

**PROPUESTA DE UN ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA COMO HERRAMIENTA
DE GESTIÓN PARA LOS HUMEDALES CAPITALINOS.**

CRISTIAN STIVEN TAMBO LOPEZ.

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS.
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS.
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL.
BOGOTÁ D.C
2015**

**PROPUESTA DE UN ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA COMO HERRAMIENTA
DE GESTIÓN PARA LOS HUMEDALES CAPITALINOS.**

CRISTIAN STIVEN TAMBO LOPEZ.

**Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Ambiental.
Modalidad: Solución de un problema de Ingeniería.**

**Directora, Liliana Salazar López.
BIÓLOGA, Universidad Nacional De Colombia.
Máster, *SANEAMIENTO Y DESARROLLO AMBIENTAL*.
Pontificia Universidad Javeriana.**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS.
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS.
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL.
BOGOTÁ D.C.
2015.**

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DIRECTOR

FIRMA JURADO

FIRMA JURADO

Bogotá, D.C, 9 de diciembre de 2015.

Dedico este a mi madre quien me ha brindado todo el apoyo necesario para cumplir mis metas y sueños, me ha cubierto con su amor y cariño y ha sido mi guía en el inesperado camino de la vida, este trabajo es una manera de honrar a mi mamá y agradecerle por su apoyo incondicional; también dedico este trabajo a mi hija que es la razón que me impulsa a continuar en la búsqueda de una mejor calidad de vida y en ser mejor persona.

Cristian Stiven Tambo Lopez

CONTENIDO

INTRODUCCION	12
1. OBJETIVOS	13
1.1. OBJETIVO GENERAL	13
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
2. MARCO TEORICO.....	14
2.1. Índices de calidad del agua.....	14
2.1.1. Definición de un índice de calidad del agua.....	16
2.1.2. Ventajas y limitaciones de un Índice de agua.....	17
2.1.3. Clasificación y Uso de los índices.....	17
2.1.4. Procedimiento para la formulación de un índice de calidad o contaminación del agua.....	18
2.1.4.1. Selección de parámetros.....	19
2.1.4.2. Transformación de las diferentes unidades de los parámetros y dimensiones a una escala común.....	21
2.1.4.3. Asignación de pesos a todos los parámetros.....	23
2.1.4.4. Agregación de los subíndices.....	23
2.1.4.5. Diseño de la Escala de Clasificación del ICA	26
2.2. Los humedales de Bogotá.....	26
2.2.1. Qué es un Humedal.....	27
2.3. Calidad del agua.....	28
3. Metodología.....	28
3.1. Localización del área de estudio.....	28
3.2. Diseño del índice de calidad del agua.....	30
3.2.1. Selección de parámetros	30
3.2.1.1. Criterio basado en la bibliografía.....	31
3.2.1.2. Criterio Normativo.....	34
3.2.1.3. Selección de parámetros de acuerdo a la Investigacion de variables de tasa asociadas al comportamiento de calidad del agua en humedales naturales y sistema de indicadores y estudios geo eléctricos.....	35
3.2.1.4. Criterio Estadístico.....	37
3.2.1.4.1. Análisis Factorial.....	41
3.2.1.5. Selección final de parámetros.....	47

3.2.2.	Desarrollo de subíndices y curvas de calidad.....	48
3.2.2.1.	Curva de concentración de oxígeno en función de la calidad.....	50
3.2.2.2.	Curva de pH en función de la calidad	52
3.2.2.3.	Curva de temperatura en función de la calidad.	54
3.2.2.4.	Curva de la demanda biológica de oxígeno (DBO ₅) en función de la calidad. 55	
3.2.2.5.	Curva de la demanda química de oxígeno (DQO) en función de la calidad. 57	
3.2.2.6.	Curva de Sólidos suspendidos totales en función de la calidad.	59
3.2.2.7.	Curva de Conductividad en función de la calidad.....	60
3.2.2.8.	Curva de fósforo total en función de la calidad.....	62
3.2.2.9.	Curva de Nitrógeno total en función de la calidad.	63
3.2.2.10.	Curva de E. coli en función de la calidad.	65
3.2.3.	Selección del método de agregación.....	67
3.2.4.	Fase de diseño de la escala general de calidad	71
3.2.5.	Validación del índice.	71
4.	Impacto social, humanístico del proyecto.....	72
5.	Conclusiones.....	73
6.	Referencias	75
7.	Anexo A.....	80
	Anexo B.	83

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Índices de calidad para usos específicos del agua.....	15
Tabla 2 Ventajas y limitaciones de un índice. [13].....	17
Tabla 3 Categorías de variables propuestas por Dunnette.....	20
Tabla 4 Diferentes parámetros usados por distintos autores en el desarrollo de índices físico-químicos de calidad de agua.	21
Tabla 5 Fórmulas de agregación de determinados o subíndices.	23
Tabla 6: Parques Ecológicos Distritales de Humedal. [27]	28
Tabla 7 Relación de parámetros e Índices de Calidad de Agua.	32
Tabla 8: Criterios admisibles calidad de acuerdo al Decreto 1594 de 1984 [29].....	35
Tabla 9: Parámetros y frecuencias de medición recomendadas para los humedales de Bogotá. [29]	36
Tabla 10: Objetivos de calidad para los humedales del distrito capital. [29]	36
Tabla 11: Distribucción de muestreos por humedal y referente.....	38
Tabla 12: Distribución de muestreos por año.	39
Tabla 13: Relacion del numero de datos disponibles de parámetros de calidad del agua por humedal.....	40
Tabla 14 ceficientes estadísticos de KMO, prueba de Bartlett y determinante de la matriz de correlaciones.	41
Tabla 15 Matriz de correlaciones.	42
Tabla 16 Comunalidades del análisis factorial para datos de alfuentes.....	42
Tabla 17 Distribución de la varianza total explicada.	44
Tabla 18 Matriz de componentes.	44
Tabla 19 Matriz de componentes rotados.	45
Tabla 20 Constituyentes seleccionados para el ICA Humedales de Bogota.	47
Tabla 21 Objetivos y Criterios Normativos de Calidad del Agua para protección de la fauna y flora.....	49
Tabla 22 Criterios de referencia del Oxigeno Disuelto para el ICAHUMB.	50
Tabla 23 Valores de referencia del pH para el ICAHUMB.	53
Tabla 24 Ecuacion y coeficientes del modelo de calidad para pH.....	54
Tabla 25 Concectraciones de referencia de la temperatura para el ICAHUMB.	54
Tabla 26 Ecuacion y coeficientes del modelo de calidad para pH.....	55
Tabla 27 Concentraciones de referencia de la DBO ₅ para el ICAHUMB.	56
Tabla 28 Ecuacion y coeficientes del modelo de calidad para la DBO ₅	57
Tabla 29 Concentraciones de referencia de la DQO para el ICAHUMB.	57
Tabla 30 Ecuacion y coeficientes del modelo de calidad para la DQO.....	58
Tabla 31 Concentraciones de referencia de los SST para el ICAHUMB.....	59
Tabla 32 Ecuacion y coeficientes del modelo de calidad para la SST.....	59
Tabla 33 Concentraciones de referencia de la conductividad para el ICAHUMB.....	61

Tabla 34 Ecuacion y coeficientes del modelo de calidad para la Conductividad.	61
Tabla 35 Concentraciones de referencia del fosforo total para el ICAHUMB.	62
Tabla 36 Ecuacion y coeficientes del modelo de calidad para el fosforo total.	63
Tabla 37 Concentraciones de referencia del nitrógeno total para el ICAHUMB.	64
Tabla 38 Ecuacion y coeficientes del modelo de calidad para el nitrógeno total.	65
Tabla 39 Valores de referencia de la E. coli para el ICAHUMB.	65
Tabla 40 Ecuacion y coeficientes del modelo de calidad para los coliformes fecales.....	66
Tabla 41: Modelos matemáticos obtenidos para cada parámetro en el Índice de Calidad.	66
Tabla 42 Posibles metodologías para el ICAHUMB.	67
Tabla 43 Pesos de ponderación asignados a las variables de calidad del agua del ICAHUMB.	67
Tabla 44 Analisis de sensibilidad de los métodos de agregación, Caso 1.	68
Tabla 45: Analisis de sensibilidad de los métodos de agregación, Caso 2.	68
Tabla 46 Analisis de sensibilidad de los métodos de agregación, Caso 3.	69
Tabla 46 Analisis de sensibilidad de los métodos de agregación, Caso 4.	70
Tabla 48 Escala de calidad para el ICAHUMB.	71
Tabla 49: Datos para la validación del índice ICAHUMB.	71
Tabla 50: Resultados de la validación del índice ICAHUMB.	72
Tabla 44 Descripción de las condiciones de calidad del agua aceptables y críticas para Humedales. [38].	80
Tabla 45 Criterios para el dictamen de la calidad de aguas corrientes basado en el sistema Saprobio. [32]	80
Tabla 46 Rangos de concentración de (OD) oxígeno disuelto y consecuencias ecosistémicas frecuentes. [31].	80
Tabla 47 Efectos de los niveles de pH en la vida acuática. [34]	80
Tabla 48 Escala de clasificación de la calidad del agua con base en la (DBO ₅) Demanda Biológica de Oxígeno. [33].	81
Tabla 49 Escala de clasificación de la calidad del agua con base en la (DQO) Demanda Química de Oxígeno. [33]	81
Tabla 50 Rangos de concentración de sólidos suspendidos en el agua. [36]	81
Tabla 51 Cantidades representativas de E.coli en diversas aguas [37].	Error!

Bookmark not defined.

LISTA DE GRAFICOS E ILUSTRACIONES

Grafico 1: Grafico de sedimentación para datos de afluentes.	43
---	----

Grafico 2 Curva de concentracion de Oxigeno obtenida en función de la calidad.	52
Grafico 3 Curva de concentracion de pH en función de la calidad.....	54
Grafico 4 Curva de temperatura °C en función de la calidad.	55
Grafico 5 Curva de concentracion de DBO ₅ en función de la calidad.	56
Grafico 6 Curva de concentracion de DQO en función de la calidad.	58
Grafico 7 Curva de concentracion de SST en función de la calidad.	59
Grafico 8 Curva de concentracion de la conductividad en función de la calidad....	61
Grafico 9 Curva de concentracion de fosforo total en función de la calidad.	63
Grafico 10 Curva de concentracion de nitrogeno total en función de la calidad....	64
Grafico 11 Curva de concentracion de coliformes fecales en función de la calidad.	66
Ilustración 1: Humedales de Bogotá [28]	29

RESUMEN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.

Este trabajo presenta la construcción de un índice de calidad del agua (ICA) como una herramienta de valoración, propone una escala de clasificación de 0 a 100, que permite establecer de una forma rápida la calidad de los cuerpos de agua de los ecosistemas de humedal de Bogotá; este índice considera diez parámetros relacionados con la conservación de flora y fauna, parámetros que fueron seleccionados teniendo en cuenta la normativa ambiental nacional (decreto 1076 de 2015).

Como herramienta de análisis se tomaron los registros históricos de monitoreos de calidad del agua de los humedales, además se realizó un análisis factorial de componentes principales en la selección de parámetros para evidenciar el nivel de correlación entre las variables y así escoger aquellas que aportaran más información al modelo. El índice es calculado por medio de la raíz cuadrada del promedio armónico no ponderado; esta expresión fue seleccionada luego de ser comparada con otras y evaluar la sensibilidad de esta a los cambios individuales de las variables.

Finalmente, se entrega una matriz de Excel en la cual se alimentan los datos mediante una condición de entrada que permite la determinación rápida del índice (ICAHUMB) permitiendo valorar la calidad ambiental de los humedales.

Palabras clave: Humedales, calidad del agua, ecosistema, aguas residuales, parámetros de calidad del agua, índice de calidad del agua, análisis de componentes principales.

