

REVISIÓN Y EVALUACIÓN DE ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA Y DE
CONTAMINACIÓN PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL DEL MÓDULO WQI DE
AMBIENSQ SUITE

CINTHIA ALEXANDRA GUTIERREZ RUIZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA

2015

“REVISIÓN Y EVALUACIÓN DE ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA Y DE
CONTAMINACIÓN PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL DEL MÓDULO WQI DE
AMBIENSQ SUITE”

CINTHIA ALEXANDRA GUTIERREZ RUIZ

Trabajo de grado para optar por el título de especialista en Química Ambiental

Director

M.Sc LUZ YOLANDA VARGAS FIALLO

Directora del laboratorio de consultas industriales UIS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA

2015

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS	14
2. JUSTIFICACIÓN	15
3. MARCO TEÓRICO	16
4. METODOLOGIA.....	62
5. RESULTADOS	67
6. CONCLUSIONES	73
7. RECOMENDACIONES.....	75
BIBLIOGRAFÍA	76

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Diagrama de proceso general.....	64
Figura 2 Diagrama de flujo para el cálculo de índices de calidad y contaminación.	65
Figura 3 Diagrama de flujo para el cálculo del índice de Canadá	65
Figura 4 Inicio del Aplicativo	67
Figura 5 Selección de variables para el cálculo de índices.....	68
Figura 6 Resultados cálculo ICA IDEAM	69
Figura 7 Resumen de puntos donde no fue posible realizar el cálculo del ICA	70
Figura 8 Generación de reportes ICAs e ICOs	70
Figura 9 Reporte gráfico ICA IDEAM	71
Figura 10 Comparación de resultados ICA IDEAM en diferentes periodos de tiempo.	72
Figura 11 Distribución porcentual ICA IDEAM	72

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Factores de ponderación de las variables del NSF -WQI	19
Tabla 2. Rangos de calidad para el índice NSF- WQI	23
Tabla 3. W_i para cada parámetro incluido en el índice de Dinius.	24
Tabla 4. Ecuaciones de cálculo de los subíndices de cada parámetro.	25
Tabla 5. Rangos de calidad para índice de DINIUS.....	26
Tabla 6. Subíndices y W_i necesarios para el cálculo del segundo índice de DINIUS.....	26
Tabla 7. Rangos de evaluación del Índice para consumo humano, agricultura y pesca.	28
Tabla 8 Rangos de evaluación del Índice para industria y recreación.	29
Tabla 9. Rangos y calificación establecida por el CCME WQI.....	33
Tabla 10. Parámetros del ISQA	35
Tabla 11. Escala de calificación de calidad del agua del ISQA.....	36
Tabla 12. Factores de ponderación para los parámetros del UWQI	39
Tabla 13. Funciones para el cálculo de Subíndices del IWQI	40
Tabla 14. Rangos de calificación del UWQI.....	42
Tabla 15. Significancia de los índices de contaminación ICOs	46

Tabla 16. Rango de evaluación de Índices de contaminación para la industria petrolera.....	48
Tabla 17. Parámetros incluidos en el ICAUCA	49
Tabla 18. Funciones para el cálculo de los Subíndices del ICAUCA	50
Tabla 19. Factores de ponderación de los parámetros del ICAUCA.....	52
Tabla 20. Escala de evaluación de la calidad del agua del ICAUCA	53
Tabla 21 parámetros incluidos en el índice del IDEAM.....	54
Tabla 22. Factores de ponderación del índice del IDEAM	55
Tabla 23. Rangos de calificación del índice del IDEAM.....	61

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Curvas de función para sólidos totales y pH.	20
Gráfica 2 Curvas de función para DBO y Coliformes fecales.	20
Gráfica 3 Curvas de función para Turbiedad y variación en la temperatura.	21
Gráfica 4 Curvas de función para nitratos y fosfatos.	21
Gráfica 5 Curvas de función para % de saturación de oxígeno disuelto.	21
Gráfica 6 Curva para el cálculo del subíndice de temperatura	36
Gráfica 7 Curva para el cálculo del subíndice de DQO.	37
Gráfica 8 Curva para el cálculo del subíndice de solidos suspendidos.	37
Gráfica 9 Curva para el cálculo del subíndice de Oxígeno Disuelto	38
Gráfica 10 Curva para el cálculo del subíndice de Conductividad.	38

RESUMEN

TITULO: "REVISIÓN Y EVALUACIÓN DE ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA Y DE CONTAMINACIÓN PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL DEL MÓDULO WQI DE AMBIENSQ SUITE"¹.

AUTORES: CINTHIA ALEXNDRA GUTIERREZ RUIZ**

PALABRAS CLAVE: índices de calidad, calidad hídrica, índices de contaminación, herramienta informática, Colombia

Debido a las pocas herramientas con que cuentan los entes de control para realizar seguimiento eficaz a las fuentes hídricas superficiales, nace la necesidad de encontrar alguna metodología que permita acoplar y ponderar las concentraciones medidas de cada una de las variables de interés, de modo que sea posible realizar análisis rápidos y acertados, estas metodologías son conocidas como índices de calidad (ICAs) e índices de contaminación (ICOs) muy usados desde los años 70 en países como Estados Unidos.

Los ICAs e ICOs son desarrollados para la dinámica puntual de un país o cuenca específica objeto de estudio, por ende una vez un ente de control ha definido utilizar uno de estos como herramienta de toma de decisiones, es de vital importancia realizar revisiones bibliográficas de los índices disponibles a nivel internacional, de modo que se realicen los ajustes necesarios a la variables y estos sean coherentes con la dinámica del sitio donde van a ser utilizados.

La principal dificultad de los índices de calidad y de contaminación radica en la centralización y organización de la información, así como en el cálculo mismo, ya que generalmente las formulas son complejas, es por esto que las plataformas informáticas especializadas en el tema, se convierten en el principal aliado, debido a que reduce dificultades técnicas.

¹ Proyecto de Grado

**Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Director: M.Sc Luz Yolanda Vargas Fiallo

ABSTRACT

TITLE:² "REVIEW AND EVALUATION OF WATER QUALITY INDICES AND POLLUTION FOR CONCEPTUAL DESIGN OF MODULE WQI AMBIENSQ SUITE".

Authors: CINTHIA ALEXNDRA GUTIERREZ RUIZ**

Keywords: Water quality, quality index, pollution index, software, Colombia

Due to the few tools available to control agencies for effective monitoring of surface water sources, comes the need to find a methodology to engage the concentrations of each of the variables of interest, so it possible to perform quick and accurate analysis, these methodologies are known as quality index (ICAs) and contamination index (ICOs) widely used since the 70s in countries like the United States.

The ICAs and ICOs are developed to the point dynamics of a country or specific basin under study, therefore once an control entity has defined to use one of these as a tool for making-decision is critical carry out literature reviews the available internationally index, so it would include to realizes necessary adjustments and those one would be consistent with the dynamics of the site where they will be used.

The main difficulty of quality and pollution index lies in the centralization and organization of information, as well as the calculation itself, being that generally the formulas are complex, that is why specialized computing platforms in the topic, become the main ally, because it reduces technical difficulties.

² Barchelor Thesis

** **Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Director: M.Sc Luz Yolanda Vargas Fiallo

INTRODUCCIÓN

La dinámica industrial del país ha generado un deterioro vertiginoso de la calidad hídrica de las fuentes de agua superficial, hecho que genera que las diferentes corporaciones autónomas del país, deban enfocar sus esfuerzos a realizar seguimiento y control a estas mismas.

La autoridad ambiental cuenta con un único insumo para realizar dicho seguimiento y control, las mediciones de los diferentes parámetros de calidad que se realizan en la época de lluvias y época seca, de donde se obtienen datos puntuales de un parámetro u otro, los cuales al ser analizados de forma individual no permiten generar un concepto global acerca de si determinado punto sobre una fuente hídrica o un afluente se encuentra dentro de una categoría de calidad, buena, regular o mala, lo que genera que los esfuerzos económicos y humanos de las diferentes Corporaciones Autónomas Regionales del país e incluso de las grandes industrias se enfoquen según un concepto técnico subjetivo, de modo que todos los planes de mitigación y esfuerzos que se realicen no generen el impacto positivo que se espera.

El uso de índices de calidad y de contaminación facilita el análisis de calidad de las fuentes superficiales, estos toman como base las mediciones realizadas a algunos parámetros de interés y les asignan un peso de importancia y una ecuación para el cálculo de un subíndice asociado, el cual finalmente hará parte de una fórmula de agregación que dará como resultado un valor numérico asociado a un rango de clasificación de calidad. Los ICAs e ICOs son utilizados desde los años 70 en países desarrollados, sin embargo en Colombia hasta hace poco tiempo se empezaron a realizar ajustes a la dinámica nacional, para implementar el cálculo de estos como herramienta para la toma de decisiones, sin

embargo la gran dificultad que se presenta para la implementación de los mismos es el grado de complejidad que presentan algunos en el cálculo.

La idea de generar una herramienta informática que permita el cálculo de diferentes índices de calidad y de contaminación, es en primera instancia gestionar la información de calidad hídrica de forma óptima, de modo que los datos históricos puedan cruzarse y realizar análisis que generen conceptos técnicos sólidos, así mismo un instrumento de este tipo permite ahorrar tiempo y trabajo a los funcionarios encargados ya que la plataforma se encarga de realizar los cálculos independiente del grado de complejidad que posea, por tanto el tiempo que anteriormente se destinaba para este fin ahora podrá utilizarse en la realización y generación de reportes que permitan tomar decisiones en tiempos cortos y orientar los recursos humanos y económicos de forma acertada.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar la revisión conceptual de índices de calidad y de contaminación del agua a nivel nacional e internacional para el desarrollo del diseño conceptual que servirá como base para el de un módulo de gestión de información del recurso hídrico dentro de la herramienta informática AMBIENSQ SUITE

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la revisión de los índices de calidad del agua y de contaminación disponibles a nivel internacional.
- Realizar la revisión bibliográfica de los índices de calidad de contaminación usados actualmente por las diferentes corporaciones autónomas regionales para el seguimiento al recurso hídrico.
- Seleccionar los índices de calidad y de contaminación que serán incluidos dentro del módulo de gestión de la información de aguas superficiales de la herramienta informática AMBIENSQ SUITE.
- Elaborar el diseño conceptual del módulo de gestión de la información de aguas superficiales WQI de la herramienta informática AMBIENSQ SUITE.
- Evaluar la calidad de los resultados de los índices de calidad y de contaminación entregados por la plataforma informática.

2. JUSTIFICACIÓN

Debido a las pocas herramientas con que se cuenta para realizar seguimiento y control eficaz a las fuentes hídricas, nace la necesidad de encontrar alguna metodología que permita acoplar y ponderar cada una de las variables de interés, de modo que sea posible realizar análisis rápidos y acertados, estas metodologías son conocidas actualmente como índices de calidad (ICAs) y de contaminación (ICOs) muy usados desde los años 70 en países desarrollados.

Estos ICAs e ICOs son desarrollados para la dinámica puntual del país o cuenca específica objeto de estudio, a partir de una revisión inicial de las variables de interés que juegan un papel importante en el deterioro de la calidad hídrica, una posterior asignación del factor de importancia, así como la elaboración de la fórmula matemática que permite el cálculo del respectivo subíndice y finalmente la determinación de la fórmula de agregación mediante la cual se obtendrá el valor final del índice, el cual será relacionado con los rangos de clasificación.

Es de vital importancia realizar una revisión bibliográfica a fondo de los índices disponibles a nivel internacional de modo que se depuren estos y se seleccionen los que se encuentren acordes con los parámetros que se miden, así como las variables que son representativas de un tipo de contaminación u otra, es decir que sean coherentes con la dinámica nacional, de modo que se genere una herramienta útil, que a través del cálculo de estos permita conocer el estado actual e histórico de calidad de una fuente superficial.

3. MARCO TEÓRICO

El deterioro de las aguas naturales en Colombia está asociado con el vertimiento de aguas residuales domésticas, industriales, de producción agrícola y ganadera, y con acciones relacionadas con el transporte terrestre, fluvial y marítimo de sustancias peligrosas. Una de las formas de evaluar el deterioro de las fuentes superficiales es mediante el empleo de índices de calidad del agua (ICAs) e índices de contaminación (ICOs), su ventaja principal radica en que la información puede ser fácilmente interpretada, por tanto se convierten en una herramienta que permite la comunicación fácil a las personas interesadas, ya sean académicos, industriales o la comunidad en general, es decir un índice de calidad o de contaminación hídrica toma información compleja y la sintetiza facilitando su asimilación y comprensión.

Los diferentes índices de calidad y de contaminación que se tienen documentados a nivel internacional han sido diseñados para la dinámica puntual de la fuente que se desea analizar, todos siguen 3 pasos básicos para su diseño:

- *Selección de las variables:* En primera instancia para la selección de los parámetros pueden incluirse desde 2 hasta el número que considere pertinente el autor, estos son seleccionados tomando como base las variables que generan un impacto negativo en la fuente para la cual se está diseñando el índice, la disponibilidad de la información y el criterio técnico del autor.
- *Determinación del subíndice de cada parámetro:* la construcción de subíndices asociados a cada una de las variables seleccionadas tiene como fin convertir los valores de las mediciones que tienen un carácter dimensional en un número adimensional. Estos subíndices pueden determinarse a través de diferentes métodos como por ejemplo tablas de calibración, curvas basadas en

ecuaciones matemáticas o normatividad, funciones matemáticas, etc. Este es el paso más importante en el diseño y construcción de un índice de calidad

- *Determinación del índice por agregación de los subíndices:* una vez el autor ha logrado homogenizar la información obtenida de la medición de las variables que se incluirán en el índice, es necesario determinar la fórmula mediante la cual se van a integrar cada uno de los subíndices, adicionalmente en este paso el autor define los pesos de importancia de las variables, ya que no todas afectan de igual forma a una determinada fuente hídrica. Las fórmulas de agregación a utilizar son normalmente funciones de promedio, ya sea un promedio aritmético, geométrico o ponderado.

