



TÍTULO

OBTENCIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA (ICA) PARA LAS CIÉNAGAS QUE FORMAN PARTE DE LA ZONA INUNDABLE DEL RÍO MAGDALENA EN EL DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO – COLOMBIA, A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI

AUTOR

Pedro Mancera Quevedo

Esta edición electrónica ha sido realizada en 2017

Directores	Dr. Francisco Córdoba García ; Dra. Osiris Álvarez Bajo
Instituciones	Universidad Internacional de Andalucía ; Universidad de Huelva
Curso	<i>Máster Oficial en Tecnología Ambiental (2015/2016)</i>
ISBN	978-84-7993-612-9
©	Pedro Mancera Quevedo
©	De esta edición: Universidad Internacional de Andalucía
Fecha documento	2016



Reconocimiento-No comercial-Sin obras derivadas

Usted es libre de:

- Copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra.

Bajo las condiciones siguientes:

- **Reconocimiento.** Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciadore (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o apoyan el uso que hace de su obra).
- **No comercial.** No puede utilizar esta obra para fines comerciales.
- **Sin obras derivadas.** No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.
- *Al reutilizar o distribuir la obra, tiene que dejar bien claro los términos de la licencia de esta obra.*
- *Alguna de estas condiciones puede no aplicarse si se obtiene el permiso del titular de los derechos de autor.*
- *Nada en esta licencia menoscaba o restringe los derechos morales del autor.*

**OBTENCIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA (ICA) PARA LAS CIÉNAGAS QUE
FORMAN PARTE DE LA ZONA INUNDABLE DEL RÍO MAGDALENA EN EL DEPARTAMENTO
DEL ATLÁNTICO – COLOMBIA, A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI**

PEDRO MANCERA QUEVEDO

**MÁSTER OFICIAL EN TECNOLOGÍA AMBIENTAL
UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE ANDALUCÍA – UNIVERSIDAD DE HUELVA
HUELVA – ESPAÑA, DICIEMBRE DE 2016**

OBTENCIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA (ICA) PARA LAS CIÉNAGAS QUE FORMAN PARTE DE LA ZONA INUNDABLE DEL RÍO MAGDALENA EN EL DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO – COLOMBIA, A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI

PEDRO MANCERA QUEVEDO

DIRECTORES:

Dr. FRANCISCO CÓRDOBA GARCÍA

Dra. OSIRIS ÁLVAREZ BAJO

COLABORADOR:

Máster. ERHENT DAVID MADARIAGA MARTÍNÉZ

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE MÁSTER EN TECNOLOGÍA AMBIENTAL

**MÁSTER OFICIAL EN TECNOLOGÍA AMBIENTAL
UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE ANDALUCÍA – UNIVERSIDAD DE HUELVA
HUELVA – ESPAÑA, DICIEMBRE DE 2016**

AGRADECIMIENTOS

Este documento no hubiera sido posible sin la colaboración desinteresada de los profesionales que participaron en cada una de las fases de este trabajo, entre ellos, Aracelly Caselles Osorio, Erhent Madariaga Martínez, Karina Castellanos Romero, Ayari Rojano Marín, Luis Carlos Gutiérrez Moreno, Ana De la Parra Guerra, Camilo Botero Saltaren y Josimar Quintero Senior, a quienes les ofrezco mi más sincero reconocimiento y respeto.

Así mismo, al profesor Francisco Córdoba García y Osiris Álvarez Bajo por su apoyo y guía incondicional, y a Erhent David Madariaga Martínez por poner a mi disposición sus conocimientos y experiencia en la evaluación de ecosistemas acuáticos continentales.

A la Universidad Internacional de Andalucía por permitirme hacer parte de su grupo de estudiantes, y a su capital humano, especialmente a los del Campus Santa María de La Rábida por su excelente trato y amabilidad.

También ofrezco un especial reconocimiento a mis compañeros de máster y de residencia por hacer de esta experiencia en España no solo un avance académico sino una especial aventura de nunca olvidar.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN _____	7
ABSTRACT _____	8
1 INTRODUCCIÓN _____	9
2 OBJETIVOS _____	11
2.1. OBJETIVO GENERAL _____	11
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS _____	11
3 MARCO TEÓRICO _____	12
3.1. ANTECEDENTES _____	12
3.2. MÉTODO DELPHI _____	15
3.3. ÍNDICES DE CALIDAD DE AGUAS - ICA _____	17
3.4. GENERALIDADES DE VARIABLES UTILIZADAS EN LA EVALUACIÓN DE CALIDAD DE AGUAS _____	19
3.5. CIÉNAGAS _____	28
4 METODOLOGÍA _____	30
4.1. CUERPOS DE AGUA DE APLICACIÓN _____	30
4.2. MÉTODO DELPHI _____	32
4.2.1. Selección de expertos. _____	32
4.2.2. Tamaño de la muestra. _____	32
4.2.3. Consultas. _____	33
4.3. CONSTRUCCIÓN DEL ICA _____	35
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN _____	38
5.1. EVALUACIÓN DE LAS CONSULTAS _____	38
5.2. CONSTRUCCIÓN DEL ÍNDICE (ICA _{ciénagas}) _____	39
5.2.1. Curvas de Calidad (Q). _____	39
5.2.2. Diseño. _____	40
5.2.3. Aplicabilidad. _____	46
6 CONCLUSIONES _____	52
7 BIBLIOGRAFÍA _____	53

ANEXOS	61
ANEXO 1. PRIMERA CONSULTA	62
ANEXO 2. SEGUNDA CONSULTA	67
ANEXO 3. TERCERA CONSULTA	73
ANEXO 4. CURVAS DE CALIDAD (Q) Y ECUACIONES	92

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
<i>Tabla 1. Variables físicas, químicas y biológicas presentadas en la primera encuesta para definir las de mayor importancia en la evaluación de la calidad del agua de las ciénagas que forman parte de la zona inundable del río Magdalena en el departamento del Atlántico (Colombia).</i>	34
<i>Tabla 2. Escala de clasificación.</i>	37
<i>Tabla 3. Variables seleccionadas para la construcción del ICA.</i>	39
<i>Tabla 4. Peso – W (Importancia) otorgada por los expertos a las variables seleccionadas para la conformación del ICA.</i>	40
<i>Tabla 5. Peso – W (Importancia) de los subíndices de después de unión de variables complementarias.</i>	43
<i>Tabla 6. Fórmulas para calcular los subíndices con variables agrupadas.</i>	44
<i>Tabla 7. Peso - W (Importancia) de los subíndices dentro del ICA.</i>	44
<i>Tabla 8. Indicadores de eutroficación en la Ciénaga El Convento en época de lluvias (Fuente: CRA, 2014)</i>	46
<i>Tabla 9. Valores de variables fisicoquímicas, microbiológicas e hidrobiológicas registradas en la ciénaga El Convento en época lluviosa de 2014 (Fuente: CRA, 2014).</i>	47
<i>Tabla 10. Datos obtenidos de la aplicación del ICA^{ciénagas} en dos puntos de muestreo en la ciénaga El Convento. Los valores se obtuvieron a partir de datos de CRA (2014).</i>	47
<i>Tabla 11. Valores del ICA^{ciénagas} en dos puntos de muestreo en la ciénaga El Convento, con el color de la escala de clasificación.</i>	48
<i>Tabla 12. Indicadores de contaminación en la Ciénaga La Luisa (Fuente: CRA, 2014).</i>	49
<i>Tabla 13. Valores de variables fisicoquímicas, microbiológicas e hidrobiológicas registradas en la ciénaga La Luisa en época lluviosa de 2014 (Fuente: CRA, 2014).</i>	49
<i>Tabla 14. Datos obtenidos de la aplicación del ICA^{ciénagas} en dos puntos de muestreo en la ciénaga La Luisa. Los valores se obtuvieron a partir de datos de CRA (2014).</i>	50
<i>Tabla 15. Valores del ICA^{ciénagas} en dos puntos de muestreo en la ciénaga La Luisa, con el color de la escala de clasificación.</i>	51

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<i>Figura 1. Ubicación geográfica de las ciénagas que forman parte de la zona de amortiguación del río Magdalena en el departamento del Atlántico.</i>	31

RESUMEN

Se empleó el método Delphi para la obtención del índice de calidad de agua – ICA, aplicable en las ciénagas que forman parte de la zona de inundación del río Magdalena en el departamento del Atlántico – Colombia. Se seleccionaron las variables que tuvieron un consenso $\geq 70\%$, siendo en total 23.

Los valores de calidad de cada variable aportados por los expertos fueron ingresados y procesados a través del programa CURVE EXPERT V1.4 (evaluation edition), obteniéndose de él las curvas y ecuaciones de cada variable. Se determinó que algunas variables representaban el mismo tipo de contaminación por lo cual se agruparon en un mismo subíndice, y las demás se representaron en subíndices individuales. Luego se agruparon los subíndices en dos grupos, “Físicoquímicos y Microbiológicos”, e “Hidrobiológicos” a los cuales también se les dio un valor de importancia relacionado con que las variables del primer grupo poseen suficientes trabajos realizados que permiten a los investigadores hacer valoraciones más exactas, mientras que las variables del segundo grupo son comunidades biológicas altamente dinámicas de las cuales hace falta estudios, lo que conlleva a cierto sesgo en la información disponible y su interpretación con relación a la calidad del agua.

Definidos los pesos de los dos grupos, se construyó la fórmula para calcular el $ICA_{\text{ciénagas}}$, empleando la media aritmética ponderada de los subíndices que lo componen, diseño, basado en el criterio ponderado de los expertos, de gran utilidad para evaluación general de la calidad del agua en estas ciénagas.

ABSTRACT

The Delphi method was used to obtain the water quality index - ICA, applicable to the lentic aquatic ecosystems that are part of the Magdalena river flood zone in the Atlantic department - Colombia. We selected the variables that had a consensus $\geq 70\%$, being in total 23, among physicochemical, microbiological and hydrobiological.

The quality values of each variable contributed by the experts were entered and processed through the program CURVE EXPERT V1.4 (evaluation edition), obtaining from it the curves and equations of each variable. It was determined that some variables represented the same type of contamination by which they were grouped in a subscript, and the others were represented in individual subscripts. The subscripts were grouped into two sets, "Physicochemical and Microbiological", and "Hydrobiological", which were also given a value of importance because of the variables of the first group have numerous information that allows the experts to make assessments adequate, whereas the variables of the second group are dynamic biological communities of which more research is required.

Already defined the weights of the two groups, the formula was obtained to calculate the indicator ($ICA_{\text{ciénagas}}$), using the weighted arithmetic mean of the subscripts that compose it, design based on the weighted criterion of the experts, of great utility for general evaluation of water quality in these lentic aquatic ecosystems.

1 INTRODUCCIÓN

En el departamento del Atlántico (Colombia), los cuerpos de agua superficiales se encuentran deteriorados principalmente por acciones antrópicas asociadas con el crecimiento poblacional en sus zonas periféricas, la producción agrícola y la ganadería, que generan contaminación por vertimientos líquidos y sólidos, invasión de los espejos de agua y conflictos por el uso del recurso, entre otros.

Este deterioro hace prioritaria su evaluación con el fin de tomar acciones de control y mitigación, por lo cual es necesario buscar alternativas de valoración que permitan conocer el estado de los mismos.

En Colombia, se han implementado diferentes estrategias que permiten esta evaluación. De hecho, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM ha diseñado diferentes indicadores que calculan la disponibilidad del recurso y las restricciones por afectaciones a la oferta o a la calidad. Estos índices están asociados al régimen natural (Índice de Aridez - IA, Índice de Regulación Hídrica - IRH) y a la intervención antrópica (Índice de Uso del Agua - IUA, Índice de Vulnerabilidad al desabastecimiento - IVH, Índice de Amenaza Potencial por Afectación a la Calidad del Agua - IACAL e Índice de Calidad del Agua - ICA).

A pesar de estos esfuerzos, es de común conocimiento que para una mejor evaluación de la calidad de los cuerpos de agua, es recomendable diseñar indicadores propios para cada zona o para cada ecosistema debido a que estos responden a diversas características locales.

Colombia es un país con una amplia diversidad geográfica, ecosistémica y ecológica, lo que se convierte en un factor limitante a la hora de utilizar un ICA. La mayoría de los indicadores existentes, están diseñados para ecosistemas de zonas con características geoquímicas del suelo y de origen geológico diferente a las del Caribe Colombiano, en especial a las del delta del río Magdalena, que lo hace particular porque soporta entre muchas cosas, la carga orgánica de gran parte del país y tiene una fuerte influencia marina, evidenciado por el gran número de especies de peces eurihalinos registrados en esta área, por ejemplo, *Mugil incilis* (Lisa) y *Mugil lisa* (Lebranche) y *Megalops atlanticus* (Sábalo). Además, las ciénagas vinculadas a él poseen conflictos particulares

relacionados con alteraciones de la interconexión con el río, la colmatación excesiva y la presencia de especies invasoras (macrófitas, peces y bivalvos), etc.

Con respecto a esto, García-Quevedo (2012, p. 14) menciona que la calidad de los recursos hídricos superficiales requiere de todo un marco metodológico de evaluación que permita obtener resultados tanto exactos como reproducibles contextualizados al caso de aplicación, por lo que recomienda realizar o utilizar un ICA específico para cada territorio debido a la particularidad que pueden presentar sus aguas.

Los índices de calidad del agua –ICA– son una herramienta para la evaluación del recurso hídrico, cuyo principal objetivo es expresar las condiciones de calidad de un cuerpo de agua, mediante el análisis de un valor único, obtenido del cálculo matemático de una combinación de parámetros ambientales. De esta manera, este trabajo pretende desarrollar un indicador (ICA) para las ciénagas que forman parte de la zona inundable del río Magdalena en el departamento del Atlántico, utilizando la metodología “Delphi” para la obtención de información, basados en el diseño del Índice de Calidad de agua WQI (Water quality Index), desarrollado por la Fundación de Sanidad Nacional NSF (National Sanitation Foundation) de los Estados Unidos de América del Norte.

2 OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Constituir un Índice de Contaminación Acuática – ICA, para las ciénagas que forman parte de la zona inundable del río Magdalena en el departamento del Atlántico, mediante la aplicación de la metodología “Delphi”.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las variables físicas, químicas y biológicas de mayor importancia para el diagnóstico de la calidad del agua en ambientes acuáticos continentales asociados al río Magdalena en el departamento del Atlántico, a partir de la información obtenida por los expertos.
- Establecer un Índice de Calidad de Aguas (ICA) aplicable a las ciénagas que forman parte del área de amortiguamiento del río Magdalena en el departamento del Atlántico.

3 MARCO TEÓRICO

3.1. ANTECEDENTES

La metodología Delphi ha significado un importante recurso en la evaluación y definición en diferentes procesos de diversas áreas y son innumerables los trabajos que se pueden citar, por ejemplo, en educación, García-Aracil y Palomares-Montero (2012) en España, evaluaron el desempeño de las universidades identificando un listado de indicadores relacionados con la evaluación de estas instituciones, validados a través del método Delphi, que sirvió de ayuda para la toma de decisiones en torno a qué indicadores deberían ser incluidos en los modelos de evaluación universitaria.

Por su parte, Criado et al. (2014) en un trabajo sobre cómo mejorar la educación científica de primaria en España compararon el currículo de ciencias español en educación primaria (enseñanzas mínimas nacionales) con los de Inglaterra y EE. UU., e hicieron propuestas de mejora mediante una revisión general por un panel de expertos en cada una de las materias de ciencias y su didáctica para lograr una mejor articulación de los contenidos con el resto de diferentes elementos curriculares. Así mismo, Riaño y Palomino (2015) en Colombia, con el propósito de adaptar y validar un cuestionario para seleccionar laboratorios virtuales (LV) utilizaron la metodología Delphi, identificando los criterios que determinan la pertinencia de los LV en la educación superior. Para el efecto crearon dos grupos de trabajo cooperativo y partieron de un cuestionario estructurado al que se le fueron adicionando o modificando las variables acorde con las diferentes opiniones de los expertos durante tres rondas sucesivas. En tanto, García-Martínez et al. (2012) en México, conformaron un sistema de indicadores a través de revisión de literatura especializada, colocando su estimación a consideración de expertos, con el fin que los programas educativos a distancia se autoevaluaran.

En el deporte, Blasco-Mira et al. (2010), trabajaron en validar mediante el Método Delphi las experiencias e interés hacia las actividades acuáticas con especial atención al Windsurf, obedeciendo al interés expresado por los responsables de la gestión municipal en materia de ocio,

recreación y deporte para desarrollar un plan de dinamización turística municipal a través de eventos deportivos de la población costera de Santa Pola (Alicante).

Para el sector de Investigación comunitaria, Martínez-Piñeiro (2003) utilizó la técnica Delphi como una estrategia de consulta en la evaluación de programas sociales principalmente en torno a la evaluación de los cursos de formación ocupacional de la comunidad gallega. Mientras que Vernal (2015), aplicó cuestionarios Delphi para indagar sobre la importancia de divulgar las potencialidades de la región de Antofagasta en Chile para su desarrollo cultural-económico, concluyendo que son muchos los aportes que podrían realizar, por ejemplo, los medios de comunicación, en cuanto a las desigualdades existentes en materia de alfabetización científica.

En la industria se puede mencionar el trabajo realizado por Camisón-Zornoza (2007), quien hizo dos investigaciones paralelas para hacer un diagnóstico estratégico de la empresa Española, utilizando en una de ellas la metodología Delphi con la cual, entre otras cosas, devela el proceso de cambio en los retos y factores claves de éxito, y las rivalidades exteriores. Igualmente, López-Moreda et al. (2012), aplicaron el método de Delphi en empresas hoteleras, lo que les permitió proponer un procedimiento que incluye indicadores, herramientas y recomendaciones prácticas para planificar e implementar un programa de monitoreo que permite dar seguimiento a los aspectos ambientales presentes en las operaciones de estas entidades.

De su lado, en el sector transporte, Guilarte et al. (2005), presentan la caracterización de los ecosistemas afectados por la contaminación derivada de las operaciones de descarga de los buques-tanques, la recepción y distribución de productos derivados del crudo de petróleo en el área de almacenamiento, el movimiento de insumos como el carbón antracita, amoniaco y azufre, la carga de lotes de minerales así como el mantenimiento de los tanques que conducen al vertimiento directo de hidrocarburos, en el Puerto Moa-Holguín (Cuba), utilizando herramientas de evaluación de criterios de expertos mediante la metodología Delphi. Del mismo modo, Awad-Núñez et al. (2015) en España, utilizaron la metodología Delphi con el propósito de evaluar los puertos secos como una oportunidad de fortalecer las soluciones intermodales que integran una cadena de transporte sostenible, enmarcadas dentro de la política de transporte de la Unión Europea, logrando obtener

mediante el estudio que los factores con importancia son los relacionados con la accesibilidad territorial.

En la Agroindustria, Suárez et al. (2013), utilizaron la metodología Delphi para establecer las bases para la zonificación agroecológica del cacao (*Theobroma cacao*, Lin) en Cuba. Zambrano et al. (2015), analizaron a mediano y largo plazo, los posibles escenarios futuros generados por las regulaciones que intervienen en el avance tecnológico de los bioinsumos en Colombia, a través de la aplicación de una encuesta Delphi. Mientras que Vargas-Hernández et al. (2015), en Costa Rica, analizaron la cadena de procesos y subprocesos de los sistemas de producción de hortalizas para consumo fresco, con el fin de establecer el grado de cumplimiento de las medidas de prevención de riesgos de inocuidad en hortalizas de consumo fresco.

Para las Ciencias de la salud se pueden mencionar los trabajos de Brink (1993) quien seleccionó la técnica de Delphi como el método más apropiado para establecer si existía un acuerdo entre los líderes de enfermería de varias universidades en Sudáfrica, algunos estados autónomos e independientes de África meridional y Namibia, para interpretar aspectos y criterios relacionados con el examen de trabajos científicos cortos, disertaciones y tesis. Thomassen et al. (2011), quienes exploraron experiencias desde el desarrollo hasta la implementación de listas de verificación en un grupo de organizaciones no médicas de alta confiabilidad (HROs), basados en entrevistas con el método Delphi. Y, Cuesta-Gómez (2013) quien utilizó la técnica Delphi en el proceso de validación de una Guía de Indicadores de Calidad de Vida para centros que prestan apoyo social y educativo a personas con Trastornos del Espectro del Autismo.

En el área de las ciencias químicas, Gonçalves-Reis et al. (2010), en vista de la dificultad de determinar los puntos de inflexión en una curva de titulación potenciométrica de ácidos húmicos por métodos tradicionales, desarrollaron un programa multiparamétrico para el establecimiento de datos de valoración potenciométrica a través del método Delphi, obteniendo curvas de valoración potenciométrica ajustadas que se superponen casi en su totalidad a las curvas experimentales, además, permite una mayor versatilidad y facilidad de operación y una interacción más amigable con el usuario.

En lo relacionado con indicadores de calidad ambiental, Souza y Libânio (2009), propusieron un Índice de Calidad del Agua (IQAB) para afluentes de las plantas de tratamiento de fuentes superficiales en Brasil, utilizando la metodología Delphi. Por su parte, Santiago y Dias (2012), utilizaron el método Delphi para la validación de una matriz de indicadores de sostenibilidad para la gestión de residuos sólidos urbanos, dicha matriz se puede utilizar como una herramienta para la gestión de la evaluación y planificación residuos sólidos en las ciudades.

Desde 1970 muchos trabajos que tienen como finalidad la obtención de índices de calidad de aguas se han basado en la metodología Delphi, como el "The National Sanitation Foundation" (NSF), realizando el índice de calidad de agua (WQI o ICA), uno de los más utilizados por agencias e instituciones en los Estados Unidos.

3.2. MÉTODO DELPHI

El Método de Delphi, desarrollado principalmente por Dalkey y Helmer (1963) en la Rand Corporation, es un método ampliamente utilizado y aceptado para lograr la convergencia de opiniones sobre el conocimiento del mundo real, solicitado por expertos en ciertas áreas temáticas sobre la lógica de que "dos cabezas piensan mejor que una" (Dalkey, 1972, p.15), es decir, la opinión de varios expertos sobre un tema específico ofrece mayor confianza en los resultados obtenidos.

El método Delphi tiene sus orígenes en el oráculo de Delfos, dedicado al dios Apolo, popular recinto en la antigua Grecia al cual acudían los ciudadanos para conocer sobre cuestiones inquietantes, la principal, el futuro. De ahí que se vincule con una visión prospectiva que descansa en la experiencia e incluso en la intuición de expertos (García-Martínez et al., 2012, p 205).

Teniendo en cuenta el propósito de la investigación, la metodología Delphi se puede plantear de diferentes formas. Según Landeta (2006), el método Delphi clásico se vincula a asuntos técnicos y busca el consenso entre un grupo homogéneo de expertos para conseguir la predicción más real posible; el Delphi político está dirigido al análisis de situaciones sociales y sus objetivos principales son asegurar que todas las alternativas posibles se han puesto en el cuestionario para su

consideración y estimar el impacto y las consecuencias de una opción particular; y, el Delphi para la toma de decisiones se caracteriza por la forma en que se constituye el panel de expertos, teniendo en cuenta su posición en la estructura jerárquica de la institución; en todo caso, este método posibilita formar un grupo de expertos teniendo en cuenta principalmente su motivación por el proceso y su nivel de pericia, ya que no pretende trabajar con muestras representativas.

Hsu y Sandford (2007), indican que la técnica está diseñada como un proceso de comunicación grupal que tiene como objetivo lograr la coincidencia entre opiniones sobre un tema particular, siendo adecuada para la construcción de consenso mediante el uso de una serie de cuestionarios, utilizando múltiples iteraciones para recopilar datos del panel de expertos. La selección de sujetos, los plazos para llevar a cabo y completar el estudio, la posibilidad de tasas de respuesta bajas y la retroalimentación no intencional del grupo de encuestados son áreas que deben ser consideradas al diseñar e implementar un estudio Delphi.

El grupo de expertos debate de manera anónima (con el fin de evitar los efectos de líderes) la importancia y pertinencia de los criterios seleccionados, obteniéndose el consenso por un procedimiento matemático de agregación de juicios individuales obtenidos a través de los cuestionarios (Riaño y Palomino, 2015, p 131).

Delbecq et al., (1975) mencionan que la técnica Delphi puede utilizarse para lograr los siguientes objetivos:

- Determinar o desarrollar una serie de posibles alternativas de programas;
- Explorar o exponer supuestos o información subyacentes que conduzcan a juicios diferentes;
- Buscar información que pueda generar un consenso por parte del grupo encuestado;
- Relacionar juicios informados sobre un tema que abarca una amplia gama de disciplinas, y;
- Educar al grupo encuestado sobre los aspectos diversos e interrelacionados del tema (p 11).