ABSTRAC

This paper presents the construction of a water quality index (ICA) as an assessment tool proposes a rating scale of 0 to 100, which allows for a quick way the quality of the water bodies of wetland ecosystems from Bogota; This index considers ten parameters related to the conservation of flora and fauna parameters were selected based on national environmental standards (Decree 1076 of 2015).

Keil historical records of monitoring water quality of wetlands were taken, plus a factorial principal component analysis was performed on the selection of parameters to demonstrate the level of correlation between the variables and so choose those that provide more information the model. The index is calculated by the square root of the average unweighted harmonic; this expression was selected after being compared and evaluate the sensitivity of individual changes in the variables.

Finally, a matrix of Excel in which the data is fed through an input condition that enables rapid determination of the index (ICAHUMB) allowing assess the quality of wetlands ambienal delivered

Keywords: wetlands, water quality, ecosystems, waste water, warm water parameters, water quality index, principal component analysis.

INTRODUCCION

El agua es fundamental para todos los organismos vivos, de allí la importancia de conservarla y darle un adecuado manejo; sin embargo el crecimiento exponencial de la población ha incrementado de forma directa su demanda en el planeta, pese a que su oferta se ve disminuida cada vez más, producto de actividades que incrementan su contaminación. Hoy en día la calidad del agua es un tema que adquiere más relevancia, no obstante la humanidad continúa explotándola y contaminándola insosteniblemente.

La estructura ecológica principal de Bogotá ha venido cambiando de manera paulatina, transformando lo que anteriormente era grandes zonas de pantanos en pequeños humedales distribuidos de sur a norte. En la actualidad los humedales en la ciudad pasan por una etapa de recuperación y rehabilitación ecológica lo que ha permitido su rescate, como por ejemplo el humedal del Burro. Sin embargo, aún se deben considerar diferentes problemáticas que ejercen presión sobre éstos como las conexiones erradas provenientes de los barrios circunvecinos, la disposición de residuos sólidos, entre otras. La calidad del agua es uno de los factores más importantes en la dinámica de los humedales, por su intrínseca relación con la salud del ecosistema y su poder limitante para la vida, se hace necesario por ello monitorear su estado.

Los índices de calidad del agua (ICA) son una herramienta ampliamente usada en el mundo para diagnosticar el estado de calidad que tienen los recursos hídricos, los ICA integran un conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos en una expresión matemática para clasificar por medio de una escala el nivel de calidad; generalmente los ICA son diseñados para atender a problemáticas propias de cada región, de allí que existan una gran variedad de metodologías para su cálculo con propósitos diferentes. Los índices son derivados matemáticamente evitando sesgos y subjetividades; son muy útiles para el monitoreo y valoración del agua, además sus resultados pueden ser fáciles y rápidamente interpretados por el público en general, aunque el cálculo de los índices no es una tarea fácil, estos presentan diversas ventajas para predecir los cambios y tendencias de calidad en áreas determinadas y consecuentemente juzgar el uso de una fuente de agua.

Esta tesis aporta un índice de calidad (ICAHUMB) para la evaluación rápida de los cuerpos de agua de los humedales presentes en Bogotá. El índice propone una escala de clasificación de 0 a 100 para establecer la calidad del agua del ecosistema, integra 10 constituyentes seleccionados a partir de la normativa y un análisis factorial de los registros históricos de calidad.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Proponer un índice de calidad del agua (*ICA*) como herramienta de gestión para los humedales capitalinos.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Escoger y priorizar los parámetros de calidad del agua que serán integrados por el ICA.
- Transformar los valores analíticos de los parámetros en una unidad adimensional por medio de curvas de calidad
-
-

2. MARCO TEORICO

2.1. Índices de calidad del agua.

Los índices de calidad del agua han sido una herramienta de gran utilidad en diferentes regiones del mundo para diagnosticar el estado del recurso hídrico, evaluando aspectos físicos, químicos y biológicos. Los ICAs generalmente son diseñados para atender a problemáticas intrínsecas de cada región, aunque muchos países adoptan metodologías ajenas para implementarlas en sus territorios.

Los índices de calidad del agua, en sus inicios pretendían medir la carga contaminante generada por los compuestos de origen orgánico, esto se debe al tipo de contaminación que se presentaba en los años 60 y 70. Los índices han evolucionado y se han convertido en una herramienta significativa para determinar la calidad de los recursos hídricos; por ello en la actualidad existen una gran variedad de metodologías para su cálculo y con propósitos que varían desde generales hasta específicos. [1]

Horton, en 1965 propuso el primer índice de calidad del agua, el cual estaba compuesto por 10 variables, algunas de ellas comúnmente monitoreadas como el oxígeno disuelto, coliformes fecales, pH, conductividad, alcalinidad, contenido de cloro y temperatura; su cálculo dependía de la suma ponderada de los subíndices y los rangos se presentaban en una escala decreciente de 0 a 100 donde el índice disminuye a medida que aumenta la contaminación, donde 0 representa la mala calidad del agua y 100 que representa la calidad del agua perfecta.

En 1970 Brown McClelland, Deininger y Tozer apoyados por la Fundación de saneamiento ambiental nacional de Estados Unidos (NSF) bajo los lineamientos de Horton, presentaron un índice de calidad del agua basado en la metodología Delphi, la cual dio una mayor convergencia de opinión para evaluar la importancia de cada aspecto de para la calidad del agua desde una visión grupal; se priorizaron nueve variables: oxígeno disuelto, coliformes fecales. pH, DBO5, nitratos, fosfatos, temperatura, turbidez y sólidos totales. La metodología de Brown y sus colaboradores sigue siendo ampliamente usada por diferentes entidades como el Ministerio de Recursos Naturales y Medio Ambiente de Tailandia, que ha adoptado el índice NSF desarrollado en 1970 como una herramienta para la evaluación de la calidad del agua desde 1995 [2] y la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (EPA) aun continua usando las curvas subíndice de Brown McClelland, Deininger y Tozer. [3]

En el año 1987 Dinius planteó un ICA, el cual desarrolló a partir de la revisión de la literatura científica, este incluye 12 contaminantes y clasifica el recurso hídrico en seis usos: abastecimiento público de agua, la recreación, pescado, mariscos, la agricultura y la industria [4]. En 1989 Tyson y House desarrollaron en Inglaterra un

ICA para catalogar la calidad del agua en los ríos dentro de un sistema de cinco clases, la metodología usada por ellos se basaba en buscar la información disponible sobre nueve parámetros de calidad del agua (OD, DBO, SS, el nitrógeno amoniacal, los nitratos, pH, °T, cloruros y coliformes totales) para ser analizados e integrados en el ICA. [5]

Típicamente, los índices se diseñaron para evaluar la calidad del agua en general, independientemente del uso que se le dé al recurso; es por ello que existen índices de carácter específico que se adaptan a cada uso:

Tabla 1: Índices de calidad para usos específicos del agua.

Año	Índices específicos	Uso
1972	O'connors	Pesca, vida silvestre y Abastecimiento público.
1974	Walski	Recreacional.
1978	Stoner	Abastecimiento público e Irrigación.
1970	Nemmerow y Sumitomo	Contacto humano directo, indirecto y remoto.
2007	Universal water quality index	Suministro de agua potable

Fuente: (El autor)

Para el caso del Universal water quality index (*UWQI*) desarrollado por la comunidad Europea, en el año 2007, el índice tiene ventajas al reflejar la idoneidad del agua para uso específico, por ejemplo, suministro de agua potable en lugar de abastecimiento general; el índice evalúa algunos parámetros como *Cd*, *cianuro*, *Hg*, *Se*, *arsénico*, *fluoruro*, *nitrato-nitrógeno*, *OD*, *DBO*, *fósforo total*, *pH* y *coliformes totales*. La aplicación de este índice se demostró en una estación de muestreo en Tahtali embalse en Turquía basándose en los datos de calidad del agua [6]. España expuso un índice de calidad general (*ICG*) el cual integra 23 parámetros usando una metodología desarrollada en Canadá en los años ochenta, para este los parámetros se evaluaban en dos grupos uno de 9 y otro de 14, siendo el primero un grupo de variables básicas y el otro variables complementarias.

En América Latina se han implementado, modificado y adaptado diferentes metodologías de carácter general y específico (Horton, Brown, Prati, Mcduffi, Dinius y INDIC-SEDUE) para la medición de la calidad de los recursos hídricos. En México, la Dirección General de Ordenación Ecológica adoptó y modificó inicialmente el INDIC-SEDUE basado en la metodología de DINIUS-WQI para sus evaluaciones de calidad del agua en la ciudad de Jalisco [7]; En el Perú, venían aplicándose en los ríos Santa, Mantaro, Chili y Rimac indicadores ICA-NSF [8] y en Brasil la Compañía Ambiental del Estado de Sao Paulo (CETESB) utiliza desde 1975 los índices con el fin de servir de información básica de calidad del agua para el público en general, desde 2002 la CETESB utiliza índices específicos para cada uso del recurso hídrico ya sea para suministro público o conservación de la vida acuática [9]

En Colombia según el IDEAM y de acuerdo con el Estudio Nacional del Agua la medición de parámetros fisicoquímicos es una actividad rutinaria. Sin embargo, no ha sido así el cálculo de índices de calidad de agua, a pesar de las recomendaciones explícitas en la legislación y del desarrollo de índices de contaminación planteados por Ramírez y Viña [10]; cabe destacar el trabajo Apoyado por la Universidad de Pamplona al grupo de investigación de ciencias naturales en el año 2005 para el diseño del Software ICATEST V 1.0; esta herramienta computacional facilita el cálculo de gran variedad y cantidad de índices de calidad del agua e índices de contaminación, los cuales se presentan discriminados por país y/o autor. [11]

Al final, se puede reconocer que existen muchos índices desarrollados en el ámbito mundial y aunque es difícil definir un índice estándar para todas las regiones, es aconsejable el uso de un ICA específico que esté contextualizado con la particularidad de las aguas en cada territorio.

2.1.1. Definición de un índice de calidad del agua.

El índice de calidad del agua es una herramienta que brinda de manera simple, rápida, objetiva y reproducible una idea del nivel de calidad de un cuerpo de agua, la ventaja de implementar estos índices radica en que a diferencia de tener un conglomerado de números como resultado de la evaluación de las muestras de agua en laboratorio, los índices logran ser fáciles y rápidamente interpretados por los encargados de la gestión del mismo y por el público en general, dejando una idea clara sobre el estado de la calidad del cuerpo de agua; además esta herramienta puede ser implementada como un método en el monitoreo de calidad de aguas.