Todos los índices de calidad y de contaminación cuentan con unos rangos de clasificación que oscilan entre 0 y 100 o 0 y 1, siempre relacionado con una descripción cualitativa del grado de contaminación del agua.

Históricamente las diferentes organizaciones gubernamentales y no gubernamentales involucradas en el seguimiento al recurso hídrico a nivel internacional han utilizado índices fisicoquímicos, en los años 70 estos empezaron a tomar fuerza a partir del desarrollo del NSF WQI realizado por Brown *et al* en Estados Unidos. Este índice sirvió como base para el desarrollo de muchos más índices, aun en la actualidad es usado en diferentes lugares del mundo.

En Colombia de acuerdo con el estudio nacional del agua (IDEAM, 2000), la medición de parámetros fisicoquímicos es una actividad rutinaria, mas no sistemática, se cuenta con una gran falencia asociada a la discontinuidad en las mediciones y a la densidad de puntos en los cuales se recolecta información de este tipo, ya que no se tiene estandarizada esta actividad, hecho que dificulta la implementación del cálculo de índices de calidad y de contaminación.

A pesar de las recomendaciones explícitas en las diferentes leyes del Ministerio y de los desarrollos de formulaciones propias como las realizadas por Ramírez *et al*, en Colombia no son ampliamente aplicados los índices de calidad de agua ICAs e índices de contaminación ICOs como herramienta de toma de decisiones que permita orientar a los diferentes entes de control en temas como el uso del agua, tan solo en la industria del petróleo son aplicados desde hace algunos años, algunas Corporaciones Autónomas Regionales están incursionando en el tema, mediante la aplicación de formulaciones de origen norteamericano.

Es importante resaltar el trabajo realizado por parte de la Universidad del Valle y la Corporación Regional del Valle del Cauca (CVC), quienes desarrollaron un índice de calidad del agua propio para el Río Cauca llamado ICAUCA, este incluye diez variables dentro de su formulación. En la actualidad es el único índice que se ha desarrollado en Colombia para uso exclusivo de una fuente en particular, es decir es el único índice desarrollado para un caso puntual que se necesitaba atender.

A nivel internacional se encuentran documentados infinidad de índices que incluyen gran variedad de parámetros físico-químicos y biológicos, a continuación se listan algunos de estos, así como los índices con que se cuentan a nivel nacional actualmente:

1.3. *Índices internacionales*

✓ *Índice de la Fundación Nacional de Saneamiento NSF – WQI:*

El índice de calidad de agua “Water Quality Index” WQI, fue desarrollado en 1970 por la National Sanitation Foundation (NSF) de Estados Unidos (Brown *et*

al.), por medio del uso de la técnica de investigación Delphi de la “Rand Corporations” (Ball y Church 1980), este índice es ampliamente utilizado y respetado en este mismo país.

El índice se construyó a partir de la reunión de un grupo de 142 expertos a quienes se les asignó la tarea de determinar que parámetros, dentro de un grupo de 35, eran los que a su juicio generaban un mayor impacto en la calidad del agua, se determinó que las variables que conformarían el índice serían: DBO, Oxígeno disuelto, variación de temperatura, Coliformes Fecales, pH, Nitratos, Turbidez, fosfatos y sólidos disueltos totales.

Para el cálculo del índice es necesario en primera instancia determinar el valor del subíndice de cada parámetro que lo compone, este subíndice se calcula por medio de curvas, en la Gráfica 1, Gráfica 2, Gráfica 3, Gráfica 4 y Gráfica 5³ se presentan las curvas de función a partir de las cuales se obtienen los subíndices de los parámetros que contempla el NSF – WQI.

En la Tabla 1 se listan los factores de ponderación a tener en cuenta para el cálculo del índice NSF– WQI

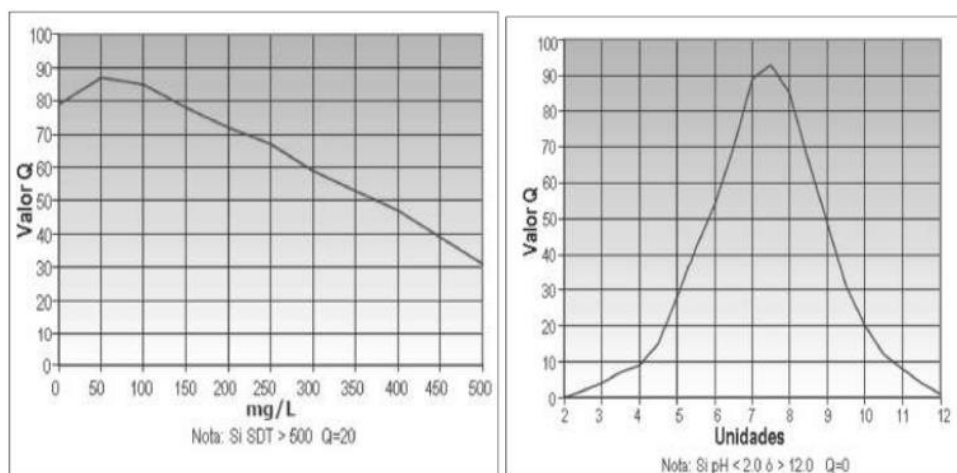
Tabla 1. Factores de ponderación de las variables del NSF -WQI

Parámetro	Unidades	Factor de ponderación
Oxígeno disuelto	% saturación	0.17
Coliformes fecales	NMP/100 ml	0.16
pH	Unidades	0.11
DBO	mg/l	0.11

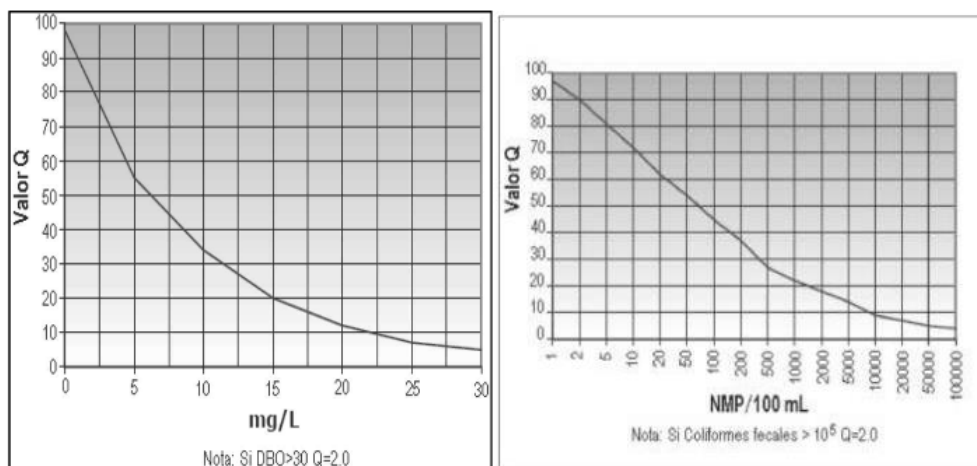
³ Universidad de Pamplona. Capítulo III, índices de calidad (ICAs) y de contaminación (ICOs) del agua de importancia mundial.

Parámetro	Unidades	Factor de ponderación
Cambio de T°	°C	0.10
Fosfatos totales	mg PO ₄ -P	0.10
Nitratos	mg NO ₃	0.10
Turbidez	NTU	0.08
Sólidos totales	mg/l	0.07

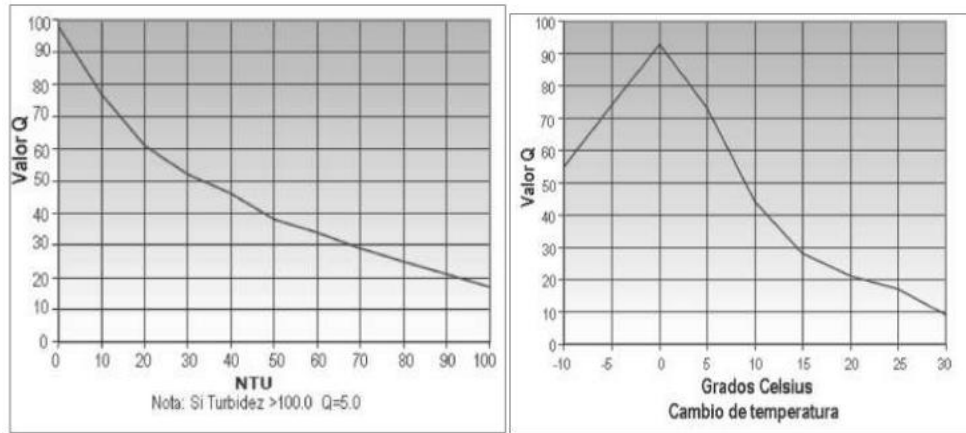
Gráfica 1. Curvas de función para sólidos totales y pH.



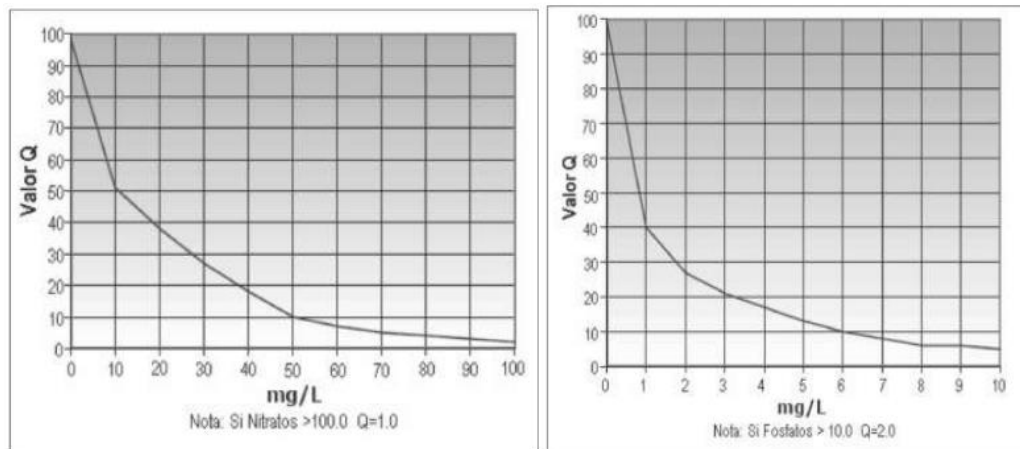
Gráfica 2 Curvas de función para DBO y Coliformes fecales.



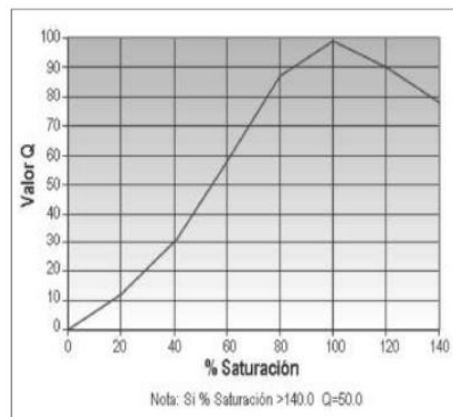
Gráfica 3 Curvas de función para Turbiedad y variación en la temperatura.



Gráfica 4 Curvas de función para nitratos y fosfatos.



Gráfica 5 Curvas de función para % de saturación de oxígeno disuelto.



Para determinar el índice NSF existen dos técnicas básicas, las denominadas aditivas y las multiplicativas, donde la única diferencia radica en la fórmula de agregación mediante la cual se obtendrá el valor final de éste

ICA Aditivo: El índice está compuesto por la sumatoria del producto de un subíndice de parámetro por el factor de ponderación asignado a cada uno de estos, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$WQI = \sum_{i=1}^n SI_i W_i$$

Donde:

WQI: Índice de calidad de agua

SI_i: Subíndice del parámetro *i*

W_i: Factor de ponderación para el subíndice *i*

ICA Multiplicativo: se calcula multiplicando los subíndices de cada parámetro de calidad, afectados previamente por un exponente (el peso asignado a cada parámetro) según la expresión que se muestra a continuación:

$$ICA_m = \prod_{i=1}^n I_i^{w_i}$$

$$ICA_m = (I_1^{w_1})(I_2^{w_2})(I_3^{w_3}) \dots (I_n^{w_n})$$

De acuerdo con lo que expresan los diferentes autores y las pruebas realizadas con datos de mediciones reales de calidad hídrica, se encontró que

el ICA multiplicativo es la forma más apropiada para el cálculo, ya que independiente de si los valores son cercanos a los límites establecidos en cada una de las curvas, el resultado es una aproximación certera de la calidad en la que se encuentra una fuente superficial, caso contrario a lo que sucede con el índice aditivo, el cual al ser calculado con valores cercanos a los extremos, presenta grandes variaciones.

Posterior al cálculo de los subíndices se procede a aplicar la fórmula anteriormente mostrada, el resultado será un número de 0 a 100 a partir del cual se determinará la calidad de la fuente analizada con ayuda de los rangos de evaluación que establece el índice para este fin.