Linstone y Turoff (1975), detallan las fases a desarrollar una vez formado el grupo de expertos:

- *Envío de un cuestionario al panel de expertos a distancia.* El panel de expertos aporta sus respuestas y las devuelve al investigador.
- *Síntesis de las respuestas.* El investigador sistematiza y categoriza las respuestas recibidas devolviendo posteriormente la información al grupo, aquellas con menor nivel de consenso se especifican en el reenvío para dar oportunidad al panel de expertos de revisarlas, y a cada experto en particular se le ofrece la posibilidad de revisar sus aportaciones.
- *Nuevo cuestionario.* Elaboración de un nuevo cuestionario, donde se recogen las aportaciones recibidas que tienen mayor nivel de acuerdo. Después de cada una de las rondas o envíos, cada experto es informado acerca de si sus respuestas coinciden o no con la mayoría, y en el caso de que estas difieran en gran medida de la opinión general, se le solicita que explicita las razones de su disenso.
- *Informe final.* Documento que recoge tres tipos de datos: temas de consenso, jerarquización de los mismos y argumentos a favor y en contra, que permiten tomar las oportunas decisiones.

Finalmente, la utilización del método Delphi supone ciertas ventajas, entre las que se encuentran contar con personal con amplia experiencia entre los encuestados y su buen juicio a la hora de lanzar argumentos sobre el tema en cuestión, además de evitar las limitaciones derivadas de la interacción entre los participantes por la influencia de participantes dominantes y la presión del grupo hacia la conformidad, pero también presume desventajas, relacionadas con la dificultad de medir el grado de experticia de los sujetos y la manipulación por parte del conductor del grupo para procesar los resultados, no obstante, estas se pueden evitar realizando una selección rigurosa de los expertos y con el procesamiento objetivo de las respuestas.

3.3. ÍNDICES DE CALIDAD DE AGUAS - ICA

Según Valcarcel-Rojas et al. (2009), un índice de calidad de agua, consiste básicamente en una expresión simple de una combinación más o menos compleja de un número de parámetros que caracterizan la calidad del agua; su ventaja radica en que puede ser más fácilmente interpretado que una lista de valores numéricos.

Estos mismos autores plantean que los usuarios de esta información pueden estar estrechamente relacionados, como: biólogos, ingenieros sanitarios y ambientales, administradores de recursos hídricos; o en su defecto personas apenas familiarizados con la misma, como el caso de usuarios, abogados y público en general; sin embargo, unos y otros podrán rápidamente tener una idea clara de la situación que expresa el índice (contaminación excesiva, media o inexistente, entre otras) (p.1).

Generalmente, la formulación de un Índice de Calidad de Agua tiene como aspecto común, su cálculo sobre la base de los siguientes 3 pasos consecutivos (Valcarcel-Rojas et al., 2009, p. 2):

- Selección de Parámetros (usualmente entre 2 y 73 variables).
- Determinación de los valores para cada parámetro: subíndices.
- Determinación del Índice por la agregación de los subíndices. La determinación del Índice de Calidad de Agua se da por la integración de los subíndices que lo conforman.

Guillén et al. (2012), indican que los índices de calidad de agua (ICA) manifiestan el grado de contaminación del agua a la fecha del muestreo y está expresado como porcentaje del agua pura; así, agua altamente contaminada tendrá un cercano o igual a 0%, en tanto que el agua en excelentes condiciones tendrá un valor de este índice cercano al 100%.

Las aguas clasificadas como excelentes y buenas pueden soportar una alta diversidad de vida acuática y son apropiadas para todo tipo de recreación y para la toma de agua para potabilización. Las de características medias o promedio generalmente poseen menos diversidad de organismos acuáticos y frecuentemente manifiestan un crecimiento anormal de algas. Aquellas aguas que caen dentro de la clasificación de regular pueden soportar una baja diversidad de vida acuática y probablemente experimenten problemas de contaminación. Las aguas dentro de la categoría de pobre solo pueden soportar un número limitado de organismos acuáticos, pudiendo esperarse que tengan grandes problemas de calidad. Normalmente no se consideran aceptables para actividades que involucren el contacto directo con el agua (Valcarcel-Rojas et al., 2009, p. 2).

De acuerdo con Ott (1978), los posibles usos de los índices de calidad de agua son los siguientes:

- *Manejo del recurso:* pueden proveer información a personas que toman decisiones sobre las prioridades del recurso.
- *Clasificación de Áreas:* para comparar el estado del recurso en diferentes áreas geográficas.
- *Aplicación de normatividad:* permite 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, pueden mostrar si la calidad ambiental está empeorando o mejorando.
- *Información pública:* los índices pueden tener utilidad en acciones de concientización y educación ambiental.
- *Investigación Científica:* simplificar una gran cantidad de datos de manera que se pueda analizar fácilmente y proporcionar una visión de los fenómenos medioambientales.

De acuerdo con Kumar et al. (2013), se puede concluir que el ICA es un número adimensional que combina múltiples factores de calidad del agua en un solo número por valores normalizados de las curvas ajustadas.

3.4. GENERALIDADES DE VARIABLES UTILIZADAS EN LA EVALUACIÓN DE CALIDAD DE AGUAS

A continuación, se realiza una breve descripción de algunas variables utilizadas frecuentemente en diferentes índices de contaminación acuática.

Sólidos Suspendidos Totales.

De la diferencia entre los sólidos totales de una muestra de agua no filtrada y los sólidos de la muestra filtrada resultan los sólidos suspendidos totales.

Las aguas crudas naturales contienen tres tipos de sólidos no sedimentables: suspendidos, coloidales y disueltos. Los sólidos suspendidos son transportados gracias a la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua; los más pequeños (menos de 0.01 mm) no sedimentan rápidamente y se consideran sólidos no sedimentables, y los más grandes (mayores de 0.01 mm) son generalmente sedimentables (IDEAM, 2007a, p 2).

Los sólidos coloidales consisten en limo fino, bacterias, partículas causantes de color, virus, etc., los cuales no sedimentan sino después de periodos razonables, y su efecto global se traduce en el color y la turbiedad de aguas sedimentadas sin coagulación, mientras que los sólidos disueltos, materia orgánica e inorgánica, son invisibles por separado, no son sedimentables y globalmente causan diferentes problemas de olor, sabor, color y salud, a menos que sean precipitados y removidos mediante métodos físicos y químicos (IDEAM, 2007a, p 2).

DBO₅

La oxidación microbiana o mineralización de la materia orgánica es una de las principales reacciones que ocurren en los cuerpos naturales de agua y constituye una de las demandas de oxígeno, ejercida por los microorganismos heterotróficos, que hay que cuantificar (IDEAM, 2007b, p 2).

Uno de los ensayos más importantes para determinar la concentración de la materia orgánica de aguas residuales es el ensayo de DBO a cinco días. Esencialmente, la DBO es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable, en condiciones aeróbicas, en un periodo de cinco días a 20 °C (IDEAM, 2007b, p 2).

DQO

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo (IDEAM, 2007c, p 2).

Durante la determinación de la DQO, la materia orgánica se convierte en dióxido de carbono y agua, sin importar que tan asimilable biológicamente sea la sustancia, por ejemplo, la glucosa y la lignina son oxidadas completamente. Como resultado, los valores de la DQO son mayores que los de la DBO₅ y la diferencia puede ser mucho mayor cuando se presentan cantidades significativas de materia orgánica resistente o refractaria, como ocurre en el caso de los desechos de pulpa de madera, a causa de su alto contenido en lignina (Roldan y Ramírez, 2008, p 194).

Oxígeno Disuelto.

El oxígeno constituye uno de los elementos de mayor importancia en los ecosistemas acuáticos, ya que su presencia y concentración definen el tipo de especies que ocurren de acuerdo con sus tolerancias y rangos de adaptación, y por ende establecen toda la estructura y funcionamiento biótico de estos sistemas (Ramírez y Viña, 1998, p 17).

Las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) en aguas naturales dependen de las características fisicoquímicas y la actividad bioquímica de los organismos en los cuerpos de agua. El análisis del OD es clave en el control de la contaminación en las aguas naturales y en los procesos de tratamiento de las aguas residuales industriales o domésticas (IDEAM, 2004, p 2).

pH.

El pH indica la concentración de hidrogeniones (H^+) en el agua. La medición del pH es uno de las actividades más importantes y de mayor frecuencia en las pruebas químicas del agua. El rango de pH para aguas naturales oscila entre 4 y 9 y la mayoría son ligeramente básicas debido a la presencia de bicarbonatos y carbonatos de metales alcalinos y alcalinotérreos. El pH del agua pura a 25°C es de 7, neutro (Invemar, 2003, p 22).

Las variaciones del pH conducen a cambios en el carbono presente. Así: en el rango de 4,5 a 8 se reduce el CO_2 e incrementan los bicarbonatos, en pH mayores a 8 descienden los bicarbonatos y aumentan los carbonatos (Ramírez y Viña, 1998, p 22).

En medios oligotróficos el carbono tiende a mantenerse como bicarbonato, pero en sistemas eutróficos la reacción puede dirigirse a los extremos, produciendo cambios drásticos en el pH en el ciclo día-noche: durante el día el dióxido de carbono presente en el agua es consumido al incorporarse a los organismos autótrofos en el proceso de fotosíntesis, lo que conduce a incrementos en el pH que a su vez determinan aumento en las concentraciones de bicarbonatos y carbonatos, este proceso se invierte en la noche (Ramírez y Viña, 1998, p 22).

Conductividad.

Según Sierra-Ramírez (2011, p 60), la conductividad es un indicativo de las sales disueltas en el agua y mide la cantidad de iones especialmente de Ca, Mg, Na, P, bicarbonatos, cloruros y sulfatos, siendo una medida indirecta de los sólidos disueltos, en general se puede decir que las aguas que tienen altas concentraciones de conductividad son corrosivas.

Los valores habituales de conductividad son menores de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en aguas de bajo contenido iónico y desde 500 hasta 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para las fuertemente mineralizadas (Roldan y Ramírez, 2008, p 225).

Temperatura.

La temperatura es un factor obvio para el desarrollo de la mayoría de los organismos. Temperaturas cercanas al punto de congelación son tan limitantes para la vida en el agua como también lo son las aguas termales, algunas de las cuales pueden tener 45°C o más (Roldan y Ramírez, 2008, p 292).

En el trópico, la temperatura no es un factor limitante para la mayoría de las especies, a no ser que se trate de algunas termales o lagos en partes muy altas de las montañas donde esta variable permanece cerca al punto de congelación (Roldan y Ramírez, 2008, p 293).

Dureza.

Se denomina dureza a la propiedad que tienen ciertas aguas de cortar el jabón, es decir, requieren grandes cantidades de jabón para producir espuma; se ocasiona por la presencia de cualquier catión bivalente en el agua, principalmente Ca^{2+} y Mg^{2+} , ingresando al agua en el proceso natural de disolución de las formas rocosas presentes en el suelo (Sierra-Ramírez, 2011, p 64).

Se clasifica básicamente en dureza carbonácea (DC), referida a menudo como dureza del bicarbonato o dureza temporal, se presenta en el agua cuando los iones de Ca^{2+} y Mg^{2+} se combinan con la alcalinidad natural, y dureza no carbonácea (DNC), conocida comúnmente como

dureza permanente, ocasionada por la presencia de sulfatos, cloruros o nitratos de Ca^{2+} y Mg^{2+} (Sierra-Ramírez, 2011, p 64-65).

Fósforo Total.

El fósforo es un elemento esencial en el crecimiento de plantas y animales y es considerado como uno de los nutrientes que controlan el crecimiento de algas, pero un exceso de fósforo produce un desarrollo excesivo de plantas, el cual es causa de condiciones inadecuadas para ciertos usos beneficiosos del agua (Baena, 2012, p 180).

La clasificación de los cuerpos de agua está directamente relacionada con la concentración de fósforo, los oligotróficos (bajas concentraciones de fósforo) son nutricionalmente pobres y biológicamente improductivos, con aguas claras y mínima producción vegetal y pesquera; el incremento nutricional conduce a cuerpos de agua mesotróficos (medianas concentraciones de fósforo) con crecimiento de plantas, aguas verdosas o amarillas y con mayor cantidad de peces, y por último están los eutróficos (altas concentraciones de fósforo), nutricionalmente ricos, con crecimiento prolífico de algas, plantas y peces, y baja calidad de agua para recreación y otros usos (Baena, 2012, p 181).

Grasas y Aceites.

Las grasas son compuestos orgánicos que se forman de carbono, hidrógeno y oxígeno, siendo la fuente más concentrada de energía en los alimentos; pertenecen al grupo de las sustancias llamadas lípidos y vienen en forma líquida o sólida, siendo combinaciones de ácidos grasos saturados y no saturados (Clesceri et al., 1992, p 76).

La presencia de grasas y aceites en el agua no sólo provoca problemas en el tratamiento de éstas sino que también da lugar a la contaminación del suelo y los cuerpos de agua donde son descargadas, de ellas, las que son altamente estables e inmiscibles con el agua, proceden en su mayoría de desperdicios alimenticios, a excepción de los aceites minerales que proceden de otras actividades. Al ser inmiscibles con el agua, van a permanecer en la superficie dando lugar a la

aparición de natas y espumas que entorpecen cualquier tipo de tratamiento, biológico o físico-químico (Kemmer y McCallion, 1999, p 6).

Alcalinidad.

La alcalinidad en el agua es entendida como la capacidad que tiene el agua para neutralizar ácidos; puede considerarse como la presencia de sustancias básicas en el agua, principalmente sales de ácidos débiles o bases fuertes (sustancias caracterizadas por el radical OH⁻, por ejemplo la soda cáustica NaOH); se reconoce por la presencia de iones, [OH⁻], [CO₃²⁻] y [HCO₃⁻] (Sierra-Ramírez, 2011, p 61-62).

En las aguas naturales la alcalinidad se debe a la presencia de iones [CO₃²⁻] y [HCO₃⁻] los cuales ingresan al agua debido a la acción del CO₂ sobre los materiales naturales del suelo (Sierra-Ramírez, 2011, p 62).

Sulfatos.

La forma más común como se encuentra el azufre en el agua es SO₄²⁻ (ion sulfato). El sulfato entra al agua con la lluvia y por disolución de las rocas que contengan compuestos como CaSO₄ y FeS₂ (pirita). Una fuente importante de azufre es la actividad volcánica. El hombre actualmente aporta a la atmosfera una cantidad de SO₂ dos a cuatro veces la actividad volcánica, a través de la actividad industrial, principalmente por la combustión del carbón (Roldan y Ramírez, 2008, p 234).

Nitratos.

La concentración de nitrato en aguas superficiales normalmente es baja (0-18 mg/L), pero puede llegar a alcanzar elevados niveles como consecuencia de las prácticas agrícolas o residuos urbanos y ganaderos (especialmente granjas), o por la aportación de aguas subterráneas ricas en nitrato (éstas con concentraciones cada vez más elevadas) (Rodríguez et al., 2012, p 111).

Plomo.

El contenido de plomo en aguas no contaminadas varía entre 1 y 10 µg/L. En la actualidad la mayor parte del plomo que se encuentra en las aguas proviene de las emisiones de vehículos automotores, estas llegan a la atmósfera y, de ahí se precipitan a los cuerpos acuáticos (Benítez y Varón, 2012, p 157).

Mercurio.

El mercurio es un elemento constitutivo de la tierra, representa el $8,5 \times 10^{-6}\%$ en peso de la corteza. Raramente se encuentra libre en la naturaleza, en pequeñas gotas junto al cinabrio (HgS) su principal mineral, o junto a otros de menor abundancia como la livinstonita (HgS.2Sb₂S₃), el calomelano (HgCl₂), coloradoita (HgTe) y tiemannita (HgSe); es un metal líquido a temperatura ambiente, insoluble en agua y soluble en ácido nítrico; cuando aumenta su temperatura produce vapores tóxicos y corrosivos, más pesados que el aire (Orozco, 2004 citado en Benítez y Varón, 2012, p 153-154).

Debido al comportamiento aleatorio de este metal, algunas veces no es claro si las altas concentraciones de mercurio, encontradas en un determinado ecosistema, son por causas naturales o por factores antropogénicos (Díaz-Arriaga, 2014, p 950).

Clorofila-a.

La Clorofila-a es un pigmento fotosintético presente en todas las especies de fitoplancton, incluyendo organismos eucarióticos (algas) y procariotas (cianobacterias) y, por lo tanto, es una variable fiable y comúnmente utilizada para la biomasa total del fitoplancton (Gregor y Maršálek, 2004, p 517). Es un indicador indirecto de la abundancia de microalgas en la columna de agua, las cuales incrementan su densidad a medida que aumentan las concentraciones de nutrientes disponibles.

Abundancia de Fitoplancton.

El número de individuos de determinadas especies varía de acuerdo a las condiciones ambientales presentes. Estas condiciones determinan su densidad, beneficiando o afectando su proliferación. El

fitoplancton o plancton vegetal, juega un papel muy importante como base de las redes tróficas y como indicadores de la calidad del agua (Oliva-Martínez et al., 2014, p 54).

Diversidad de zooplancton y Macroinvertebrados bentónicos.

La diversidad se entiende como el número de especies o riqueza de un sistema, aunque generalmente se refiere a un taxa o a una comunidad; de este modo se habla por ejemplo de la diversidad de moluscos, insectos o peces en una ciénaga, la de macrozoobentos o el fitoplancton, en lugar de la diversidad de la ciénaga propiamente (Ramírez y Viña, 1998, p 39).

Los índices de diversidad son descriptores de la estructura de un taxón o comunidad: cuantas especies hay y en qué proporción se ensamblan, así que cualquier alteración en ellos (incrementos o decrementos, indican cambios en las condiciones ambientales, o procesos biológicos relevantes como por ejemplo sucesión (Ramírez y Viña, 1998, p 39).

Porcentaje de cobertura de las macrófitas en el espejo de agua.

Uno de los grupos de organismos más característicos de los planos de inundación son las macrófitas, las cuales participan en diversos procesos del ecosistema como biomineralización y reciclaje de nutrientes (Villabona-González, 2011, p 853). La cobertura total de estas sobre el espejo de agua puede ser un indicador del estado trófico del sistema.

Peces (relación carnívoros/omnívoros).

Karr (1981, citado por Velázquez-Velázquez y Vega-Cendejas, 2004, p 14) encontró que un sitio declina en calidad a medida que la proporción de omnívoros se incrementa; la dominancia de estas especies crece presumiblemente como resultado de la degradación de la base alimentaria, especialmente de los invertebrados, trayendo como consecuencia que las especies oportunistas aumenten en número y proporción.

Este mismo autor estableció que muestras con menos de 20% de individuos omnívoros son buenas, mientras que aquellos sitios con más de 45% de omnívoros en la muestra están ampliamente degradados. Otro criterio importante es la proporción de peces insectívoros o de consumidores de invertebrados en general (invertívoros), pues existe una fuerte correlación negativa entre la abundancia de peces invertívoros y la de omnívoros (Velázquez-Velázquez y Vega-Cendejas, 2004, p 14).

La presencia de carnívoros es otro parámetro indicador de la calidad de un ambiente. Poblaciones viables y saludables de estas especies (carnívoros tope) indican una comunidad saludable y diversificada; a medida que la calidad del agua declina, las poblaciones de esas especies disminuyen o desaparecen. Una proporción mayor de 5% de estos individuos indica ecosistemas saludables; mientras que muestras con menos de 1% de estos organismos indican condiciones de mala salud del ecosistema (Velázquez-Velázquez y Vega-Cendejas, 2004, p 14).

Coliformes Totales y Fecales.

Mientras que la presencia de unos pocos microorganismos no patógenos en el agua puede ser tolerable, la presencia de organismos indicadores específicos puede indicar que esa agua puede estar contaminada con patógenos; estos, están generalmente asociados con el tracto intestinal; su presencia indica contaminación fecal, y de ellos, los coliformes son los más ampliamente utilizados como indicadores (Madigan et al., 2003, p 927).

Los coliformes fecales son contaminantes comunes del tracto intestinal tanto del hombre como de los animales de sangre caliente; están presentes en el tracto intestinal en grandes proporciones, permanecen por más tiempo en el agua que las bacterias patógenas y se comportan de igual manera que los patógenos en los sistemas de desinfección. En la inactivación de los coliformes fecales se deben tener en cuenta factores ambientales como, la humedad, temperatura, luz ultravioleta, pH, ya que estos microorganismos al no encontrarse en un ambiente favorable y al no obtener los nutrientes necesarios para su crecimiento se hacen más susceptibles a la inactivación (Fuccz-Gamboa, 2007, p 113).

3.5. CIÉNAGAS

Las ciénagas son sistemas poco profundos que usualmente no sobrepasan los 5 m de profundidad (Ramírez y Vina, 1998, p. 154), que desempeñan un papel ecológico, ambiental y socioeconómico relevante gracias al amortiguamiento de las crecientes de los grandes ríos, a su alta productividad y diversidad biótica, al construirse en zonas de resguardo de las comunidades ícticas y a las actividades humanas de transporte, recreación, explotación o riego (Ramírez y Vina, 1998, p. 155).

Ramírez y Vina (1998) mencionan que algunas de las características de las ciénagas son las siguientes:

- Durante la temporada de lluvias se producen incrementos en el nivel de los ríos que encuentran en las ciénagas de la cuenca baja una vía de flujo fuera del cauce principal. Gracias a ello, estos sistemas amortiguan las crecientes de invierno y con ello evitan o reducen las inundaciones en sectores donde el río se encuentra colmatado o simplemente donde el caudal rebasa sus márgenes.
- Este proceso de inundación ocurre con alto dinamismo o rapidez, situación que conduce al enturbiamiento de las ciénagas, a la desaparición o atenuación de los gradientes espaciales, a la dilución de sólidos disueltos y a un menor desarrollo fitoplanctónico. En algunas ciénagas la inundación ocurre de manera tan contundente, que se incrementa el volumen de sus aguas en más de un 300% en una o dos semanas, alterando completamente las condiciones fisicoquímicas y bióticas presentes.
- Las altas concentraciones de sólidos suspendidos que arrastran algunos ríos, producen una rápida pérdida de profundidad, hecho que malogra su capacidad de amortiguación.
- Una vez estabilizada la entrada de aguas los sólidos inician su sedimentación paulatina, situación que induce el desarrollo explosivo de fitoplancton en virtud de la mayor cantidad de luz presente y el enriquecimiento con material orgánico e inorgánico ocurrido durante la inundación.
- Al desaparecer la incidencia del río principal, se expresan múltiples condiciones locales a causa de los tributarios de menor caudal (caños, quebradas), cuyas características están ampliamente afectadas por los diferentes tipos de actividad humana sobre la cuenca.

- Entrada la temporada de sequía, el proceso de inundación se invierte produciendo la salida del agua de la ciénaga al río, lo que se conoce como estiaje.
- Durante la época de aguas bajas, las concentraciones de iones se incrementan y mas especialmente en aquellos sistemas con influencia antrópica; esto significa mayores concentraciones de nutrientes y variaciones mas drásticas en el oxígeno acorde no solamente con el ciclo diario, sino con los procesos de eutrofización y de descomposición de las macrófitas.

4 METODOLOGÍA

4.1. CUERPOS DE AGUA DE APLICACIÓN

El área de estudio de este trabajo comprende las ciénagas ubicadas en la parte baja del río Magdalena en el departamento del Atlántico (Figura 1), el cual se encuentra ubicado al norte de Colombia, con costas sobre el mar Caribe.

El río Magdalena es la arteria fluvial más importante del país y la principal fuente de agua dulce de la región. Cuenta con una zona inundable formada por un complejo de ciénagas, interconectadas por caños y zonas anegadizas que son de vital importancia para el sostenimiento de la diversidad biológica de esta zona del río.

El complejo de cuerpos de agua lénticos asociados al río Magdalena de interés para este trabajo son los siguientes:

- Ciénaga de Mesolandia o La Bahía.
- Ciénaga de Malambo.
- Ciénaga El Convento.
- Ciénaga de Sabanagrande.
- Ciénaga de Santo Tomás.
- Complejo de Ciénagas de Palmar de Varela (Ciénagas: Paraíso, Larga, La Luisa y Manatí).

Todos estos cuerpos de agua actúan como vasos receptores del río, funcionando como amortiguadoras del nivel del agua en épocas de alto caudal (épocas de lluvias).

Estas ciénagas tienen la particularidad de haber sido sometidas a una serie de obras hidráulicas mediante la ejecución del proyecto “Regulación y Manejo del Sistema de Ciénagas de las Poblaciones de Sabanagrande, Santo Tomás y Palmar de Varela” con el objeto de confinar y regular sus aguas para aprovechar y optimizar la explotación hídrica del sistema, logrando la mitigación de las inundaciones en sectores vulnerables de las poblaciones aledañas. Igualmente, se generaron

impactos negativos al acrecentar los conflictos entre los pescadores, ganaderos y agricultores con respecto al manejo de las compuertas debido a los intereses particulares de cada sector productivo; además se afectaron las poblaciones de peces debido a que la regulación hídrica no se hace de forma natural (CRA, 2007).



Figura 1. Ubicación geográfica de las ciénagas que forman parte de la zona de amortiguación del río Magdalena en el departamento del Atlántico.

4.2. MÉTODO DELPHI

Para la selección y asignación de pesos de las variables en la construcción del índice de calidad de agua - ICA_{ciénagas}, se utilizó la metodología Delphi, de la “Rand Corporation’s”. En el desarrollo del trabajo se procedió de la siguiente manera:

4.2.1. Selección de expertos.

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.

Teniendo en cuenta que la validez de la información a obtener depende de la calidad profesional de los expertos a seleccionar, se escogieron personas que garantizaran experiencia y amplio conocimiento en el tema. En este sentido, para la selección de los expertos se tuvo en cuenta profesionales pertenecientes a universidades, empresas de consultoría ambiental, centros de investigación e instituciones gubernamentales encargadas de la administración del medio ambiente y los recursos naturales renovables del departamento del Atlántico (Colombia) que tuviesen participación en estudios ecológicos en los ecosistemas cenagosos de la zona inundable del río Magdalena en este departamento.