El diseño adecuado de un índice debe incorporar los límites permisibles descritos por la norma, los criterios para los usos específicos del agua y el potencial uso del recurso, esta información es de gran valor para el manejo operacional de los recursos hídricos y puede brindar lineamientos claves para su administración por parte del gobierno o el público. El índice debe integrar un número reducido de parámetros pero que sean de gran significancia (ej. oxígeno disuelto, coliformes fecales, sólidos suspendidos) y entreguen la máxima cantidad de información sobre cambios en calidad del agua y su impacto en los distintos usos. [12]

En el caso de Índices de Calidad aplicables a Aguas Continentales Superficiales pareciera que el mayor peso debiera ser otorgado a los parámetros como el OD, DBO, N-NH₃, sólidos suspendidos y coliformes totales. En el caso de Índices de Calidad aplicables a Fuentes de Agua Potable debiera otorgarse peso además al N-NO₃, Color, Arsénico y Boro. En todos los casos la agregación puede hacerse usando diferentes fórmulas matemáticas. [12]

2.1.2. Ventajas y limitaciones de un Índice de agua.

Actualmente, se le atribuyen muchas ventajas a los índices de calidad del agua, aunque también presentan algunas limitaciones (*Tabla 2*), los índices tienen interesantes características que permiten una evaluación integral del recurso debido que se derivan matemáticamente, evitando así subjetividades y sesgos. Los ICAs aparecen como herramientas útiles para predecir cambios y tendencias en la calidad del agua

Tabla 2 Ventajas y limitaciones de un índice. [13]

VENTAJAS	LIMITACIONES
Permiten mostrar la variación espacial y temporal de la calidad del agua. 1. Método simple, conciso y válido para expresar la importancia de los datos generados regularmente en el laboratorio. 2. Útiles en la evaluación de la calidad del agua para usos generales. 3. Permiten a los usuarios una fácil interpretación de los datos. 4. Pueden identificar tendencias de la calidad del agua y áreas problemáticas. 5. Permiten priorizar para evaluaciones de calidad del agua más detalladas. 6. Mejoran la comunicación con el público y aumentan su conciencia sobre las condiciones de calidad del agua. 7. Ayudan en la definición de prioridades con fines de gestión.	1. Proporcionan un resumen de los datos. 2. No proporcionan información completa sobre la calidad del agua. 3. No pueden evaluar todos los riesgos presentes en el agua. 4. Pueden ser subjetivos y sesgados en su formulación. 5. No son de aplicación universal debido a las diferentes condiciones ambientales que presentan las cuencas de una región a otra. 6. Se basan en generalizaciones conceptuales que no son de aplicación universal. 7. Algunos científicos y estadísticos tienden a rechazar y criticar su metodología, lo que afecta la credibilidad de los ICA como una herramienta para la gestión.

2.1.3. Clasificación y Uso de los índices

Existen 10 categorías de índices, situados en 4 grupos, así: [14]

Grupo I: se aplica a los tensores e incluye dos categorías:

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

Grupo II: miden la capacidad de estrés:

- Indicadores de medidas simples: incluyen muchos atributos y componentes individuales del agua, que pueden ser usados como indicadores de su calidad.
- Indicadores basados en criterios o estándares: correlacionan las medidas de calidad del agua con los niveles estándar o normales que han sido determinados para la preservación y usos adecuados del agua.
- Los índices multiparametro: se determinan por la opinión colectiva o individual de expertos.

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

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

Grupo IV: tiene en cuenta las consecuencias:

- Indicadores de la vida acuática: basados en diferentes reacciones de tolerancia de la biota acuática a varios contaminantes y condiciones.
- Indicadores de la vida acuática: basados en diferentes reacciones de tolerancia de la biota acuática a varios contaminantes y condiciones.
- Indicadores del uso del agua: evalúan el agua respecto a usos como abastecimiento y agricultura.
- Indicadores basados en la percepción: se determinan por la opinión público y los usos de los cuerpos de agua.

Los ICAs e ICOs, son una herramienta que se tiene en la actualidad para disminuir e interpretar la información generada en el monitoreo de una fuente, y hace una clasificación de acuerdo a sus usos, así: [15]

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

2.1.4. Procedimiento para la formulación de un índice de calidad o contaminación del agua.

Los índices de calidad del agua sirven para que cualquier persona pueda juzgar si una fuente de agua es utilizable o no y compararla con otra, pero el desarrollo de un ICA no es de ninguna manera una tarea fácil. De hecho está cargada de varias complicaciones e incertidumbres. En general, el cálculo de los ICAs e ICOs se basa en las siguientes etapas: [4]

1. Selección de parámetros.
2. Transformación de las diferentes unidades de los parámetros y dimensiones a una escala común por medio de la determinación de curvas de calidad o ecuaciones de regresión para las variables.
3. Asignación de pesos a todos los parámetros.
4. Cálculo del índice a partir de la integración de subíndices en la expresión matemática.
5. Explicación de la escala general de calidad.

Las etapas 1,2 y 4 son esenciales para todos los índices; el paso 3 también, pero algunos índices pueden formarse sin éste; la etapa 1 y 3 aún no posee una técnica definida que asegure el 100% de objetividad, incluso la selección de parámetros por métodos estadísticos ya que está plagado de muchas incertidumbres. [4]

2.1.4.1. Selección de parámetros.

Para esta etapa se deben tener en cuenta las consideraciones básicas de calidad del agua, los aspectos que pueden llevar a que un cuerpo de agua este alterado y los tipos de contaminación.

Se han implementado diferentes metodologías en cuanto a la selección de parámetros, una de las más usadas es la Metodología Delphi usada por los índices de *Dinius* y *WQI-NSF*, donde un panel de expertos escoge las variables de acuerdo a su mayor recurrencia y el criterio personal. También se han usado métodos estocásticos con el propósito de reducir un conjunto multivariado, un ejemplo es el Análisis de Componentes Principales (ACP) [16]; no existe una metodología clara y con un 100% de objetividad para la priorización de parámetros, en la mayoría de los casos depende del criterio del autor.

Durante la etapa de selección de parámetros, éstos se pueden considerar de dos a un número infinito de los mismos, aunque muchos autores recomiendan que los índices tengan la menor cantidad de variables posibles, ya que la selección de un gran número de variables puede llevar a la pérdida de información al agregar matemáticamente las variables.

La selección de parámetros se fundamenta en las consideraciones de calidad y los tipos de contaminación que se presentan generalmente. Durante esta primera etapa se recomienda tener en cuenta:

- Opinión de expertos.
- Datos históricos de calidad del agua.
- La normatividad y agencias gubernamentales.
- Criterios de espacio tiempo (Características representativas del ecosistema).
- Información disponible.

- Las categorías de las variables de calidad del agua.

Finalmente, esta etapa es una de las más importantes ya que se definen los parámetros que se integraran en el índice, por ello se deben tener en cuenta los siguientes criterios para la reducción de variables:

- Evitar la redundancia de los parámetros seleccionados.
- Escoger un número de parámetros que sean sensibles a las alteraciones del medio.
- Las variables seleccionadas deben ser parámetros medidos comúnmente.
- Parámetros que permitan el cálculo rápido del índice.
- Consideraciones de gastos económicos en las técnicas de medición de las variables.

En esta etapa se han usado muchas metodologías por diferentes autores, Dunnette recomienda escoger las variables teniendo en cuenta cinco categorías, así: [17]

Tabla 3 Categorías de variables propuestas por Dunnette

Categoría	Variables que las representan
Nivel de Oxígeno	OD, DQO, DBO
Sustancias Disueltas	PH, Conductividad, Sólidos Totales, Disueltos y Suspendidos
Características físicas	Temperatura, transparencia, Sólidos Totales.
Aspectos de Salud	Coliformes fecales y totales
Eutrofización	NO ₂ -N, NO ₃ -N, Orotofosfatos.

Para el diseño de los índices de calidad del agua a nivel mundial se han usado diversas metodologías en la selección de parámetros; una de las más usadas es la metodología Delphi, que da la escogencia y la conformación de un panel de expertos tales como: representantes de agencias regulatorias, académicos y otros que puedan tener relación con la calidad del agua. Dichos expertos no son informados de la identidad de los demás miembros del grupo. [18]

Variables comúnmente seleccionadas en la composición de los índices de la calidad del agua

En un inicio el diseño de los índices incluía en su mayoría variables de origen orgánico debido a las características de la contaminación de los países industrializados de los años 60 y 70. Para nuestros días es notorio como el desarrollo de los índices tiene en cuenta otros procesos, como la contaminación por detergentes, agroquímicos y el efecto de éstos y los demás factores en la diversidad y composición de las especies, aunado a la afección que ellos tienen en procesos ecológicos como la producción y respiración de los organismos. Igual importancia en este aspecto, se le ha dado al proceso de la Demanda Química de Oxígeno. Para el diseño de un ICA comúnmente es tenido en cuenta (en casi el 50% de los casos) es el oxígeno disuelto, que se combina frecuentemente con los sólidos

totales, el pH, Coliformes fecales, DBO, Fósforo Total y Ortofosfatos, Nitratos; una importancia similar alcanza la turbidez, la temperatura y el amonio. [18]

La tabla 5 reporta los parámetros escogidos por varios autores en el diseño de su índice

Tabla 4 Diferentes parámetros usados por distintos autores en el desarrollo de índices físico-químicos de calidad de agua.

<i>Brown</i>	<i>Buscaran</i>	<i>Dinius</i>	<i>Walski</i>	<i>Dunnette</i>	<i>Queralt</i>	<i>Mingo</i>	<i>House</i>	<i>Smith</i>
1972	1975	1972	1974	1979	1982	1983	1989	1990
OD	OD	OD	OD	OD	OD	OD	OD	OD
DBO	DBO	DBO	DBO	DBO	DBO	DBO	DBO	DBO
°T	°T	°T	°T	°T	°T	°T	°T	°T
Coli F.	Coli F.	Coli F.	Coli F.	Coli F.	-	Coli F.	Coli F.	Coli F.
pH	pH	pH	pH	pH	S.S.	pH	pH	pH
S.T.	Conductividad	Conductividad	S.S.	S.T.	Nitratos	Conductividad	S.S.	S.S.
Turbidez	Cloruro	Cloruro	Turbidez	Nitratos		S.S.	Cloruro	
Nitratos	Amonio	Dureza	Nitratos	Amonio		Nitratos		
Fosfato	Detergentes	Alcalinidad	Fosfato			Amonio		
	Aspecto	Color	Grasa					
			Color					
			Olor					

Fuente: (El Autor)

2.1.4.2. Transformación de las diferentes unidades de los parámetros y dimensiones a una escala común.

El desarrollo de las curvas de calidad de agua, es el paso más importante en el diseño de un ICA. Las variables integradas por el índice están expresadas en diferentes unidades (mg/L, %Saturación, conteos/volumen, etc.), lo que hace imposible su agregación, además los valores de los parámetros son muy difíciles de comparar en conjunto; como consecuencia de esto se transforman los valores a una misma escala dimensional o adimensional para permitir su agregación, en la mayoría de los casos se trazan curvas asignando valores entre 0 y 100, a cada valor analítico. Se pueden usar diferentes métodos en el diseño de las curvas de calidad: [19]

- **Método basado en la experiencia propia:** consiste en que cada investigador selecciona los parámetros a evaluar a criterio y necesidad personal, es muy subjetivo debido a que no solamente se encuentran grandes diferencias de criterio entre autores distintos, sino también entre las curvas desarrolladas por un mismo autor para distintos parámetros.
- **El método Delphi:** para su construcción se usa el promedio de la opinión de varios expertos.
- **Curvas basadas en ecuaciones matemáticas:** se parte de una fórmula matemática con la cual se desarrolla la curva de calidad respectiva para cada parámetro o a partir de las curvas generadas se desarrolla la fórmula matemática respectiva.
- **Curvas basadas en la normatividad:** se generan las curvas a partir de los valores de los parámetros recogidos en diferentes normatividades. El principal objetivo de este método es buscar la objetividad y la aceptación por parte de los expertos.
- **Parámetro bajo formulación matemática:** con el fin de convertir los valores del parámetro de acuerdo a varias escalas con las que los valores del parámetro conservan sus unidades originales.

Desarrollar las curvas exclusivamente a partir de los valores de los parámetros recogidos en diferentes normativas ha sido ampliamente usado; ya que los valores fijados en las normativas están, en general, muy meditados y marcan límites por efectos muy concretos quedando así libres de muchas de las divergencias encontradas en las consultas a expertos.