En la Tabla 2 se presentan los rangos de calidad de la fuente superficial evaluada que estipula el índice.

Tabla 2. Rangos de calidad para el índice NSF- WQI

Rango	Calidad
0 – 25	Muy mala
26 – 50	Mala
51 – 70	Regular
71 – 90	Buena
91 – 100	Excelente

El Índice NSF está enfocado principalmente para la evaluación de fuentes superficiales destinadas a consumo humano, es el índice más usado a nivel mundial para el análisis de una determinada fuente para el uso mencionado anteriormente.

✓ *Índice de calidad del agua de Dinius (1972)*

El índice de calidad de Dinius está compuesto por 9 parámetros fisicoquímicos y 2 microbiológicos. Al igual que el índice de NSF asigna a cada parámetro un factor de ponderación W_i en una escala de 0.5 a 5, tal como se muestra en la Tabla 3

Tabla 3. W_i para cada parámetro incluido en el índice de Dinius.

Variable	Valor de W_i
Oxígeno disuelto %	5.0
Coliformes totales	3.0
Coliformes fecales	4.0
Ph	1.0
DBO	2.0
Temperatura	2.0
Conductividad Eléctrica	1.0
Color	1.0
Dureza	1.0
Cloruros	0.5
Alcalinidad total	0.5

Así mismos establece un subíndice para cada uno de los once parámetros que interfieren en el cálculo de este, las ecuaciones se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Ecuaciones de cálculo de los subíndices de cada parámetro.

Parámetros	Subíndices
Oxígeno disuelto (%)	$I_1 = x$
DBO ₅ (mg/l)	$I_2 = 107x^{-0.642}$
Coliformes totales (NMP/100 ml)	$I_3 = 100 (x)^{-0.3}$
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	$I_4 = 100 (5x)^{-0.3}$
Conductividad (µmho/cm)	$I_5 = 535x^{-0.3565}$
Cloruros (mg/l)	$I_6 = 125.8x^{-0.207}$
Dureza (CaCO ₃ , ppm)	$I_7 = 10^{1.974-0.00132x}$
Alcalinidad (CaCO ₃ , ppm)	$I_8 = 108x^{-0.178}$
pH	$I_9 = 10^{0.2335+0.44pH}, x < 6.7$
	$I_{10} = 100, 6.7 \leq x \leq 7.58$
	$I_{11} = 10^{4.22-0.293x}, x > 7.58$
Temperatura (°C)	$I_{12} = -4(x_a - x_a) + 112$
	$x_a: Temp actual$
	$x_a: Temp std$
Color (Unidades de color)	$I_{13} = 128x^{-0.288}$

Al igual que el NSF WQI, el índice de Dinius utiliza como fórmula de agregación una ecuación aditiva:

$$I = \frac{1}{21} \sum_{i=1}^{11} W_i * I_i$$

Dinius estableció unos rangos de calidad que van de 0 – 100, siendo cero “calidad muy mala” y cien “calidad excelente”, el resultado obtenido de aplicar la anterior fórmula debe compararse contra dichos rangos, los cuales se encuentran consignados en la Tabla 5.

Tabla 5. Rangos de calidad para índice de DINIUS

Calidad	Rango
Excelente	91-100
Buena	81-90
Regular	51-80
Mala	41-50
Muy Mala	0-40

Este índice está orientada al uso del agua para consumo humano, agricultura, pesca, industria y recreación

✓ *Segundo índice de DINIUS*

Este índice fue desarrollado por Dinius en 1987, contempla un parámetro adicional a los once mencionados en el ítem anterior (Nitratos), establece los factores de ponderación W_i en una escala de cero a uno, así mismo el cálculo de los subíndices se realiza mediante nuevas ecuaciones y los resultados se encuentran en un rango de cero a cien, en la Tabla 6 se presentan los W_i y las funciones para los cálculos de los subíndices que intervienen.

Tabla 6. Subíndices y W_i necesarios para el cálculo del segundo índice de DINIUS.

Parámetro	Unidades	W_i	Función
Oxígeno disuelto	% de saturación	0.109	$I_{OD} = 0.82 * OD + 10.56$
DBO ₅	mg/l a 20°C	0.097	$I_{DBO_5} = 108 * (DBO_5)^{-0.3494}$
Coliformes totales	NMP/100 ml	0.090	$I_{Coli} = 136 (Coli)^{-0.1311}$
Coliformes fecales	NMP/100 ml	0.116	$I_{E-Coli} = 106 (E - Coli)^{-0.1286}$

Parámetro	Unidades	W _i	Función
Alcalinidad	Ppm CaCO ₃	0.063	$I_{ALK} = 110 (ALK)^{-0.1342}$
Dureza	Ppm CaCO ₃	0.065	$I_{Dureza} = 552 (Dureza)^{-0.4488}$
Cloruros	mg/l, agua fresca	0.074	$I_{Cloruros} = 391 (Cloruros)^{-0.3480}$
Conductividad	(µmho/cm) a 25 °C	0.079	$I_{Cond} = 506 (Cond)^{-0.3315}$
pH	-----	0.077	$pH < 6.9, I_{pH} = 10^{0.6803+0.1856*(pH)}$ $pH (6.9 - 7.1), I_{pH} = 1$ $pH > 7.1, I_{pH} = 10^{3.65-0.2216*(pH)}$
Nitratos	mg NO ₃ /l	0.090	$I_N = 125 (N)^{-0.2718}$
Temperatura	°C	0.077	$I_T = 10^{2.004-0.0382 (t_a-t_s)}$
Color	Unidades de Pt std	0.063	$I_{Color} = 127 (C)^{-0.2394}$

La ecuación para el cálculo del Índice es una función multiplicativa de agregación, la cual se usa para combinar los doce subíndices calculados, la cual de forma general es:

$$IWQ = \prod_{i=1}^n I_i^{w_i}$$

Este índice establece 6 rangos de clasificación de la calidad de agua, teniendo en cuenta las características que debe presentar el recurso hídrico de acuerdo con el uso a que se destine, los cuales son: excelente (E), aceptable (A),

levemente contaminada (LC), contaminada (C), fuertemente contaminada (FC) y extremadamente contaminada (EC), en la Tabla 7 y la Tabla 8 se presenta dichos rangos para cada uso que contempla el índice de Dinius.

Tabla 7. Rangos de evaluación del Índice para consumo humano, agricultura y pesca.

Identificación	Consumo Humano		Agricultura		Pesca y acuática	
	Calidad	Rango	Calidad	Rango	Calidad	Rango
EC	Inaceptable su consumo humano	0-40	Inaceptable para riego	0-20	Inaceptable para vida acuática	0-30
FC	Dudoso para consumo humano	41-50	Uso solo en cultivos muy resistentes	21-30	Inaceptable para actividad pesquera	31-40
C	Tratamiento de potabilización necesario	51-70-	Tratamiento requerido para la mayoría de cultivos	31-50	Vida acuática limitada a especies muy resistentes	41-50
LC	Dudoso consumo sin tratamiento	71-80	No requiere tratamiento para la mayoría de cultivos	51-70	Dudosa la pesca sin riesgos a la salud	51-60
A	Tratamiento menor	81-90	Purificación menor para	71-90	Límite para peces muy	61-70

Identificación	Consumo Humano		Agricultura		Pesca y acuática	
	Calidad	Rango	Calidad	Rango	Calidad	Rango
	requerido		cultivos que requieran alta calidad de agua		sensitivos	
E	No requiere tratamiento para consumo	91-100	No requiere purificación para riego	91-100	Pesca y vida acuática abundante	71-100

Tabla 8 Rangos de evaluación del Índice para industria y recreación.

Identificación	Industria		Recreación	
	Calidad	Rango	Calidad	Rango
EC	Inaceptable para cualquier industria.	0-20	Inaceptable para recreación.	0-20
FC	Uso restringido en actividades burdas	21-30	Contaminación visible, evitar cercanía	21-30
C	Tratamiento para mayoría de usos	31-50	Evitar contacto, solo con lanchas	31-40
LC	No requiere tratamiento para mayoría de industria de operación	51-70	Dudosa para contacto con el agua	41-50
A	Purificación menor para industrias que requieran alta calidad	71-90	Restringir los deportes de inmersión,	51-70

Identificación	Industria		Recreación	
	Calidad	Rango	Calidad	Rango
	de agua		precaución si se ingiere dada la posibilidad de presencia de bacterias.	
E	No requiere purificación	91-100	Cualquier tipo de deporte acuático	71-100

La diferencia fundamental entre el primer y segundo índice de Dinius, radica en que el último no contempla un único rango de clasificación para todos los usos, este genera una tabla individual para cada uno donde los valores de cada rango varían de acuerdo al análisis realizado a los posibles resultados teniendo en cuenta los diferentes valores que pueden tomar las variables de interés en un escenario u otro.

- ✓ *Índice de calidad del agua del Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente (CCME WQI)*⁴

El índice de Canadá se basa en el logro de objetivos, es decir en el cumplimiento de legislación o límites seguros establecidos por la autoridad

⁴ Canadian Council of Ministers of the Environment. 2001. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME Water Quality Index 1.0, technical report. In: Canadian environmental quality guidelines, 1999, Canadian council of ministers of the environment, Winnipeg.

ambiental competente. Lo conforman 3 factores: amplitud, alcance y frecuencia (cada uno con escala de cero a cien).

Factor 1, Alcance:

Este representa el número de objetivos que no se alcanzaron, es decir el número de parámetros que no cumplieron el máximo permisible establecido por la legislación, evalúa la conformidad con los objetivos en un periodo de tiempo indicando el porcentaje de parámetros que no alcanzaron el objetivo.

$$F_1 = \frac{\text{Numero de variables que fallaron}}{\text{Numero total de variables}} * 100$$

Factor 2, Frecuencia:

Representa el número de pruebas individuales que no alcanzaron los objetivos, evalúa la frecuencia con la cual los objetivos no se alcanzaron e indica el porcentaje de pruebas individuales que no alcanzaron su objetivo.

$$F_2 = \frac{\text{Numero de pruebas deficientes}}{\text{Numero total de pruebas}} * 100$$

Factor 3, Amplitud:

Representa la cantidad por la cual las pruebas no alcanzaron los objetivos y se calcula en tres pasos:

- El número de veces que una concentración de un parámetro excede un objetivo se denomina “excursión”.

Cuando un parámetro no debe exceder una concentración:

$$Excursión = \left(\frac{Valor\ Inaceptable}{Objetivo} \right) - 1$$

Cuando un parámetro no debe ser menor a una determinada concentración

$$Excursión = \left(\frac{Objetivo}{Valor\ Inaceptable} \right) - 1$$

- Cálculo de la cantidad colectiva de pruebas individuales que se encuentran fuera de conformidad, este aspecto se denomina “suma normalizada de excursiones” o NSE

$$NSE = \frac{\sum_{i=1}^n Excursiones}{Numero\ de\ pruebas}$$

- F3 se escala para generar un valor entre cero y cien:

$$F_3 = \left(\frac{NSE}{0.01 * NSE + 0.01} \right)$$

A continuación se presenta la ecuación general para el cálculo del índice, teniendo en cuenta los 3 subíndices presentados anteriormente.

$$WQI = 100 - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732}$$

Donde F1, F2 y F3 son los factores de alcance, frecuencia y cantidad de veces por la cual los objetivos no se alcanzaron.

Posterior a la realización del cálculo del índice se procede a comparar el número obtenido en el resultado como la Tabla 9, donde se presentan los rangos y las respectivas calificaciones y de este modo entregar un concepto técnico acerca de la calidad de la fuente superficial evaluada, basado en el cumplimiento de la legislación nacional vigente.

Tabla 9. Rangos y calificación establecida por el CCME WQI

Rango	Calificación	Descripción
95-100	Excelente	Ausencia virtual de deterioro , condiciones muy cercanas a las prístinas

Rango	Calificación	Descripción
Buena	80-94	Grado menor de deterioro, las condiciones rara vez se alejan de los niveles deseables
Aceptable	65-79	Deterioro ocasional, algunas veces las condiciones se alejan de los niveles deseables
Marginal	45-64	Deterioro frecuente, las condiciones se alejan con frecuencia de los niveles deseables.
Pobre	0-44	La calidad del agua casi siempre presenta deterioro, las condiciones se alejan generalmente de los niveles deseables.

Como ventajas el CCME WQI se tiene que es fácilmente adaptable a diferentes requisitos legales y a diferentes usos del agua, ya que el usuario final decide cuales son las variables de interés y los puntos o periodos de tiempo a tener en cuenta, según si desea realizarse un análisis espacial o temporal.