4.2.2. Tamaño de la muestra.

Aunque algunos estudios utilizan una cantidad amplia de expertos, no hay literatura que precise el número de ellos que se necesitan para un la aplicación de la metodología Delphi. Ludwig (1994) señala que el número de expertos que se utiliza en una estudio Delphi “se determina generalmente por el número de personas requerido para constituir una agrupación representativa de juicios y la capacidad de procesamiento de la información del equipo de investigación” (p. 52).

Autores como Delbecq et al. (1975) sugieren que de diez a quince sujetos podían bastar para que el Delphi sea homogéneo, y Arrastarraga (2005) citado por García-Martínez et al. (2012, p. 207), considera que no hay forma de determinar el número óptimo de expertos para participar en una encuesta Delphi, sin embargo, parece necesario un mínimo de 7, no siendo aconsejable recurrir a

más de 30, es decir, este método no requiere de una participación nutrida, sino calificada. De la misma manera, Reguant-Álvarez y Torrado-Fonseca (2016, p 92) mencionan que el número de expertos suele oscilar entre 6 y 30 en función del problema, aunque no es un condicionante porque siempre tiene que primar la calidad frente a la cantidad.

Para el desarrollo de este trabajo se logró contactar 15 expertos calificados en el tema a estudiar, recibiendo apoyo favorable de 12 de ellos, de los cuales solo 7 terminaron con el proceso de consulta, es decir, el tamaño de la muestra para esta investigación fue de 7 expertos.

4.2.3. Consultas.

El medio de contacto con los expertos fue el correo electrónico. En el primer cuestionario (Consulta No. 1) se les presentó un total de 54 variables (Tabla 1), entre físicas, químicas y biológicas, que fueron seleccionadas de una lista de chequeo de variables indicadoras de algún tipo de contaminación en ecosistemas acuáticos, descartando aquellas que se consideraron con efectos ambientales poco significativos en esta zona y eligiendo aquellas con mayor probabilidad de impacto.

Se les pidió a los expertos que seleccionaran las variables de mayor importancia para la evaluación de la calidad del agua de las ciénagas que forman parte de la zona inundable del río Magdalena en el departamento del Atlántico, clasificándolas en tres categorías, de acuerdo a si el parámetro debía ser: “No incluido”, “Indeciso” o “Incluido”, de igual manera que se aplicó en la obtención del índice de calidad de agua “Water Quality Index” (WQI) por la National Sanitation Foundation (NSF) de los Estados Unidos en los años 70 (Ball y Church, 1980). Así mismo, se les dio la opción de agregar variables que no se encontraran dentro del listado y que consideraran pertinentes, clasificándolas al igual que las demás (Anexo 1).

Tabla 1. Variables físicas, químicas y biológicas presentadas en la primera encuesta para definir las de mayor importancia en la evaluación de la calidad del agua de las ciénagas que forman parte de la zona inundable del río Magdalena en el departamento del Atlántico (Colombia).

Variables Físicas, Químicas y Biológicas		
Conductividad	Sulfatos	Clorofila a
Temperatura	Nitratos	Diversidad de fitoplancton
Turbidez	Nitritos	Riqueza de fitoplancton
Transparencia	Amonio	Abundancia de fitoplancton
Sólidos suspendidos	Cobre	Diversidad de perifiton
Sólidos disueltos	Plomo	Riqueza de perifiton
% de saturación de O ₂	Aluminio	Abundancia de perifiton
Alcalinidad	Arsénico	Diversidad de zooplancton
Dureza	Cadmio	Riqueza de zooplancton
pH	Hierro	Abundancia de zooplancton
DBO ₅	Mercurio	Porcentaje de cobertura de las macrófitas en el espejo de agua
DQO	Níquel	BMWP/Col (Macroinvertebrados bentónicos)
Potasio	Cromo	Diversidad de Macroinvertebrados bentónicos
Nitrógeno total	Manganeso	Riqueza de Macroinvertebrados bentónicos
Fósforo total	Bario	Abundancia de Macroinvertebrados bentónicos
Relación N/P	Zinc	Diversidad de peces
Carbonatos	Coliformes totales	Riqueza de peces
Cloruros	Coliformes fecales	Abundancia de peces

Recibidos los resultados de la Consulta No. 1, se realizó un análisis, y se les devolvió un consolidado porcentual de la primera consulta en la segunda encuesta (Consulta No. 2), invitando en esta a que confrontaran sus respuestas con las de los demás participantes, con la finalidad de confirmar o modificar sus resultados. Además, se les solícito calificar las variables clasificadas como “Incluidas”, según su importancia en una escala de 1 a 5, siendo 1 la calificación más baja y 5 la más significativa (Anexo 2).

Las respuestas fueron nuevamente evaluadas y se determinó que las variables que formarían parte del indicador serían aquellas cuyo porcentaje de consenso superara el 70%. A cada una se le determinó su peso (importancia), que resultó de las evaluaciones solicitadas a los expertos. La ponderación para cada variable se obtuvo dividiendo la suma de las calificaciones dadas por todos los expertos a cada variable entre la suma total.

Definidas las variables, en la tercera ronda (Consulta No. 3) se solicitó a cada una de las personas encuestadas el desarrollo de unas tablas en las cuales debieron definir valores de calidad de las variables seleccionadas, comenzando con los que indicaran calidad de aguas muy buenas hasta valores indicadores de muy mala calidad, para poder desarrollar una curva de calidad con la media de los valores obtenidos para cada una de las variables incluidas, tomando en el eje de ordenadas la calidad del agua, de 0 a 100, y en el eje de abscisas las intensidades de cada variable, representando en la curva, la variación de la calidad del agua con respecto a la cantidad de cada contaminante (Anexo 3).

4.3. CONSTRUCCIÓN DEL ICA

A la información obtenida en la Consulta No. 3 se realizó un promedio. Los datos fueron ingresados y procesados a través del programa CURVE EXPERT V1.4 (evaluation edition), que selecciona la curva que mejor se ajusta a los datos, eligiendo entre más de 35 modelos de regresión. Con esto, se obtuvieron las curvas y las ecuaciones de cada variable.

Las curvas de calidad para cada variable tienen una escala que fluctúa entre 0 y 100 (0 = baja calidad y 100 = alta calidad). De esta manera, dado un determinado valor de una variable, se puede obtener en la curva de calidad su correspondiente ecuación.

Cada ecuación obtenida con las curvas representa un subíndice. Por ejemplo, la ecuación de los SST manifiesta la calidad con respecto a los Sólidos Suspendidos Totales, las del pH indica la calidad relacionada con la concentración de hidrogeniones, y el Mercurio revela la calidad

concerniente a las concentraciones presentes de este metal; igualmente funcionan las demás variables.

Se agruparon los subíndices en dos grupos, “Fisicoquímicos y Microbiológicos”, e “Hidrobiológicos”. En estos fueron calculados de nuevo los pesos (W) que tendría cada subíndice dentro del ICA. Se promediaron los pesos de los subíndices del grupo “Fisicoquímicos y Microbiológicos” y este promedio se restó a 1, dividiéndose la diferencia entre todos los subíndices de este grupo. De igual forma se procedió para “Hidrobiológicos”, se promediaron los pesos de los subíndices, restándose a 1 y dividiéndose la diferencia entre los subíndices.

A estos grupos se les asignó el peso que tendrán dentro del ICA. Lo adecuado sería distribuir un 50% de peso para cada grupo, sin embargo, se determinó que el grupo de los subíndices “Fisicoquímicos y Microbiológicos” tendrán un peso del 60% en el índice, mientras que los subíndices “Hidrobiológicos” obtendrán un 40%.

Esta importancia se definió porque para las variables del primer grupo existen suficientes trabajos realizados que permiten a los investigadores hacer valoraciones más exactas, mientras que las variables del segundo grupo son comunidades biológicas altamente dinámicas de las cuales hace falta estudios, lo que conlleva a cierto sesgo en la información disponible y su interpretación con relación a la calidad del agua. A medida que se vaya generando más información, se podrían modificar los pesos asignados a estos grupos.

Esta ponderación ya ha sido definida por autores como Ramírez y Viña (1998) quienes establecieron la importancia por la experiencia que se ha tenido previamente en estudios limnológicos y de calidad de aguas. Así mismo, teniendo en cuenta el grado en que cada variable afecta o refleja el funcionamiento de las ciénagas tropicales, Pinilla et al. (2010) definieron estos valores en la construcción del índice de estado limnológico (IEL) para evaluar las condiciones ecológicas de las ciénagas del Canal del Dique, un brazo del río Magdalena muy cercano al área de estudio de este trabajo.

Definidos los pesos de los dos grupos, se construyó la fórmula para calcular el ICA_{ciénagas}, empleando la media aritmética ponderada de los subíndices que lo componen de acuerdo a la siguiente expresión:

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

Donde W es el ponderador del subíndice de calidad i e I es el valor calculado del sub-índice i con base en las curvas de calidad ajustadas y la ecuación que la define.

El resultado obtenido de la aplicación de la fórmula se interpreta empleando la misma escala que para el índice de calidad de agua ICA-NSF, de acuerdo a los rangos que se presentan en la Tabla 2. Los resultados deben ser valores entre 0 y 100, siendo 0 una calidad de agua muy mala o pobre y 100 una calidad de agua excelente.

Tabla 2. Escala de clasificación.

Rango de calidad (Q)	Escala de Color/Interpretación
91 - 100	Excelente
71 - 90	Buena
51 - 70	Media
26 - 50	Mala
0 - 25	Muy Mala

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. EVALUACIÓN DE LAS CONSULTAS

De los resultados de la primera consulta se destaca el consenso obtenido por el 100% de los expertos sobre la necesidad de inclusión en el ICA de variables como la DBO₅, DQO, Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Coliformes Fecales. Así mismo, se obtuvo que las variables con mayor porcentaje de consenso (70%) que no deben ser incluidas en el índice son el Potasio, Cobre, Níquel, Manganeso, Bario y Cloruros, lo que supone que éstas no tienen importancia en la evaluación de la calidad del agua en estos ecosistemas a juicio de los expertos consultados.

Al solicitarles a los expertos la comparación de sus resultados con respecto a los de los demás, posibilitando la realización de cambios en sus respuestas (Consulta No. 2), se seleccionaron las variables que obtuvieron más del 70% de aprobación para la construcción del ICA. Además, se añadieron dos variables que obtuvieron un 60% de consenso, la primera, “Diversidad de zooplancton”, con el fin de representar en el ICA todos los niveles tróficos de las variables hidrobiológicas, y la segunda, “Nitratos”, puesto que no quedó incorporado entre las variables ningún representante de los nutrientes nitrogenados. Se escogieron los nitratos porque pueden llegar a ser indicadores de eutrofización, ya que en la zona de estudio hay actividad agrícola, ganadera y se encuentran poblaciones con necesidades básicas insatisfechas que vierten residuos urbanos a estos cuerpos de agua, por lo que concentraciones de esta variable podrían ser un importante indicador de impacto de estas actividades sobre estos ecosistemas. Entre las variables seleccionadas se encuentran las que se listan en la Tabla 3 .

Es de destacar que quedaron incluidas la mayor parte de las variables citadas en la Resolución 000258 del 13 de abril de 2011 de la Corporación Autónoma Regional del Atlántico – CRA, por la cual se establecen los objetivos de calidad para las cuencas hidrográficas de su jurisdicción (departamento del Atlántico) para el periodo 2011-2020. Entre estas variables se encuentran la DBO₅, Oxígeno disuelto, Grasas y Aceites, Coliformes Totales y Fecales, Sólidos Suspendidos Totales, Nitratos, Fósforo Total, pH y Temperatura.

Tabla 3. Variables seleccionadas para la construcción del ICA.

No.	Variable	No.	Variable
1	Sólidos suspendidos	13	Plomo
2	DBO ₅	14	Mercurio
3	DQO	15	Nitratos
4	Oxígeno disuelto	16	Abundancia de fitoplancton
5	pH	17	Diversidad de Macroinvertebrados bentónicos
6	Conductividad	18	Clorofila-a
7	Temperatura	19	Porcentaje de cobertura de las macrófitas en el espejo de agua
8	Dureza	20	Peces (Relación carnívoros/omnívoros)
9	Fósforo total	21	Diversidad de zooplancton
10	Grasas y aceites	22	Coliformes fecales
11	Alcalinidad	23	Coliformes totales
12	Sulfatos		

5.2. CONSTRUCCIÓN DEL ÍNDICE (ICA_{ciénagas})

5.2.1. Curvas de Calidad (Q).

Se eliminaron los valores Q que se encontraban muy alejados de la media y se elaboraron las curvas de calidad, seleccionando aquellas cuyo coeficiente de regresión fuese mayor de 0,95 ($r > 0,95$).

Las curvas y ecuaciones para cada contaminante, con su respectivo r y desviación (S) se presentan en el Anexo 4.

Las gráficas presentan diferentes formas, asociadas a los valores obtenidos. En el caso del oxígeno disuelto y el pH se obtuvieron curvas gaussianas debido a que existen valores altos y bajos de estas variables que indican aguas contaminadas, es decir, el valor de calidad tiende a 0 cuando se presentan estos valores y un valor medio que indica aguas limpias. Para otras variables, las gráficas fueron decrecientes asintóticas, en algunos casos a medida que los valores van aumentando y en otros, a medida que los valores van disminuyendo, el valor de calidad tiende a 0, indicando aguas contaminadas.

5.2.2. Diseño.

Como resultado de las calificaciones solicitadas a los expertos para las variables de mayor significancia en la evaluación de la calidad de agua en las ciénagas que forman parte del área de inundación del río Magdalena en el departamento del Atlántico, para determinar la importancia de las mismas dentro de un ICA, dándoles un valor de uno (1) a cinco (5), siendo 1 la importancia más baja y 5 la más alta, se realizó una sumatoria de los resultados, obteniendo el peso de cada variable (parámetro Σ). Este valor se normalizó (parámetro W), expresándose también como porcentaje para cada una de las variables seleccionadas (Tabla 4).

Tabla 4. Peso – W (Importancia) otorgada por los expertos a las variables seleccionadas para la conformación del ICA.

Variables seleccionadas	Σ Calificación expertos	Peso (W)	%
Fósforo Total	46	0,055	5,52
DQO	44	0,053	5,28
DBO ₅	44	0,053	5,28
Coliformes Fecales	44	0,053	5,28
Sólidos Suspendidos Totales	43	0,052	5,16
Oxígeno disuelto	43	0,052	5,16
Abundancia de Fitoplancton	42	0,050	5,04
Porcentaje de cob.de las macrófitas en el espejo de agua	42	0,050	5,04
pH	41	0,049	4,92
Clorofila-a	40	0,048	4,80
Coliformes Totales	38	0,046	4,56
Conductividad	34	0,041	4,08
Sulfatos	34	0,041	4,08
Nitratos	33	0,040	3,96
Mercurio	32	0,038	3,84
Diversidad de Macroinvertebrados bentónicos	32	0,038	3,84
Plomo	31	0,037	3,72
Dureza	30	0,036	3,60
Alcalinidad	29	0,035	3,48
Grasas y Aceites	29	0,035	3,48
Diversidad de Zooplancton	29	0,035	3,48
Peces (Relación Carnívoros/Omnívoros)	28	0,034	3,36
Temperatura	26	0,031	3,12
SUMA	834	1	100

Se determinó que algunas de las variables hidrobiológicas seleccionadas sobreestimaban la capacidad bioindicadora de su nivel trófico, por lo que se decidió prescindir de ellas. Estas fueron “Abundancia de Fitobentos” y “Abundancia de Macroinvertebrados Bentónicos”.

En el caso de “Abundancia de Fitobentos”, que agrupa al conjunto de algas que vive sobre el fondo o que están asociadas a cualquier tipo de sustrato (Stevenson, 1996, p 14), autores como Sand-Jensen (1983) consideran que esta comunidad, por ser poco densa, refleja bien las condiciones ambientales circundantes en las fases iniciales de la colonización de un sustrato, probablemente esta característica termina siendo una desventaja en muestras de sustratos naturales por no tener conocimiento del tiempo de colonización sobre el sustrato, por lo cual se decidió excluirla.

Además, dentro del grupo de variables seleccionadas también se tiene otros productores primarios, entre ellos el fitoplancton, tal vez el más promisorio de todos los indicadores de alerta temprana de cambios en las características ecológicas de los humedales, debido a su capacidad de responder de forma rápida y previsible a un amplio espectro de agentes contaminantes (Ramírez, 2000), con lo cual las microalgas ya quedan incluidas en el indicador.

De otro lado, los macroinvertebrados bentónicos, que son un grupo ampliamente usado en estudios ecológicos y de contaminación de aguas debido a que responden rápidamente a las variaciones ambientales, siendo indicadores biológicos por excelencia, se encontraban representados por dos variables “Diversidad” y “Abundancia”, de las cuales se seleccionó “Diversidad de Macroinvertebrados Bentónicos”, ya que al responder las encuestas, la mayoría de los expertos, a pesar que consideran la “Abundancia de Macroinvertebrados Bentónicos” importante en la evaluación de la calidad de agua de estos sistemas, manifestaron tener dificultad en definir valores de calidad para esta variable, igual que para la “Abundancia de Fitobentos”.

Así mismo, con la necesidad de simplificar el número de parámetros, para efectos del índice se unieron subíndices complementarias que indican un mismo tipo de contaminación, de igual manera como procedieron Ramírez et al., (1997) en la formulación de los índices de contaminación (ICO) para la caracterización de aguas naturales, en este sentido, se agruparon la DQO, DBO₅, Coliformes Fecales (CF), Coliformes Totales (CT) y Oxígeno Disuelto (OD) para constituir el Subíndice de Calidad por Materia orgánica (CMO), el Fósforo Total y los Nitratos para conformar el Subíndice de Estado Trófico (ET), la Conductividad, Dureza y Alcalinidad para formar el Subíndice de Calidad por Mineralización (CM), y la Abundancia de Fitoplancton y Clorofila-a para el Subíndice de

Productividad Fitoplanctónica (PF). El resto de variables fisicoquímicas se presentan de forma individual (subíndices).

Al unir las variables dentro de los subíndices nuevamente se realizó el cálculo de los pesos (W) que tendrían dentro del ICA, promediando los valores ya calculados, este promedio se restó a 1 y la diferencia se dividió entre todas las variables con la finalidad de distribuir el residuo de manera equitativa, para que así el resultado siguiera siendo 1.

Por ejemplo, las variables incluidas en el Subíndice de Calidad por Materia Orgánica obtuvieron de los expertos los pesos DQO = 0,053, DBO₅ = 0,053, CF = 0,053, CT = 0,046 y OD = 0,052.

Estos valores se promediaron, resultando el peso para el subíndice CMO (0,051). Para normalizar los pesos (parámetro W), nuevamente se suman las importancias de todos los subíndices, obteniéndose un total de 0,796, lo cual se resta a 1, resultando 0,204, valor que se distribuye entre todos los subíndices que ya no son 23 sino 19, ya que el subíndice CMO incluye 5 variables.

Se continúa con el Subíndice de Estado Trófico (ET) conformado por las variables Fósforo Total con una importancia de 0,055 y Nitratos con 0,040 que al promediarlo resulta un peso para el Subíndice ET de 0,058. Para normalizar los pesos (parámetro W), nuevamente se suman las importancias de todos los subíndices obteniéndose un total de 0,942, lo cual se resta a 1, resultando 0,058, valor que se distribuye entre todos los subíndices que ya no son 19 sino 18, porque el Subíndice ET incluye 2 variables.

El Subíndice de Calidad por Mineralización (CM) está constituido por la Conductividad con una importancia de 0,041, Dureza con 0,036 y Alcalinidad con 0,035, que al promediarlos resulta un peso para el Subíndice CM de 0,051. Para normalizar los pesos (parámetro W), nuevamente se suman las importancias de los subíndices obteniéndose un total de 0,898, lo cual se resta a 1, resultando 0,102, valor que se distribuye entre todos los subíndices que ya no son 18 sino 16, porque el Subíndice CM incluye 3 variables.

Finalmente, el Subíndice de Productividad Fitoplanctónica (PF) que incluye la Abundancia de Fitoplancton y Clorofila-a con igual valor de importancia que le otorgan a este subíndice un peso de 0,071. Para normalizar los pesos (parámetro W), nuevamente se suman las importancias de los subíndices obteniéndose un total de 0,929, lo cual se resta a 1, resultando 0,071, valor que se distribuye entre todos los subíndices que ya no son 16 sino 15, porque el Subíndice de PF incluye 2 variables.

La distribución de los pesos de los subíndices es la que se muestra en la siguiente Tabla.

Tabla 5. Peso – W (Importancia) de los subíndices después de unión de variables complementarias.

Subíndices	Peso (W)	%
Sólidos suspendidos	0,077	7,66
Calidad por Materia orgánica - CMO (DQO, DBO ₅ , CF, CT y OD)	0,076	7,61
pH	0,074	7,42
Estado trófico (Fósforo total y Nitratos)	0,072	7,24
Sulfatos	0,066	6,58
Mercurio	0,063	6,34
Calidad por Mineralización (Conductividad, Dureza y Alcalinidad)	0,062	6,22
Plomo	0,062	6,22
Grasas y aceites	0,060	5,98
Temperatura	0,056	5,62
Porcentaje de cobertura de las macrófitas en el espejo de agua	0,075	7,54
Calidad por Productividad fitoplanctónica (Abundancia de fitoplancton y Clorofila a)	0,074	7,42
Diversidad de Macroinvertebrados bentónicos	0,063	6,34
Diversidad de zooplancton	0,060	5,98
Peces (Relación carnívoros/omnívoros)	0,059	5,86
SUMA	1,000	100,00

Con los subíndices y curvas definidas se procede a diseñar el ICA. Inicialmente se construyeron las fórmulas para calcular los subíndices con variables agrupadas, estas se obtuvieron empleando la media aritmética ponderada de las variables que los componen según las expresiones que se presentan en la siguiente Tabla:

Tabla 6. Fórmulas para calcular los subíndices con variables agrupadas.

Subíndice	Formula
Calidad por Materia orgánica - CMO (DQO, DBO ₅ , CF, CT y OD)	$SI_{CMO} = \left(\sum_{i=1}^n SI_i W_i \right) / 5$
Estado trófico - ET (Fósforo Total y Nitratos)	$SI_{ET} = \left(\sum_{i=1}^n SI_i W_i \right) / 2$
Calidad por Mineralización – CM (Conductividad, Dureza y Alcalinidad)	$SI_{CM} = \left(\sum_{i=1}^n SI_i W_i \right) / 3$
Producción Fitoplanctónica - PF (Abundancia de Fitoplancton y Clorofila-a)	$SI_{PF} = \left(\sum_{i=1}^n SI_i W_i \right) / 2$

Donde I es el valor calculado la variable i que compone el subíndice, con base en las curvas de calidad ajustadas y la ecuación que la define, y W es el peso de cada una de esas variables.

Se unieron los subíndices en dos grupos, “Fisicoquímicos y Microbiológicos”, e “Hidrobiológicos”. Al igual que con los subíndices cuando se unieron variables, en los grupos fueron calculados de nuevo los pesos que tendrían dentro del ICA. Se promediaron los pesos de los subíndices del grupo “Fisicoquímicos y Microbiológicos” y este promedio se restó a 1, dividiéndose la diferencia entre todos los subíndices de este grupo. De igual forma se procedió para “Hidrobiológicos”, se promediaron los pesos de los subíndices, restándose a 1 y dividiéndose la diferencia entre los subíndices, obteniéndose los pesos que se aprecian en la Tabla 7.

A estos grupos se les asignó el peso que tendrán dentro del ICA. “Fisicoquímicos y Microbiológicos” tendrán un peso del 60% en el índice, y subíndices “Hidrobiológicos” obtendrán un 40%.

Tabla 7. Peso - W (Importancia) de los subíndices dentro del ICA.

	Subíndices	Peso (W)	%
Fisicoquímicos y microbiológicos	Sólidos suspendidos	0,110	10,970
	Calidad por Materia orgánica - CMO (DQO, DBO ₅ , CF, CT y OD)	0,109	10,922
	pH	0,107	10,730
	Calidad por Estado trófico (Fósforo total y Nitratos)	0,106	10,550
	Sulfatos	0,099	9,891
	Mercurio	0,097	9,651
	Calidad por Mineralización (Conductividad, Dureza y Alcalinidad)	0,095	9,531
	Plomo	0,095	9,531

	Subíndices	Peso (W)	%
	Grasas y aceites	0,093	9,291
	Temperatura	0,089	8,932
	SUMA	1,000	100,000
Hidrobiológicos	Porcentaje de cobertura de las macrófitas en el espejo de agua	0,209	20,911
	Calidad por Productividad fitoplanctónica (Abundancia de fitoplancton y Clorofila a)	0,208	20,791
	Diversidad de Macroinvertebrados bentónicos	0,197	19,712
	Diversidad de zooplancton	0,194	19,353
	Peces (Relación carnívoros/omnívoros)	0,192	19,233
	SUMA	1,000	100,000

Definidos los pesos de los dos grupos, se construyó la fórmula para calcular el $ICA_{Ciénagas}$, empleando la media aritmética ponderada de los subíndices que los componen de acuerdo a la siguiente expresión:

$$ICA_{Ciénagas} = \left(\left(\sum_{i=1}^n (SI_{iFQ} \times W_i) \right) \times 0,6 \right) + \left(\left(\sum_{i=1}^n (SI_{iHB} \times W_i) \right) \times 0,4 \right)$$

Donde:

SI_{iFQ} = valor calculado de los subíndices i que componen el grupo de los fisicoquímicos y microbiológicos, con base en las curvas de calidad ajustadas, y la ecuación que la define.