Es importante, anotar que en algunos casos para el desarrollo de muchas de las curvas se han tenido en cuenta funciones matemáticas que pueden ser: lineales, lineales segmentadas (incluyen funciones umbral), no lineales y segmentada no lineal [15]; estas son de suma importancia en la medida que facilitan el cálculo de los índices; pues, de otra manera, se depende directamente de la apreciación de la gráfica, hecho que genera subjetividad y a la vez que reduce la precisión en la estimación del índice. Además, restringen el empleo de bases de datos y la cuantificación por la vía del computador. [20]

En la mayoría de los casos las funciones usadas para los subíndices son lineales como el caso del oxígeno disuelto, aunque otras variables son mejor expresadas como funciones exponenciales de base 10; generalmente, se tiene en cuenta una función matemática parsimoniosa, es decir, una función que cambia de manera gradual y no abrupta, en consideración a su tendencia, sin que la simplificación de los datos cause una distorsión del índice. [21]

2.1.4.3. Asignación de pesos a todos los parámetros.

Antes de aplicar la expresión matemática que deriva los subíndices, muchos autores consideran que se debe asignar pesos a las variables, de acuerdo a su incidencia en el cuerpo de agua y al uso del recurso hídrico, ya que algunos parámetros se consideran más importantes que otros y pueden ser indicadores significativos en el cambio de la calidad del agua.

La asignación de pesos relativos corresponde a los factores de contaminación o calidad en aguas de acuerdo al uso del agua e importancia de los parámetros en relación al riesgo que implique en aumento o disminución de su concentración. En el caso de Índices de Calidad aplicables a Aguas Continentales Superficiales pareciera que el mayor peso debiera ser otorgado a los determinados OD, DBO, N-NH₃, sólidos suspendidos y coliformes totales, Por ejemplo, en el diseño del ICAOBJ desarrollado en Chile se consideró a cada uno de los parámetros así [22]:

- La concentración del parámetro en aguas limpias y contaminadas.
- El impacto del contaminante en el ecosistema (vida acuática).
- El impacto del contaminante en el tratamiento posterior del agua.
- El impacto del contaminante en el uso riego y recreación.

2.1.4.4. Agregación de los subíndices

El paso a seguir una vez definidos los factores de integración y las curvas de calidad es la derivación de los subíndices por medio de fórmulas de agregación matemática que comúnmente funcionan con el promedio, para determinar un valor único de calidad. Las fórmulas comúnmente están enfocadas en dos métodos de cálculo: [14]

- *El Producto Ponderado*: en el cual los pesos dan importancia a los puntajes y todos ellos son ponderados de acuerdo a la importancia de los pesos y luego son multiplicados
- *La Suma Ponderada*, en la cual cada puntaje es multiplicado por su peso y los productos son sumados para obtener el índice si los pesos son iguales para cada puntaje.

Para algunos autores es una falla el método de asignar un peso al parámetro por algo que ya ha sido considerado al desarrollar la curva. Si es más grave la alteración producida por un parámetro que por otro esto debe de ser reflejado adecuadamente en las curvas desarrolladas. Existen algunos parámetros que son más comúnmente alterados por los vertidos que otros, pero la calidad se deteriora de igual manera por la alteración de un parámetro que por la de otro. [20] En la tabla 6 se pueden observar diferentes métodos de agregación de determinados:

Tabla 5 Fórmulas de agregación de determinados o subíndices.

Método	Expresión
Promedio ponderado	$ICA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$
Promedio Aritmético Ponderado	$ICA = \sum_{i=1}^n q_i w_i$
Promedio Geométrico no Ponderado	$ICA = \left(\prod_{i=1}^n q_i \right)^{\frac{1}{n}}$
Promedio Geométrico ponderado	$ICA = \left(\prod_{i=1}^n q_i \right)^{w_i}$
Raíz Cuadrada del Promedio Armónico no ponderado	$ICA = \sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{q_i^2}}}$
Raíz Cuadrada del Promedio Armónico	$ICA = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i^{-2} \right)^{-0,5}$
Operador Mínimo	$ICA = \min(q_1, q_2, \dots, q_n)$
Promedio no ponderado modificado	$ICA = \frac{1}{100} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \right)^2$
Promedio ponderado modificado	$ICA = \frac{1}{100} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i w_i \right)^2$
Ecuación Sugerida por Swamee y Tyagi	$ICA = \left(1 - n + \sum_{i=1}^n q_i^{\frac{-1}{k}} \right)^k$

Fuente: (El Autor)

Donde:

n : Número de Variables

q_i : Valor del Subíndice de la variable

w_i : Factor de Ponderación

k : Constante con valor óptimo de 0,4. (Valor recomendado)

Al proceder a la agregación del índice se ha observado que la escogencia de la fórmula es un factor clave, tanto así, que muchas de las discusiones se han centrado en demostraciones de las bondades de la fórmula final, en la medida en que ésta es más o menos sensible y reduce o amplía el escalamiento. [18]

En el desarrollo de un ICA a medida que el número de variables de calidad del agua aumenta, la magnitud del índice agregado disminuye. La mayoría de los métodos de agregación sufren de tres defectos: la ambigüedad, eclipse, y rigidez: [23]

1. Existen problemas de ambigüedad cuando todos los subíndices indican la calidad del agua aceptable para un uso determinado, pero el índice agregado no lo hace.
2. Existen problemas eclipsantes cuando el índice agregado no refleja la mala calidad del agua de una o más variables de calidad del agua.
3. Existen problemas de rigidez cuando se incluyen variables adicionales en el índice para abordar las preocupaciones específicas de calidad del agua, pero la función de agregación defectuosa podrían reducir artificialmente el valor del índice de la calidad del agua de tal manera que no refleja con exactitud la verdadera calidad del agua.

La fórmula más sencilla y usada es la promedio ponderado; con esta fórmula se expresa el estado medio de los parámetros pero no la calidad del agua, ya que posee muy poca sensibilidad a los cambios de los parámetros, su uso supone considerar la calidad del agua como un simple sistema aditivo, idea totalmente ajena a la realidad. Al usar el promedio aritmético ponderado parte de la ponderación limita más aún la sensibilidad de índice, sobre todo de los parámetros de menor peso [20], además este método puede confrontar problemas de eclipsamiento, que ocurre cuando un subíndice muestra una calidad pobre, pero al realizar el proceso de agregación esta baja calidad no es reflejada en el resultado final, por lo que se sobrestima el valor del índice. [5]

El operador mínimo, aunque tiene como ventajas principales ser extremadamente sensible a la variación de los parámetros y por ser una fórmula abierta permite un número indefinido de parámetros, sin embargo al recargar el concepto de la calidad en un sólo parámetro, tiende a perder de vista la idea global de la calidad y se convierte en una fórmula demasiado polarizada para el uso previsto para el cuerpo de agua. [20]

Para el ICA diseñado en Oregón y desarrollado para explicar mejor la calidad de agua en general y no para ver la calidad de agua para cualquier uso en específico; se realizó un estudio comparativo entre tres diferentes métodos de agregación y se concluyó que la raíz cuadrada del promedio armónico no ponderado presentaba una mayor sensibilidad a cambios en las variables individuales. Esta ecuación permite a las variables más críticas transmitir una mayor influencia sobre el valor final del índice. En cambio, aquellos métodos en los cuales se asignan pesos fijos a las variables de calidad de agua siempre van a estar altamente influenciados por las variables que tengan los pesos mayores. La metodología que tiene en cuenta la raíz cuadrada del promedio armónico sufre o confronta problemas de ambigüedad. Lo que significa que para aguas con calidad aceptable, el método de agregación puede indicar que son inaceptables. [5]

El promedio geométrico ponderado ha sido ampliamente usado cuando las muestras tienen gran variabilidad y es importante tener en cuenta valores bajos; esta expresión es mucho más sensible que las medias aritméticas sobre todo a cambios pequeños de los parámetros, incluso este modelo multiplicativo tiene la propiedad de hacerse 0 al llegar a este valor cualquier parámetro, aunque este puede experimentar problemas de eclipsamiento cuando se le asignan pesos pequeños (cerca de 0). Es la fórmula de agregación más recomendada y se considera el método más aceptable ya que la calidad no es dividida en fracciones, sino que es directamente proporcional al efecto de cada uno de los parámetros, esta expresión permite obtener un valor más cercano a la realidad de la calidad del recurso. [20]

En general todas las fórmulas presentan inconvenientes, por ello en la gran mayoría de los casos queda a criterio del autor.

2.1.4.5. Diseño de la Escala de Clasificación del ICA

Por último, los valores obtenidos de las fórmulas de agregación deben ser interpretados por una escala o esquema de clasificación, aquí el valor obtenido del índice es transformado en una característica que define el nivel de calidad o contaminación final del agua, se interpreta generalmente en escalas de 0 a 10 o 0 a 100, siendo 0 un agua de mala calidad, mientras que un valor cercano a 1 o 100 representa un agua de Muy Buena Calidad o Excelente; a su vez las categorías de calidad suelen estar agrupadas por un color.

Es conveniente aclarar que tales categorías deben ser definidas con anticipación y en concordancia con el desarrollo de las curvas de los subíndices, con el fin de que los sistemas puedan leerse por separado desde los subíndices y guarden armonía con el totalizado. Es decir, cada curva de cada subíndice debe haberse desarrollado con el mismo sistema de clasificación final que permita, por ejemplo, que si para el Oxígeno Disuelto el valor de calidad de 50, está en una categoría de calidad de agua media, todas las demás Variables incluidas en el índice, tengan la misma equivalencia respecto de la misma categoría (valor Q: 50 para categoría media). De otra manera, puede darse el caso de contrariedades en la clasificación final. [18]

2.2. Los humedales de Bogotá.

Los humedales capitalinos han pasado por un sinnúmero de transformaciones, que han sido ocasionadas por el desarrollo de actividades humanas, que tienen como consecuencia una fuerte presión sobre los ecosistemas; gran parte de estas transformaciones en los humedales se deben a procesos urbanísticos, a la contaminación por aguas residuales, a la eutrofización y la pérdida de la biodiversidad entre otros aspectos.

En Colombia los humedales están protegidos por la Ley 357 de 1997 que acoge la convención Ramsar, para el año 2006 el Departamento Administrativo de Medio Ambiente (hoy Secretaria de Ambiente) presenta la política de humedales del distrito capital con el fin de satisfacer la demanda de espacios naturales para la recreación y conservación de ecosistemas estratégicos, en general la política presenta objetivos para recuperar la dinámica natural del ecosistema con base en la promoción de actividades de conservación y recuperación ecológica.

En Bogotá, por medio del decreto 190 de 2004, se clasifican los humedales como parques ecológicos distritales, tienen como uso principal la preservación de flora y fauna. La resolución 1813 de 2006 del Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA) reglamentó el uso del recurso hídrico como Estético, descrito en el artículo 28 del decreto 1594 de 1984, los cuerpos de agua superficial deben estar libres de material flotante y de espumas provenientes de actividad humana, grasas y aceites que formen película visible y sustancias que produzcan olor.

La SDA y la EAAB iniciaron en el año 2007, en un primer estudio se realizó seguimiento y monitoreo de efluentes y corrientes superficiales, el inventario de las descargas sanitarias, pluviales y combinadas (entradas) y los efluentes (salidas) de los 13 humedales del Distrito Capital; en un segundo estudio se presentó el monitoreo efectuado a doce de los trece humedales declarados como Parques Ecológicos Distritales [24], estas evaluaciones contemplan datos sobre parámetros como grasas y aceites, aluminio, cadmio, cianuro, cobre, cromo hexavalente, cromo total, DBO5, DQO, fenoles, fosforo total, níquel, nitratos, NKT, plomo, tensoactivos, Solidos suspendidos totales (SST), sulfatos, zinc, pH, solidos sedimentables (SS), temperatura (°T), conductividad, coliformes totales y E. coli.

2.2.1. Qué es un Humedal.

De acuerdo a la convención Ramsar, un humedal se define como “las extensiones de marismas pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean estas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda los seis metros”. [25]

La política distrital de humedales plantea un humedal como ecosistemas de gran valor natural y cultural, constituidos por un cuerpo de agua permanente o estacional de escasa profundidad, una franja a su alrededor que puede cubrirse por inundaciones periódicas (Ronda hidráulica) y una franja de terreno no inundable, llamada Zona de manejo y preservación ambiental. Estas áreas se asocian a planos de desborde de los ríos, razón por la cual su biota, los flujos de nutrientes, materia y energía están adaptados a las fluctuaciones y comportamientos de sus sistemas hídricos asociados. [26]

Los ecosistemas de humedal envuelven diferentes fenómenos físicos, químicos y biológicos, con características espacio temporales específicas, que determinan la calidad ambiental del ecosistema, aunque se conoce el impacto individual de las variables que inciden en la calidad del agua, las correlaciones de dichas variables son pobremente conocidas y cuantificables.