✓ *Índice simplificado de calidad del agua (ISQA)*

Fue desarrollado en el año 1982 para las cuencas de Cataluña en España, por Queralt. Toma en cuenta la clasificación del agua para diferentes usos. En la Tabla 10 se listan los parámetros que incluye el Índice ISQA

Tabla 10. Parámetros del ISQA

Parámetro	Unidades
Temperatura (T)	°C
DQO	mg/l
Material suspendido o sólidos suspendidos (SS)	mg/l
Oxígeno disuelto (OD)	mg/l
Conductividad eléctrica (Cond): medida a 18°C	µS/cm

Queralt propuso la siguiente ecuación para el cálculo del valor del índice:

$$ISQA = T(DQO + SS + OD + Cond)$$

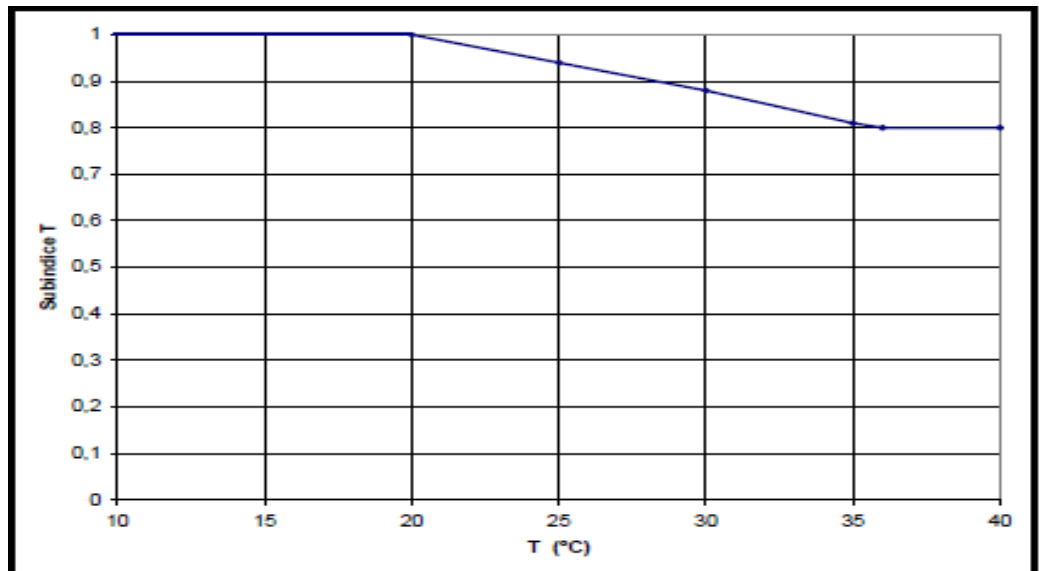
Al igual que en el índice NSF los cinco subíndices son calculados a través de gráficas, en donde en el eje de las abscisas se ubican varios niveles de la variable en particular y en el eje de las ordenadas los niveles de calidad del agua o valor del subíndice. En la Gráfica 6, Gráfica 7, Gráfica 8, Gráfica 9 y Gráfica 10 se presentan las curvas de cada parámetro.

Para realizar la clasificación de la calidad del agua de acuerdo al número obtenido del ISQA, el autor propuso 5 rangos de calidad teniendo en cuenta las características que debe tener el recurso hídrico de acuerdo al uso para el que sea destinado, dichos rangos se presentan en la Tabla 11.

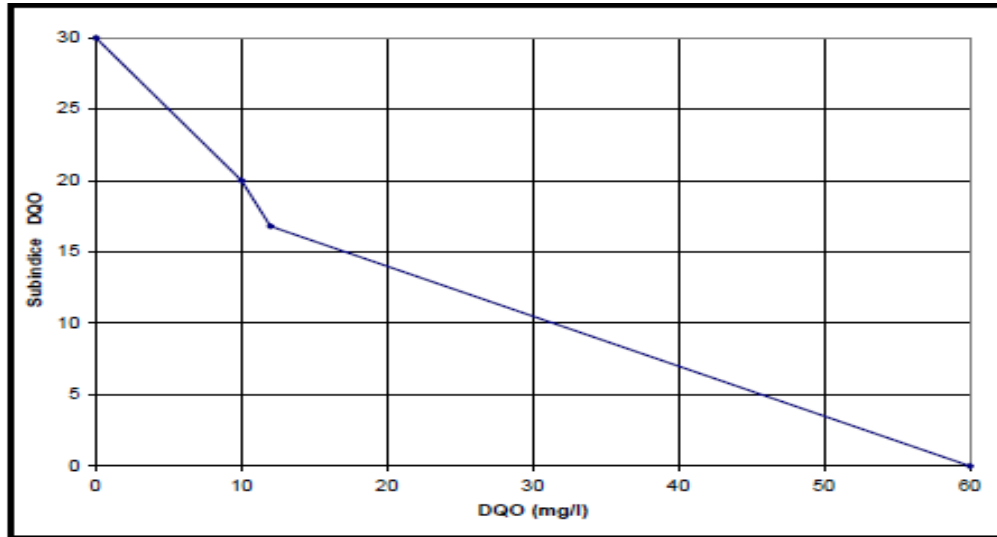
Tabla 11. Escala de calificación de calidad del agua del ISQA

<i>Índice de calidad</i>	<i>Clasificación de calidad</i>
85-100	Todos los usos
60-85	Abastecimiento para consumo humano, recreación por contacto directo, piscicultura
45-60	Riego, Industria, Abastecimiento para consumo humano con tratamiento especial.
30-45	Recreación por contacto indirecto (Navegación) y refrigeración industrial.
0-30	No puede Usarse

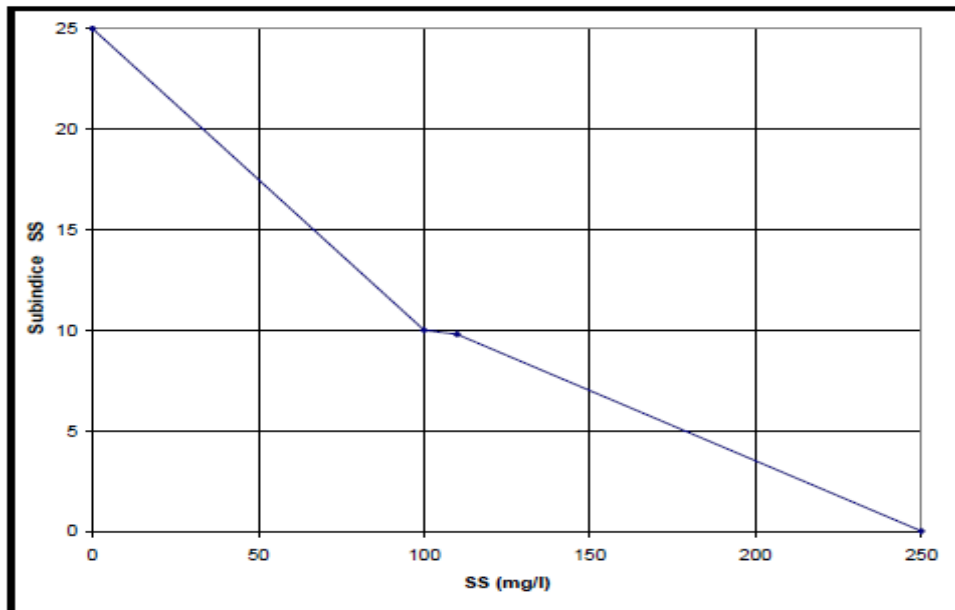
Gráfica 6 Curva para el cálculo del subíndice de temperatura



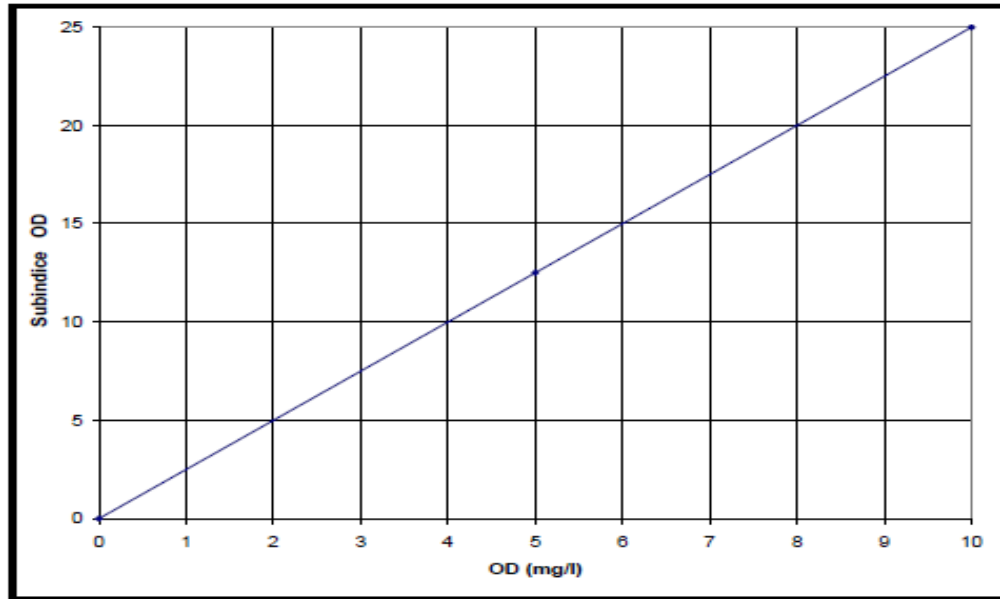
Gráfica 7 Curva para el cálculo del subíndice de DQO



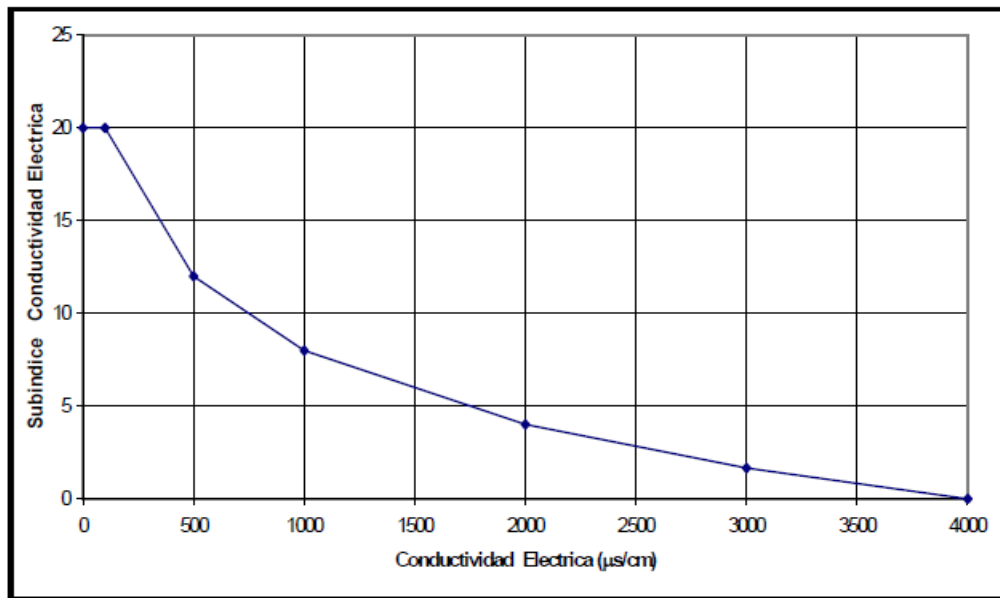
Gráfica 8 Curva para el cálculo del subíndice de solidos suspendidos.



Gráfica 9 Curva para el cálculo del subíndice de Oxígeno Disuelto



Gráfica 10 Curva para el cálculo del subíndice de Conductividad.



✓ *UWQI*

El índice de la unión europea UWQI contempla parámetros tales como Oxígeno disuelto, pH, DBO, nitratos, fósforo total, cadmio, mercurio, arsénico, fluoruro, Coliformes totales, cianuro y selenio. Los factores de ponderación para cada uno de las variables anteriormente mencionadas se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Factores de ponderación para los parámetros del UWQI

Parámetro	Factor de ponderación
Oxígeno Disuelto	0.114
pH	0.029
DBO	0.057
Nitratos	0.086
Fosforo total	0.057
Cadmio	0.086
Mercurio	0.086
Arsénico	0.113
Fluoruro	0.086
Coliformes totales	0.114
Cianuro	0.086
Selenio	0.086

En la Tabla 13 se encuentran las funciones para el cálculo de los 12 subíndices del UWQI, así como las respectivas restricciones para el uso de las mismas.