SI_{iHB} = valor calculado de los subíndices i que componen el grupo de los Hidrobiológicos, con base en las curvas de calidad ajustadas y la ecuación que la define.

W_i = peso (importancia) de cada subíndice.

El resultado obtenido se interpreta empleando la misma escala que para el índice de calidad de agua ICA-NSF. Estos deben ser valores entre 0 y 100, siendo 0 una calidad de agua muy mala o pobre y 100 una calidad de agua excelente.

Finalmente, si alguna de las variables falta, el valor total del índice puede ser calculado de forma parcial, por la distribución de su peso entre las demás y su posterior recalcular. Es decir, si en algún estudio no se toma registro de alguna de las variables, su peso se divide entre el número de

variables restantes, ese valor se suma a cada uno de los pesos de las variables que si fueron registradas y se sigue con el cálculo del índice.

5.2.3. Aplicabilidad.

Ejemplo 1. Ciénaga El Convento.

En las ciénagas del departamento del Atlántico anualmente se realizan estudios fisicoquímicos, microbiológicos e hidrobiológicos. En la Ciénaga El Convento en el año 2014 (CRA, 2014) se aplicaron diferentes indicadores de eutrofización como el de Carlson (1980) (TSI), Aizaki *et al.* (1981), Volenweider (1981) y Margalef (1983), cuyos resultados revelan valoraciones diferentes en un mismo punto de muestreo, estimandose las mismas muestras como oligotróficas, mesotróficas, eutróficas e hipereutróficas. A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el trabajo de la CRA (2014) en dos puntos de muestreo.

Tabla 8. Indicadores de eutrofización en la Ciénaga El Convento en época de lluvias (Fuente: CRA, 2014)

Indicador	Carlson (1980) (TSI)	Aizaki <i>et al.</i> (1981)	Volenweider (1981)	Margalef (1983)		
Criterio	Oligotrófico	0-40	0-30	[4.2] 10-100 cel/mL		
	Mesotrófico	40-50	30-50	[16.1] 100-1.000 cel/mL		
	Eutrófico	50-70	50-80	[42.6] 1.000- 1.000.000 cel/mL		
	Hipereutrófico	70<TSI<100	>80			
Indicador	Fósforo total mg/m ³	Clorofila "a" mg/m ³	Fósforo total mg/m ³	Clorofila "a" mg/m ³	Clorofila "a" mg/m ³	Fitoplancton (Cel/mL)
P1	113,38993	33,688293	2,42448	28,035708	1,37	87,576923
P2	125,67121	49,773106	-8,2646646	45,929966	7,06	157,6

Como se observa, de los resultados de los indicadores aplicados no es posible hacer un análisis preciso de los datos, por ejemplo, para las mismas muestras el índice de Carlson (1980) (TSI) presenta las aguas como hipereutróficas, mientras que el índice de Aizaki *et al.* (1981) las muestra como oligotróficas. Razón por la cual se hace necesario crear un índice de calidad de aguas propio para estas ciénagas.

Se tomaron los datos de variables fisicoquímicas, microbiológicas e hidrobiológicas en dos puntos de muestreo del trabajo citado, los cuales son los que se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores de variables fisicoquímicas, microbiológicas e hidrobiológicas registradas en la ciénaga El Convento en época lluviosa de 2014 (Fuente: CRA, 2014).

Variables	Unidades	Valores	
		Punto 1	Punto 2
SST	mg/L	53	70
DQO	mg/L	114,87	26,96
DBO ₅	mg/L	3,97	5,78
CF	NMP/100mL	450	2300
CT	NMP/100mL	450	3300
OD	mg/L	9,6	10
pH	Unidades de pH	6,9	6,76
Fósforo Total	mg/L	1	1
Nitratos	mg/L	1,95	4,57
Sulfatos	mg/L	1101	247,42
Conductividad	μS/cm	1170	1800
Temperatura	°C	31	31,5
Porcentaje de cobertura de las macrófitas	%	21,63	21,63
Abundancia de fitoplancton	Individuos/Litro	87577,2	157599,9
Clorofila-a	mg/L	1,33	7,06
Diversidad de zooplancton	Bits/Individuo	0,91	1,06

Se extrajeron del índice las variables que no fueron tenidas en cuenta para este estudio y sus pesos fueron distribuidos equitativamente entre el resto de variables, se aplicaron las ecuaciones de calidad para cada subíndice (*Si*), obteniéndose el valor *Q* que luego se multiplicó por su peso para obtener el subtotal. Los resultados pueden observarse apreciarse en la Tabla 10.

Tabla 10. Datos obtenidos de la aplicación del ICA_{ciénagas} en dos puntos de muestreo en la ciénaga El Convento. Los valores se obtuvieron a partir de datos de CRA (2014).

	Subíndices (Valor Q)	Peso (<i>W</i>) <i>Si</i>	Valor Q		Subtotales	
			Punto 1	Punto 2	Punto 1	Punto 2
Fisicoquímicos y Microbiológicos	Sólidos suspendidos	0,16	86,91	79,76	14,19	13,03
			16,17	60,37		
			80,23	69,03		
	Calidad por Materia Orgánica	0,16	52,28	35,72	36,84	36,79
			67,02	51,77		
	OD		52,65	45,11		
	pH	0,16	98,04	96,59	16,01	15,78
	Fósforo Total		0,00	0,00		
	Estado Trófico	0,16	77,84	57,58	6,19	4,58
	Nitratos					

	Subíndices (Valor Q)	Peso (W) SI	Valor Q		Subtotales		
			Punto 1	Punto 2	Punto 1	Punto 2	
	Sulfatos	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Calidad por Mineralización Conductividad	0,06	25,18	0,00	4,11	0,00	
	Temperatura	0,14	68,88	64,92	11,25	10,60	
	SUMA	1,00			88,60	80,78	
Hidrobiológicos	Porcentaje de cobertura de las macrófitas en el espejo de agua	0,34	75,70	75,70	25,66	25,66	
	Calidad por Producción Fitoplanctónica	Abundancia de fitoplancton	0,34	100,00	100,00	33,77	33,05
		Clorofila-a		100,00	95,72		
	Diversidad de zooplancton	0,32	8,95	10,69	2,89	3,46	
	SUMA	1,00			62,32	62,16	

La suma de los subtotales de los grupos (“Fisicoquímicos y Microbiológicos” e “Hidrobiológicos”) en cada punto se multiplicó por sus pesos (0,6 Fisicoquímicos y Microbiológicos, y 0,4 Hidrobiológicos) y estos totales de cada grupo fueron sumados, obteniéndose un ICA_{ciénagas} para el punto 1 de 78,09 y para el punto 2 de 73,33 (Tabla 11), valores que se encuentran dentro del rango de aguas de buena calidad (Q =71-90).

Tabla 11. Valores del ICA_{ciénagas} en dos puntos de muestreo en la ciénaga El Convento, con el color de la escala de clasificación.

Punto de muestreo	Totales por Grupo de SI		Valor ICA _{ciénagas}
	Fisicoquímicos y Microbiológicos	Hidrobiológicos	
P1	53,16	24,93	78,09
P2	48,47	24,87	73,33

Estos resultados estarían acordes con el estado real de la ciénaga en ese entonces, puesto que en ese estudio se menciona que de los cuerpos de agua de la zona, este era el único con entrada directa de agua desde el río Magdalena, lo que le aportaría recambio de agua, dispersión de contaminantes, mayor diversidad de comunidades biológicas generalistas, mejoría en el estado de eutrofización, entre otras características asociadas con ecosistemas con buena calidad de aguas.

Ejemplo 2. Ciénaga La Luisa

Se tomaron al azar dos puntos de muestreo de los monitoreados en época de lluvias en la ciénaga La Luisa en el año 2014 (CRA, 2014). De acuerdo a este estudio, los índices de eutrofización

aplicados, al igual que en las demás ciénagas, siguen siendo inconsistentes en cuanto al significado real del estado de calidad del agua. En la Tabla 12 se puede apreciar en resumen, los valores de los indicadores de contaminación aplicados a los dos puntos escogidos.

Tabla 12. Indicadores de contaminación en la Ciénaga La Luisa (Fuente: CRA, 2014).

Indicador		Carlson (1980) (TSI)		Aizaki <i>et al.</i> (1981)		Volenweider (1981)	Margalef (1983)
Criterio	Oligotrófico	0-40		0-30		[4.2]	10-100 cel/mL
	Mesotrófico	40-50		30-50		[16.1]	100-1.000 cel/mL
	Eutrófico	50-70		50-80		[42.6]	1.000-1.000.000 cel/mL
	Hipereutrófico	70<TSI<100		>80			
Variable empleada		Fósforo total mg/m ³	Clorofila "a" mg/m ³	Fósforo total mg/m ³	Clorofila "a" mg/m ³	Clorofila "a" mg/m ³	Fitoplancton (Cel/mL)
Indicador		Carlson (1980) (TSI)		Aizaki <i>et al.</i> (1981)		Volenweider (1981)	Margalef (1983)
P7		112,3	39,5	3,4	34,5	2,5	462,5
P8		115,6	78,4	0,5	77,8	130,7	83,0

Se tomaron los datos de variables fisicoquímicas, microbiológicas e hidrobiológicas disponibles en el trabajo de la CRA (2014), los cuales son los que se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Valores de variables fisicoquímicas, microbiológicas e hidrobiológicas registradas en la ciénaga La Luisa en época lluviosa de 2014 (Fuente: CRA, 2014).

Variables	Unidades	Valores	
		P7	P8
SST	mg/L	249,4	152,5
DQO	mg/L	133,56	315,63
DBO ₅	mg/L	11,12	17,19
CF	NMP/100mL	3300	450
CT	NMP/100mL	3300	450
OD	mg/L	12	14,4
pH	Unidades de pH	8,6	9,3
Fósforo Total	mg/L	1,81	2,28
Nitratos	mg/L	9,3	9,5
Sulfatos	mg/L	249,4	306,89
Conductividad	µS/cm	2870	3090
Temperatura	°C	30,2	29,7
Porcentaje de cobertura de las macrófitas	%	42,72	42,72
Abundancia de fitoplancton	Individuos/Litro	2,47	130,71
Clorofila-a	mg/L	471289,2	84949,4

Variables	Unidades	Valores	
		P7	P8
Diversidad de zooplancton	Bits/Individuo	1,57	0,9

Se extrajeron del índice las variables que no fueron tenidas en cuenta para este estudio y sus pesos fueron distribuidos equitativamente entre el resto de variables, se aplicaron las ecuaciones de calidad para cada subíndice (S), obteniéndose el valor Q que luego se multiplicó por su peso para obtener el subtotal. Los resultados pueden apreciarse en la Tabla 14.

Tabla 14. Datos obtenidos de la aplicación del ICA_{ciénagas} en dos puntos de muestreo en la ciénaga La Luisa. Los valores se obtuvieron a partir de datos de CRA (2014).

	Subíndices (Valor Q)	Peso (W) SI	Valor Q		Subtotales		
			P7	P8	P7	P8	
Fisicoquímicos y Microbiológicos	Sólidos suspendidos	0,16	25,33	50,76	4,14	8,29	
	Calidad por Materia Orgánica	DQO		11,74	0,00		
		DBO		50,04	37,92		
		CF	0,16	31,86	52,28	24,08	25,90
		CT		51,77	67,02		
		OD		12,32	9,03		
	pH	0,16	68,72	40,54	11,22	6,62	
	Estado Trófico	Fósforo Total	0,16	0,00	0,00	2,92	2,87
		Nitratos		36,75	36,07		
	Sulfatos	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	
Calidad por Mineralización	Conductividad	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	
Temperatura	0,14	75,34	79,46	12,30	12,98		
SUMA		1,00			54,67	56,66	
Hidrobiológicos	Porcentaje de cobertura de las macrófitas en el espejo de agua	0,34	43,58	43,58	14,77	14,77	
	Calidad por Producción Fitoplanctónica	Abundancia de fitoplancton	0,34	0,00	0,00	31,13	33,77
		Clorofila-a		36,75	36,07		
	Diversidad de zooplancton	0,32	17,75	8,84	5,74	2,86	
SUMA		1,00			51,64	51,40	

La suma de los subtotales de los grupos (“Fisicoquímicos y Microbiológicos” e “Hidrobiológicos”) en cada punto se multiplicó por sus pesos (0,6 Fisicoquímicos y Microbiológicos y 0,4 Hidrobiológicos) y los totales de cada grupo fueron sumados, obteniéndose un ICA_{ciénagas} para el punto 7 de 53,46 y para el punto 8 de 54,55 (Tabla 15), valores que se encuentran dentro del rango de aguas medianamente contaminadas (Q =51-70), con tendencia a aguas de mala calidad.

Tabla 15. Valores del ICA_{ciénagas} en dos puntos de muestreo en la ciénaga La Luisa, con el color de la escala de clasificación.

Punto de muestreo	Totales por Grupo de SI		Valor ICA _{ciénagas}
	Fisicoquímicos y Microbiológicos	Hidrobiológicos	
P7	32,8	20,65	53,46
P8	33,99	20,56	54,55

Esta ciénaga presenta diversas problemáticas como el encerramiento de sus orillas para la producción ganadera, vertimientos urbanos, colmatación y bloqueo de entradas naturales de agua a través del río, entre otras, que le han causado deterioro, de hecho, los datos del estudio de la CRA (2014) muestran algunos valores indicadores de malas condiciones como el caso del porcentaje de macrófitas en el espejo de agua, altos sulfatos, fosfatos y conductividad.

No obstante, los resultados de la aplicación de ICA_{ciénagas} deberían ser acordes con el estado de calidad del agua al momento de la realización de los registros (época de lluvias), donde las entradas de agua por escorrentía al sistema estarían ayudando a mejorar sus condiciones, por lo que parece evidente que el ICA_{ciénagas} debería calcularse en distintos periodos estacionales para conocer y prever el estado de calidad de las aguas en función de las variables climáticas.

6 CONCLUSIONES

La simplificación del número de variables mediante la asociación de parámetros en algunos subíndices permite que en la práctica estos tengan resultados altamente significativos debido a que las variables que lo componen se complementan.

El grado de avance en investigaciones que involucran las variables seleccionadas para el ICA_{ciénagas} en el área de estudio permitió la división de los subíndices en dos grupos, “Fisicoquímicos y Microbiológicos”, e “Hidrobiológicos” y su ponderación dentro del indicador.

La falta de análisis de alguna de las variables en un muestreo no impide la aplicación del ICA_{ciénagas}, puesto que este se puede calcular de forma parcial, redistribuyendo el peso de la variable faltante entre las demás.

Cada subíndice de los que conforman el ICA_{ciénagas} es un indicador de la condición particular de los cuerpos de agua con respecto a ese tipo de contaminación.

El índice de calidad de aguas - ICA_{ciénagas} es un indicador que permite evaluar adecuadamente el estado de calidad general de las aguas de las ciénagas que forman parte de la zona inundable del río Magdalena en el departamento del Atlántico.

7 BIBLIOGRAFÍA

Aizaki, M., Otsuki, O., Fukushima, M., Hosomi, M., & Muraoka. (1981). Application of Carlson's trophic state index to Japanese lakes and relationships between the index and other parameters. *Verh. Internat. Verein Limnol.* 21:675-681.

Awad-Núñez, S., González-Cancelas, N., & Camarero-Orive, A. (2015). Establecimiento de los factores a considerar para determinar la zona de ubicación de un puerto seco y de sus jerarquías a través de un panel Delphi. *Revista Transporte y Territorio* /13. p 100 – 121. ISSN 1852-7175.

Baena, L. (2012). Criterios para la evaluación de la eutroficación en la Laguna de Sonso mediante el modelo de simulación LACAT. En Peña, E., Cantera, J., & Muñoz, E (Eds), *Evaluación de la contaminación en ecosistemas acuáticos: Estudio de caso de la Laguna Sonso, cuenca alta del río Cauca*. Capítulo 8. (pp 175-194). Cali – Colombia.

Ball, R., & Church, R. (1980). Water quality indexing and scoring. *Journal of the Environmental Engineering Division American Society of Civil Engineers*, 106, EE4, 1980, pp. 757-771.

Benítez, N., & Varón, A. (2012). Dinámica de la transformación y bioacumulación de los metales pesados en la Laguna de Sonso. En Peña, E., Cantera, J., & Muñoz, E (Eds), *Evaluación de la contaminación en ecosistemas acuáticos: Estudio de caso de la Laguna Sonso, cuenca alta del río Cauca*. Capítulo 7. (pp 137-174). Cali – Colombia.

Blasco-Mira, J., López- Padrón, A., & Mengual-Andrés, A. (2010). Validación mediante método Delphi de un cuestionario para conocer las experiencias e interés hacia las actividades acuáticas con especial atención al Windsurf. *Ágora para la Educación Física y el Deporte*. No.12 (1), 75-96. ISSN: 1578-2174.

Brink, H. (1993). Academic nurse leaders' interpretation of concepts and priorities related to the examination of scientific short papers, dissertations and theses - Part 1. *Curationis*, Vol. 16, No. 3. p 62 – 67.

Camisón-Zornoza, C. (2007). ¿Quo vadis la empresa industrial española?: Fortalezas y debilidades ante los factores clave de éxito. *Universia Business Review*, núm. 13. pp. 42-61. ISSN: 1698-5117.

Carlson, R.E. (1980). More complication in the chlorophyll.a-Secchi's disc relationship. *Limnology and Oceanography*. 25: 378-382.

Clesceri, L., Greeneberg, A., & Trussell, R. (1992). "Métodos Normalizados para Análisis de Aguas potables y residuales", Editoriales Díaz de Santos, Madrid, España.

CRA - Corporación Autónoma Regional del Atlántico. (2007). Documentación del estado de las cuencas hidrográficas en el Departamento del Atlántico. Barranquilla – Colombia. 114 p.

CRA - Corporación Autónoma Regional del Atlántico. (2011). Resolución 000258 del 13 de abril de 2011. Por el cual se establecen los objetivos de calidad para las cuencas hidrográficas de la jurisdicción para el periodo 2011-2020. 9 p.

CRA - Corporación Autónoma Regional del Atlántico. (2014). Caracterización del ambiente acuático y evaluación del estado trófico de los cuerpos de agua asociados a los municipios de Sabanagrande, Santo Tomás y Palmar de Varela en el departamento del Atlántico. Contrato 000180 de 2014. Laboratorio para la Industria y El Medio Ambiente - LIMA LTDA. Barranquilla – Colombia. 667 p.

Criado, A., Cruz-Guzmán, M., García-Carmona, A., & Cañal, P. (2014). ¿Cómo mejorar la educación científica de primaria en España desde el currículo oficial? Sugerencias a partir de un análisis curricular comparativo en torno a las finalidades y contenidos de la ciencia escolar. *Enseñanza de las ciencias*, No. 32.3: 249-266. ISSN: 0212-4521.

Cuesta-Gómez, J. (2013). Aplicación de la técnica Delphi en el proceso de validación de un instrumento para la evaluación de la calidad de vida en centros para personas con trastornos del espectro del autismo. *Revista Curriculum*, 26, pp. 135-160; ISSN: 1130-5371.

Dalkey, N. C. (1972). The Delphi method: An experimental study of group opinion. In N. C. Dalkey, D. L. Rourke, R. Lewis, & D. Snyder (Eds.). *Studies in the quality of life: Delphi and decision-making* (pp. 13-54). Lexington, MA: Lexington Books.

Dalkey, N. C., & Helmer, O. (1963). An experimental application of the Delphi method to the use of experts. *Management Science*, 9 (3), 458-467.

Delbecq, A. L., Van de Ven, A. H., & Gustafson, D. H. (1975). *Group techniques for program planning*. Glenview, IL: Scott, Foresman, and Co.

Díaz-Arriaga, F (2014). Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Rev. Salud pública*. 16 (6): 947-957.

Dinius, S. (1987). Design of a water quality index. *W.R. Bulletin*, V23, No. 5.

Fuccz-Gamboa, J., Gómez-Moreno, R., Cárdenas-Guzmán, M., Campos-Pinilla, C. (2007). Comportamiento de coliformes fecales como indicadores bacterianos de contaminación fecal en diferentes mezclas de biosólido y estériles utilizados para la restauración ecológica de la Cantera Soratama, Bogotá. *Universitas Scientiarum*, vol. 12, núm. Es2, pp. 111-120. ISSN: 0122-7483.

García-Aracil, A., & Palomares-Montero, D. (2012). Indicadores para la evaluación de las instituciones universitarias: validación a través del método Delphi. *Revista Española de Documentación Científica*, 35, 1, p 119-144. ISSN: 0210-0614.

García-Martínez, V., Aquino-Zúñiga, S., Guzmán-Sala, A., & Medina-Meléndez, A. (2012). El uso del método delphi como estrategia para la valoración de indicadores de calidad en programas educativos a distancia. *Revista CAES* Vol. 3, No. 1, p. 200-222.

García-Quevedo, T. (2012). *Propuestas de índices de calidad de agua para ecosistemas hídricos de Chile*. Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. Santiago de Chile. 157 p.

Gonçalves-Reis, C.D., Dutra-Fonseca, R.A., Reis, E.L., Reis, C., Guimarães-Brighenti, C.R., & Matias, A.A. (2010). Programa de ajuste multiparamétrico de curvas de titulación potenciométricas de ácidos húmicos. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:569-573.

Gregor, J., & Marsálek, B. (2004). "Freshwater Phytoplankton Quantification by Chlorophyll a: A Comparative Study of in vitro, in vivo and in situ Methods". *Water Res.* Vol. 38. pp. 517-522.

Guilarte, A., Díaz, A., Nápoles J., Fernández, O., Abalos, A., & Pérez, R.M. (2015). Valoración de impacto ambiental en el Puerto Moa-Holguín. *Rev. Colomb. Biotecnol.* Vol. XVII No. 2 pp 129-139.

Guillén, V., Teck, H., Kohlmann, B., & Yeomans, J. (2012). "Microorganismos como bioindicadores de la Calidad del Agua", *Tierra tropical: sostenibilidad, ambiente y sociedad*, vol. 8, No. 1, pp. 65-93.

Hsu, Chia-Chien & Sandford, Brian A. (2007). The Delphi Technique: Making Sense of Consensus. *Practical Assessment Research & Evaluation*, 12(10). Available online: <http://pareonline.net/getvn.asp?v=12&n=10>.

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2004). Determinación de oxígeno disuelto método yodométrico modificación de azida. Versión 1. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, República de Colombia - Subdirección de Hidrología - Grupo Laboratorio de Calidad Ambiental. 9 p.

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2007a). Sólidos suspendidos totales en agua, secados a 103 – 105°C. Versión 03. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, República de Colombia - Subdirección de Hidrología - Grupo Laboratorio de Calidad Ambiental. 7 p.

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2007b). Demanda bioquímica de oxígeno 5 días, incubación y electrometría. Versión 02. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, República de Colombia - Subdirección de Hidrología - Grupo Laboratorio de Calidad Ambiental. 13 p.

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2007c). Demanda química de oxígeno por refluo cerrado y volumetría. Versión 05. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, República de Colombia - Subdirección de Hidrología - Grupo Laboratorio de Calidad Ambiental. 11 p.

INVEMAR - Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. (2003). Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos (aguas, sedimentos y organismos). Programa CALIDAD AMBIENTAL MARINA – CAM. Santa Marta – Colombia. 148 p.

Kemmer F., & McCallion J. (1999). Manual de Agua (su naturaleza, tratamiento y aplicaciones), Nalco Chemical Company, Editorial McGraw-Hill, 55-70 pp. México.

Kumar, P., Kumar, A., Prakash, B., & Kumar, M. (2013). "Water Quality Indices Used for Water Resources Vulnerability Assessment Using gis Technique: A Review," *Scopus Compendex and Geobase Elsevier*, vol. 6, No. 6 (1), pp. 1594-1600.

Landeta, J. (2006). Current validity of the Delphi method in social sciences. *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 73 (5), 467-482.

Linstone, H., & Turoff, M. (eds.). (1975). The Delphi method: techniques and applications. Reading, Mass: Addison-Wesley.

López-Moreda, L., De Armas-Vargas, Y., Almeida-Rodríguez, M., & Alonso-Tamayo, L (2012). Procedimiento para planificar el monitoreo ambiental en empresas hoteleras. *Revista Avanzada Científica*. Vol. 15 No. 1, p 1-16. ISSN: 1029-3450.

Ludwig, B. G. (1994). Internationalizing Extension: An exploration of the characteristics evident in a state university Extension system that achieves internationalization. An published doctoral dissertation, The Ohio State University, Columbus.

Madigan, M. T., Martinko, J. M. and Parker, J. 2003. Brock Biología de los microorganismos. 10ª ed. Ed. Pearson Prentice Hall, Madrid. 1096 p.

