores a regiones o problemas ambientales específicos, por lo que la evaluación individual por variable sigue siendo una tarea dispendiosa y necesaria en la estimación de la calidad o contaminación del agua.

Los trabajos de mayor importancia a nivel mundial se deben al índice desarrollado por "The National Sanitation Foundation" (NSF), por ser el más utilizado y modificado en muchos países del mundo, como España, Brasil y Colombia, entre otros.

En Colombia hay que resaltar los trabajos realizados por Ramírez y Viña (1998), desarrolladores una gama de índi-

ces complementarios, quienes desagregando los tipos de contaminación, los cuales permiten estudiar problemas particulares, evitan un enmascaramiento de la información por el uso de múltiples variables a la vez. Así mismo, los trabajos realizados en el Departamento del Valle del Cauca por Rojas (1991,) quien se basa en la metodología de la NSF, como también el Icauca (2004) con el proyecto PMC-Fase II.

Es importante conocer las bases metodológicas de cada indicador, antes de aplicarlo en un sistema acuático, porque en muchas ocasiones estos son elaborados para problemas específicos de una región, los cuales no se acoplan a otras fuentes que van a ser estudiadas; por lo tanto, la elaboración o adaptación de un indicador sería la mejor opción para el uso de estos indicadores.

En la mayoría de los casos las variables más empleadas para la valoración físico-química del agua a partir de indicadores son el pH, OD, DBO_5 , una especie de nitrógeno como nitratos o amonio, fósforo total y sólidos suspendidos totales. La DQO se ha limitado a pesar que es una variable más amplia para evaluar la contaminación de origen orgánico e inorgánico, además el uso de esta variable amplía la gama de usos de ciertos indicadores.

La propuesta canadiense de British Columbia se basa en el logro de objetivos que simplemente son la comparación de los valores obtenidos con la legislación existente, esto permite evaluar las estrategias de mejoramiento de calidad del agua tomadas por las agencias de control de una forma más directa, ya que los cambios mediante esta valoración son más sensibles. Además es una de las metodologías que fácilmente se pueden adecuar a los requerimientos de la legislación en un determinado país, ya que no jerarquiza las variables y todas tienen igual importancia.

De acuerdo con el estudio realizado por House (1989) en los métodos utilizados para el cálculo de un ICA el promedio aritmético ponderado modificado y la suma ponderada modificada proveen los mejores resultados para la indexación de la calidad general del agua.

Agradecimientos

Al grupo de investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos y Desarrollo de Suelos (Irehisa) de la Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente (Eidenaar) de la Universidad del Valle, y la Corporación Autónoma Regional del Cauca, por el apoyo económico y administrativo para la realización de este artículo.

Bibliografía

BCWQI., The British Columbia Water Quality Index., Environmental Protection Division. Ministry of Environment. Government of British Columbia, 2001. En: www.env.gov.bc.ca/wat/wq/BCguidelines/indexreport.html, Visitada en Septiembre de 2006.

- Ball, R., Church, R., Water quality indexing and scoring., Journal of the Environmental Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 106, EE4, 1980, pp. 757-771.
- Boyacioglu, H., Development of a water quality index based on a European classification scheme., Water SA, Vol. 33, No. 1, January, 2007.
- Brown, R., Maccllelland, N., Deininger, R., Tozer, R., A Water Quality Index – Do We Dare?., Water and Sewage Works. October, 1970, pp. 339-334.
- Cude, C., Oregon Water Quality Index: A Tool for Evaluating Water Quality Management Effectiveness., Paper No. 99051, Journal of The American Resources Association, 37, 1, 2001, pp. 125 – 138.
- CETESB., Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de Brasil., Índice de calidad de Aguas, 2006. En: http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/indice_iap_iqa.asp, Visitada en Junio de 2006
- CVC-UNIVALLE., Proyecto de modelación del río Cauca –PMC-Fase II., Volumen X, Estudio de la calidad del agua del río Cauca y sus principales tributarios mediante la aplicación de índices de calidad y contaminación, tramo Salvajina – La Virginia, Corporación Autónoma del Valle, Universidad del Valle, Santiago de Calí, 2004.
- Debels, P., Figueroa, R., Urrutia, R., Barra, R., Niell, X., Evaluation of water quality in the Chillán river (Central Chile) using physicochemical parameters and a modified water quality index., Environmental Monitoring and Assessment, Volume 110, 2005, pp. 301–322
- Del Río, I., Revisión Crítica de los Índices Físico-Químicos de Calidad del Agua., Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, En Revista Ingeniería Civil, 1986.
- Dinius, S., Design of a water quality index., W.R. Bulletin, V23, No. 5, 1987.
- Dunnette, D., A Geographically Variable Water Quality Index Used in Oregon., Journal of the Water Pollution Control Federation, Vol. 51, No. 1, 1979, pp. 53-61.
- Fernández, N., Solano, F., Índices de Calidad y de contaminación del Agua., Universidad de Pamplona, 2005.
- Fernández, N., Ramírez, A., Solano, F., Índices físico-químicos de Calidad del agua, un estudio comparativo., Conferencia Internacional Usos Múltiples del Agua: Para la Vida y el Desarrollo Sostenible, Agua 2003, Universidad del Valle – Cinara, 2003.
- Horton R.K., An Index Number System for Rating Water Quality., Jr. of WPCF, Vol. 37, 1965.
- IDEAM., Estudio Nacional de Águas., 2000. En: www.ideam.gov.co
- IDEAM, SINCHI, IAVH, IIAP, INVEMAR., Sistema de Información Ambiental de Colombia –SIAC- Primera generación de Indicadores de la Línea Base de la Información Ambiental de Colombia., ISBN 958-8067-08-1, 2002.
- Liebman H., Atlas of Water Quality: Methods and Practical Conditions., R. Oldenbourgh, Munich, 1969.
- Montoya, M., Contreras, C., García, V., Estudio Integral de la Calidad del Agua en el Estado de Jalisco., Com. Nal. Agua., Geren., Reg. Lermasantiago, Guadalajara, 1997, pp. 106.
- National Academy of Science (NAS)., Planning for Environmental Indices., A Report of The Planning Committee on Environmental Indices, National Academy of Science, Washington, 1975.
- NSF - National Sanitation Foundation., Consumer Information: Water Quality Index (WQI)., 2006. En: www.nsf.org/consumer/just_for_kids/wqi.asp, Visitada: Marzo de 2006
- OEA., Metodología estadística para la medición de la calidad de los recursos hídricos en los países de la comunidad Andina., Preparado por: Proyecto Sistema de Información del medio ambiente, SIMA, Instituto Lima, Perú, 2004.
- Orozco, C., Pérez, A., Gonzáles, M. N., Rodríguez, F., Alfayate, J., Contaminación Ambiental. Una visión desde la Química., Tercera edición, Thomson Editoriales Spain Paraninfo, S.A., 2005.
- Ott, W., Environmental Indices., Theory and Practice, Aa Science, Ann Arbor, Michigan, 1978.
- Van Helmond, C., Breukel, R., Physico-Chemical water quality indices., In: J.J. Ottens, F.A.M. Claessen, P. Stoks, J., Timmermam and Ward, R. Monitoring, Tailor-Made II, Proceedings of an International Works on Information Strategies in Water Management, Nunspeet, The Netherlands, 1997, pp.475-479.
- Walski, T. M., Parker F.L., Consumers Water Quality Index., Jour Environ. Eng. Div., 100, No. EE3, 1974, pp.436-448.
- WEP, Lower Great Miami Watershed Enhancement Program (WEP)., Miami Valley River Index, 1996.