Tabla 13. Funciones para el cálculo de Subíndices del IWQI

Variable	Rango	Subíndice
DBO	$X < 3$	$Y = 100$
	$3 \leq x < 5$	$Y = -25x + 175$
	$5 \leq x < 7$	$Y = -22.5x + 162.5$
	$x \geq 7$	$Y = 0$
Nitratos	$x \leq 5$	$Y = 100$
	$5 < x \leq 10$	$Y = -10x + 150$
	$10 < x \leq 20$	$Y = -4.5x + 95$
	$x > 20$	$Y = 0$
Arsénico	$x \leq 0.02$	$Y = 100$
	$0.02 < x \leq 0.05$	$Y = -1666.7x + 133.33$
	$0.05 < x \leq 0.1$	$Y = -900x + 95$
	$x > 0.1$	$Y = 0$
Oxígeno disuelto	$x \geq 8$	$Y = 100$
	$8 < x \leq 6$	$Y = 25x - 100$
	$6 < x \leq 3$	$Y = 15x - 40$
	$x > 3$	$Y = 0$
Fluoruros	$x \leq 1$	$Y = 100$
	$1 < x \leq 2$	$Y = -95x + 194.17$
	$x > 2$	$Y = 0$
Fósforo total	$x \leq 0.02$	$Y = 100$
	$0.02 < x \leq 0.16$	$Y = -375.14x + 107.14$
	$0.16 < x \leq 0.65$	$Y = -91.837x + 64.694$
	$x > 0.65$	$Y = 0$
Mercurio	$x \leq 0.0001$	$Y = 100$
	$0.0001 < x \leq 0.0005$	$Y = -125000x + 112.5$
	$0.0005 < x \leq 0.002$	$Y = -30000x + 65$

Variable	Rango	Subíndice
	$X > 0.002$	$Y = 0$
Selenio	$X \leq 0.01$	$Y = 100$
	$0.01 < X \leq 0.02$	$Y = 4500x + 95$
	$X > 0.02$	$Y = 0$
Cianuro	$X \leq 0.01$	$Y = 100$
	$0.01 < X \leq 0.05$	$Y = -1250x + 112.5$
	$0.05 < X \leq 0.1$	$Y = -900x + 95$
	$X > 0.1$	$Y = 0$
Cadmio	$X \leq 0.003$	$Y = 100$
	$0.003 < X \leq 0.005$	$Y = -25000x + 175$
	$0.005 < X \leq 0.010$	$Y = -9000x + 95$
	$x > 0.010$	$Y = 0$
Coliformes totales	$x \leq 50$	$Y = 100$
	$50 < x \leq 5000$	$Y = -10.857 \ln x + 142.47$
	$5000 < x \leq 50000$	$Y = -21.715 \ln x + 284.95$
	$X < 50000$	$Y = 0$
pH	$6.5 \leq x \leq 8.5$	$Y = 100$
	$5.5 \leq x \leq 6.4$	$Y = 50$
	$8.6 \leq x \leq 9$	
	$x < 5.5$	$Y = 0$
	$x > 9$	

La ecuación por medio de la cual se calcula el índice corresponde a un promedio aritmético ponderado, así:

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

Los rangos de calificación establecidos por el índice UWQI se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Rangos de calificación del UWQI

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

1.4. ÍNDICES NACIONALES

✓ *Índices de contaminación ICOS⁵:*

- *Índice de contaminación por minerales, ICOMI:*

Se expresa en términos de conductividad, dureza y alcalinidad, ya que estas son el reflejo de ausencia o presencia según sea el caso de sólidos disueltos, cationes de calcio y magnesio y aniones carbonatos y bicarbonatos respectivamente.

⁵ Ramírez, A. Restrepo, R. Viña, G. Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales [online]. Ecopetrol, Instituto Colombiano del Petróleo. Vol 1 Num. 3 (Diciembre 1997). P 135 – 153.

$$ICOMI = \frac{1}{3} (I \text{ conductividad} + I \text{ dureza} + I \text{ alcalinidad})$$

$$\text{Log}_{10} I \text{ conductividad} = -3.26 + 1.34 \text{ Log}_{10} * \text{Conductividad} \frac{\mu S}{cm}$$

Conductividades mayores a $270 \frac{\mu S}{cm}$, tiene un índice de conductividad = 1

$$\text{Log}_{10} I \text{ dureza} = -9.09 + 4.40 \text{ Log}_{10} * \text{Dureza} \frac{mg}{l}$$

Durezas mayores a $110 \frac{mg}{l}$ tiene I Dureza= 1

Durezas menores de $30 \frac{mg}{l}$ tiene I Dureza= 0

$$I \text{ Alcalinidad} = -0.25 + 0.005 * \text{Alcalinidad} \frac{mg}{l}$$

Alcalinidades mayores a $250 \frac{mg}{l}$ tiene I Alca = 1

Alcalinidades menores a $50 \frac{mg}{l}$ tiene I Alca = 0

- *Índice de contaminación por materia orgánica, ICOMO:*

Se expresa en términos de DBO, coliformes y porcentaje de saturación de oxígeno, ya que en conjunto recogen efectos distintos de la contaminación orgánica de una fuente.

$$ICOMO = \frac{1}{3} (I \text{ DBO} + I \text{ coliformes totales} + I \% \text{ Oxígeno})$$

$$I\ DBO = -0.05 + 0.70 \text{Log}_{10} * DBO \frac{mg}{l}$$

DBO mayores a $30 \frac{mg}{l}$ tiene I DBO = 1

DBO menores a $2 \frac{mg}{l}$ tiene I DBO = 0

$$I\ Col.TOT = -1.44 + 0.56 \text{Log}_{10} * Col\ TOT \frac{NMP}{100\ cm^3}$$

Coliformes totales mayores a $20000 \frac{NMP}{100\ cm^3}$ tienen I Col.TOT= 1

Coliformes totales menores a $500 \frac{NMP}{100\ cm^3}$ tienen I Col.TOT= 0

$$I\%Oxígeno = 1 - 0.01 * \% \text{ de Oxígeno}$$

% de oxígeno mayores a 100% tienen I % oxígeno = 0

- *Índice de contaminación por pH, ICOpH*

La ecuación representa una campana invertida en la cual a valores superiores o inferiores de la neutralidad se incrementa el nivel de contaminación, mientras que valores comprendidos entre pH 6 y 8 representan una condición perfectamente natural de las aguas.

$$ICO\ pH = \frac{e^{-31.08+3.45*pH}}{1 + e^{-31.08+3.45*pH}}$$

Si pH es menor a 7 entonces $pH' = 14 - pH$ y se reemplaza pH' en la fórmula anterior

- *Índice de contaminación por sólidos suspendidos, ICOSUS*

Se representa únicamente en función de sólidos suspendidos, ya que estos son claro índice de contaminación por compuestos inorgánicos.

$$ICOSUS = -0.02 + 0.003 * ISólidos\ suspendidos \frac{mg}{l}$$

Sólidos suspendidos mayores a $340 \frac{mg}{l}$ tienen $ICOSUS = 1$

Sólidos suspendidos menores a $10 \frac{mg}{l}$ tienen $ICOSUS = 0$

- *Índice de contaminación trófico, ICOTRO*

Se calcula sobre la base de la concentración de fosforo total:

$$Oligotrófico < 0.01 \left(\frac{mg}{l}\right)$$

$$Mesotrófico 0.01 - 0.02 \left(\frac{mg}{l}\right)$$

$$Eutrófico 0.02 - 1 \left(\frac{mg}{l}\right)$$

$$Hipereutrófico > 1 \left(\frac{mg}{l}\right)$$

- *Índice de contaminación por Temperatura, ICOTEMP*

Está enfocado en la valoración de vertimientos y no de aguas naturales como los ICOs anteriores, este ICO se formuló sobre la base de la diferencia entre el vertimiento y el cuerpo receptor.

$$ICOTEMP = -0.49 + 1.27 * \log(Temp\ vert - Temp\ cuerpo\ receptor)$$

Si la diferencia de temperatura es menor a 2.5°C (275.5K), ICOTEMP =0

Si la diferencia de temperatura es mayor a 15°C (288.5K), ICOTEMP =1

En la Tabla 15 se presenta los rangos contra los cuales deben compararse los resultados arrojados por cada índice ICO con el fin de conocer el grado de contaminación de la fuente superficial analizada:

Tabla 15. Significancia de los índices de contaminación ICOs

ICO	Contaminación	Escala de color
0 – 0.2	Ninguna	Azul
>0.2 -0.4	Baja	Verde
>0.4 – 0.6	Media	Amarillo
>0.6 -0.8	Alta	Naranja
>0.8 – 1	Muy alta	Rojo

✓ *Índices de contaminación ICOs para el sector petrolero*⁶

Los autores de los ICOs anteriormente presentados desarrollaron 5 índices más, específicamente para la industria petrolera, con el fin de evaluar la contaminación producida por esta actividad industrial

- *Índice de contaminación por hidrocarburos aromáticos en peces y sedimentos – ICoARO*

$$ICOARO = -0.07 + 0.13 * Aromáticos$$

Si aromáticos > 8 µg/g, ICoARO = 1

- *Índice de contaminación por Hidrocarburos alifáticos en peces y sedimentos – ICOALRE*

$$ICOALRE = 0.06 (Alifáticos resueltos)^{0.60}$$

Alifáticos resueltos > 100 µg/g, ICOALRE = 1

- *Índice de contaminación por Hidrocarburos alifáticos no resueltos en peces, ICOALNORE-P*

$$ICOALNORE - P = 0.80 (Alifáticos no resueltos)^{0.62}$$

⁶ Ramírez, A. Restrepo, R. Cardeñosa, M. Índices de contaminación para caracterización de aguas continentales y vertimientos [online]. Ecopetrol, Instituto Colombiano del Petróleo. Vol 1 Num. 5 (Diciembre 1999). P 89 – 99.

Si alifáticos no resueltos en peces > 60 µg/g, ICOALNORE = 1

- *Índice de contaminación por hidrocarburos alifáticos no resueltos en sedimentos, ICOALNORE – S*

$$ICOALNORE - S = 0.07 (\text{Alifáticos no resueltos})^{0.61}$$

Si alifáticos no resueltos en sedimentos >80 µg/g, ICOALNORE-S =1

- *Índice de contaminación por Hidrocarburos alifáticos totales en peces y sedimentos ICOLALTO*

$$ICOLALTO = 0.05 (\text{Alifáticos totales})^{0.58}$$

Si alifáticos totales > 175 µg/g, ICOLALTO = 1

Los rangos para la evaluación de los 5 índices presentados anteriormente se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Rango de evaluación de Índices de contaminación para la industria petrolera.

ICO	Contaminación	Caracterización	Escala de color
0-0.2	Ninguna	Aguas puras, quizás con aporte Biogénicos	

ICO	Contaminación	Caracterización	Escala de color
>0.2 – 0.4	Baja	Con leve incidencia antrópica	
>0.4 -0.6	Media	Notable actividad antrópica	
>0.6 – 0.8	Alta	Incidencia importante de la industria del petróleo	
>0.8 – 1	Muy alta	Áreas muy contaminadas por hidrocarburos petrogénicos	

✓ *Índice de calidad del agua adaptado al río Cauca (Rojas 1991)⁷*

En 1991 Rojas *et al.* propuso una modificación del índice NSF en su forma multiplicativa, de modo que pudiese aplicarse al río Cauca, se excluyeron parámetros como nitratos, fosfatos (debido a sus valores despreciables, ya que se encuentran en muy bajas concentraciones en el río) y variación de temperatura, teniendo en cuenta que al río Cauca no se realiza ningún vertimiento que pudiesen afectar significativamente la temperatura del agua. En la Tabla 17 se presentan los parámetros que el autor definió eran pertinentes de acuerdo a la dinámica del Río Cauca incluir en el cálculo del índice

Tabla 17. Parámetros incluidos en el ICAUCA

Parámetro
Oxígeno Disuelto
Coliformes fecales

⁷ Patiño, P. Holguin, J. *Et al.* Metodología para la adaptación de un índice de calidad del agua a las condiciones medio ambientales del Río Cauca en el tramo Salvajina – La Virginia. [online]. Seminario internacional: visión integral en el mejoramiento de la calidad del agua

Parámetro
pH
DBO ₅
Turbiedad
Sólidos totales
Sólidos suspendidos
Color
Fósforo total
Nitrógeno total

Los subíndices del ICAUCA son calculados de la siguiente manera:

- ✓ Los parámetros de Oxígeno disuelto, DBO₅, Turbiedad, Coliformes fecales, Sólidos totales y pH, se usan las curvas establecidas por el índice NSF
- ✓ Para el parámetro de color se utiliza la función establecida para el índice de DINIUS
- ✓ Para el Subíndice de sólidos suspendidos se utiliza la función del ICOSUS.
- ✓ Para nitrógeno y fósforo total se utilizan las funciones del ICA de CETESB

En la tabla que se presenta a continuación se resumen las ecuaciones necesarias para el cálculo de los subíndices, incluidos los de NSF.

Tabla 18. Funciones para el cálculo de los Subíndices del ICAUCA

Parámetro	Unidad	Función del Subíndice (I)
DBO ₅	mg/l	$I_{DBO_5} = e^{(4.5824 - 0.1078DBO_5 + 2.4581 \cdot 10^{-4} e^{DBO_5})}$ <p style="text-align: center;">Si DBO₅ > 30mg/l, I_{DBO5}=2</p>

Parámetro	Unidad	Función del Subíndice (I)
OD % Saturación	% Sat	$I_{\%Sat} = e^{(1.3663+0.063\%sat-0.000303\%sat^2)}$ <p>Si % Sat > 140, $I_{\%sat}=50$</p>
Turbiedad	Unidades (UNT)	$I_{Turb} = e^{(4.561-0.0196Turb+2.4167*10^{-5}Turb^2)}$ <p>Si turbiedad > 100 UNT, $I_{Turb}=5$</p>
Sólidos totales (ST)	mg/l	$I_{ST} = \frac{1}{0.0123 - 1.3545 * 10^{-5}ST + 9.265 * 10^{-8}ST^2}$ <p>Si ST>500 mg/l, $I_{ST}=20$</p>
pH	Unidades	$I_{pH} = e^{(-7.6434pH+18.5352\frac{1}{pH}+14.625 [Ln (pH)]^2)}$ <p>Si pH < 2 ó pH>12 unidades, $I_{pH}=0$</p>
Coliformes Fecales (ColiF)	NMP	$I_{ColiF} = e^{4.5685-0.1305Ln(colif)-0.0129[Ln (ColiF)]^2}$ <p>Si coliformes fecales >10⁵ / 100 ml, $I_{ColiF}=2$</p>
Nitrógeno total (NT)	mg/l	$I_{NT} = e^{(4.4706-0.043NT+2.8813*10^{-5}NT^2)}$ <p>Si Nitrógeno total > 100 mg/l, $I_{NT}=1$</p>
Fósforo total (FT)	mg/l	$I_{FT} = \frac{1}{0.0084 + 0.0143FT + 0.00074FT^2}$ <p>Si fosforo total > 10 mg/l, $I_{FT}=2$</p>
Color	UPC	$I_{Color} = 127 (C)^{-0.2394}$
Sólidos suspendidos	mg/l	$I_{COSUS} = -0.02 + 0.003 * I_{Solidos\ suspendidos} \frac{mg}{l}$

Parámetro	Unidad	Función del Subíndice (I)
		<p>Sólidos suspendidos mayores a $340 \frac{mg}{l}$ tienen ICOSUS = 1</p> <p>Sólidos suspendidos menos a $10 \frac{mg}{l}$ tienen ICOSUS = 0</p>

Posterior a la definición de cada subíndice del ICAUCA, los autores determinaron la ponderación que darían a cada uno de los parámetros incluidos dentro del índice, Dichos W_i se encuentran en la Tabla 19.