Margalef, R. (1983). Limnología. Omega. Barcelona. 1010 pp.

Martínez-Piñero, E. (2003). La técnica Delphi como estrategia de consulta a los implicados en la evaluación de programas. Revista de Investigación Educativa, Vol. 21, No. 2, p. 449-463.

Montoya-Moreno, Y., & Aguirre, N. (2013). Estado del arte del conocimiento sobre perifiton en Colombia. Revista Gestión y Ambiente Vol. 16 (3): 91-117.

Oliva-Martínez, M., Godínez-Ortega, J., & Zúñiga-Ramos, C. (2014). Biodiversidad del fitoplancton de aguas continentales en México. Revista Mexicana de Biodiversidad, Supl. 85: S54-S61.

Ott, W. (1978). Environmental Indices, Theory And Practice, Aa Science, Ann Arbor, Michigan, USA, 371 p.

Pinilla, G., Duarte-Coy, J., & Vega-Mora, L. (2010). Índice de estado limnológico (IEL) para evaluar las condiciones ecológicas de las ciénagas del Canal del Dique, Colombia. Acta biol. Colomb., Vol. 15 No. 2, 169 – 188.

Ramírez, A. & Viña, G. (1998). Limnología Colombiana. Aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá - Colombia. 293 p. ISBN: 958-9029-06-X.

Ramírez, A., Restrepo, R. Y Viña, G. (1997). "Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulaciones y aplicación", Ciencia, Tecnología y Futuro, 1 (3):135 - 53.

Ramírez, J. (2000). Fitoplancton de agua dulce: bases ecológicas, taxonómicas y sanitarias. Universidad de Antioquia. Medellín – Colombia. 207 p.

Reguant-Álvarez, M & Torrado-Fonseca, M. (2016). El método Delphi. REIRE, Revista d'Innovació i Recerca en Educació, 9 (1), 87-102. DOI: 10.1344/reire2016.9.1916.

Riaño, C., & Palomino, M. (2015). Diseño y elaboración de un cuestionario acorde con el método Delphi para seleccionar laboratorios virtuales (LV). Sophia, 11(2), 129-141. ISSN: 1794-8932.

Rodríguez, S., Gauna, L., Martínez, G., Acevedo, H., & Romero, C. (2012). Relación del nitrato sobre la contaminación bacteriana del agua. Terra Latinoamericana, vol. 30, núm. 2, pp. 111-119. E-ISSN: 2395-8030.

Roldán, G., & Ramírez, J. (2008). Fundamentos de limnología neotropical. 2ª Edición. Colombia, Medellín: Editorial Universidad de Antioquia. ISBN: 978-958-714-144-3. 440 pp.

Sand-Jensen, K. (1983). Photosynthetic carbon sources of stream macrophytes. J. Exp. Bot. 34: 198-210.

Santiago, L.S., & Dias, S.M.F. (2012). Matriz de indicadores de sustentabilidade para a gestão de resíduos sólidos urbanos. Eng Sanit Ambient. V17 No.2, p 203-212.

Sierra-Ramírez, C. (2011). Calidad del agua: Evaluación y diagnóstico. Primera edición. Ediciones de la U. Bogotá, D.C. Colombia. 457 p. ISBN: 978-958-8692-06-7.

Souza, M., & Libânio, M. (2009). Proposta de índice de Qualidade para Água Bruta afuente a estações convencionais de tratamento. Eng Sanit Ambient. v.14 n.4. p 471-478.

Stevenson, R.J. (1996). An introduction to algal ecology in freshwater benthic habitats. En: Stevenson, R.J., Bothwell, M.L. & Lowe, R.L. (Eds.) Algal Ecology. Freshwater benthic ecosystems. Academic press, INC. San Diego, California, 1-30.

Suárez, G., Florido-Bacallao, R., Soto-Carreño, F., & Caballero-Núñez, A. (2013). Bases para la zonificación agroecológica en el cultivo del cacao (*Theobroma cacao*, lin) por medio del criterio de expertos. *Cultivos Tropicales*, vol. 34, no. 2, p. 30-37. ISSN digital: 1819-4087.

Thomassen, O., Espeland, A, Sjøteland, E., Lossius, H., Heltne, J., & Brattebø, G. (2011). Implementation of checklists in health care; learning from high-reliability organizations. *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*. p 19:53.

Valcarcel-Rojas, L., Alberro-Macías, N., & Frías-Fonseca, D. (2009). El Índice de Calidad de Agua como herramienta para la gestión de los recursos hídricos. *Medio Ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente*. Año 9, No.16. ISSN-1683-8904.

Vargas-Hernández, G., González-Lutz, M., Durán-Quirós, A., y Mora-Acedo, D. (2015). Diseño y validación de un sistema para cuantificar riesgos de contaminación y su aplicación para identificar puntos críticos de control en cultivos hortícolas en Costa Rica. *Nota Técnica. Agronomía Costarricense* 39(2): 153-166. ISSN: 0377-9424.

Velázquez-Velázquez, E., & Vega-Cendejas, M. (2004). Los peces como indicadores del estado de salud de los ecosistemas acuáticos. *CONABIO. Biodiversitas* 57:12-15.

Vernal, T. (2015). La comunicación científica para el desarrollo cultural y económico: el caso de las potencialidades astronómicas de la Región de Antofagasta en Chile. *Cuadernos.info*, (37), 213-224. doi: 10.7764/cdi.37.691.

Villabona-González, S., Aguirre, N., & Estrada, A. (2011). Influencia de las macrófitas sobre la estructura poblacional de rotíferos y microcrustáceos en un plano de inundación tropical. *Rev. biol. trop [online]*. Vol.59, n.2, pp. 853-870. ISSN 0034-7744.

Zambrano, D., Bonilla, R., Avellaneda, L., & Zambrano, G. (2015). Análisis prospectivo de los bioinsumos agrícolas en Colombia: una consulta a expertos. *Rev. Colomb. Biotecnol.* Vol. XVII No. 2, p 103-113.

ANEXOS

ANEXO 1. PRIMERA CONSULTA

PROPUESTA DE UN ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUAS – ICA PARA LAS CIÉNAGAS QUE HACEN PARTE DE LA ZONA INUNDABLE DEL RÍO MAGDALENA EN EL DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO

CONTEXTO

Para Colombia, fueron desarrollados a finales de los años 90 los Índices de Contaminación de aguas (ICO) (Ramírez et al., 1997). El desarrollo de los ICO, para valoración de la calidad de las aguas continentales en nuestro país ha sido usado de manera recurrente. No obstante, nuestra diversidad geográfica, ecosistémica y ecológica puede ser un factor limitante para la obtención de resultados óptimos. Específicamente, se ha observado en diversos trabajos realizados por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA 2013, CRA 2014a y CRA 2014b), que su aplicación en las ciénagas que hacen parte de la zona inundable del río Magdalena en el departamento del Atlántico (Caribe Colombiano), no siempre arroja resultados que se ajustan a las categorías o escalas descritas, porque están influenciados por diversos factores locales.

Teniendo en cuenta lo anterior, se utilizará la técnica de investigación Delphi – Panel de Expertos - de la “Rand Corporation’s” (Ball y Church, 1980), como una estrategia de análisis de opinión (Del Rincón et al., 1995), a modo de cuestionarios.

Las estimaciones de los expertos se realizarán en sucesivas rondas anónimas (entre 3 o 4), buscando conseguir consenso, pero con la máxima autonomía por parte de los participantes, manteniendo comunicación por correo electrónico, por donde se les informa los resultados obtenidos después de cada sesión.

Para el análisis de los datos se utilizarán estadísticos que permitan el análisis de las respuestas de los expertos, quienes serán personal profesional perteneciente a universidades, centros de investigación e instituciones gubernamentales encargadas de la administración del medio ambiente y los recursos naturales renovables del departamento del Atlántico (Colombia) que hayan tenido participación en estudios ecológicos en estos ecosistemas.

CONSULTA NO. 1

A Continuación se deben desarrollar 3 puntos, el tercero es opcional.

1. La siguiente pregunta es libre, es decir, usted como experto puede exponer sus argumentos sobre la cuestión, realizando cualquier comentario que considere importante con relación al tema.

Se puede afirmar que los índices de contaminación – ICO (ICOMO, ICOMI, ICOSUS, ICOTRO, ICOBIO, ICOpH, etc.) establecidos por Ramírez et al., (1997) y algunos Índices de calidad de agua - ICA de algunos países diferentes a Colombia son de común utilización en evaluaciones de calidad de aguas continentales en Colombia.

De acuerdo a su experiencia, ¿qué utilidad cree que tienen los ICO y los ICA para evaluar la calidad del agua en las ciénagas que hacen parte de la zona inundable del río Magdalena en el departamento del Atlántico?

RESPUESTA:

2. La finalidad de este punto es conocer la importancia que usted le otorga para la evaluación de la calidad de aguas en las ciénagas que hacen parte de la zona inundable del río Magdalena en el departamento del Atlántico, a cada parámetro medido en los ICOs e ICAs y determinar que otras variables físicas, químicas o biológicas, que no se encuentran incluidas, usted considera deberían hacer parte de un índice de calidad de aguas para esta zona.

Se procederá de la misma manera que para la creación de otros índices de calidad de agua. De este modo, usted deberá determinar si cada variable debería ser incluida en un índice de contaminación en las ciénagas del área de estudio, clasificando cada parámetro en una de las siguientes categorias: "No Incluido", "Indeciso" o "Incluido".

OBTENCIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA (ICA) PARA LAS CIÉNAGAS QUE FORMAN PARTE DE LA ZONA INUNDABLE DEL RÍO MAGDALENA EN EL DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO – COLOMBIA, A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI

Así mismo, se encuentran unos espacios vacíos en los cuales usted podrá escribir alguna variable física, química o biológica que no se encuentre en la lista.

No.	Variable	Categoría
1	Conductividad	
2	Temperatura	
3	Turbidez	
4	Transparencia	
5	Sólidos suspendidos	
6	Sólidos disueltos	
7	Oxígeno disuelto	
8	Alcalinidad	
9	Dureza	
10	pH	
11	DBOs	
12	DQO	
13	Potasio	
14	Nitrógeno total	
15	Fósforo total	
16	Relación N/P	
17	Carbonatos	
18	Cloruros	
19	Sulfatos	
20	Nitratos	
21	Nitritos	
22	Amonio	
23	Cobre	
24	Plomo	
25	Aluminio	
26	Arsénico	
27	Cadmio	
28	Hierro	
29	Mercurio	
30	Níquel	
31	Cromo	
32	Manganeso	
33	Bario	

No.	Variable	Categoría
34	Zinc	
35	Coliformes totales	
36	Coliformes fecales	
37	Clorofila a	
38	Diversidad de fitoplancton	
39	Riqueza de fitoplancton	
40	Abundancia de fitoplancton	
41	Diversidad de perifiton	
42	Riqueza de perifiton	
43	Abundancia de perifiton	
44	Diversidad de zooplancton	
45	Riqueza de zooplancton	
46	Abundancia de zooplancton	
47	Porcentaje de cobertura de las macrófitas en el espejo de agua	
48	BMWP/Col (Macroinvertebrados bentónicos)	
49	Diversidad de Macroinvertebrados bentónicos	
50	Riqueza de Macroinvertebrados bentónicos	
51	Abundancia de Macroinvertebrados bentónicos	
52	Diversidad de peces	
53	Riqueza de peces	
54	Abundancia de peces	
55		
56		
57		
58		
59		
60		

3. En este punto es opcional, y en él usted podrá anotar cualquier observación adicional que tenga con respecto al tema (recomendaciones, explicaciones, etc.) y que considere pueden servir para la obtención de mejores resultados en este trabajo.

RESPUESTA:

BIBLIOGRAFÍA

Ball, R., Y Church, R. (1980). Water Quality Indexing and Scoring. Journal of the Environmental Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 106, EE4, 757-771.

Corporación Autónoma Regional del Atlántico - CRA. (2013). Caracterización fisicoquímica de los vertimientos de aguas residuales hacia los cuerpos de agua del Departamento del Atlántico y monitoreo fisicoquímico, microbiológico e hidrobiológico sobre la calidad y estado actual de las fuentes hídricas del departamento. Laboratorio Microbiológico Barranquilla. Informe final. 637 p.

Corporación Autónoma Regional del Atlántico - CRA. (2014a). Caracterización fisicoquímica, microbiológica e hidrobiológica de algunos cuerpos de agua lénticos del departamento del Atlántico. Laboratorio para la Industria y el Medio Ambiente - LIMA LTDA. Informe final. 479 p.

Corporación Autónoma Regional del Atlántico - CRA. (2014b). Caracterización del ambiente acuático y evaluación del estado trófico de los cuerpos de agua asociados a los municipios de Sabanagrande, Santo Tomás y Palmar de Varela en el departamento del atlántico. Laboratorio para la Industria y el Medio Ambiente - LIMA LTDA. Informe final. 667 p.

Del Rincón, D., Arnal, J., Latorre, A., Y Sans, A. (1995). Técnicas de investigación en Ciencias Sociales. Madrid: Dykinson.

Ramírez, A., Restrepo, R. Y Viña, G. (1997). "Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulaciones y aplicación", Ciencia, Tecnología y Futuro, 1 (3):135 - 53.

ANEXO 2. SEGUNDA CONSULTA

CONSULTA No. 2.

INTRODUCCIÓN

En el departamento del Atlántico, los cuerpos de agua superficiales se encuentran deteriorados principalmente por acciones antrópicas asociadas con el crecimiento poblacional en sus zonas periféricas, la producción agrícola y la ganadería, que generan contaminación por vertimientos líquidos y sólidos, invasión de los espejos de agua y conflictos por el uso del recurso, entre otros.

Este deterioro hace prioritaria su evaluación con el fin de tomar acciones de control y mitigación, por lo cual es necesario buscar alternativas de valoración que permitan conocer el estado de los mismos.

En el país, se han implementado diferentes estrategias que permiten esta evaluación, de hecho, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM ha diseñado diferentes indicadores que calculan la disponibilidad del recurso y las restricciones por afectaciones a la oferta o a la calidad. Estos índices están asociados al régimen natural (Índice de Aridez - IA, Índice de Regulación Hídrica - IRH) y a la intervención antrópica (Índice de Uso del Agua - IUA, Índice de Vulnerabilidad al desabastecimiento - IVH, Índice de Amenaza Potencial por Afectación a la Calidad del Agua - IACAL e Índice de Calidad del Agua - ICA).

A pesar de estos esfuerzos, es de común conocimiento que para una mejor evaluación de la calidad de los cuerpos de agua, es recomendable diseñar indicadores propios para cada zona o para cada ecosistema debido a que estos responden a diversas características locales.

Los índices de calidad del agua –ICA– son una herramienta simple para la evaluación del recurso hídrico y son usados como una combinación de parámetros que sirven como expresión de la calidad del agua. De esta manera, este trabajo pretende desarrollar un indicador (ICA) para las ciénagas que hacen parte de la zona inundable del río Magdalena en el departamento del Atlántico, utilizando la metodología “Delphi” para la obtención de información, basados en el diseño del Índice de Calidad de agua WQI (Water quality Index), desarrollado por la Fundación de Sanidad Nacional NSF (National Sanitation Fundation) de los Estados Unidos de América del Norte.

Inicialmente se planteo un cuestionario (Consulta No.1) donde se le pedía a los expertos la selección de las variables de mayor importancia para la evaluación de los ecosistemas acuáticos de interés, ya resueltas las encuestas se realizó un análisis de los resultados que serán devueltos en la segunda encuesta (Consulta No. 2) para que los expertos confronten sus resultados con los de los demás participantes y consideren cada una de sus respuestas, posibilitando la realización de cambios en las mismas. Las respuestas serán evaluadas y se determinaran las variables que harán parte del indicador, con sus respectivos pesos (importancia). Luego, en la tercera ronda (Consulta No. 3) se

solicitará de las personas encuestadas que desarrollen una curva de puntuación para cada una de las variables incluidas, tomando en el eje de ordenadas la calidad del agua, de 0 a 100, y en el eje de abscisas las intensidades de cada variable, de tal manera que la curva dibujada represente, en la opinión del encuestado, la variación de la calidad del agua respecto a la cantidad de cada contaminante.

Las gráficas obtenidas se denominaran «relaciones funcionales». Se obtendrá la curva media, para cada contaminante, calculando la media aritmética de todas las gráficas de los encuestados, y una zona de sombra que representaba el 80% de los límites de seguridad (pues dentro de ella se encontraran 80% de las respuestas de los encuestados). Si la zona de sombra es estrecha indica una gran coincidencia en la mayoría de los expertos, mientras que si es ancha, significaba lo contrario.

CONSULTA No. 2.

1. A continuación encontrará los resultados dados por usted en la primera consulta, incluyendo el porcentaje de consenso con respecto a los demás expertos. La idea es que revise su primera respuesta, modificando la categoría si lo considera necesario. Se entenderá que si los espacios continúan vacíos después de devuelta la segunda consulta, es porque usted no considera realizar modificaciones a sus primeros resultados.

Finalmente, es necesaria que esta vez, las variables que consideró "Incluidas" sean calificadas con una puntuación de 1 a 5 según se consideren de menor a mayor importancia, siendo uno la calificación más baja y 5 la más significativa.

No.	Variable	Categoría otorgada por usted	Porcentaje de consenso con respecto a los demás expertos	Cambio de categoría (solo escribir en el espacio de la variable a la que desea hacerle el cambio)	Calificación (1 a 5)
1	Conductividad		El 80% de los expertos incluiría esta variable.		
2	Temperatura		El 80% de los expertos incluiría esta variable.		
3	Turbidez		El 40% la incluiría, el 30% está indeciso y el 30% No la incluiría.		
4	Transparencia		El 50% No la incluiría, el 30% está indeciso y el 20% la incluiría.		
5	Sólidos suspendidos		El 100% de los encuestados está de acuerdo en incluiría.		
6	Sólidos disueltos		El 40% la incluiría, el 40% No la incluiría y el 20% está indeciso.		
7	% de saturación de O ₂		El 90% de los encuestados la incluiría.		
8	Alcalinidad		El 70% la incluiría.		
9	Dureza		El 80% la incluiría.		
10	pH		El 90% de los encuestados la incluiría.		
11	DBO ₅		El 100% de los encuestados está de acuerdo en incluiría.		
12	DQO		El 100% de los encuestados está de acuerdo en incluiría.		
13	Potasio		El 70% de los expertos No la incluiría, Solo un 20% si.		
14	Nitrógeno total		El 60% la incluiría, el 40% está indeciso o no la incluiría.		
15	Fósforo total		El 80% la incluiría.		
16	Relación N/P		El 60% la incluiría, el 40% No.		

No.	Variable	Categoría otorgada por usted	Porcentaje de consenso con respecto a los demás expertos	Cambio de categoría (solo escribir en el espacio de la variable a la que desea hacerle el cambio)	Calificación (1 a 5)
17	Carbonatos		El 50% No la incluiría, un 30% está indeciso y un 20% la incluiría.		
18	Cloruros		El 60% No la incluiría, 30% está indeciso.		
19	Sulfatos		El 70% de los expertos la incluiría, 20% No.		
20	Nitratos		El 60% de los expertos la incluiría, 30% No.		
21	Nitritos		El 50% No la incluiría, un 30% la incluiría y el 20% está indeciso.		
22	Amonio		El 60% de los expertos la incluiría, 40% No.		
23	Cobre		El 70% de los expertos la incluiría, 40% está indeciso.		
24	Plomo		El 70% de los expertos la incluiría, 30% No.		
25	Aluminio		El 50% No la incluiría, un 40% está indeciso y solo el 10% la incluiría.		
26	Arsénico		El 50% No la incluiría, un 40% Si la incluiría y solo el 10% está indeciso.		
27	Cadmio		40% de los expertos la incluiría, otro 30% No la incluiría y el resto está indeciso.		
28	Hierro		40% de los expertos la incluiría, otro 30% No la incluiría y el resto está indeciso.		
29	Mercurio		El 70% de los expertos la incluiría, 30% No.		
30	Níquel		El 70% de los expertos No la incluiría, 20% está indeciso.		
31	Cromo		El 50% No la incluiría, un 40% la incluiría.		
32	Manganeso		El 60% No la incluiría, 20% Si la incluiría.		
33	Baño		El 70% de los expertos No la incluiría, 20% está indeciso.		
34	Zinc		El 50% No la incluiría, 40% Si la incluiría.		
35	Coliformes totales		El 90% de los encuestados la incluiría.		
36	Coliformes fecales		El 100% de los encuestados está de acuerdo en incluirla.		
37	Clorofila a		El 80% la incluiría, el resto no.		

No.	Variable	Categoría otorgada por usted	Porcentaje de consenso con respecto a los demás expertos	Cambio de categoría (solo escribir en el espacio de la variable a la que desea hacerle el cambio)	Calificación (1 a 5)
38	Diversidad de fitoplancton		El 60% la incluiría, 20% No la incluiría.		
39	Riqueza de fitoplancton		El 60% de los expertos la incluiría, 30% No.		
40	Abundancia de fitoplancton		El 90% de los encuestados la incluiría.		
41	Diversidad de perifiton		El 40% la incluiría, un 20% No la incluiría y el 40% está indeciso.		
42	Riqueza de perifiton		El 50% la incluiría, 40% No la incluiría.		
43	Abundancia de perifiton		El 60% de los expertos la incluiría, 30% está indeciso.		
44	Diversidad de zooplancton		El 60% la incluiría, 30% No la incluiría.		
45	Riqueza de zooplancton		El 50% la incluiría, 50% No la incluiría.		
46	Abundancia de zooplancton		El 50% la incluiría, 50% No la incluiría.		
47	Porcentaje de cobertura de las macrófitas en el espejo de agua		El 80% la incluiría.		
48	BMWP/Cot (Macroinvertebrados bentónicos)		El 50% la incluiría, un 30% No la incluiría y el 20% está indeciso.		
49	Diversidad de Macroinvertebrados bentónicos		El 90% de los encuestados la incluiría.		
50	Riqueza de Macroinvertebrados bentónicos		El 60% de los expertos la incluiría, 30% está indeciso.		
51	Abundancia de Macroinvertebrados bentónicos		El 70% la incluiría, 20% No.		
52	Diversidad de peces		El 70% de los expertos la incluiría, 20% está indeciso.		
53	Riqueza de peces		El 50% la incluiría, 40% No la incluiría.		
54	Abundancia de peces		El 40% la incluiría, 40% No la incluiría y 20% está indeciso		

Las siguientes variables fueron Incluidas en la lista por usted y otros expertos. Se presentan con la finalidad de realizar la misma categorización que a las demás variables, es decir, usted deberá calificarlas como Incluido, No incluido, o Indeciso. Así mismo, es necesario que a las variables que considere "Incluidas", las califique con una puntuación de 1 a 5 según se considere de mayor a menor importancia, siendo uno la calificación más baja y 5 la más significativa.

No.	Variable	Categoría otorgada por usted. Los espacios en blanco corresponden a las variables propuestas por otros expertos	Calificación (1 a 5)
55	Grasas y aceites		
56	Contaminantes emergentes		
57	Velocidad del viento		
58	Fitobentos		
59	Intensidad Lumínica (Luz)		
60	Profundidad		
61	Estreptococos fecales		
62	Peces (Relación carnívoros/omívoros)		
63	Abundancia de invertebrados bentónicos (chironómidos y tubificidos)		
64	Fenoles		
65	Hidrocarburos totales de petróleo (HTP)		
66	Tensoactivos (SAAM)		

ANEXO 3. TERCERA CONSULTA

CONSULTA No. 3.

Como finalización de proceso de consulta para la obtención de un índice de calidad de aguas – ICA a través del método "Delphi", que inició con un cuestionario (Consulta No.1) donde se pedía la selección de las variables de mayor importancia para la evaluación de la ciénagas que hacen parte de la zona inundable del río Magdalena en el departamento de Atlántico, y la confirmación de las mismas, posibilitando la realización de cambios en sus respuestas (Consulta No. 2), se seleccionaron las variables que obtuvieron más del 70% de aprobación. Las variables seleccionadas fueron:

No.	Variable	No.	Variable
1	Sólidos suspendidos	14	Mercurio
2	DBOs	15	Nitratos
3	DQO	16	Abundancia de fitoplancton
4	Oxígeno disuelto	17	Diversidad de Macroinvertebrados bentónicos
5	pH	18	Clorofila a
6	Conductividad	19	Porcentaje de cobertura de las macrofitas en el espejo de agua
7	Temperatura	20	Abundancia de invertebrados bentónicos
8	Dureza	21	Abundancia Fitobentos
9	Fósforo total	22	Peces (Relación carnívoros/omívoros)
10	Grasas y aceites	23	Diversidad de zooplancton
11	Alcalinidad	24	Coliformes fecales
12	Sulfatos	25	Coliformes totales
13	Plomo		

En esta tercera y última ronda (Consulta No. 3) se solicita a las personas encuestadas el desarrollo de unas tablas en las cuales deben definir valores de calidad de las variables seleccionadas, comenzando con los que indiquen calidad de aguas muy buenas hasta valores de muy mala calidad, para poder desarrollar una curva de puntuación con la media de los valores obtenidos para cada una de las variables incluidas, tomando en el eje de ordenadas la calidad del agua, de 0 a 100, y en el eje de abscisas las intensidades de cada variable, de tal manera que la curva dibujada represente, la variación de la calidad del agua respecto a la cantidad de cada contaminante.