2.3. Calidad del agua.

La calidad del agua se determina analizando las características físicas químicas y biológicas, siguiendo los estándares o directrices de calidad, criterios que parten de una base científica sólida, la cual dicta los límites permisivos de concentración de compuestos que son aceptables para los humanos y la vida acuática. Durante los últimos años el deterioro de la calidad se ha convertido en controversia y tema de preocupación mundial debido al crecimiento exponencial de la población, la expansión de las actividades humanas y el cambio climático.

La calidad del agua está vinculada con la capacidad del recurso para responder al uso que se le quiera destinar. La principal problemática del agua a nivel mundial está relacionada con la eutrofización, como resultado del aumento de nutrientes de fósforo y nitrógeno, generados por actividades agrícolas, aguas residuales domésticas e industriales y de incendios forestales; los cuerpos de agua superficial como los humedales son los ecosistemas más susceptibles a los impactos negativos de la eutrofización debido a su complejo dinamismo y al tiempo de retención del agua, hecho que contribuye a la acumulación de contaminantes.

3. Metodología

Este capítulo incluye el procedimiento desarrollado para determinar el Índice de Calidad de Agua (ICA).

3.1. Localización del área de estudio.

El proyecto tiene como objetivo las áreas de humedal declaradas por el decreto 190 de 2004 como Parque Ecológico Distrital de humedal y de aquellos reconocidos en los últimos tiempos por la Secretaria Distrital de Medio Ambiente; además de aquellos que cuenten con información disponible sobre caracterizaciones físicas y químicas de calidad del agua, estos son:

Tabla 6: Parques Ecológicos Distritales de Humedal. [27]

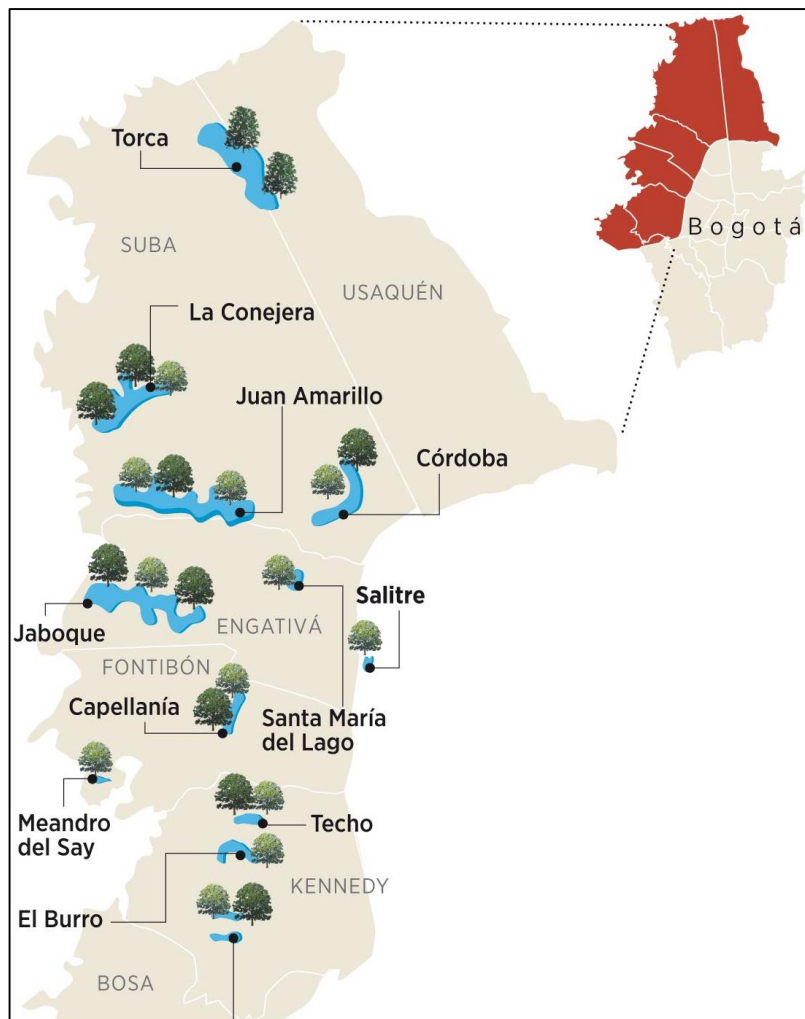
HUMEDAL		ÁREA (Ha)	CUENCA	LOCALIDAD	RESOLUCIÓN DE APROBACIÓN PMA
1	<i>Tibanica</i>	28,8	Tunjuelo	Bosa (7)	Res. SDA 334 del 28 de Febrero de 2007
2	<i>La Vaca</i>	7,98	Fucha	Kennedy(8)	Res. SDA 7473 del 30 de Octubre de 2009

3	<i>El Burro</i>	18,84	Fucha	Kennedy(8)	Res. SDA 4383 del 30 de Octubre de 2008
4	<i>Techo</i>	11,67	Fucha	Kennedy(8)	Res. SDA 4573 del 22 de Junio de 2009 y 6469 del 22 de Septiembre de 2009
5	<i>Capellanía</i>	27	Fucha	Fontibón(9)	Res. SDA 7474 del 30 de Octubre de 2009
6	<i>Meandro del Say</i>	26	Fucha	Fontibón(9)	Res. Conjunta CAR-SDA 03 del 23 de febrero de 2015
7	<i>Santa María del Lago</i>	0,86	Salitre	Engativá(10)	Res. SDA 7773 del 22 de diciembre 2010
8	<i>Córdoba</i>	40,51	Salitre	Suba(11)	Res. SDA 1504 del 28 de junio de 2008
9	<i>Jaboque</i>	148	Jaboque	Engativá(10)	Res. Conjunta CAR-SDA 01 del 13 de febrero de 2015
10	<i>Juan amarillo</i>	222,76	Salitre	Engativá(10) - Suba(11)	Res. SDA 3887 del 6 de Mayo de 2010
11	<i>La Conejera</i>	58,89	Conejera	Suba(11)	Res. SDA 0069 del 26 de Enero de 2015
12	<i>Torca-Guaymaral</i>	79,93	Torca	Usaquén(1)-Suba(11)	Res. Conjunta CAR-SDA 02 del 13 de febrero de 2015
13	<i>El Salitre</i>	2,8	Salitre	Barrios Unidos(12)	
14	<i>Tunjo</i>	33,2	Tunjuelo	Tunjuelito(6)-Ciudad Bolívar(19)	
15	<i>La Isla</i>	7,77	Tunjuelo	Bosa(7)	
Total		715,01			

Fuente: Secretaria Distrital de Ambiente.

Los 15 humedales reconocidos por la SDA se extienden de norte a sur (*Ilustración 1*), repartidos en ocho localidades, comprenden 715 Ha y solo 12 de ellos poseen plan de manejo ambiental.

Ilustración 1: Humedales de Bogotá [28]



3.2. Diseño del índice de calidad del agua

El proceso para el diseño del índice de calidad del agua para los humedales (ICAH) del distrito capital está relacionado con las siguientes etapas:

- Selección de parámetros.
- Desarrollo de subíndices y curvas de calidad.
- Asignación de pesos a los subíndices.
- Agregación de subíndices a la fórmula matemática.
- Diseño de la escala de calidad.

3.2.1. Selección de parámetros

La selección de parámetros de evaluación fue el primer paso para la estructuración del índice de calidad del agua (ICAHUMB) para los humedales capitalinos; por ello

para el desarrollo de la primera fase de diseño de este índice se analizaron las siguientes condiciones:

- Criterio bibliográfico.
- Criterio normativo
- Criterio Estadístico
- informe realizado en 2010 por la Universidad de los Andes en convenio con la Secretaria de Medio Ambiente, enfocado a la *“Investigacion de variables de tasa asociadas al comportamiento de calidad del agua en humedales naturales y sistema de indicadores y estudios geo eléctricos”*.

3.2.1.1. Criterio basado en la bibliografía.

Debido a la actual preocupacion por medir la calidad de los recursos hidricos, se han realizado varios trabajos que analizan los diferentes índices de calidad del agua existentes. Un ejemplo es el estudio comparativo realizado por Nelson Fernandez y sus colaboradores, este articulo presenta una revisión de los diferentes tipos de índices de calidad del agua por medio de un analisis de clasificacion multivariado. Entre los resultados se evidenció que de los 30 índices analizados, en el 50% de los casos se tiene en cuenta el oxigeno disuelto que se combina con los sólidos totales (en 12 índices), el pH (en 12), los coliformes fecales (en 11), la DBO (en 11), el fósforo total y los ortofosfatos (en 11) y los nitratos (en 10). Con algo menos de frecuencia se encuentran la turbidez (en 9), la temperatura (en 8) y el amonio (en 8). Lo anterior, se debe a que en la mayoría de las ocasiones se ha querido involucrar en un solo índice procesos de diferente naturaleza como lo son: la oxido-reducción, la mineralización, los sólidos suspendidos, los nutrientes fósforo y nitrógeno y el pH, este último como la expresión más importante del sistema carbono-carbonato, por lo que mediciones como la alcalinidad y dureza son poco frecuentes, a pesar de la importancia que ellas tienen. [18]

En la selección de parámetros existe la tendencia de reducir el número de variables evitando así la multitud de criterios y la redundancia, seleccionando parámetros que permitan un cálculo rápido y a bajo costo; La tabla 7 reporta los parámetros escogidos por varios autores en el diseño de su índice:

Tabla 7 Relación de parámetros e Índices de Calidad de Agua.[illegible]

Grasas			x											
Nitrógeno orgánico en sedimentos										x				
Carbono orgánico en sedimentos										x				
Fenoles											x			

Fuente: El Autor

La tabla muestra diferentes índices desarrollados a nivel mundial, diseñados para cuerpos de agua dulce; se evidencio, que los parámetros más utilizados fueron el oxígeno disuelto, la temperatura y la demanda biológica oxígeno; cada uno se emplea en 10 de los 12 índices analizados (83% de los casos), seguido del pH en nueve índices (75%), los coliformes fecales en 8 índices (67%) , los sólidos suspendidos, los nitratos y fosfatos en 5 casos (42%), la alcalinidad en cuatro (33%), dureza, cloruro, salinidad, nitrógeno amoniacal, sólidos totales y sólidos suspendidos en 3 casos cada uno (25%), transparencia, nitrógeno total, fosforo total, DQO, clorofila a y color cada uno en dos índices (17%) y por último los parámetros de olor, grasas, nitrógeno orgánico en sedimentos, carbono orgánico en sedimentos, fenoles, amonio, conductividad, nitritos, solo en un índice (9 %).

Las probables causas de estos resultados radican en lo siguiente:

El oxígeno disuelto (OD) (83% de presencia en los ICA) es un indicador del nivel de contaminación del agua y da soporte a la dinámica de la vida vegetal y animal; por lo general un nivel alto de oxígeno en el agua indica mejor calidad, pero si los niveles de oxígeno están demasiado bajos los peces y otros organismos no pueden sobrevivir. Una de las razones más comunes para encontrar niveles bajos de oxígeno es debido a altas concentraciones de materia orgánica (vertidos, conexiones erradas, descomposición vegetal y animal) o a la presencia de altas concentraciones de nutrientes en forma de fósforo y nitrógeno, ya que promueven el crecimiento de algas y bacterias, que necesitan oxígeno para sobrevivir y descomponer los desechos orgánicos.