Tabla 19. Factores de ponderación de los parámetros del ICAUCA

Parámetro	Ponderación w_i
Oxígeno disuelto	21
Coliformes fecales	16
DBO ₅	15
Turbiedad	7
Sólidos totales	7
Fósforo total	8
pH	8
nitrógeno total	8
Sólidos suspendidos	5
Color	5

El ICAUCA se calcula por medio de una función multiplicativa, tal como se muestra a continuación:

$$ICA_m = \prod_{i=1}^n I_i^{w_i}$$

$$ICA_m = (I_1^{w_1})(I_2^{w_2})(I_3^{w_3}) \dots (I_n^{w_n})$$

Para el índice del río Cauca se estableció una clasificación de la calidad del agua, considerando como base el uso para abastecimiento humano (Ver Tabla 20).

Tabla 20. Escala de evaluación de la calidad del agua del ICAUCA

Índice de calidad	Clasificación
80-100	Óptima calidad
50-80	Buena calidad
35-50	Aceptable calidad
20-35	Inadecuada calidad
0-20	Muy mala calidad

✓ *ICA (IDEAM)*⁸

El índice de calidad del agua del IDEAM se calcula tomando como base 5 variables o 6 variables representativas de los diferentes tipos de contaminación, la elección entre el uso de uno u otro estará sujeta a la disponibilidad de las mediciones en cada punto. En caso de contar con los parámetros completos para realizar el cálculo de los dos índices del IDEAM la plataforma deberá solicitar al usuario que indique si se calcula uno de los dos o ambos.

⁸ Güiza, Gladys Yadira, Et al. Hoja metodológica Índice de calidad del agua. Instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM. 2011

En la Tabla 21 se presentan los parámetros incluido en el índice con sus respectivas unidades para el caso de 5 o 6 variables.

Tabla 21 parámetros incluidos en el índice del IDEAM

Variable	Expresada como	ICA de 5 Variables	ICA de 6 Variables
Oxígeno disuelto, OD	% saturación	X	X
Sólidos en suspensión	mg/l	X	X
Demanda Química de Oxígeno DQO	mg/L	X	X
Conductividad Eléctrica, C.E.	μS/cm	X	X
pH total	Unidades de pH	X	X
Nitrógeno total/Fosforo total	--	--	X

Para el cálculo del índice del IDEAM se utiliza como fórmula de agregación la presentada en la ecuación 1.

$$\text{Ecuación 1} \quad ICAFQ = \sum W_i I_i$$

Dónde:

ICAFQ: Índice de calidad del agua Físico – Químico

W_i : Factor de ponderación del subíndice i

I_i : Subíndice del parámetro i

De acuerdo a la ecuación 1, el índice del IDEAM se ha diseñado a partir de dos componentes, el primero es un factor de ponderación, el cual indica el peso que

tiene determinada variable dentro de la ecuación, es un número constante para cada parámetro incluido, estos se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22. Factores de ponderación del índice del IDEAM

Variable (Unidades)	Peso de importancia ICA 5 Variables	Peso de importancia ICA 6 Variables
Oxígeno disuelto, OD (%de saturación)	0.20	0.17
Sólidos en suspensión (mg/l)	0.20	0.17
Demanda Química de Oxígeno DQO (mg/l)	0.20	0.17
Conductividad Eléctrica, C.E. (μ S/cm)	0.20	0.17
pH total (Unidades)	0.20	0.15
NT/PT	---	0.17
E-Coli	---	---

El segundo componente son los subíndices, los cuales utilizan como insumo para su cálculo, los valores ingresados por los usuarios, a continuación se describe como se calculan cada uno de estos:

- Subíndice de Sólidos totales:

Si el valor arrojado por el análisis de sólidos totales del laboratorio se encuentra en el rango entre 4.6 mg/l y 319 mg/l el cálculo del subíndice se realiza mediante el reemplazo en la siguiente ecuación:

$$I_{SST} = 1 - (-0.02 + 0.003 * SST_{mg/l})$$

Dónde:

I_{SST} : subíndice de sólidos suspendidos totales

$SST_{mg/l}$: valor de sólidos suspendidos totales en $\frac{mg}{l}$

En el caso en que el valor se encuentre por fuera del rango mencionado anteriormente, el subíndice toma el valor de cero o uno, de acuerdo a las condiciones que se presentan a continuación:

$$\text{Si } SST \leq 4.5, \text{ entonces } I_{SST} = 1$$

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

Dónde:

I_{SST} : subíndice de sólidos suspendidos totales

$SST_{mg/l}$: valor de sólidos suspendidos totales en $\frac{mg}{l}$

- Subíndice de conductividad

Para el cálculo del subíndice de conductividad los autores establecieron que en el caso en el cual la medición de laboratorio realizada a la muestra de agua tomada de la fuente superficial objeto de estudio, dé como resultado un valor negativo, el subíndice será cero, en el caso contrario, es decir que el resultado

sea un valor positivo, sin importar el rango en el que se encuentre se aplicará la siguiente ecuación:

$$I_{Cond} = 1 - 10^{(-3.26 + 1.34 \log_{10} Conductividad)}$$

$$I_{Cond} < 0 \text{ (Negativo), entonces } I_{Cond} = 0$$

Dónde:

I_{Cond}: Subíndice de conductividad

Conductividad: valor de conductividad entregado por el laboratorio

- Subíndice de pH

El subíndice de pH se calcula teniendo en cuenta 5 rangos, para cada uno de ellos está establecida una ecuación o un valor constante, tal como se presenta a continuación:

Cuando el dato del pH de la fuente objeto de estudio sea inferior a 4, el subíndice toma el valor de 0.10.

$$\text{Si } pH < 4 \text{ entonces } I_{pH} = 0.10$$

Cuando el pH se encuentra entre 4 y 7 Unidades, el subíndice se calcula mediante la ecuación que se presenta a continuación:

$$\text{Si } pH \text{ está entre 4 y 7, entonces: } I_{pH} = 0.02628419 * e^{(pH * 0.520025)}$$

Si el pH se está entre el rango de 7.1 y 8.0 unidades, el subíndice de este parámetro es 1.

Si pH está entre 7.1 y 8.0, entonces $I_{pH} = 1$

En el caso en el que el pH se encuentre entre 8.1 y 11 unidades el cálculo del subíndice se realiza reemplazando dicho valor en la ecuación que se presenta a continuación:

*Si pH está entre 8.1 y 11, entonces: $I_{pH} = 1 * e^{((pH-8)-0.5187742)}$*

Finalmente si el pH es un valor superior a 11 unidades, el subíndice toma el valor de 0.10, al igual que si es menor que 4,

Si pH es > 11.1 , entonces $I_{pH} = 0.10$

Dónde:

I_{pH} = Subíndice de pH

pH: valor de pH entregado por el laboratorio

- Subíndice de DQO

El subíndice de DQO planteado por los autores cuenta con 5 rangos y para cada uno de ellos se determinó una ecuación de cálculo o un número constante tal como se muestra a continuación:

Si $DQO \leq 20$, Entonces: $I_{DQO} = 0.91$

Si $20 < DQO \leq 25$, Entonces: $I_{DQO} = 0.71$

Si $25 < DQO \leq 40$, Entonces: $I_{DQO} = 0.51$

Si $40 < DQO \leq 80$, Entonces: $I_{DQO} = 0.26$

Si $DQO > 80$, Entonces: $I_{DQO} = 0.125$

Dónde:

I_{DQO} : Subíndice de Demanda Química de Oxígeno

DQO: dato de Demanda Química de Oxígeno entregado por el laboratorio

- Subíndice de Oxígeno disuelto

En el subíndice de oxígeno disuelto se tienen en cuenta dos condiciones para saber cuál de las dos ecuaciones establecidas es la indicada para realizar el cálculo, en el caso en el que el porcentaje de saturación sea cien o inferior debe usarse la primera de la ecuaciones enunciadas a continuación, en el caso contrario en el que el porcentaje sea superior al 100% es decir que se encuentre en un estado de sobresaturación, debe utilizarse la segunda ecuación.

$$\begin{aligned} & \text{Si el \% de saturación de OD} \leq 100\%, \text{ entonces: } I_{\%satOD} \\ & = (1 - (1 - 0.01 * \%SatOD) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Si el \% de saturación de OD} > 100\%, \text{ Entonces: } I_{\%SatOD} \\ & = 1 - (0.01 * \% satOD - 1) \end{aligned}$$

Dónde:

$I_{\%satOD}$: Subíndice de porcentaje de oxígeno disuelto

% de saturación de OD: dato de porcentaje de oxígeno disuelto entregado por el laboratorio

- Subíndice de Nitrógeno total/fósforo total:

Esta relación indica el balance de nutrientes para la productividad acuícola de las zonas inundables en los ríos ubicados desde el norte de Argentina hasta el centro de México. A continuación se presentan las ecuaciones para la determinación del subíndice.

$$15 \leq \frac{NT}{PT} \leq 20, \text{Entonces } I_{NT/PT} = 0.8$$

$$10 \leq \frac{NT}{PT} \leq 15, \text{Entonces } I_{NT/PT} = 0.6$$

$$5 \leq \frac{NT}{PT} \leq 10, \text{Entonces } I_{NT/PT} = 0.35$$

$$\frac{NT}{PT} \leq 5 \text{ ó } \frac{NT}{PT} > 20, \text{Entonces } I_{NT/PT} = 0.15$$

Una vez calculados los subíndices de cada parámetro se aplica la ecuación 1 y se obtiene el valor numérico final del índice del IDEAM, este deberá compararse con los rangos de calificación establecidos por los autores (Ver Tabla 23), en los cuales se asocia el resultado numérico a una descripción y un color característico.

Tabla 23. Rangos de calificación del índice del IDEAM.

Descripciones	Rango	Color
Muy malo	0-0.25	Rojo
Malo	0.26-0.50	Naranja
Regular	0.51-0.70	Amarillo
Aceptable	0.71-0.90	Verde
Bueno	0.91-1.00	azul

4. METODOLOGIA

El desarrollo de este proyecto parte de la necesidad de una Corporación Autónoma Regional de generar una herramienta informática que permita el cálculo de diferentes índices de calidad y de contaminación, así como gestionar la información referente al tema, es por esto que una vez se realizó la revisión bibliográfica de los índices nacionales e internacionales más usados, se implementó la siguiente metodología con el fin de dar cumplimiento a cada uno de los objetivos establecidos.

- *Análisis de la disponibilidad de la información necesaria para calcular los índices y de la aplicabilidad de los mismos en la dinámica nacional:*

En este paso se revisó en detalle la información de mediciones históricas de calidad hídrica suministrada por la autoridad ambiental correspondiente a los últimos 6 años, donde se determinó el número de variables medidas para cada una de las cuencas de interés, por otra parte se encontró que varios de los índices de calidad que hacen parte de la revisión documental no eran posibles calcularlos por falta de información. Como resultado de esta etapa se obtuvo un primer acercamiento a los índices que serían incluidos dentro de la herramienta informática.

- *Selección de los índices de calidad y de contaminación acordes con la dinámica nacional:*

A partir de la depuración realizada en el paso anterior y de la información recolectada en la revisión bibliográfica, se propuso incluir dentro del aplicativo los índices del IDEAM de 5 y 6 variables, el índice de Canadá (CCME WQI), el segundo índice de Dinius y los índices de contaminación.

La autoridad ambiental para la cual se desarrolló la herramienta informática determinó que se incluirían los índices de contaminación, el índice de Canadá y los índices del IDEAM planteados inicialmente.