Para algunas variables, se les suministrará referencias obtenidas de literatura especializada sobre calidad de agua, no con el fin de influir en su respuesta, si no con el propósito de mostrarles datos generales conseguidos en otros estudios.

CONSULTA No. 3.

Como se les mencionó anteriormente se van a construir los niveles de calidad de las variables seleccionadas, para esto, se necesita que definan valores de calidad de agua según la variable, siendo cero (0) una calidad de agua muy mala y cien (100) una calidad de agua muy buena. Además, si lo desea puede dejar alguna observación.

1. Sólidos Suspendidos Totales

VALORES GENERALES DE REFERENCIA		
SST (mg/L)	Calidad	Fuente
<10	Muy buena, cuenca alta	Nisbert y Vemeaux (1970)
10 - 25	Normal, cuenca alta media	Nisbert y Vemeaux (1970)
25 - 50	Buena, cuenca media baja	Nisbert y Vemeaux (1970)
50 - 75	Buena, cuenca baja	Nisbert y Vemeaux (1970)
75 - 150	Media, contaminados	Nisbert y Vemeaux (1970)
150 - 300	Mediocre, contaminados	Nisbert y Vemeaux (1970)
>300	Muy contaminados	Nisbert y Vemeaux (1970)
< 15	Objetivos de calidad para el quinquenio 2011-2020	CRA (2011)

Calidad	Valor Q	SST (mg/L)
Muy buena	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
Muy Mala	0	

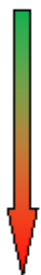
Observación	
-------------	--

2. DBO₅

VALORES GENERALES DE REFERENCIA		
DBO (mg/L)	Calidad	Fuente
0,75 - 2	Recreación	Tennessee Valley Autonomy (2016)


OBTENCIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA (ICA) PARA LAS CIÉNAGAS QUE FORMAN PARTE DE LA ZONA INUNDABLE DEL RÍO MAGDALENA EN EL DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO – COLOMBIA, A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI

VALORES GENERALES DE REFERENCIA		
DBO (mg/L)	Calidad	Fuente
1,5 - 3,5	Recreo - Pesca	Tennessee Valley Autonomy (2016)
< 1	Normal	Nisbert y Verneaux (1970)
1 - 3	Aceptable	Nisbert y Verneaux (1970)
3 - 6	Calidad dudosa	Nisbert y Verneaux (1970)
> 6	Anormal	Nisbert y Verneaux (1970)
< 5	Objetivos de calidad para el quinquenio 2011-2020	CRA (2011)

Calidad	Valor Q	DBOs (mg/L)
Muy buena	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
	Muy Mala	0

Observación	
-------------	--


3. DQO

Calidad	Valor Q	DQO (mg/L)
Muy buena	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
	Muy Mala	0

Observación	
--------------------	--

4. Oxígeno Disuelto

VALORES GENERALES DE REFERENCIA		
OXÍGENO (mg/L - %)	Calidad	Fuente
6,5 - 7,5	Recreación	Tennessee Valley Autonomy (2016)
5 - 7	Recreo - pesca	Tennessee Valley Autonomy (2016)
>4	Preservación flora y fauna aguas cálidas	Ministerio de Salud (1984)
>5	Aguas frías	Ministerio de Salud (1984)
>70%	Contacto primario y secundario (recreación)	Ministerio de Salud (1984)
> 3	Objetivos de calidad para el quinquenio 2011-2020	CRA (2011)

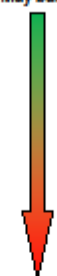
Calidad	Valor Q	OD (mg/L)
 Muy Buena	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
Muy Mala	0	

Observación	
--------------------	--

5. pH

La medición del pH es uno de las actividades más importantes y de mayor frecuencia en las pruebas químicas del agua. El rango de pH para aguas naturales oscila entre 4 y 9 y la mayoría son ligeramente básicas debido a la presencia de bicarbonatos y carbonatos de metales alcalinos y alcalinotérreos. El pH del agua pura a 25°C es de 7, neutro (Invemar, 2003, p 22).

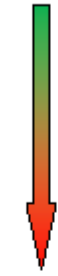
Como objetivo de calidad para estas ciénagas, según la CRA están los valores de 7-9 unidades de pH.

Calidad	Valor Q	Unidades de pH
 Muy Buena Muy Mala	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
0		

Observación	
-------------	--

6. Conductividad

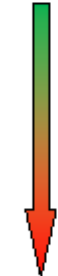
VALORES GENERALES DE REFERENCIA		
CONDUCTIVIDAD (µS/cm)	Calidad	Fuente
Hasta 400	Deseable potable	Real Decreto 140/2003
Hasta mineralización	Tolerable potable	Real Decreto 140/2003
20 a 50	Alta montaña	Roldan y Ramírez (2008)
150 a 200	Cuenca baja	Roldan y Ramírez (2008)
0,04	Agua pura	Ross-Moreno (2011)
0,05 a 5	Agua destilada	Ross-Moreno (2011)
5 a 50	Agua de lluvia	Ross-Moreno (2011)
< 2500	Aguas Potables	Ross-Moreno (2011)
2500 a 20000	Aguas salobres	Ross-Moreno (2011)
45000 a 55000	Aguas de mar	Ross-Moreno (2011)
> 100000	Salmueras	Ross-Moreno (2011)
0,005	Agua ultra pura	Equipos y Laboratorio de Colombia (2011-2015)
1	Agua de montaña	Equipos y Laboratorio de Colombia (2011-2015)
500 a 800	Agua doméstica	Equipos y Laboratorio de Colombia (2011-2015)
1055	Max. Para agua potable	Equipos y Laboratorio de Colombia (2011-2015)

Calidad	Valor Q	CONDUCTIVIDAD (µS/cm)
	Muy buena	100
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
	Muy Mala	0

Observación	
-------------	--

7. Temperatura

El objetivo de calidad para el quinquenio 2011-2020 para la CRA es de temperaturas < 40 °C.


Calidad	Valor Q	TEMPERATURA (°C)
	Muy buena	100
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
	Muy Mala	0

Observación	
-------------	--

OBTENCIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA (ICA) PARA LAS CIÉNAGAS QUE FORMAN PARTE DE LA ZONA INUNDABLE DEL RÍO MAGDALENA EN EL DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO – COLOMBIA, A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI

8. Dureza


VALORES GENERALES DE REFERENCIA		
DUREZA (mg/L)	Calidad	Fuente
150	Deseable potable	Real Decreto 140/2003
<10	Oligotrofia	Nisbert y Vermeaux (1970)
10 - 20	Productividad débil	Nisbert y Vermeaux (1970)
20 - 40	Productividad mediocre	Nisbert y Vermeaux (1970)
40 - 80	Productividad media	Nisbert y Vermeaux (1970)
80 - 110	Eutrofia	Nisbert y Vermeaux (1970)
110 - 150	Aguas duras	Nisbert y Vermeaux (1970)
>150	Aguas incrustantes muy duras	Nisbert y Vermeaux (1970)

Calidad	Valor Q	DUREZA (mg/L)
	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
	Muy Mala	0

Observación	
-------------	--

9. Fósforo Total

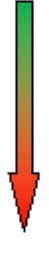
VALORES GENERALES DE REFERENCIA		
FÓSFORO TOTAL (mg/L)	Calidad	Fuente
0,17	Muy buena, cuenca alta	Real Decreto 140/2003
<0,01	Normal, cuenca alta media	US. EPA. (1980)
0,01 - 0,02	Buena, cuenca media baja	US. EPA. (1980)
>0,02	Buena, cuenca baja	US. EPA. (1980)
≤ 0,1	Objetivos de calidad para el quinquenio 2011-2020	CRA (2011)

Calidad	Valor Q	FÓSFORO TOTAL (mg/L)
 Muy buena	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
Muy Mala	0	

Observación	
-------------	--

10. Grasas y Aceites


Como objetivo de calidad de Grasas y Aceites para estas ciénagas, según la CRA, está el valor de < 5 mg/L.

Calidad	Valor Q	GRASAS Y ACEITES (mg/L)
 Muy buena	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
Muy Mala	0	

Observación	
-------------	--


11. Alcalinidad

VALORES GENERALES DE REFERENCIA		
ALCALINIDAD (mg/L)	Calidad	Fuente
<25	Anta montaña	Nisbert y Vemeaux (1970)
25 - 50	Curso medio	Nisbert y Vemeaux (1970)
50 - 100	Macisos cristalinos	Nisbert y Vemeaux (1970)
100 - 150	Curso inferior	Nisbert y Vemeaux (1970)
150 - 250	Aguas muy productivas	Nisbert y Vemeaux (1970)
250 - 350	Aguas contaminadas	Nisbert y Vemeaux (1970)
>350	Aguas contaminadas	Nisbert y Vemeaux (1970)

Calidad	Valor Q	ALCALINIDAD (mg/L)
	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
Muy Mala	0	


Observación	
-------------	--

12. Sulfatos

Calidad	Valor Q	SULFATOS (mg/L)
	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
Muy Mala	0	

Observación	
--------------------	--

13. Nitratos

Calidad	Valor Q	NITRATOS (mg/L)
Muy buena	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
	Muy Mala	

Observación	
--------------------	--

14. Plomo

Categorización de las fuentes de provisión de agua para consumo humano en función de la concentración de plomo (CPb)

FUENTE	CATEGORÍA	CONDICIONES DE CALIDAD
SUPERFICIAL	Calidad apropiada con tratamiento convencional	$CPb \leq 29,3 \mu\text{g/l}$ (1)
SUPERFICIAL	Calidad condicionada a aplicación de tratamientos especiales que verifiquen remociones de plomo no menores que 80 %	$29,3 \mu\text{g/l} < CPb \leq 58,5 \mu\text{g/l}$ (1)
SUPERFICIAL	Calidad inapropiada. Requerimiento de acciones de restauración de calidad de la fuente.	$CPb > 58,5 \mu\text{g/l}$ (3)
SUBTERRANEA	Calidad apropiada para consumo directo o para cuando el uso esté condicionado a la aplicación de una técnica de desinfección	$CPb \leq 11,7 \mu\text{g/l}$ (2)

Notas:

- (1) Referida a la muestra de agua filtrada
 (2) Referida a la muestra de agua sin filtrar

OBTENCIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA (ICA) PARA LAS CIÉNAGAS QUE FORMAN PARTE DE LA ZONA INUNDABLE DEL RÍO MAGDALENA EN EL DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO – COLOMBIA, A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI


Concentraciones de Plomo asociadas a efectos tóxicos agudos y crónicos seleccionadas para el cálculo de relaciones Toxicidad Aguda/Crónica.

Especie	Concentración asociada a toxicidad aguda [µg/l]	Concentración asociada a toxicidad crónica [µg/l]	Relación Toxicidad Aguda/Crónica para cada especie (SACR)	Referencia
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	1314 (1)	11,11 (1)	118,3	Davies et al., 1976
<i>Pimephales promelas</i>	2100	329	6,4	Spehar and Fiandt, 1986
<i>Salmo salar</i>	700	31,6	22	Grande and Andersen, 1983
<i>Gambusia pseudohimnaeus</i>	124	28,4	4,4	Spehar et al., 1978
<i>Daphnia magna</i>	1036,27 (1)	57,20 (1)	18,11	Chapman et al., 1980
<i>Hyalella azteca</i>	20,16	63,17 (1)	0,32	MacLean et al., 1996

Nota:

(1) Corresponde a la media geométrica de los valores reportados por el autor

Fuente: República Argentina (2005). Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. Desarrollos de niveles guía nacionales de calidad de agua ambiente correspondientes a Plomo.

Calidad	Valor Q	PLOMO (µg/L)
 Muy buena Muy Mala	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
0		

Observación	
-------------	--

15. Mercurio

Concentraciones de mercurio ambiental – debido a causas naturales – encontradas en aguas superficiales no contaminadas

Concentraciones de mercurio ambiental (µg/L)	
< 0,5	Ríos y aguas subterráneas
0,07	Ríos y lagos
0,0033 – 0,1	Ríos
0,001 – 0,01	Ríos y lagos cristalinos
Otros valores de interés	
Concentraciones de mercurio ambiental (µg/l)	
< 0,1	Aguas Lluvias
< 0,1	Agua potable
< 0,05	Agua de mar
< 0,24	Ríos Canadienses


La norma para el mercurio en agua potable según la OMS es 1,0 µg/L.

Concentraciones admisibles de mercurio según la destinación del recurso hídrico de acuerdo a la legislación colombiana

Variable	Concentración admisible de mercurio en fuentes hídricas destinadas para:	Valor (µg/L)	Referencia
Colombia	Consumo humano y doméstico	2,0	Art. 38 y 39, Dec. 1594/84*
	Actividades pecuarias	10,0	
	Actividades agrícolas	-	
	Preservación de flora y fauna	10,0	
California (EE-UU)	Protección vida acuática	0,05	(31)
Canadá	Protección vida acuática	0,026 (Inorgánico)	(32)
		0,004 (Orgánico)	
Estados Unidos	Protección vida acuática (EPA)	1,4	(31)


*En el caso colombiano, aunque el decreto 1594 de 1984 fue derogado en el año 2010, todavía siguen vigentes los artículos 20 y 21, y los artículos del 37-48, entre otros —ver Decreto 3930 de 2010— mientras el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial exdite las regulaciones respectivas.


Fuente: Díaz-Arriaga, F (2014). Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. Rev. Salud pública. 16 (6): 947-957.

Calidad	Valor Q	MERCURIO (µg/L)
	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
Muy Mala	0	

Observación	
-------------	--

16. Abundancia de Fitoplancton

Calidad	Valor Q	FITOPLANCTON (Individuos/Litro)
	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	

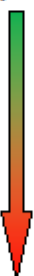
Calidad	Valor Q	FITOPLANCTON (Individuos/Litro)
 Muy Mala	20	
	10	
	0	

Observación	
--------------------	--

17. Diversidad de macroinvertebrados bentónicos

Roldan y Ramírez (2008) indican que comunidades hidrobiológicas con valores de diversidad (H') inferiores a 1,5 bits/Individuo presentan aguas contaminadas, entre 1,5 y 3,0 bits/Individuo aguas medianamente contaminadas y entre 3,0 y 5,0 bits/Individuo aguas limpias.

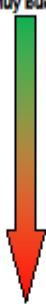
Para el caso se esta variable se utilizaran valores de diversidad basados en el índice de Shannon-Wiener (H').

Calidad	Valor Q	DIVERSIDAD (bits/Individuo)
 Muy buena Muy Mala	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
0		

Observación	
--------------------	--

OBTENCIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA (ICA) PARA LAS CIÉNAGAS QUE FORMAN PARTE DE LA ZONA INUNDABLE DEL RÍO MAGDALENA EN EL DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO – COLOMBIA, A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI

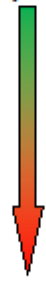
18. Clorofila a

Calidad	Valor Q	CLOROFILA-a (mg/m ³)
 Muy buena Muy Mala	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
0		

Observación	
--------------------	--

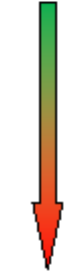
19. Porcentaje de cobertura de las macrófitas en el espejo de agua

En esta variable nos referimos específicamente al porcentaje del cuerpo de agua cubierto por macrófitas, por ejemplo, un cuerpo de agua totalmente cubierto por macrófitas, tiene un 100% de cobertura.

Calidad	Valor Q	PORCENTAJE DE COBERTURA (%)
 Muy buena Muy Mala	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
0		


Observación	
--------------------	--

20. Abundancia de macroinvertebrados bentónicos

Calidad	Valor Q	MACROINVERTEBRADOS BENTÓNICOS (Individuos/m ²)
	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
	Muy Mala	0

Observación	
--------------------	--

21. Abundancia de Fitobentos

Calidad	Valor Q	ABUNDANCIA DE FITOBENTOS (Individuos/cm ²)
	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
	Muy Mala	0


Observación	
--------------------	--

22. Peces (relación carnívoros/omnívoros)

Un indicador favorable de la calidad del agua de un sistema puede ser obtenido examinando la estructura trófica de la comunidad que alberga. Las alteraciones de la calidad del agua u otras condiciones del hábitat, incluyendo el uso del suelo en las cuencas, comúnmente resultan en la disminución de muchos recursos alimenticios para los peces (Velázquez-Velázquez y Vega-Cendejas, 2004, p 14). Los cambios resultantes en las comunidades de peces pueden ser medidas mediante una serie de indicadores tróficos; se ha encontrado (Karr, 1981, citado por Velázquez-Velázquez y Vega-Cendejas, 2004, p 14) que un sitio declina en calidad a medida que la proporción de omnívoros se incrementa. La dominancia de estas especies crece presumiblemente como resultado de la degradación de la base alimentaria, especialmente de los invertebrados. En consecuencia, las especies oportunistas aumentan en número y proporción.

Karr (1981, citado por Velázquez-Velázquez y Vega-Cendejas, 2004, p 14) estableció que muestras con menos de 20% de individuos omnívoros son buenas, mientras que aquellos sitios con más de 45% de omnívoros en la muestra están ampliamente degradados. Otro criterio importante es la proporción de peces insectívoros o de consumidores de invertebrados en general (invertívoros). En términos generales existe una fuerte correlación negativa entre la abundancia de peces invertívoros y la de omnívoros (Velázquez-Velázquez y Vega-Cendejas, 2004, p 14).

La presencia de carnívoros es otro parámetro indicador de la calidad de un ambiente. Poblaciones viables y saludables de estas especies (carnívoros tope) indican una comunidad saludable y diversificada; a medida que la calidad del agua declina, las poblaciones de esas especies disminuyen o desaparecen. Una proporción mayor de 5% de estos individuos indica ecosistemas saludables; mientras que muestras con menos de 1% de estos organismos indican condiciones de mala salud del ecosistema (Velázquez-Velázquez y Vega-Cendejas, 2004, p 14).

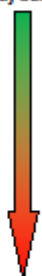
Calidad	Valor Q	RELACIÓN (carnívoros/omnívoros)
	100	/
	90	/
	80	/
	70	/
	60	/
	50	/
	40	/
	30	/
	20	/
	10	/
	Muy Mala	0

Observación	
-------------	--

23. Diversidad de zooplancton


Roldan y Ramirez (2008), indican que comunidades hidrobiológicas con valores de diversidad (H') inferiores a 1,5 bits/Individuo presentan aguas contaminadas, entre 1,5 y 3,0 bits/Individuo aguas medianamente contaminadas y entre 3,0 y 5,0 bits/Individuo aguas limpias.

Para el caso se esta variable se utilizaran valores de diversidad basados en el índice de Shannon-Wiener.

Calidad	Valor Q	DIVERSIDAD (bits/Individuo)
 Muy buena	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
Muy Mala	0	

Observación	
-------------	--

24. Coliformes Fecales


Calidad	Valor Q	COLIFORMES FECALES (NMP/100 mL)
 Muy buena	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
Muy Mala	0	

Observación	
-------------	--

OBTENCIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA (ICA) PARA LAS CIÉNAGAS QUE FORMAN PARTE DE LA ZONA INUNDABLE DEL RÍO MAGDALENA EN EL DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO – COLOMBIA, A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI

25. Coliformes Totales

VALORES GENERALES DE REFERENCIA		
COLIFORMES TOTALES (NMP/100 mL)	Calidad	Fuente
50 - 100	Recreación	Tennessee Valley Autonomy (2016)
100 - 1000	Recreo - pesca	Tennessee Valley Autonomy (2016)
0	Potable	Real Decreto 140/2003
1000	Potable desinfección (contacto primario)	Ministerio de Salud (1984)
5000	Agrícola (contacto secundario)	Ministerio de Salud (1984)
20000	Potable (tratamiento convencional)	Ministerio de Salud (1984)
< 5000 NMP/100 mL	Objetivos de calidad para el quinquenio 2011-2020	CRA (2011)

Calidad	Valor Q	COLIFORMES TOTALES (NMP/100 mL)
 Muy Buena	100	
	90	
	80	
	70	
	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
Muy Mala	0	

Observación	
-------------	--

¡Muchas Gracias!

BIBLIOGRAFÍA

CRA - Corporación Autónoma Regional del Atlántico. (2011). Resolución 000258 del 13 de abril de 2011. Por el cual se establecen los objetivos de calidad para las cuencas hidrográficas de la jurisdicción para el periodo 2011-2020. 9 p.

Díaz-Arriaga, F (2014). Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. Rev. Salud pública. 16 (6): 947-957.

Equipos y Laboratorio de Colombia. (2011-2015). Conductividad eléctrica. Recuperado de: http://equiposylaboratorio.com/sito/contenidos_mo.php?it=5397.

INVEVAR - Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. (2003). Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos (aguas, sedimentos y organismos). Programa CALIDAD AMBIENTAL MARINA – CAM. Santa Marta – Colombia. 148 p.

Ministerio de Salud. (1984). Decreto 1594 de 1984 por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos en la República de Colombia.

Nisbet, M., & Verneaux, J. (1970). "Composants chimiques des eaux courantes." Ann. Limnol., 6(2): 161-190.
Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.

República Argentina (2005). Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. Desarrollos de niveles guía nacionales de calidad de agua ambiente correspondientes a Plomo.

Roldán, G. & Ramírez, J. (2008). Fundamentos de limnología neotropical. 2ª Edición. Colombia, Medellín: Editorial Universidad de Antioquia. ISBN: 978-958-714-144-3. 440 p.

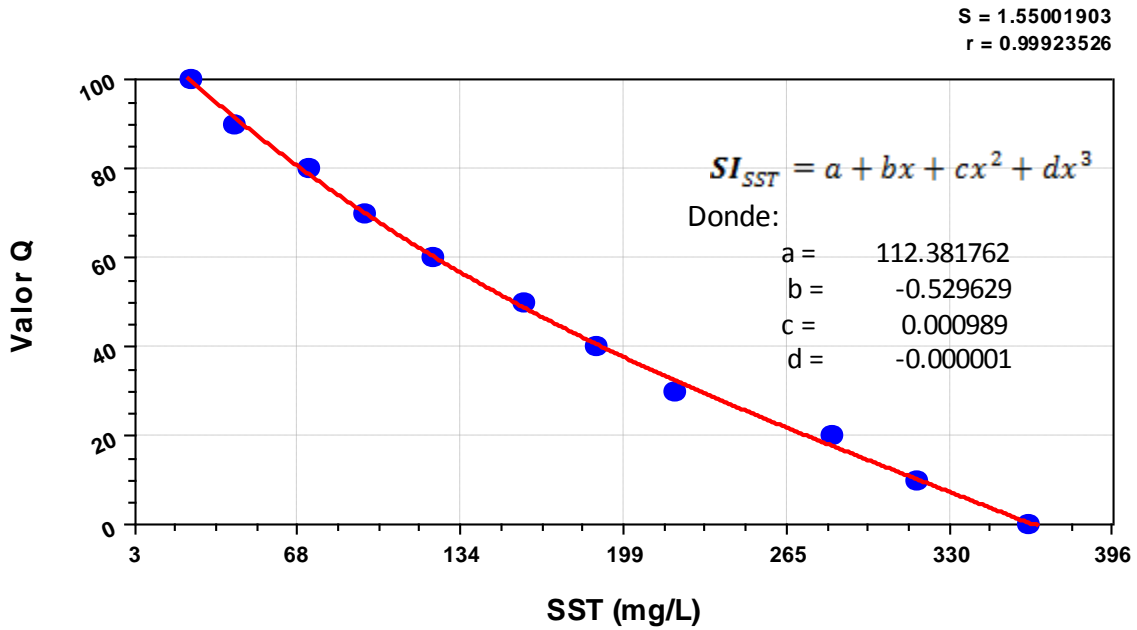
Ross-Moreno, A. (2011). Capítulo 7: Parámetros físicos de calidad de las aguas. Conductividad, resistividad y temperatura. Recuperado de: <http://www.mailxmail.com/curso-agua-calidad-contaminacion-1-2/parametros-fisicos-calidad-aguas-conductividad-resistividad-temperatura>.

Tennessee Valley Autonomy. (2016). Calidad de agua. Recuperado de: <https://www.tva.gov/Environment/Environmental-Stewardship/Water-Quality>.