La temperatura (83% de presencia en los ICA) está intrínsecamente relacionada con los niveles de oxígeno y son inversamente proporcionales entre sí, lo que significa que al $>^{\circ}T < OD$ y a $<T > OD$, cuando los niveles de temperatura en el agua son muy bajos suelen aumentar los procesos biológicos por microorganismos anaerobios. Esta componente física del agua influye notoriamente en su calidad, afecta los procesos metabólicos, la respiración, crecimiento y reproducción de plantas y animales, la solubilidad de sustancias y las reacciones químicas y bioquímicas.

La DOB₅ (83% de presencia en los ICA) mide la cantidad de oxígeno necesaria para la descomposición aeróbica mediante microorganismos, por ello un valor alto en la DBO puede es un indicador de contaminación y de posibles condiciones anóxicas del medio acuático. Por lo general las aguas naturales presentan niveles muy bajos

de materia orgánica, por ello medir su concentración se hace importante ya que su origen esta derivado de las actividades agrícolas, industriales y urbanas.

El pH (75% de presencia en los ICA) es un constituyente del agua importante para el desarrollo de la vida acuática y los procesos biológicos y químicos, este factor interviene en los niveles de toxicidad de un gran número de contaminantes.

Las causas de contaminación de tipo bacteriológico en agua, son producto de los animales y actividades humanas; algunas de ellas por el aporte de desechos en forma de heces fecales, orina y sangre a las redes de drenaje urbano; estas variables (coliformes fecales 67% de presencia en los ICA y la E-coli) en el agua deben ser monitoreadas debido a su capacidad de producir enfermedades al ser humano como el cólera, disentería, fiebre tifoidea, hepatitis, entre otras.

Los nitratos y fosfatos están presentes en el 42% de los índices, deben su papel a la capacidad de promover el crecimiento de algas y otros organismos, que contribuyen a la eutrofización del ecosistema. Para el caso de los sólidos suspendidos presentes en un porcentaje análogo a los componentes anteriores, su presencia afecta considerablemente los procesos biológicos como la fotosíntesis, los SS son de vital importancia en el monitoreo de humedales por la concentración de lodos en el fondo del vaso hidráulico del ecosistema.

De acuerdo a la revisión bibliografía, gran parte de los índices pretenden evaluar variables como en OD, DBO, SST, E coli, Coliformes fecales, nutrientes, pH y la temperatura debido a su importante papel en la calidad del agua y dinámica natural de los ecosistemas, su baja o alta concentración puede indicar contaminación en el agua y posibles alteraciones al medio acuático.

3.2.1.2. Criterio Normativo.

A nivel nacional la clasificación y usos del agua están reguladas por el decreto 1594 de 1984 del Ministerio de Agricultura donde se dictan y establecen parámetros y criterios de calidad que debe tener el recurso dependiendo de su clasificación; para el caso de los humedales y de acuerdo a los usos destinados del agua, tenemos los siguientes criterios según la norma:

Decreto 1594-84 Artículo 44: Dicta los criterios de calidad admisibles que se deben tener en cuenta cuando el recurso tiene como finalidad uso estético:

1. Ausencia de material flotante y de espumas provenientes de actividad humana.
2. Ausencia de grasas y aceites que formen película visible.
3. Ausencia de sustancias que produzcan olor.

Decreto 1594-84 Artículo 45: Los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para preservación de la fauna y flora en aguas dulces son los siguientes:

Tabla 8: Criterios admisibles calidad de acuerdo al Decreto 1594 de 1984 [29]

Decreto 1594 de 1984	OD [mg/L]	DBO ₅ [mg/L]	DQO [mg/L]	Coliformes Fecales	Coliformes Totales	Nitrógeno Total [mg/L]	Fosforo Total [mg/L]	PH
Preservación de Fauna y Flora	5	1 - 15	< 100	1000	5000	-	-	6,5 a 9
Uso recreativo con contacto secundario	70 % de saturación	-	-	1000	5000	-	-	5 a 9

El decreto 1594 también menciona algunas variables que deben ser tenidas en cuenta a la hora de establecer un modelo para la simulación de la calidad del agua.

- Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)
- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- Sólidos Suspendidos (SS)
- pH
- Temperatura (°T)
- Oxígeno Disuelto (OD)
- Coliformes
- Caudal

Para el adecuado diseño de un índice de calidad del agua, se debe considerar la normativa, ya que esta cuenta con el respaldo de un gran número de expertos sobre el tema. Según lo anterior, para esta investigación se deben tener en cuenta aquellos parámetros que indican:

- Contaminación por cargas orgánicas (DQO, DBO₅, COT),
- Exceso de nutrientes (fósforo y nitrógeno total),
- Ausencia de espumas y de material flotante que intuye el monitoreo de Parámetros como tensoactivos y grasas y aceites,
- la presencia de microorganismos patógenos como el caso de los coliformes fecales y totales.
- La condición del medio acuático (el oxígeno disuelto, la temperatura y el pH tienen intrínseca relación con la calidad estética, el mantenimiento de la vida acuática e inciden en la concentración de otras sustancias y en la capacidad auto depuradora del agua).

3.2.1.3. Selección de parámetros de acuerdo a la Investigación de variables de tasa asociadas al comportamiento de calidad del agua en humedales naturales y sistema de indicadores y estudios geo eléctricos.

Este informe realizado por la Universidad de los andes es único en su tipo y presenta los resultados del estudio del comportamiento de la dinámica de contaminantes en algunos humedales de Bogotá y propone un modelo de indicadores fisicoquímicos. Plantea la adopción del “*Water Quality Index de Canadá (WQI)*” para los humedales

del distrito capital, este índice puede usarse para determinar la calidad del agua según criterios de calidad, estimando los niveles de afectación al agua por actividades humanas; el WQI fue escogido ya que permite incorporar objetivos de calidad en diferentes partes del humedal sin importar que los parámetros monitoreados sean diferentes.

De acuerdo a esta investigación, el estudio de la calidad del agua en los humedales de Bogotá debe realizarse por separado a los espejos de agua y los afluentes del ecosistema; con esto se podrá determinar la calidad del agua que ingresa al humedal y la interacción de estos ecosistemas con la calidad fisicoquímica del agua y de las diferentes comunidades animales y vegetales presentes. [29] Los expertos de la EAAB y de la universidad de los andes recomiendan los siguientes parámetros para el monitoreo de la calidad del agua en humedales (Tabla 9).

Tabla 9: Parámetros y frecuencias de medición recomendadas para los humedales de Bogotá. [29]

Indicador	Frecuencia de Muestreo	Parámetros
Calidad del agua en entradas y salidas del humedal	Trimestral	Cianuro, cinc, coliformes fecales, DBO, DQO, fenoles totales, fosforo reactivo soluble, fosforo total, nitratos, NKT, pH, SST, temperatura y tensoactivos *tensoactivos, coliformes totales, OD, sulfatos, e-coli, grasas y aceites (2 veces al año)
Calidad del agua en el humedal	Trimestral	Temperatura, pH, nitratos, NKT, Fenoles Totales, DBO, coliformes fecales, fosforo reactivo soluble, turbiedad (Disco Secchi), SST, clorofila A, COT, fosforo total y DQO Tensoactivos, coliformes totales, OD, sulfatos, e-coli, grasas y aceites e hidrocarburos (2 veces al año).

Este informe plantea objetivos temporales de calidad para los humedales como marco de referencia para el cálculo de los índices, ya que en la actualidad no existen normas que reglamenten la calidad del agua que ingresa o esta al interior de los humedales; esto objetivos de calidad están basados en la comparación de datos históricos de los humedales y criterios de calidad de las cuencas que atraviesan la ciudad (Torca, Salitre, Fucha y Tunjuelo); buscando potenciar el tema de preservación y restauración ecológica de humedales.

Tabla 10: Objetivos de calidad para los humedales del distrito capital. [29]

Parámetro	Unidades	Afluentes de los humedales	Al interior de los humedales
		Valor de referencia	
Aceites y Grasas	mg/L	10	8
Cianuro	mg/L	0,01	
Cinc	mg/L	0,2	
Coliformes Fecales	nmp/100 ml	1000000	1000000
Coliformes Totales	nmp/100 ml	1000000	1000000

DBO5	mg/L	50	50
DQO	mg/L	150	150
E.coli	nmp/100 ml	1000000	1000000
Fenoles	mg/L	0,1	0,1
Fosforo reactivo soluble	mg/L	2	1
Fosforo Total	mg/L	5	2
Nitratos	mg/L	0,5	0,3
Nitrógeno Total	mg/L	10	
NKT	mg/L		10
OD	mg/L	>=2	>=2
PH	Unidad	6-8.	6-8.
Turbiedad	UNT		350
SST	mg/L	100	90
Sulfatos			55
Sulfuros	mg/L	2	
Temperatura	°C	25	17
Tensoactivos (SAAM)	mg/L	1	1
COT	mg/L		35

Para el diseño del ICAHUMB se deben considerar las recomendaciones del estudio anterior; ya que brindan lineamientos y objetivos de calidad sobre parámetros que por las características de los afluentes y espejos de agua deben ser monitoreados.

3.2.1.4. Criterio Estadístico.

En esta investigación se usaron los registros históricos de datos existentes y disponibles sobre caracterizaciones físicas, químicas y microbiológicas realizadas en los cuerpos de agua, efluentes y afluentes de los humedales de la ciudad registrados por las instituciones distritales.

En primera instancia, se revisaron los registros contemplados en los planes de manejo ambiental de los diferentes humedales y los resultados de los convenios entre la Secretaria Distrital de Ambiente – SDA y la empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá – ESP-EAB-ESP para la fase VIII Y IX del programa de seguimiento y monitoreo de efluentes industriales y afluentes al recurso hídrico de Bogotá, las cuales están orientadas a la evaluación y caracterización de las condiciones de calidad de los vertimientos, los cuerpos de agua superficial, la red de alcantarillado público y los pozos presentes en los humedales. También se revisaron los datos producto del monitoreo independiente de parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y biológicos realizado por la EAB-ESP a las entradas, salidas y cuerpos de agua de los parques ecológicos distritales de humedal (PEDH), cuyos registros se reportan desde el año 2005 al 2014.

A continuación se describen de los estudios que se consideraron para esta investigación:

Octava Fase del Programa de Seguimiento y Monitoreo de Efluentes y Corrientes Superficiales de Bogotá:

Esta fase de seguimiento y monitoreo contempla el inventario de entradas y salidas de 12 humedales distritales, además identifica los puntos críticos que los afectan y caracteriza los vertimientos que ingresan a los ecosistemas, así como las descargas que salen, brinda los resultados de los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos de la calidad del agua, evaluando su origen y el impacto generado por estas descargas. Esta fase se realizó en noviembre y diciembre de 2005, caracterizando cincuenta y cuatro (54) puntos, entradas y salidas a los humedales ubicados en el D.C. [24]

Novena Fase del Programa de Seguimiento y Monitoreo de Efluentes Industriales y Afluentes al Recurso Hídrico de Bogotá.

Esta fase de seguimiento y monitoreo está orientada a la evaluación de los vertimientos a las corrientes y al mejoramiento de la calidad del recurso hídrico superficial de los humedales de Bogotá, por ello se realiza una evaluación comparativa de las concentraciones de parámetros físicos, químicos y microbiológicos de 13 de los quince parques ecológicos distritales reconocidos por la Secretaria de Ambiente; que pueden afectar la calidad del cuerpo de agua, su capacidad hidráulica y de depuración. Las jornadas de monitoreo de este estudio se realizaron en el año 2008, 2009 y 2010, caracterizando 333 puntos de muestreo.

Registros de datos de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB).