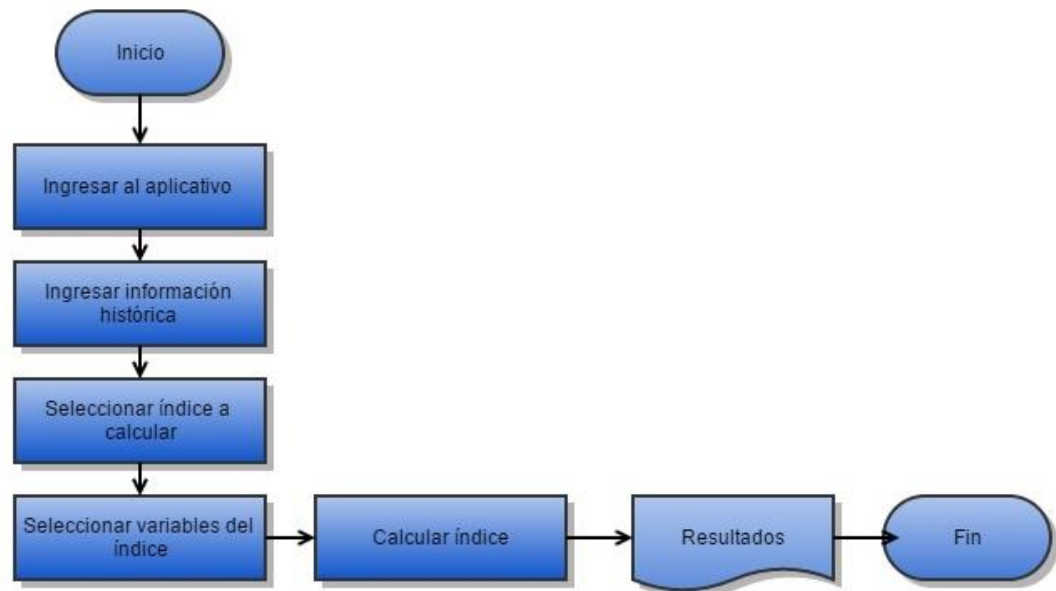
Adicionalmente se acordó incluir el cálculo de un índice adicional el cual fue desarrollado por funcionarios de la Corporación, tomando como base el ICA Físicoquímico del IDEAM de 6 variables, al cual se le adicionó un parámetro más considerado como crítico dentro de la dinámica de las fuentes superficiales de su jurisdicción.

- *Elaboración del diseño conceptual del módulo WQI.*

Una vez seleccionados los índices de calidad y de contaminación se elaboró el documento soporte del diseño conceptual de la herramienta informática, donde se estableció cada uno de los insumos necesarios para el cálculo de los mismos y los resultados en forma de reportes que debían generarse. Este documento sirvió como base para el equipo de ingenieros de sistemas encargados del desarrollo del módulo.

En la Figura 2 se presenta el diagrama de flujo general del aplicativo, en donde se especifican las funcionalidades básicas que este incluyen, estas son: carga y almacenamiento de información histórica, cálculo de diferentes índices de calidad y de contaminación y generación de reportes gráficos asociados con los diferentes ICAs e ICOs.

Figura 1 Diagrama de proceso general



En la Figura 2 y Figura 3 se presentan los diagramas elaborados para el cálculo de los diferentes índices de calidad y de contaminación y para el caso especial del índice de Canadá respectivamente, este último como se mencionó en el presente documento, el CCME WQI tiene una forma especial de cálculo, ya que busca evaluar el cumplimiento de las variables que el usuario final decida respecto a una determinada legislación vigente, ya sea local o nacional.

Figura 2 Diagrama de flujo para el cálculo de índices de calidad y contaminación.

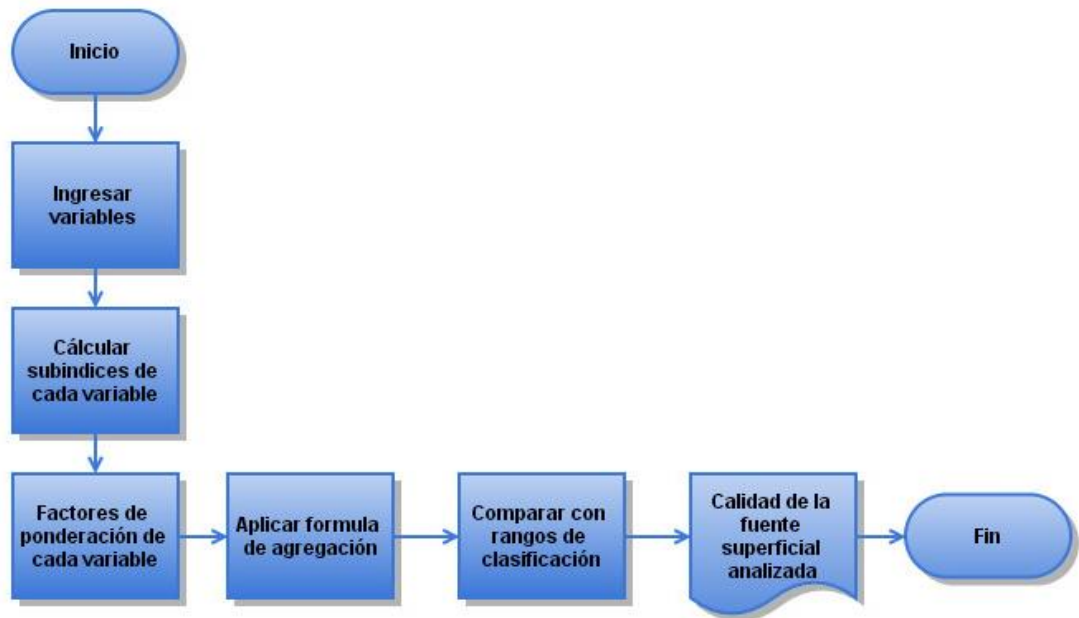
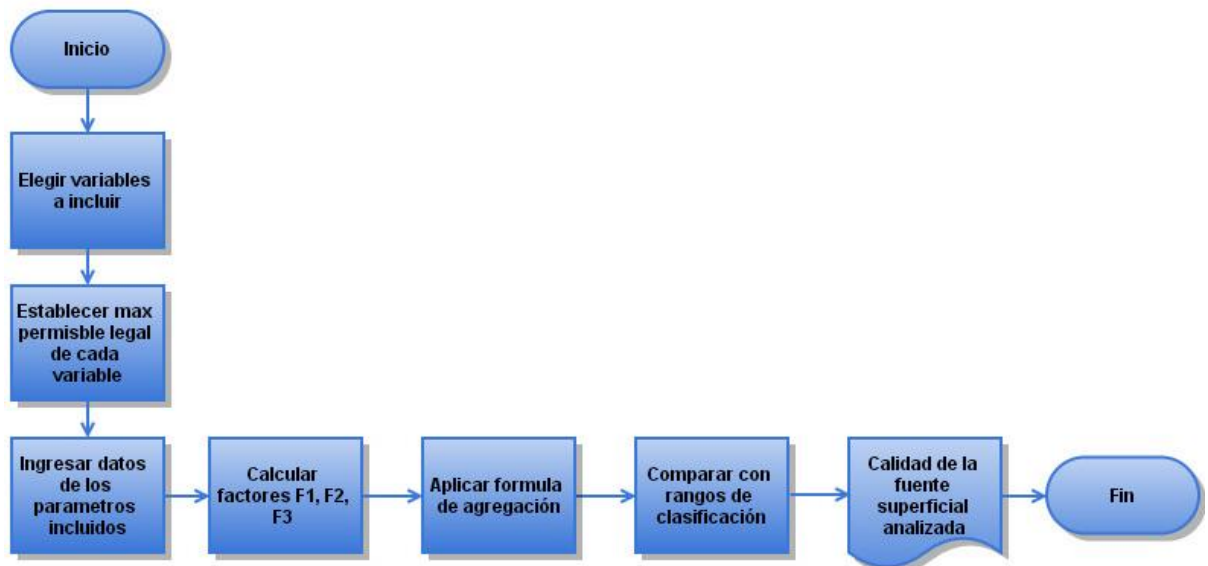


Figura 3 Diagrama de flujo para el cálculo del índice de Canadá



- *Corroborar la confiabilidad de los resultados de los índices de calidad y de contaminación arrojados por el módulo WQI.*

Adicional al diseño del aplicativo, se desarrollaron actividades de soporte al equipo de ingenieros de sistemas encargados del desarrollo del módulo, con el fin de garantizar que el resultado sería el esperado, una vez se terminó la etapa de desarrollo, fue necesario realizar pruebas exhaustivas del cálculo de los diferentes índices incluidos, estas se llevaron a cabo a través de hojas de Excel, con alrededor de 10 combinaciones diferentes de datos reales seleccionados al azar para cada uno, por otra parte se diseñaron escenarios atípicos, se utilizaron datos donde el resultado del índice podría predecirse por la dinámica de la fuente, todo esto con el fin de corroborar la veracidad de los resultados arrojados por el aplicativo. Finalmente se encontró que el aplicativo entrega resultados con un 100% de confiabilidad en los cálculos.

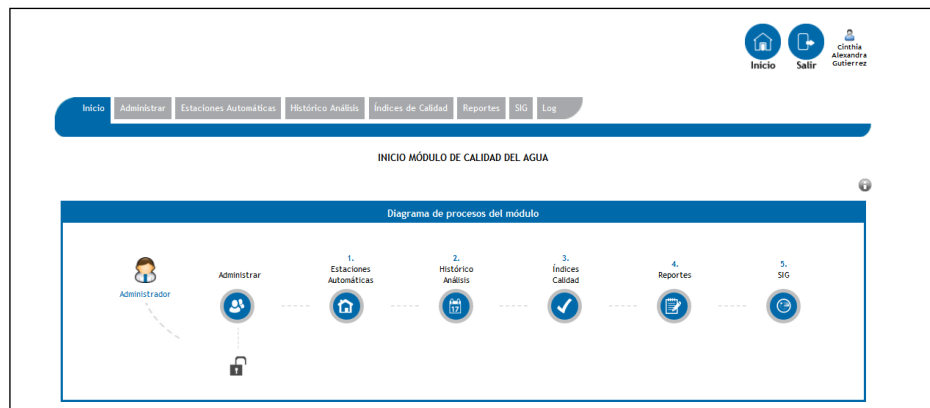
5. RESULTADOS

Como resultado de este trabajo se obtuvo el documento que recopiló la revisión bibliográfica expuesta en el marco teórico, el diseño de la herramienta informática, el cual contenía la información necesaria para el cálculo de índices de calidad y de contaminación útiles para el seguimiento a calidad hídrica, así como una herramienta informática que permite realizar el cálculo de estos mismos.

A continuación se describe la funcionalidad en cuanto a cálculo de índices de calidad y de contaminación del aplicativo desarrollado, así como los reportes referentes al tema generados.

En la Figura 4 se presenta el inicio del aplicativo desarrollado, allí se cuentan con diferentes opciones que permite a los usuarios finales crear usuarios, carga la información histórica (la cual es el insumo principal para el cálculo de los índices), calcular índices y generar reportes asociados a los índices. Es posible acceder a cada una de las funcionalidades anteriormente mencionadas a través de las pestañas del menú superior o haciendo click sobre el diagrama de flujo que se presenta en el inicio.

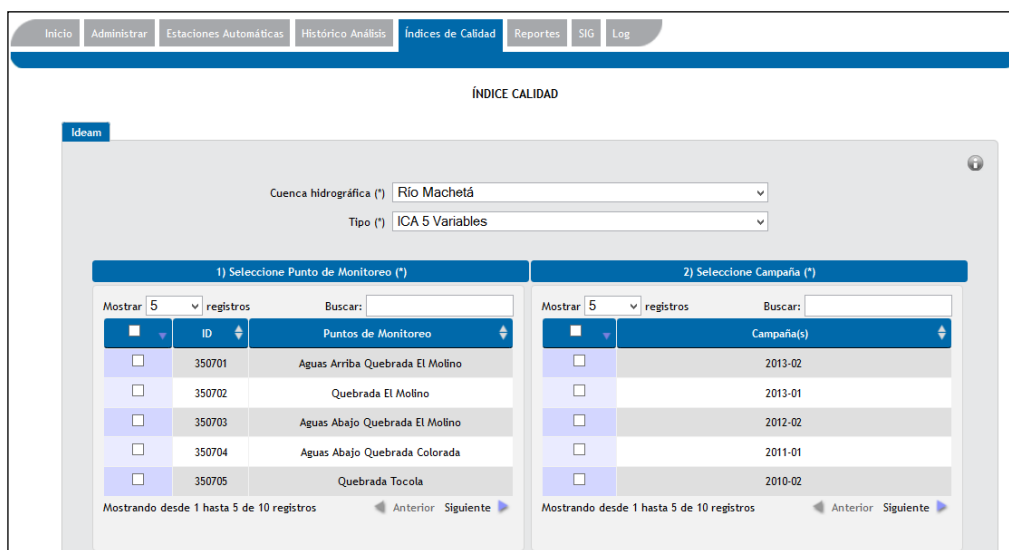
Figura 4 Inicio del Aplicativo



Una vez el usuario final tiene información de historicos de analisis de las variables necesarias para el cálculo de los índices en la base de datos del aplicativo, el usuario puede ingresar a la pestaña llamada “índices de calidad”, en donde encontrará los índices que tiene el aplicativo disponibles, de acuerdo a la selección de este, se mostrará las listas donde este deberá indicar al modulo con que datos desea realizar el cálculo, las variables que el usuario define son: la cuenca hidrográfica para la cual se va a realizar el cálculo, el tipo de índice (es decir cual de todos los que se tienen disponibles desea ejecutar), los puntos de monitoreo y las campañas de seguimiento a los cuales desea realizar el proceso de cálculo, cabe resaltar que dependiendo del índice que se elija deberán definirse mas o menos variables, como es el caso del CCME WQI donde adicionalmente deben indicarse tambien los parámetros que se tendrán en cuenta y el limite legal que se utilizará para la comparación.

En la Figura 5 se presenta la pantalla de inicio para la selección anteriormente mencionada.

Figura 5 Selección de variables para el cálculo de índices



El aplicativo realiza el cálculo del índice de acuerdo a la selección realizada, como resultado se obtiene una tabla como la representada en la Figura 6, en donde se indican los puntos de monitoreo donde fue posible llevar a cabo el cálculo, el resultado numérico y el color asociado al rango de clasificación (en los casos en que el índice establece una escala de color asociada), por otra parte el aplicativo muestra la tabla con todos los rangos de clasificación del índice seleccionado.