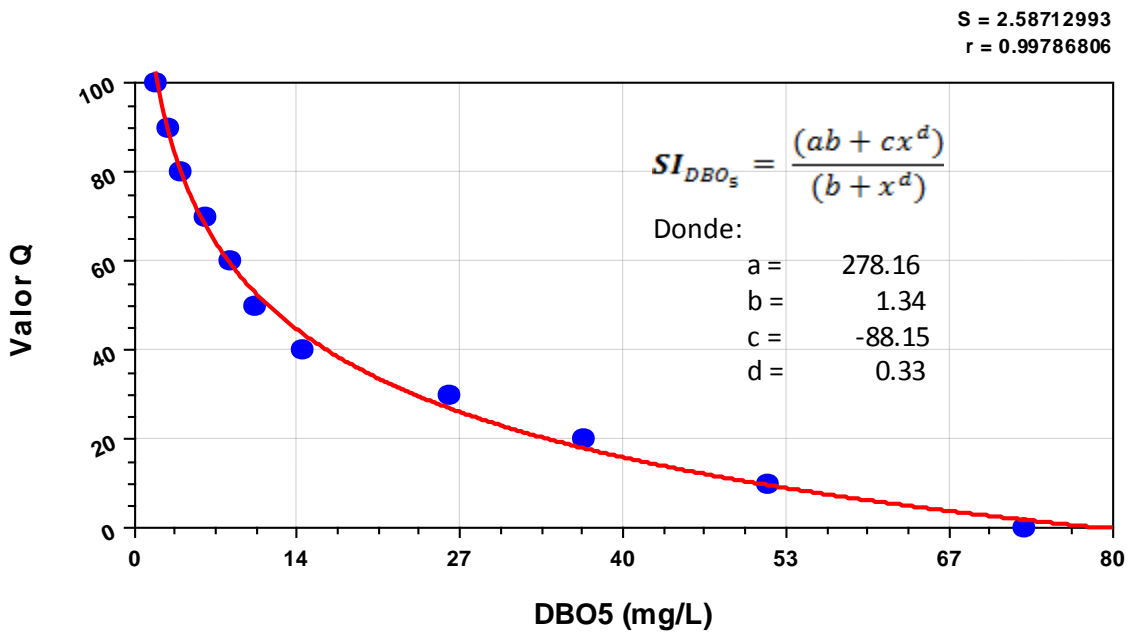
US. EPA. (1980). Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes. Environmental Protection Agency, EPA-600. Cincinnati, Ohio.

Velázquez-Velázquez, E., & Vega-Cendejas, M. (2004). Los peces como indicadores del estado de salud de los ecosistemas acuáticos. CONABIO. Biodiversitas 57:12-15.

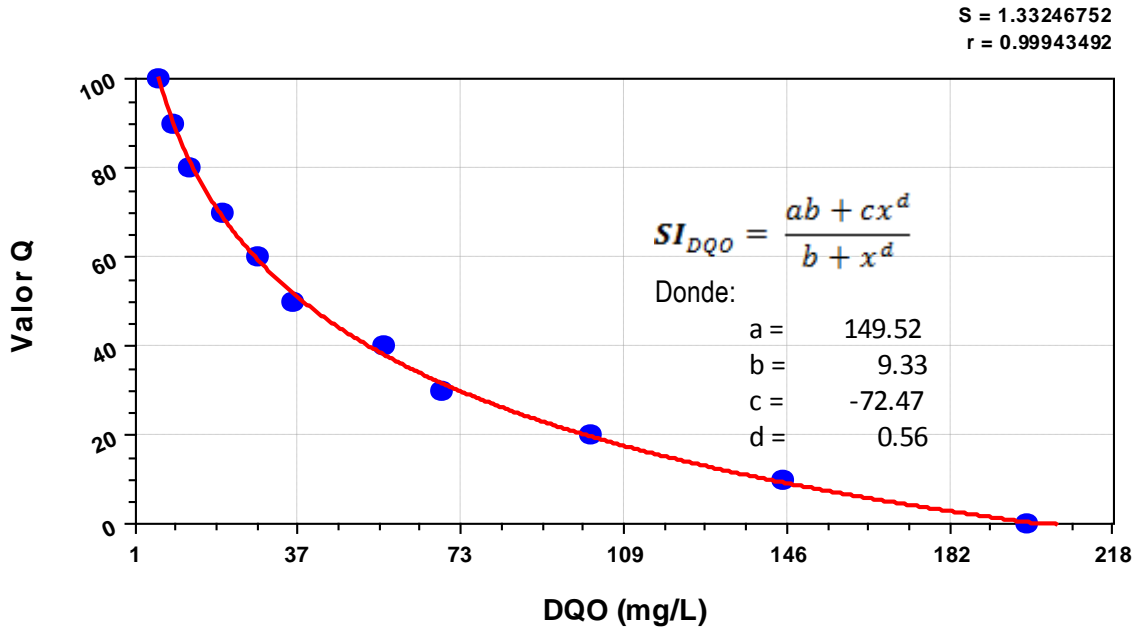
ANEXO 4. CURVAS DE CALIDAD (Q) Y ECUACIONES



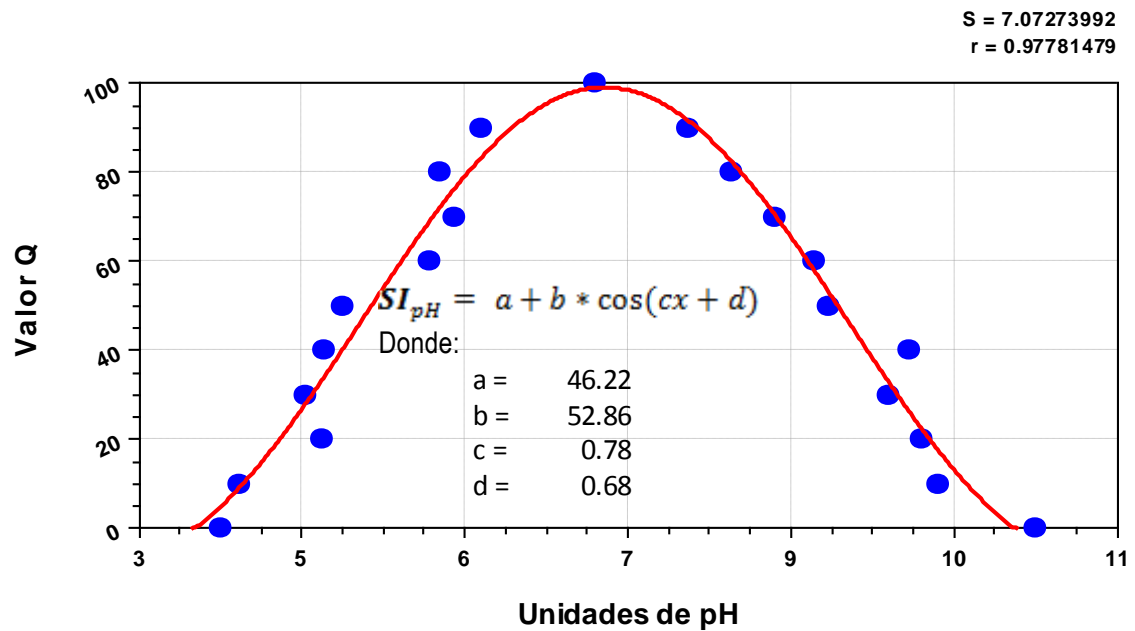
Sí SST ≥ 383 mg/L, Q = 0. Sí SST ≤ 25 mg/L, Q = 100.



Sí DBO₅ ≥ 73 mg/L, Q = 0. Sí DBO₅ ≤ 2 mg/L, Q = 100.

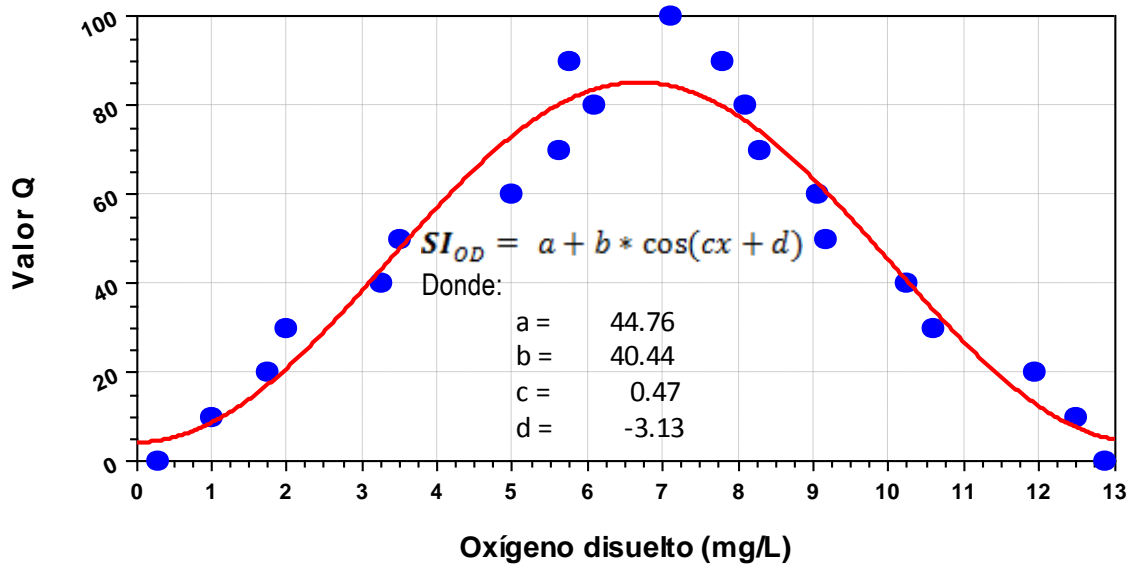


Sí DQO ≥ 199 mg/L, Q = 0. Sí DQO ≤ 6 mg/L, Q = 100.



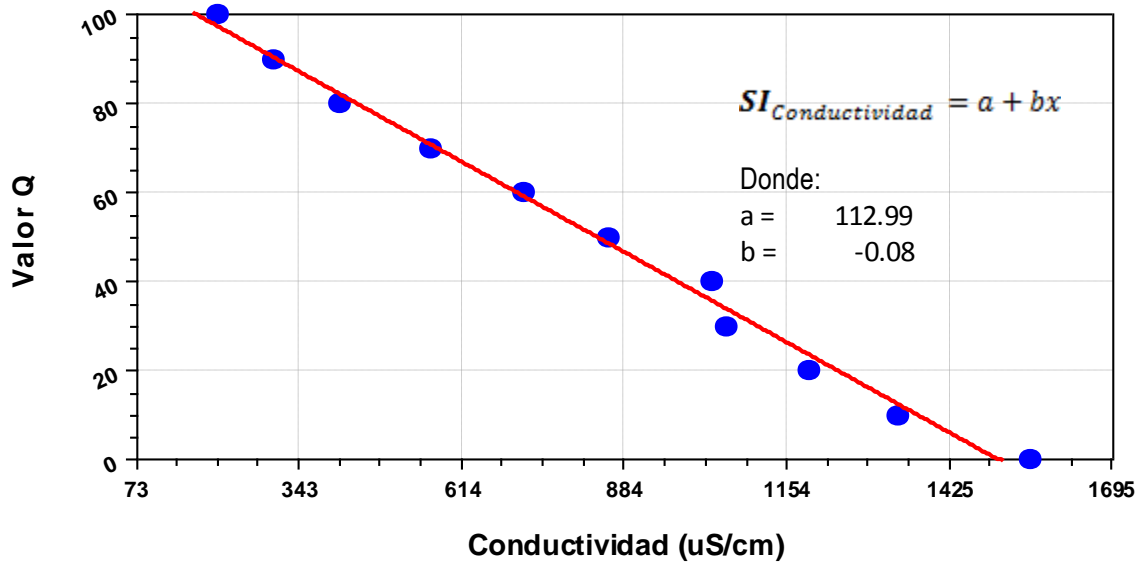
Sí, 4 unidades ≤ pH ≥ 10 unidades, Q = 0.

S = 8.01517447
 r = 0.97141610

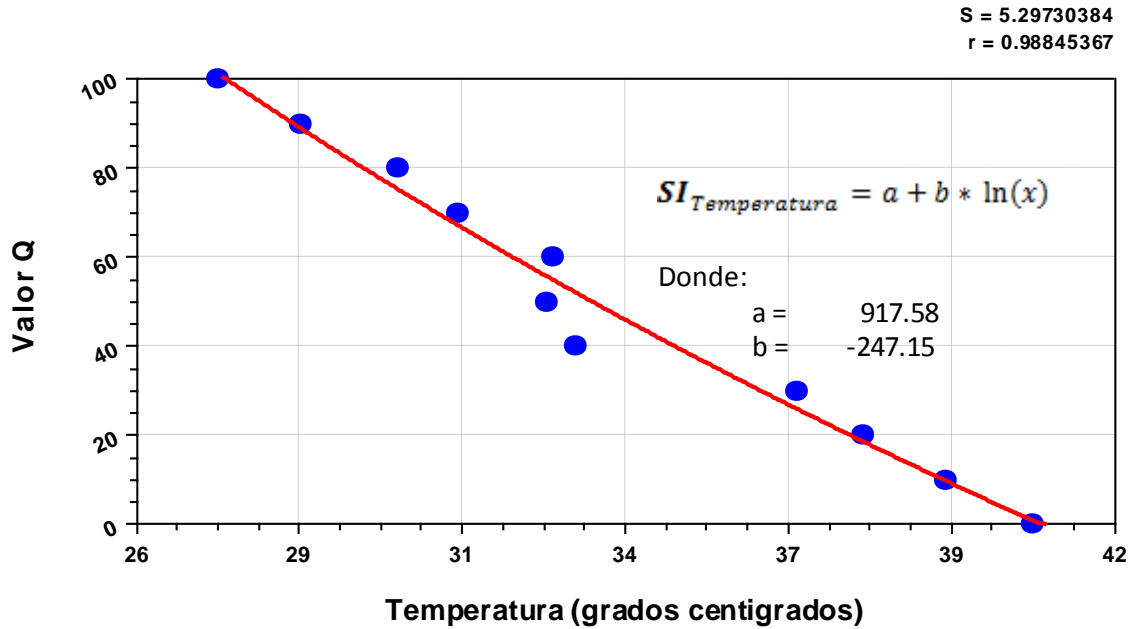


Si $0,3 \text{ mg/L} \leq OD \leq 12,87 \text{ mg/L}$, $Q = 0$.

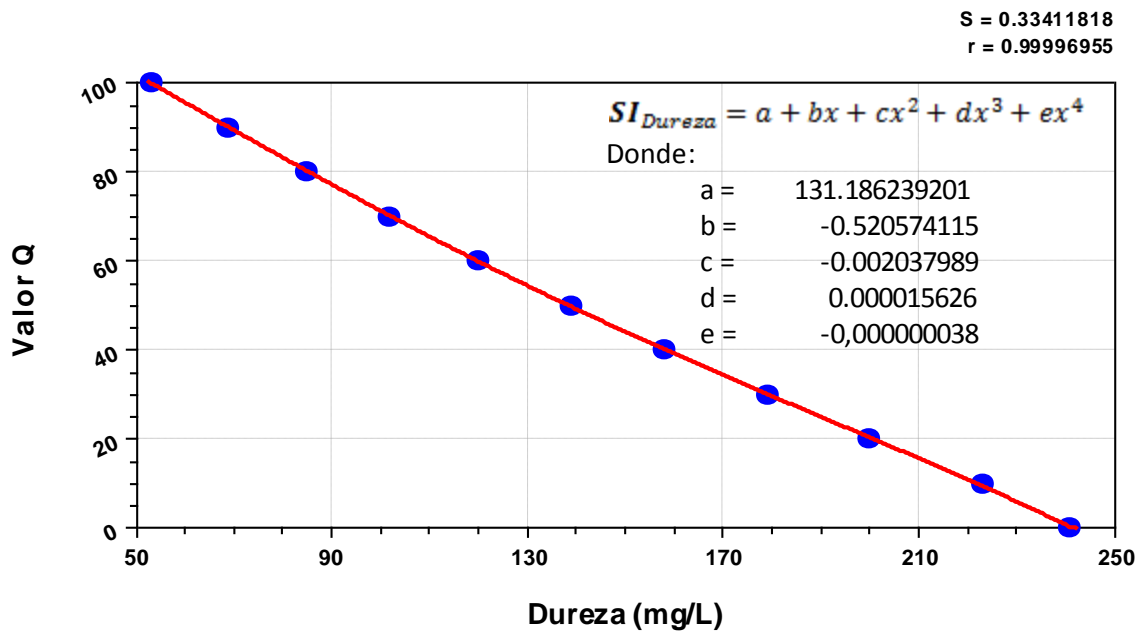
S = 3.07039800
 r = 0.99613589



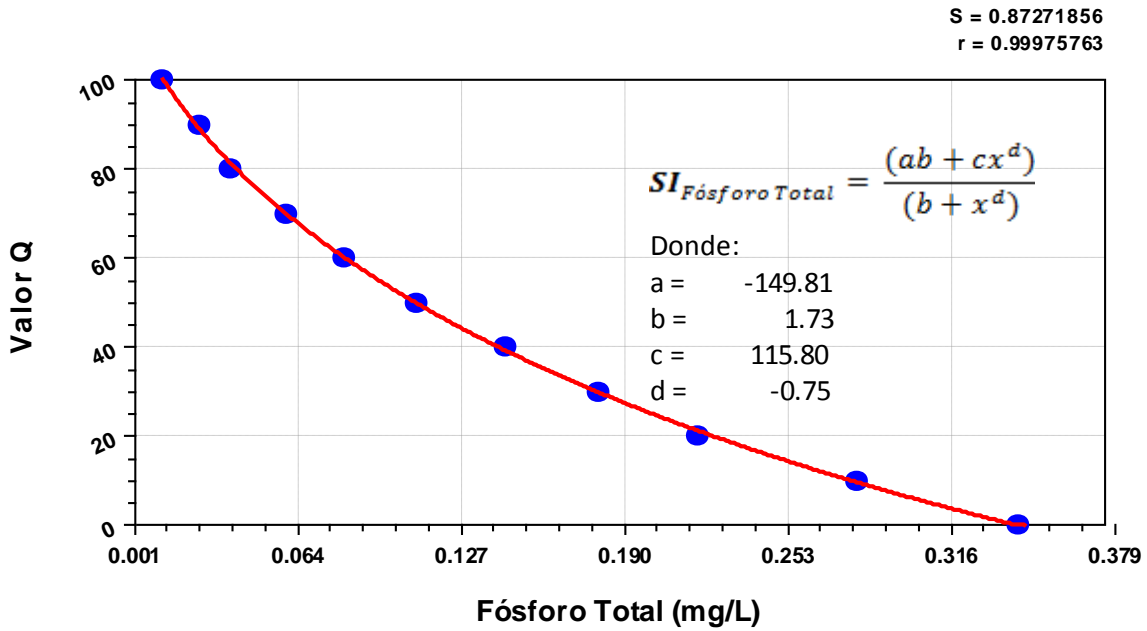
Si Conductividad $\geq 1560 \mu\text{S/cm}$, $Q = 0$. Si Conductividad $\leq 208 \mu\text{S/cm}$, $Q = 100$.



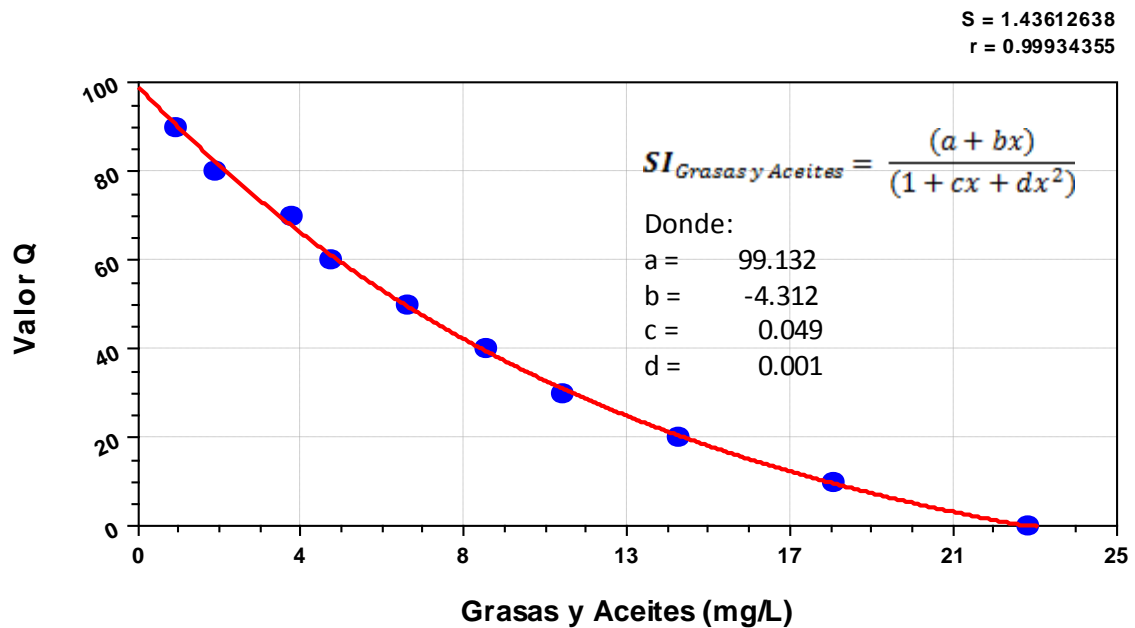
Sí Temperatura $\geq 40,84$ °C, Q = 0. Sí Temperatura $\leq 27,2$ °C, Q = 100.



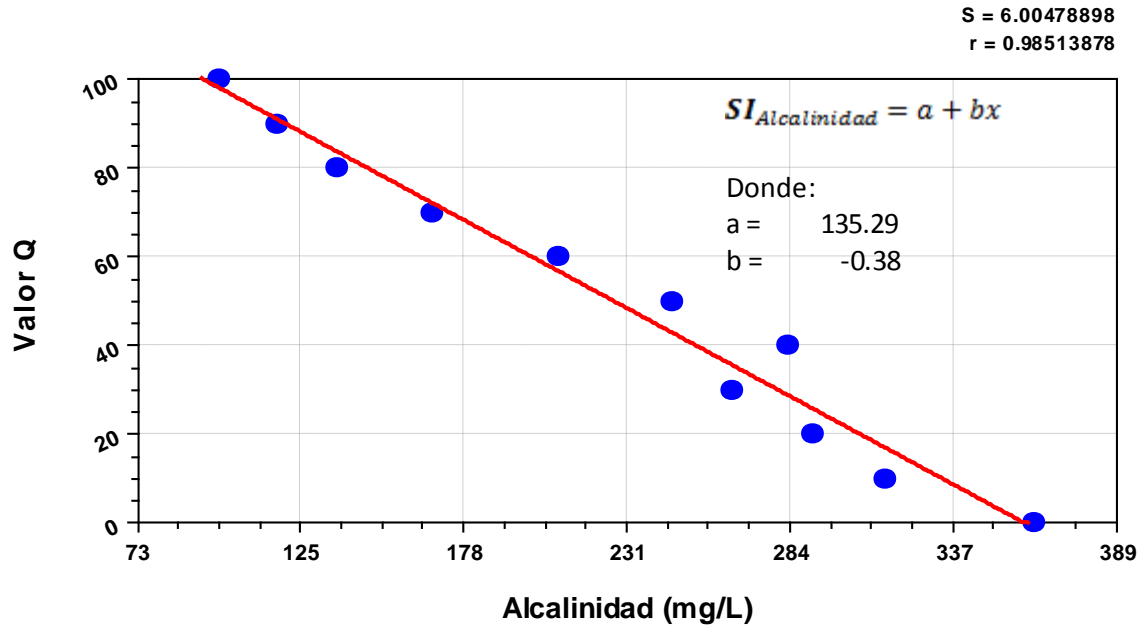
Sí Dureza ≥ 241 mg/L, Q = 0. Sí Dureza ≤ 53 mg/L, Q = 100.



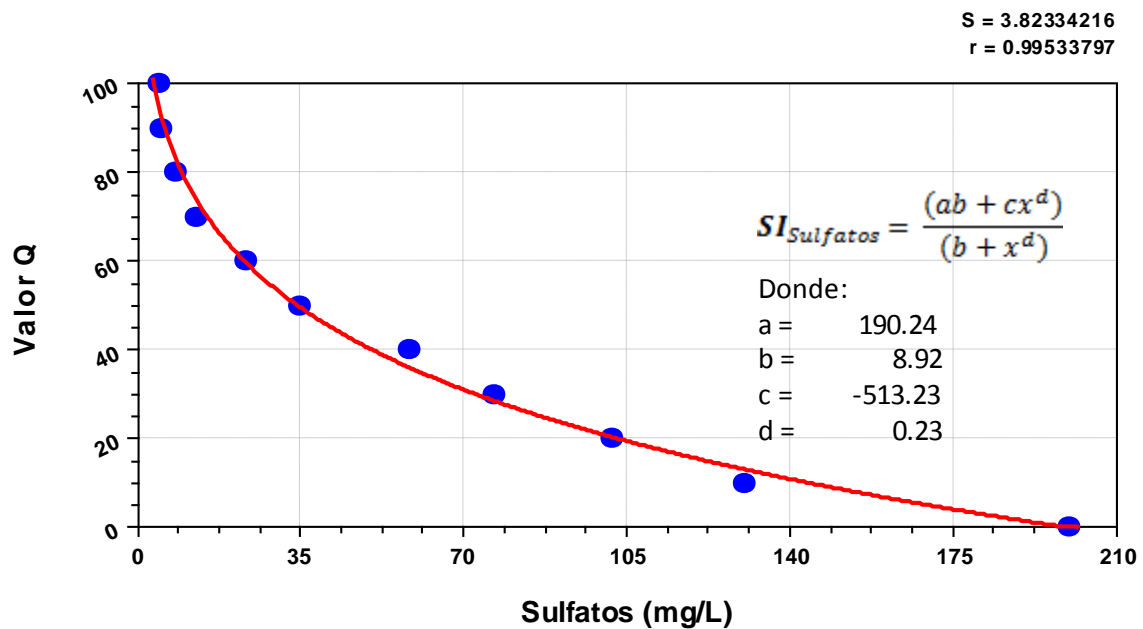
Sí Fósforo Total $\geq 0,342$ mg/L, Q = 0. Sí Fósforo Total $\leq 0,012$ mg/L, Q = 100.