Esta base de datos contempla los análisis físicos, químicos, biológicos y microbiológicos realizados por el monitoreo de la EAB-ESP a las entradas, salidas y cuerpos de agua de los humedales de la ciudad, cuyos registros se reportan desde el año 2010 hasta el año 2014 en 242 puntos de muestreo (Anexo B).

En resumen, Se revisaron 629 registros de muestreos realizados en cuerpos de agua, afluentes y efluentes de los humedales, entre los años 2005 y 2014 (Tabla 11)

Tabla 11: Distribución de muestreos por humedal y referente.

N°	Humedal	Muestreos en espejos de agua	Muestreos en entradas y salidas	Total Muestreos
1	Capellania	12	25	37
2	La Conejera	18	54	72
3	Jaboque	24	65	89
4	Juan Amarillo	41	63	104

5	Meandro del Say	13	5	18
6	Córdoba	20	47	67
7	Santa María del Lago	10	13	23
8	Burro	15	21	36
9	Techo	12	25	37
10	La Vaca	16	30	46
11	Torca & Guaymaral	10	54	64
12	Tibanica	18	18	36
Registro Total de Muestreos		209	420	629

Fuente: (El autor)

De acuerdo a la tabla 11, los ecosistemas en los cuales se han realizado mayor número caracterizaciones de calidad del agua son los Humedales de Juan Amarillo y Jaboque con 104 y 89 muestreos; seguidos por el humedal de la Conejera y Córdoba con 72 y 67 muestreos respectivamente; en comparación con los humedales Santa María del lago y Meandro del Say que poseen solo 23 y 18 mediciones. También se evidencia que hay un número mayor de muestreos realizados en los afluentes y efluentes (420 muestreos) en comparación con la toma realizada en los espejos de agua (209 muestreos).

La tabla 12 muestra la distribución de los registros con respecto al año en que se tomaron las muestras, evidenciando que el año 2009 representa el mayor porcentaje de registros con un total de 213, en comparación con el año 2014 que presenta datos sobre 23 muestreos.

Tabla 12: Distribución de muestreos por año.

Año de Muestreo	Numero de muestreos
2005	27
2008	75
2009	213
2010	176
2011	36
2013	79
2014	23
Total	629

Fuente: (El autor)

El análisis estadístico para la selección de parámetros no es una tarea fácil, cada muestreo realizado en los humedales tiene un objetivo diferente, que puede evaluar la calidad de los espejos de agua, los efluentes o los afluentes por canales, tuberías y colectores, por ende los parámetros de calidad medidos varían (tabla 9). Como se puede evidenciar en la tabla 13 para algunos parámetros la cantidad de registros de mediciones disponibles dificulta su análisis; como el caso del Cromo Hexavalente que solo cuenta con 7 registros en comparación con otras variables como la DBO₅, o el fósforo total que cuentan con más de 500.

Tabla 13: Relación del número de datos disponibles de parámetros de calidad del agua por humedal.

Parámetro	Humedales de Bogotá												Total Datos Disponibles por parámetro
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	Capellania	Conejera	Juan Amarillo	Jaboque	Meandro del Say	Córdoba	Santa Maria del Lago	El Burro	Techo	Vaca	Torca y Guaymaral	Tibanica	
Cromo hexavalente	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	4	0	7
Coliformes fecales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	8	5	19
Nitritos	7	0	0	12	0	0	0	0	0	3	10	0	32
Amonio	6	1	0	12	0	1	0	0	0	7	10	0	37
Cadmio	3	4	2	9	0	11	2	2	1	1	2	3	40
Cianuro disociable	1	0	23	0	0	14	0	0	1	2	7	0	48
Cromo	8	5	7	9	1	5	2	2	7	3	0	6	55
oxígeno disuelto	4	11	13	8	0	7	0	0	3	5	7	1	59
Sulfatos	7	1	18	12	0	9	0	0	3	4	2	6	62
Hidrocarburos	10	1	21	14	1	10	1	5	10	6	15	5	99
Níquel	8	5	17	33	0	6	3	4	12	2	8	8	106
Cianuro	5	12	12	31	1	0	5	6	14	11	9	5	111
Plomo	12	2	18	31	1	9	2	5	12	8	8	8	116
Clorofila-a	7	5	35	15	0	9	10	4	9	17	11	8	130
Cobre	11	5	27	25	1	14	2	7	16	13	8	11	140
Aceites y grasas	11	16	22	24	1	19	2	4	11	11	16	10	147
Aluminio	14	15	35	33	1	26	5	8	16	15	22	12	202
SAAM	17	26	32	32	1	25	5	8	15	14	21	12	208
Zinc	19	15	36	34	1	26	5	8	16	14	22	12	208
Carbono orgánico total	17	35	48	32	13	25	10	15	17	18	19	22	271
Fenoles totales	28	39	62	48	9	38	11	15	24	20	29	22	345
Solidos sedimentables	26	55	29	74	12	48	12	22	26	31	30	23	388
Nitrato	27	47	60	69	14	52	16	31	26	25	36	21	424
SST	20	56	73	68	5	52	12	20	26	31	53	21	437
DQO	26	55	72	69	5	52	12	20	27	32	50	21	441
E, coli	31	46	89	77	18	58	22	28	33	36	54	29	521
Coliformes totales	31	46	89	77	18	58	22	29	34	40	61	32	537
Fosforo soluble	31	46	101	79	17	59	21	34	33	42	52	32	547
Nitrógeno kjeldahl total	29	62	102	89	18	67	22	35	36	43	60	36	599
DBO₅	36	68	97	87	18	66	21	35	37	42	57	36	600
Fosforo total	36	62	101	89	17	65	22	34	36	43	59	36	600

Temperatura*	34	71	100	89	18	67	22	33	37	42	62	36	611
Conductividad*	36	70	102	89	18	67	22	35	37	42	62	36	616
PH	36	71	102	89	18	67	22	35	37	42	62	36	617

Fuente: (El Autor)

Los humedales en Bogotá presentan características de calidad del agua muy variadas tanto para sus afluentes como cuerpos de agua; debido al impacto provocado por actividades de origen antrópico que afectan la calidad del agua que ingresa al humedal y la interacción del ecosistema.

Para la selección de parámetros, también se tuvo en cuenta un criterio estadístico; por ello se realizó un análisis factorial (AF) por componentes principales en el programa estadístico BM SPSS Statistics versión 21.

3.2.1.4.1. Análisis Factorial.

El análisis factorial (AF) es una técnica de análisis multivariable que tiene como objetivo reducir un conjunto de variables cuantitativas aleatorias a un número menor de factores lineales independientes, perdiendo la menor cantidad de información posible; con esta herramienta se pueden hallar las causas de la variabilidad en un conjunto de datos, ordenando las variables por importancia.

En este análisis se contemplaron los datos de 629 muestreos realizados en los afluentes, efluentes y espejos de agua de los diferentes humedales desde el año 2005 hasta el 2014; el análisis factorial incluyó 11 variables: NKT, fosforo total, Coliformes totales, E-coli, conductividad, DBO₅, DQO, nitratos, sólidos suspendidos totales SST, temperatura y pH; estos parámetros fueron seleccionados a partir del número de registros existentes en la base de datos.

El coeficiente estadístico de Káiser-Meyer-Olkin (KMO) presentó un valor mediano de 0.709 lo que indica que existe un nivel aceptable de correlación entre las variables, por lo que el tamaño de muestra para el análisis fue considerado como bueno, el KMO pone en manifiesto que para este caso, el análisis factorial es pertinente. La prueba de Esfericidad de Bartlett resultó significativa ($\chi^2=1100,0011$ g.l.=55; $P=0.00$) rechazando la hipótesis de diagonalidad de la matriz de correlación. El determinante de la matriz de correlaciones presentó un valor de 0,009 muy cercano a cero, confirmando la correlación lineal entre las variables.

Tabla 14 coeficientes estadísticos de KMO, prueba de Bartlett y determinante de la matriz de correlaciones.

Medida de adecuación muestra de Káiser-Meyer-Olkin.		0,709
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aproximado	1011,0011
	gl	55
	Sig.	0,000
Determinante de la matriz de correlaciones		0,009

Fuente: (El Autor)

A partir de la matriz de correlaciones (Tabla 16) se puede evidenciar que las variables DQO, NKT, SST y fósforo total presenta correlaciones positivas que indican que un aumento en las cargas orgánicas puede implicar que se relaciona con un aumento en la concentración de nutrientes; la correlacion positiva entre el fósforo total y el NKT radica en su naturaleza de aportar nutrientes al ecosistema; existe una corelacion entre los Coliformes totales y la E.coli debido a su origen microbiano, además juntos son indicadores bacterianos de contaminacion fecal en aguas; tambien se puede evidenciar que los nitratos son una variable independiente que posee bajas correlaciones con los otros paramentros.

Tabla 15 Matriz de correlaciones.

		Coliformes Totales	DQO	E.coli	Fosforo Total	NKT	SST	pH	Temperatura	Nitratos	Conductividad	DBO5
Correlación	Coliformes Totales	1,000										
	DQO	,067	1,000									
	E.coli	,440	,233	1,000								
	Fosforo Total	,109	,677	,238	1,000							
	NKT	,116	,708	,315	,817	1,000						
	SST	-,011	,705	-,016	,468	,382	1,000					
	pH	,007	,091	,142	,258	,302	-,181	1,000				
	Temperatura	,072	,076	,066	,176	,137	,030	,313	1,000			
	Nitratos	-,027	-,073	-,075	-,137	-,099	,063	-,030	-,063	1,000		
	Conductividad	,092	,325	,244	,575	,422	,123	,171	-,021	-,020	1,000	
	DBO₅	,082	,568	,254	,578	,688	,190	,202	,048	-,082	,280	1,000
a. Determinante = ,009												

Fuente: (El Autor)

Las comunialidades iniciales representan la varianza de cada variable explicada por todas las componentes principales por lo tanto valen siempre 1; la comunialidad final indica la variabilidad de cada variable que es explicada por el conjunto de componentes del modelo. Nótese que salvo la DBO que presenta el menor valor (explica el 57%), el resto de variables reproducen mas del 60% de su variabilidad original en el modelo; el mayor valor se lo llevan los nitratos con 0,976 (97%).

Tabla 16 Comunialidades del análisis factorial para datos de afluentes.

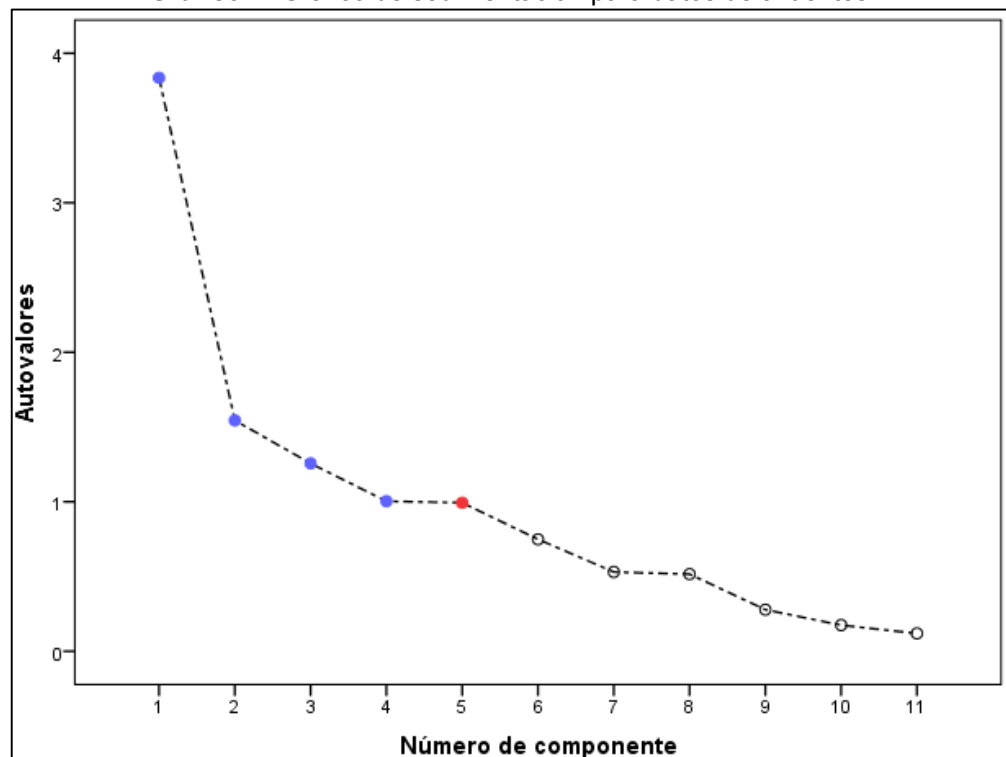
Comunalidades		
	Inicial	Extracción
Nitratos	1,000	,976
SST	1,000	,868
DQO	1,000	,852
Temperatura	1,000	,841
Fosforo Total	1,000	,830
NKT	1,000	,828
ColiformesTotales	1,000	,789
pH	1,000	,759
E.coli	1,000	,708

Conductividad	1,000	,605
DBO5	1,000	,576
Método de extracción: Análisis de Componentes principales.		