Figura 6 Resultados cálculo ICA IDEAM

Cuenca hidrográfica	Punto de Monitoreo	Campaña(s)	Valor
Río Gachetá	Río Amoladero	2013-02	0.88
Río Gachetá	Quebrada Arrastradero	2013-02	0.95
Río Gachetá	Aguas Abajo Quebrada Arrastradero	2013-02	0.88
Río Gachetá	Río Lagunero	2013-02	0.87
Río Gachetá	Quebrada Pan de Azúcar	2013-02	0.87

Mostrando desde 1 hasta 5 de 6 registros

◀ Anterior Siguiente ▶

Rangos de calificación del índice del IDEAM		
Descripciones	Rango	Color
Muy malo	0-0.25	Rojo
Malo	0.26-0.50	Naranja
Regular	0.51-0.70	Amarillo
Aceptable	0.71-0.90	Verde
Bueno	0.91-1.00	Azul

Para los casos en que por falta de datos no es posible obtener un valor numérico de un ICA, aplicativo genera una tabla donde se indica exactamente cual o cuales son los datos faltantes de cada uno de los puntos de acuerdo a lo que se estableció en el diseño como datos obligatorios para poder llevar a cabo el cálculo (Ver Figura 7).

Figura 7 Resumen de puntos donde no fue posible realizar el cálculo del ICA

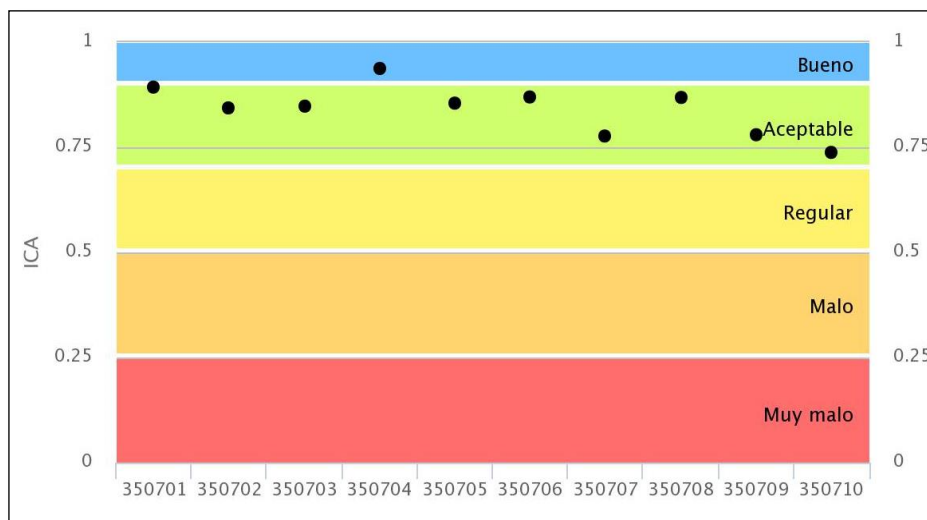
Campaña	ID Punto	Oxígeno Disuelto	Temp.	Altitud	PH	Conduct.	DQO	Sólidos Susp.
2013-02	212001	6.2	X	X	6.8	17	15.5	5
2013-02	212002	6.6	X	X	6.8	52.4	22	12.3
2013-02	212003	5.9	X	X	6.8	65.2	24.8	15
2013-02	212004	6.2	X	X	6.8	21.5	15.5	5
2013-02	212005	6.6	X	X	6.8	86.7	22	12.3

La herramienta permite generar diferentes tipos de reportes gráficos asociados al cálculo de los índices de calidad y de contaminación incluidos, esto a través de la pestaña llamada “Reportes”, donde al ingresar a esta en el menú superior el aplicativo solicita al usuario que seleccione el tipo de reporte que desea generar (Ver Figura 8).

Figura 8 Generación de reportes ICAs e ICOs

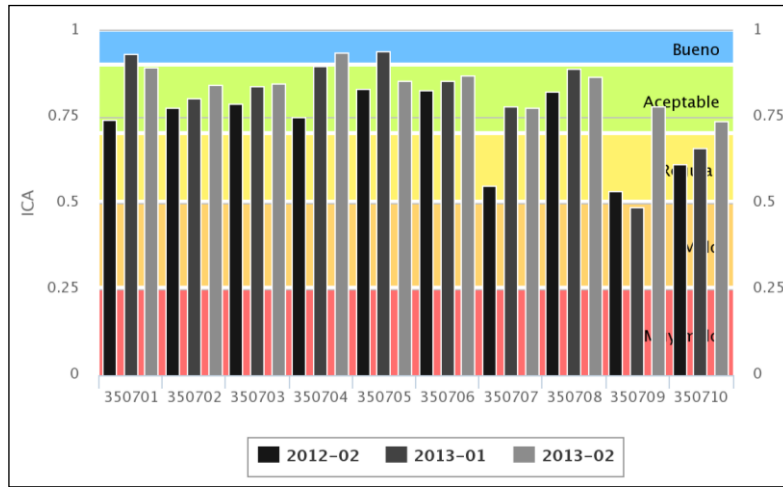
El primer tipo de reporte que es posible realizar, son gráficas con el resultado del cálculo del índice para cada uno de los puntos seleccionados, tal como se muestra en la Figura 9, donde en el fondo de la gráfica se cuenta con la bandera de colores establecida en la tabla de los rangos de clasificación del índice seleccionado, cuando este así lo contempla, de modo que se hace más fácil al usuario identificar e interpretar cada uno de los números consignados allí.

Figura 9 Reporte gráfico ICA IDEAM



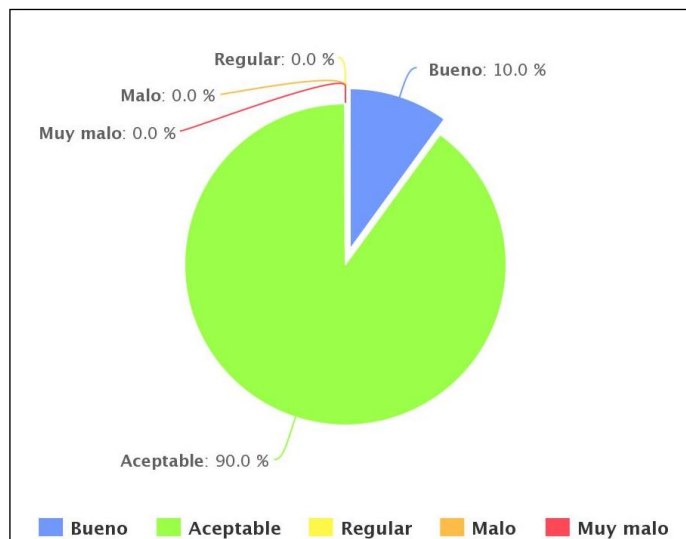
Un segundo tipo de reporte, consiste en la comparación del resultado del índice en diferentes periodos de tiempo (Ver Figura 10), de esta forma se permite al usuario realizar analisis historicos de la evolución de un determinado ICA, esta gráfica siempre está acompañada de una tabla de datos, donde se especifica el valor individual de cada una de las mediciones representadas.

Figura 10 Comparación de resultados ICA IDEAM en diferentes periodos de tiempo.



Finalmente el aplicativo permite generar un último tipo de reporte gráfico, donde básicamente se busca visualizar la distribución porcentual de los puntos de monitoreo de aguas superficiales donde se realizó el cálculo de algún índice en una determinada cuenca, dicho reporte se presenta en la Figura 11.

Figura 11 Distribución porcentual ICA IDEAM



6. CONCLUSIONES

- Los resultados de las campañas de seguimiento a las concentraciones de las variables de interés que desarrollan las diferentes Corporaciones Autónomas Regionales por si solos, no constituyen una herramienta para determinar si hay afectación de la calidad de una determinada fuente de agua superficial.
- Las principales dificultades que se presentan y por las cuales los índices de calidad y de contaminación aun no son ampliamente utilizados en el país como herramienta para la toma de decisiones en cuanto a calidad hídrica, es el grado de complejidad de los cálculos que implican algunos ICAs e ICOs y la disponibilidad de la información de concentración de las variables de interés.
- Se cuentan con información de infinidad de índices de calidad a nivel internacional, sin embargo no siempre es posible la implementación de los mismos en el ámbito nacional, debido a que estos fueron diseñados teniendo en cuenta las condiciones geográficas y la dinámica de las fuentes hídricas locales, lo que implica que son desarrollos específicos que entregan resultados representativos solo cuando las condiciones del lugar donde se aplica son similares.
- A nivel nacional hasta hace cerca de 20 años se inició el proceso de adaptación y desarrollo de índices de calidad teniendo en cuenta las condiciones climáticas y la dinámica industrial local.

- Es de vital importancia la implementación de herramientas tecnológicas dentro de las autoridades ambientales competentes a nivel nacional, que faciliten el cálculo de índices de calidad y de contaminación.

7. RECOMENDACIONES

- Ampliar este tipo de revisiones bibliográficas y de herramientas informáticas a los índices de calidad para aguas subterráneas e industrias puntuales como la minería.
- Promover el uso de índices de calidad del agua como herramienta técnica para la toma de decisiones en cuanto al recurso hídrico.

BIBLIOGRAFÍA

Abassi, T. Abassi, S. A., Water Quality Indices. 2012.

Boyacioglu, H. Development of a water quality index based on European classification scheme [online]. Agosto de 2006. Department of environmental engineering.

Canadian Council of Ministers of the environment. 2001. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME Water Quality Index 1.0, User's manual. In: Canadian environmental quality guidelines, 1999, Canadian council of ministers of the environment, Winnipeg.

Canadian Council of Ministers of the environment. 2001. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME Water Quality Index 1.0, technical report. In: Canadian environmental quality guidelines, 1999, Canadian council of ministers of the environment, Winnipeg.

Corporación autónoma regional del Cauca. Estudio de la calidad del agua del Río Cauca y sus principales tributarios mediante la aplicación de índices de calidad y de contaminación tramos Salvajina - la Virginia. Noviembre 2002.

Díaz, L. A. Estudio comparativo de índices de calidad del agua mediante la aplicación y evaluación de un modelo armonizado en Latinoamérica, caso de estudio Río Loa. Agosto 2010. Universidad Católica del Norte.

Fernández, N. Ramírez, A. Solano, F. Physico-Chemical water quality indices a comparative review. [online]. Revista Bistua.

González, V. Caicedo, O. Aguirre, N. Aplicación de los índices de calidad de agua NSF, DINIUS y BMWP en la quebrada la Ayurá, Antioquia, Colombia [online]. Marzo 2013. Revista gestión y ambiente.

Güiza, Gladys Yadira, Et al. Hoja metodológica Índice de calidad del agua. Instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM. 2011.

Hurley, T. Sadiq, R. Mazumder, A. Asaptation and evaluation of the Canadian Council of Ministers of the environment water quality index (CCME WQI) for use as an effective tool to characterize drinking source wáter quality. [online]. Abril de 2012. Water Research.

Jiménez Cisneros, B. Información y calidad del agua en México [online], Mayo – Agosto 2007. Revista de ciencias sociales de la universidad nacional de nuevo león.

Jiménez, M. Vélez, M. Análisis comparativo de indicadores de la calidad de agua superficial. Universidad Nacional de Medellín. Antioquia, Colombia [online]. Octubre de 2006. Avances en recursos hidráulicos.

Kannel, P. Lee, S. Lee, Y. Kanel, S. Khan, S. Application of water quality índices and dissolved oxugen as indicators for river water classification and urban impact assessment [online]. Febrero 2007. Environmental Monitoring and assessment.

Lumb, A. Sharma, T.C. Bibeault, J-F. A Review of Genesis and Evolution of Water Quality Index (WQI) and Some Future Directions [online], Febrero 2011. Water Qual Expo Health.

Lumb, A. Sharma, T.C. Bibeault, J-F. Klawunn, P. A Comparative study of USA and candian Water Quality Index Models [online], Diciembre 2011. Water Qual Expo Health.

Orjuela, L. et al. Estudio Nacional del agua, Capitulo 6. IDEAM 2010.

Patiño, P. Holguin, J. *Et al.* Metodología para la adaptación de un índice de calidad del agua a las condiciones medio ambientales del Río Cauca en el tramo Salvajina – La Virginia. [online]. Seminario internacional: visión integral en el mejoramiento de la calidad del agua.

Ramírez, A. Restrepo, R. Cardeñosa, M. índices de contaminación para caracterización de aguas continentales y vertimientos [online]. Ecopetrol, Instituto Colombiano del Petróleo. Vol 1 Num. 5 (Diciembre 1999). P 89 – 99.

Ramírez, A. Restrepo, R. Viña, G. Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales [online]. Ecopetrol, Instituto Colombiano del Petróleo. Vol 1 Num. 3 (Diciembre 1997). P 135 – 153.

Samboni, N. *et al.* Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. [online]. Diciembre de 2007. Revista ingeniera e investigación.

Torres, P. Cruz, C. Patiño, P. índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica [online]. Octubre 2009. Revista ingenierías Universidad de Medellín.

Universidad de Pamplona. Capítulo III, índices de calidad (ICAs) y de contaminación (ICOs) del agua de importancia mundial.

Universidad de Pamplona. Capítulo IV, análisis comparativo de los índices de calidad (ICAs) y de los índices de contaminación (ICOs) del agua.