Sí Grasas y Aceites ≥ 23 mg/L, Q = 0. Sí Grasas y Aceites ≤ 0 mg/L, Q = 100.

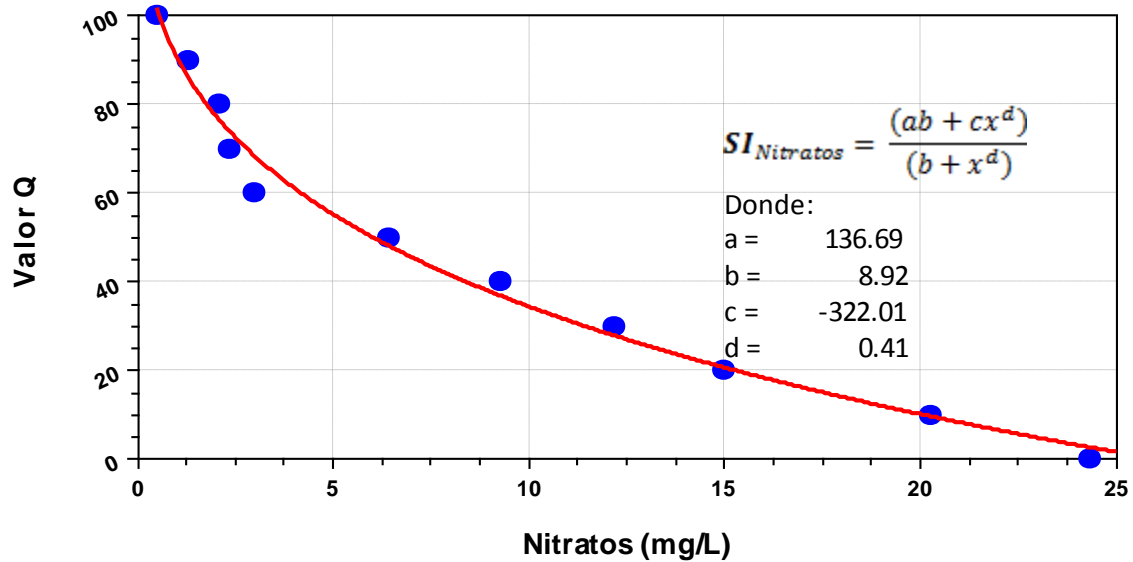


Sí Alcalinidad \geq 363 mg/L, Q = 0. Sí Alcalinidad \leq 99 mg/L, Q = 100.



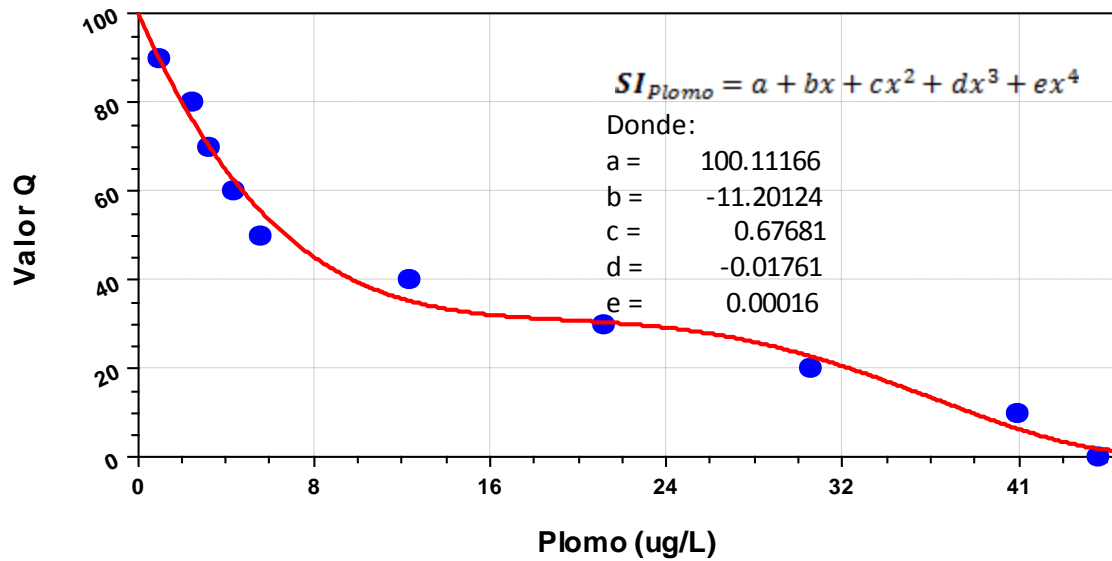
Sí Sulfatos \geq 200,03 mg/L, Q = 0. Sí Sulfatos \leq 4,75 mg/L, Q = 100.

S = 4.49818834
 r = 0.99354115



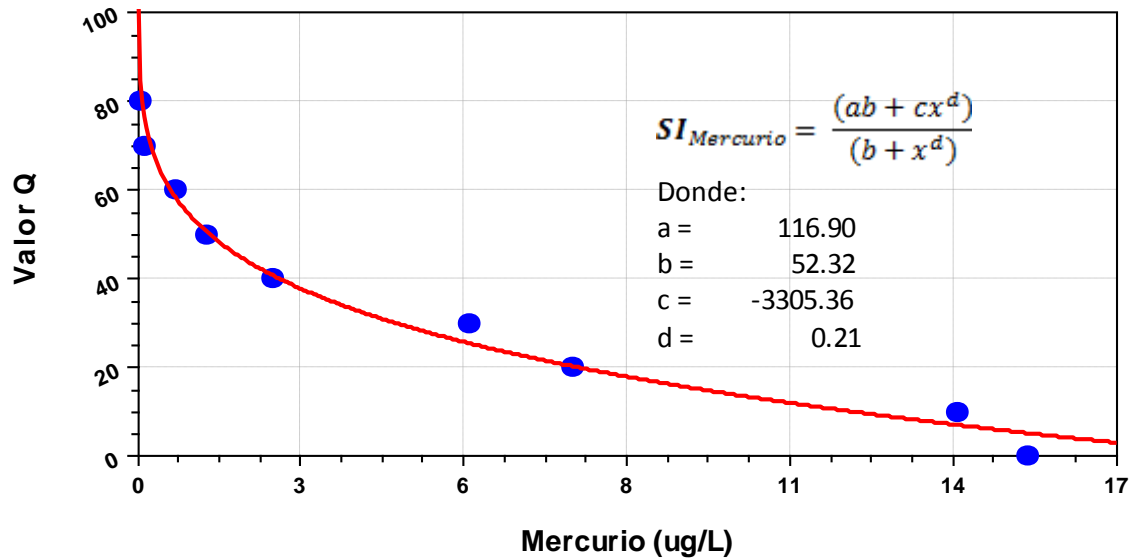
Si Nitratos \geq 24,36 mg/L, Q = 0. Si Nitratos \leq 0,524 mg/L, Q = 100.

S = 3.94728096
 r = 0.99574156



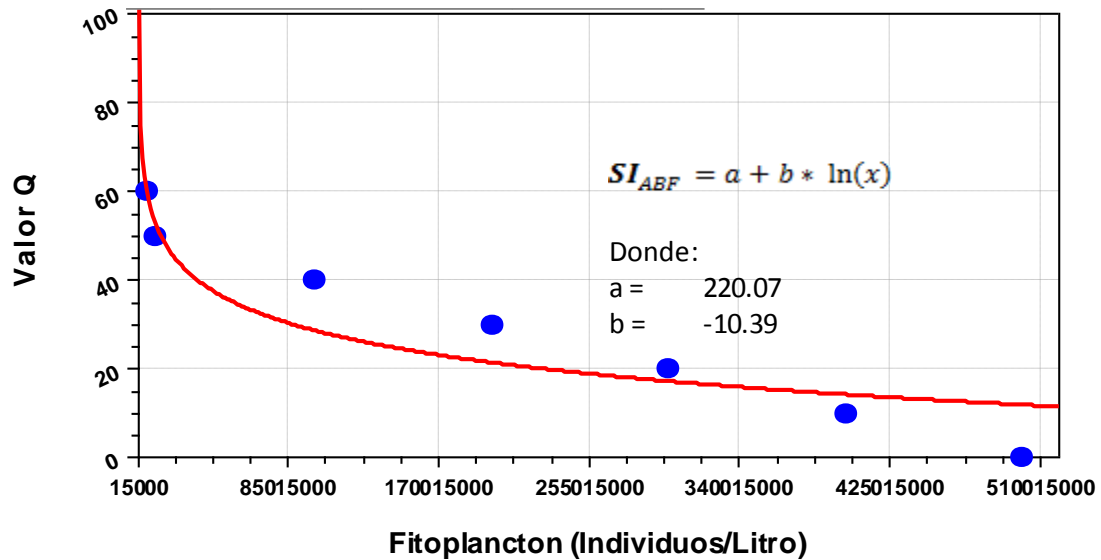
Si Plomo \geq 44,22 μ g/L, Q = 0. Si Plomo \leq 0,0004 μ g/L, Q = 100.

S = 3.36649705
 r = 0.99638742

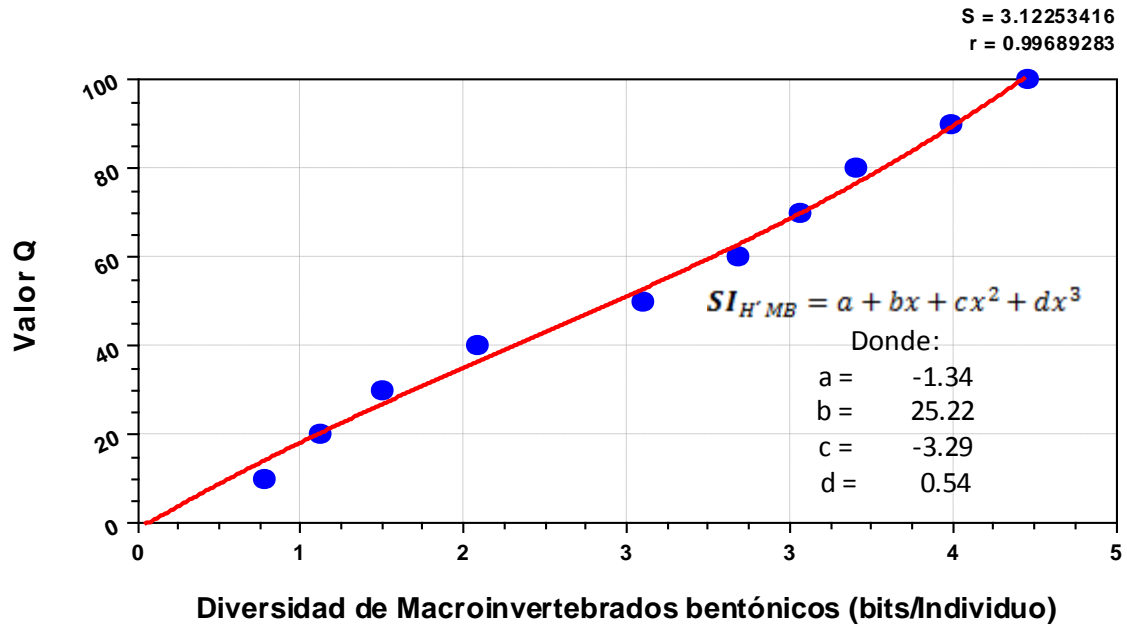


Si Mercurio \geq 15,2 $\mu\text{g/L}$, Q = 0. Si Mercurio \leq 0,002 $\mu\text{g/L}$, Q = 100.

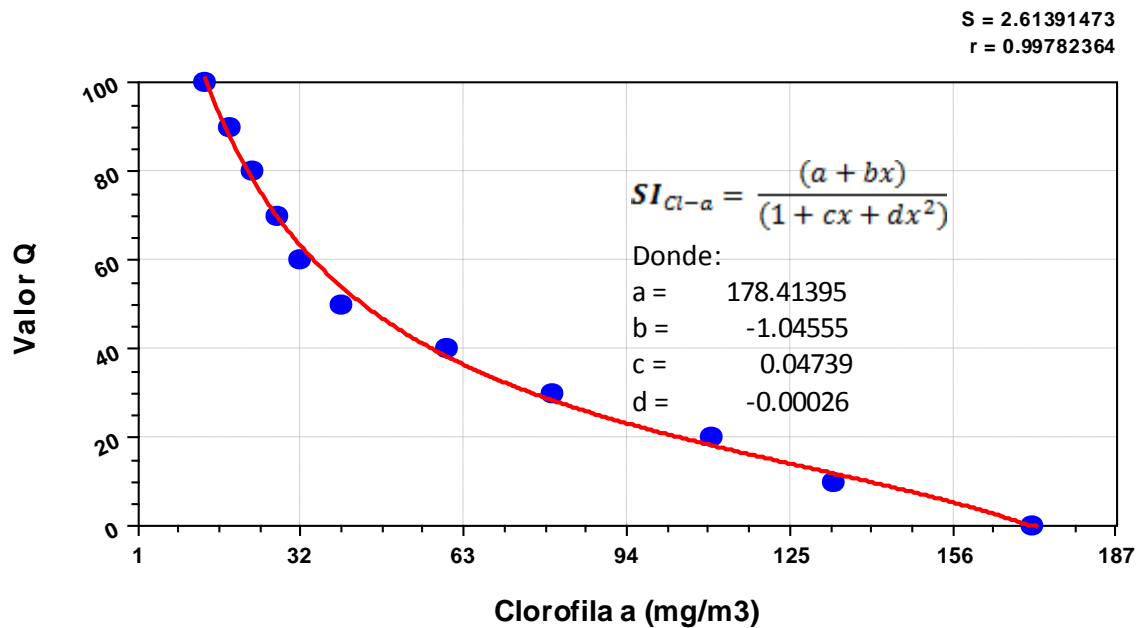
S = 7.09916728
 r = 0.97916553



Si Fitoplancton \geq 5 x 10⁸ Ind/L, Q = 0. Si Fitoplancton \leq 15 x 10⁴ Ind/L, Q = 100.

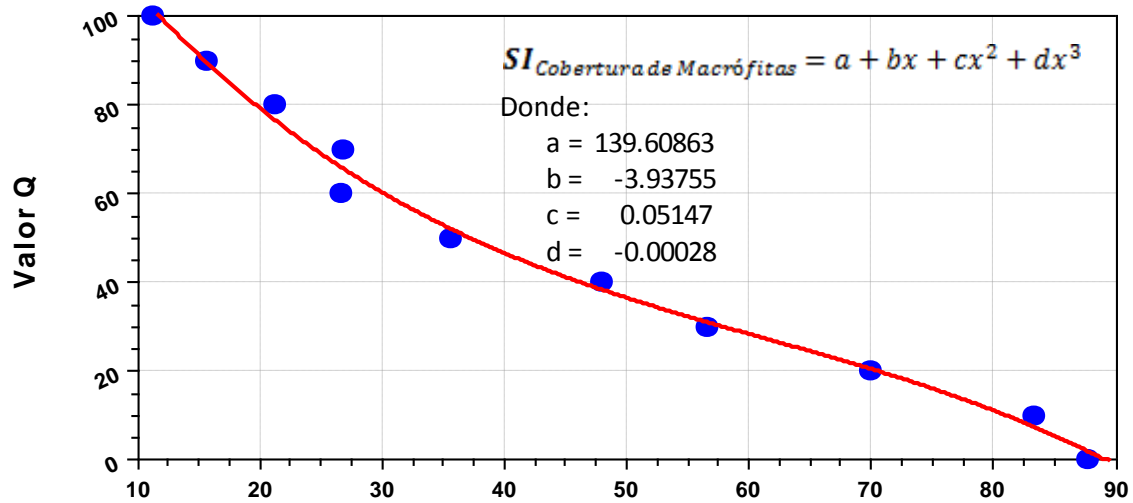


Sí Diversidad (H') ≤ 0 bits/Ind, Q = 0. Sí Diversidad (H') $\geq 4,70$ bits/Ind, Q = 100.



Sí CL-a ≥ 171 mg/m³, Q = 0. Sí CL-a ≤ 14 mg/m³, Q = 100.

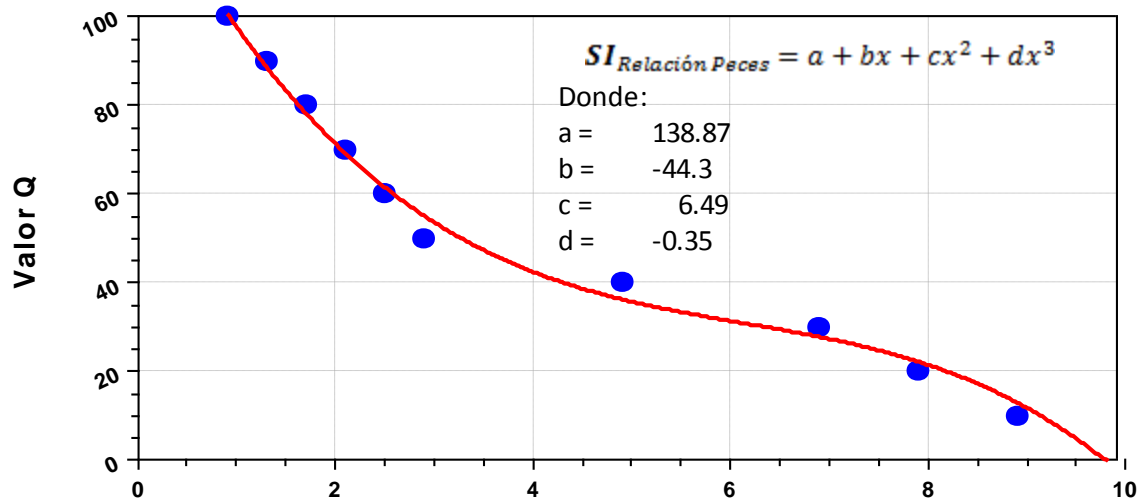
S = 3.52771205
r = 0.99603244



Macrófitas (% de cobertura en el espejo de agua)

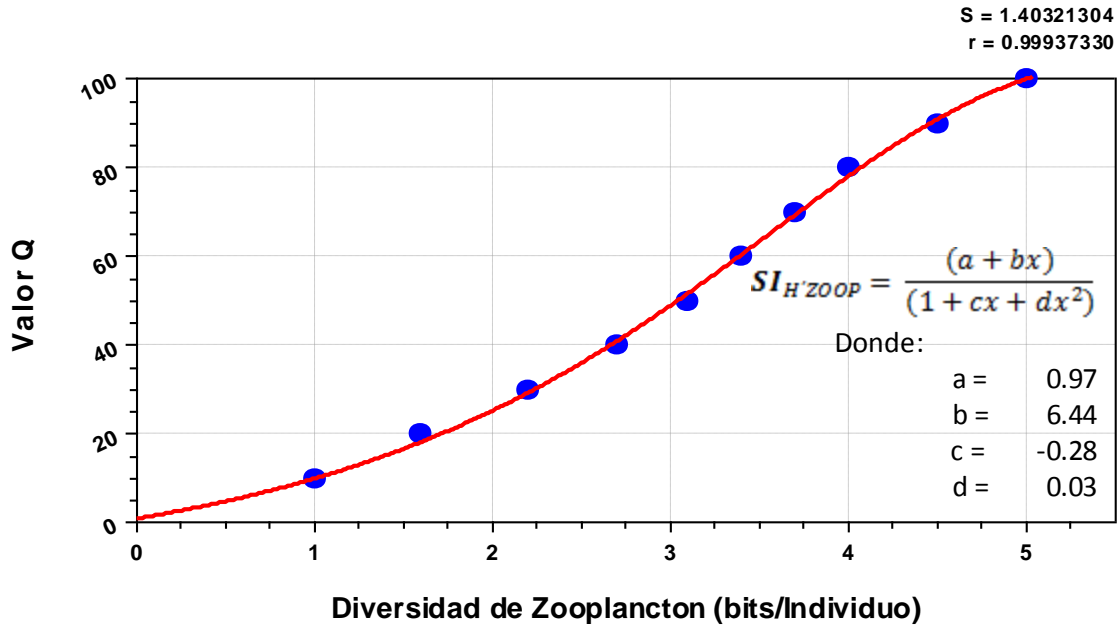
Sí % de Macrófitas $\geq 87,5\%$, Q = 0. Sí % de Macrófitas $\leq 11,25$, Q = 100.

S = 3.17709308
r = 0.99678312

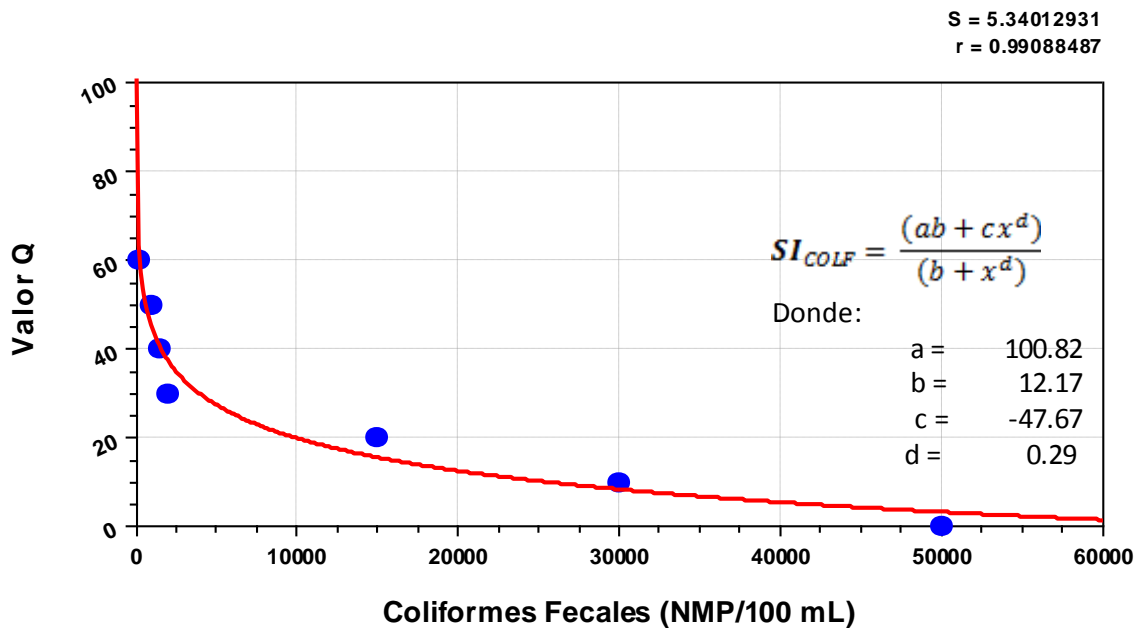


Peces (Relación Carnívoros/Omnívoros)

Sí Relación ≥ 10 , Q = 0. Sí Relación ≤ 1 , Q = 100.

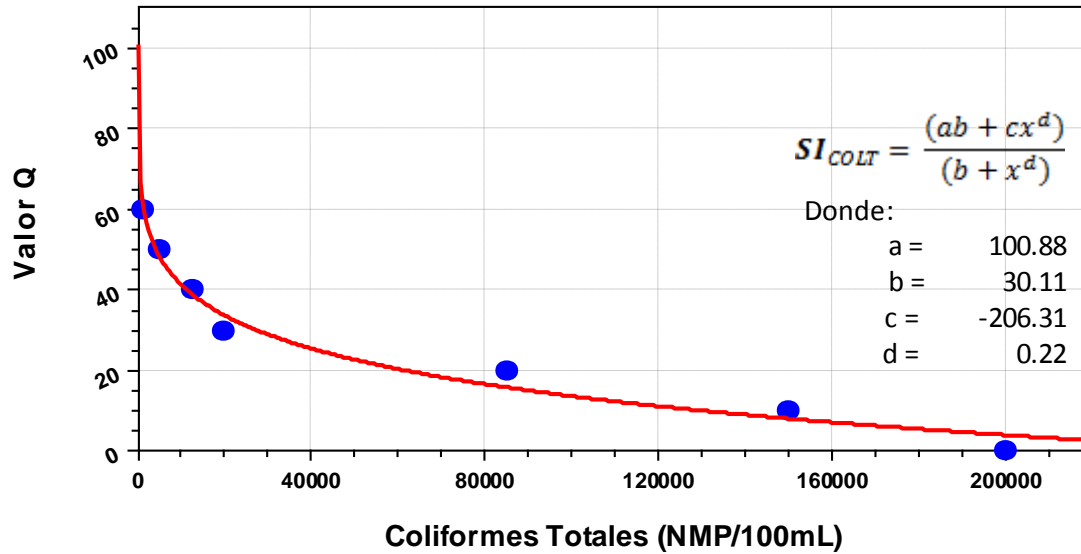


Si Diversidad (H') ≤ 0 bits/Ind, Q = 0. Si Diversidad (H') ≥ 5 bits/Ind, Q = 100.



Si COLF $\geq 5 \times 10^4$ NMP/100 ml, Q = 0. Si COLF ≤ 0 NMP/100 ml, Q = 100.

S = 4.08775482
 r = 0.99466906



Si COLT $\geq 2 \times 10^5$ NMP/100 ml, Q = 0. Si COLT ≤ 0 NMP/100 ml, Q = 100.