Fuente: (El Autor)

Según el gráfico 1, lo ideal sería escoger 4 factores, ya que el cambio o punto de inflexión se acentúa en el cuarto factor, sin embargo, se considera que la varianza explicada por éstos es muy baja (69,4%), por lo tanto, se escogieron 5 componentes que explican el 78,5% de la varianza.

Gráfico 1: Gráfico de sedimentación para datos de afluentes.



Fuente: (El Autor)

Se escogieron 5 componentes, 4 presentaron auto valores mayores a 1 y explican el 69,5% de la varianza. No obstante el quinto factor se encuentra muy próximo a 1 (0,993) por lo que se decidió incluir en la estructura factorial; los 5 componentes explican 78,47% de la varianza total, esto indica que el porcentaje acumulado de varianza alcanza un nivel satisfactorio para esta investigación.

Las componentes CP1, CP2, CP3, CP4 y CP5 representaron un 34,8%, 14,03%, 11,42%, 9,1% y 9,02% respectivamente (Tabla14).

Tabla 17 Distribución de la varianza total explicada.

Varianza total explicada									
Componente	Auto valores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción			Suma de las saturaciones al cuadrado de la rotación		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	3,836	34,869	34,869	3,836	34,869	34,869	3,189	28,991	28,991
2	1,544	14,036	48,905	1,544	14,036	48,905	1,679	15,262	44,253
3	1,256	11,421	60,326	1,256	11,421	60,326	1,447	13,159	57,411
4	1,004	9,124	69,450	1,004	9,124	69,450	1,296	11,785	69,197
5	,993	9,029	78,478	,993	9,029	78,478	1,021	9,282	78,478
6	,749	6,807	85,286						
7	,530	4,821	90,107						
8	,516	4,689	94,796						
9	,278	2,531	97,327						
10	,175	1,589	98,916						
11	,119	1,084	100,000						
Método de extracción: Análisis de Componentes principales.									

Fuente: (El Autor)

La estructura factorial inicial (matriz de componentes) no es muy clara debido a que diversos factores comparten las variables, como el caso de los coliformes totales y la temperatura que están relacionados con el segundo, tercer y cuarto factor, la variable *E.coli* aparece tanto en el primer, segundo y tercer factor. Lo mismo ocurre para los sólidos suspendidos respecto a los ejes primero, segundo y cuarto.

Los pesos de cada variable por componente antes de la rotación se muestran en la tabla 18, estos pesos o coeficientes corresponden a la correlación entre la componente y la variable; se puede observar como las variables de NKT, fósforo total, DBO₅, DQO, conductividad y SST están relacionadas en mayor medida con la primera componente; los coliformes fecales, la E-coli, la temperatura y el pH se relacionan más con la segunda y tercera componente. Mientras que los nitratos con la cuarta.

Tabla 18 Matriz de componentes.

	Componente				
	1	2	3	4	5
NKT	,904				
Fósforo Total	,902				
DQO	,842	-,334			
DBO5	,735				
Conductividad	,569			-,442	
SST	,531	-,646		,394	
pH		,556	-,554		
E.coli	,411	,529	,505		

Coliformes Totales		,481	,644	,322	
Temperatura		,373	-,487	,650	
Nitratos					,926
Método de extracción: Análisis de componentes principales.					
a. 5 componentes extraídos					

Fuente: (El Autor)

Con el fin de facilitar la interpretación de los factores en esta investigación se llevó a cabo la rotación de los ejes factoriales por el método Varimax. Este método busca maximizar la varianza de los factores e interpretar de forma más precisa la relación de las variables con las componentes; minimiza el número de variables de altos coeficientes en un factor. consiguiendo que algunas de sus cargas factoriales tiendan a acercarse a uno, mientras que otras se acerquen a cero, lo que se obtiene es una pertenencia más clara e inteligible de cada variable a ese factor”. [30]

Tabla 19 Matriz de componentes rotados.

	Componente				
	1	2	3	4	5
NKT	,834	,287	,119	,176	-,071
Fósforo Total	,832	,321	,072	,156	-,080
Conductividad	,729	-,145	,106	-,169	,110
DBO5	,728	,153	,089	,059	-,107
SST	,238	,895	-,059	-,015	,084
DQO	,635	,661	,070	,071	-,051
Coliformes Totales	-,021	,053	,886	,041	,008
E.coli	,304	-,080	,779	,023	-,042
Temperatura	-,041	,112	,079	,904	-,052
pH	,425	-,433	-,045	,619	,072
Nitratos	-,077	,047	-,023	-,022	,983
Método de extracción: Análisis de componentes principales.					
Método de rotación: Normalización Varimax con Káiser.					
a. La rotación ha convergido en 9 iteraciones.					

Fuente: (El Autor)

Como lo muestra la tabla 19 del análisis factorial (Matriz de componentes rotados) podemos concluir que las variables se agrupan en 4 grupos:

a) Componente 1:

“Nutrientes y mineralización” es la asociación de las variables, NKT, fosforo total, DBO₅ y conductividad.

Este componente confirma los anteriores valores de correlación entre las variables, la matriz de correlaciones mostró que las variables NKT y fósforo total se correlacionaban en más del 80%; la conductividad presentaba correlaciones entre el 42% y 57% con el fosforo total y el NKT respectivamente.

La concentración de fósforo y nitrógeno en el agua promueve los fenómenos de eutrofización, impulsando la proliferación de algas y macrofitas (buchón de agua, barbasco, entre otras), que consecuentemente disminuyen la concentración de oxígeno disuelto en el agua y pueden aumentar los procesos anaerobios, el origen de las altas concentraciones de nutrientes en los humedales se debe a que varios ecosistemas presentan actividades agrícolas en zonas de ronda y conexiones erradas de aguas residuales.

La conductividad por su parte refleja la presencia de cationes de sodio, potasio, calcio, magnesio y aniones de carbonatos, bicarbonatos, sulfatos y cloruros, principalmente aportadas por vertimientos residuales de origen doméstico, un incremento en la conductividad del agua puede tener efectos graves sobre la dinámica ecológica de los ecosistemas llegando incluso a una fuerte reducción de la biodiversidad.

La DBO5 indica la cantidad de oxígeno disuelto que consumen los microorganismos para la oxidación bioquímica de la materia orgánica. La DBO puede aumentar por la oxidación del amoníaco a nitritos y, a nitratos; altas concentraciones de materia orgánica en humedales tienen su origen principalmente en el vertido de aguas residuales y la proliferación de productores primarios como algas.

- b) Componente 2: “Carga orgánica y sólidos suspendidos” lo integran las variables de SST y DQO

La DQO es una medida representativa de la contaminación e indica la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica. Los registros históricos los humedales de Bogotá presentan altos valores de SST y al mismo tiempo valores altos en la demanda de oxígeno; este modelo evidenció que las variables estaban correlacionadas más del 70%, lo que indicaba que un aumento en la concentración de la DQO puede relacionarse con un incremento de la concentración de SST en agua.

Es importante anotar que los procesos de contaminación orgánica no están asociados al incremento de sólidos suspendidos (a pesar de las correlaciones de estos con la DBO y DQO), ni tampoco a procesos de eutrofización. Así mismo, el aumento de sólidos suspendidos no está relacionado con la llegada de nutrientes (salvo durante lluvias); tampoco hay asociación entre estos últimos y la mineralización de las aguas [16].

- c) Componente 3: Este grupo etiquetado “indicadores microbiológicos” está conformado por las variables coliformes totales y E. coli.

Su correlación en este factor se debe a que los dos parámetros son indicadores de contaminación bacteriana en aguas. Estas bacterias son aportadas por los

animales que pastan en la ronda de algunos humedales, la existencia de conexiones erradas al ecosistema y la descarga de residuales líquidos urbanos.

- d) Componente 4: “Temperatura y acidez” conformado por las variables °T y pH. Estas variables son indicadores inmediatos de las condiciones de vida acuática, por ello son de suma importancia a la hora de evaluar la calidad del agua en los humedales; un aumento en la °T involucra una disminución del pH y por ende la acidificación del ecosistema.
- e) Componente 5 denominado nitratos, su aumento en el agua está relacionado con el arrastre de sedimentos por lluvia, el vertimiento de aguas residuales domésticas e industriales y conexiones erradas. Esta variable presentó en el análisis factorial independencia de las otras, aunque el valor de la comunalidad en el modelo es la más alta.

El análisis factorial permite concluir que excepto los nitratos, las demás variables presentan correlaciones entre sí que pueden aportar gran parte de la varianza en un modelo; por ello algunas de ellas deben ser consideradas para integrar el índice de calidad del agua para los humedales de Bogotá.

3.2.1.5. Selección final de parámetros.

Teniendo en cuenta los resultados de la revisión bibliografía, el análisis normativo y estadístico, se escogieron las variables para el ICAHUMB. Los constituyentes seleccionados fueron:

La demanda química y biológica de oxígeno como medida de carga orgánica, el nitrógeno total y fósforo total como medidores de la eutrofización de aguas, la E. coli como indicador de contaminación fecal y bacteriana, y la conductividad que refleja la mineralización del agua; por otro lado, la temperatura, el pH y el oxígeno disuelto imponen las condiciones del medio, el OD es vital ya que su alta o baja concentración indica la salud del ecosistema. Los parámetros del ICAHUMB se reportan en la siguiente tabla:

Tabla 20 Constituyentes seleccionados para el ICA Humedales de Bogotá.

Objetivo		Parámetro
1	Condiciones para la vida acuática	% de saturación de Oxígeno
2	Carga Contaminante	NKT
3		Fósforo Total
4		Conductividad
5		DBO5
6		SST
7		DQO
8	Indicadores de contaminación fecal	E, coli

9	Condiciones del medio	Temperatura
10		pH

Fuente: (El Autor)

3.2.2. Desarrollo de subíndices y curvas de calidad.

Las curvas son la esencia del diseño del índice, éstas tienen la capacidad de reproducir la relación entre la concentración de un parámetro y la calidad que representa. Para esta investigación el desarrollo de las curvas se realizó asignando valores de calidad a diferentes concentraciones, teniendo como referente la normativa ambiental, los objetivos de calidad para los humedales y los rangos de concentración permisible de cada parámetro.

Las curvas se ajustaron utilizando el software Curve Expert v.1.4, obteniendo las expresiones matemáticas que relacionan cada parámetro con la calidad, esto se hace con el fin de facilitar el cálculo del índice mediante herramientas de computo; se escogieron los modelos que presentaban funciones matemáticas que se ajustaban con coeficientes de regresión mayores a 0,98.

El diseño de las curvas de calidad se basó en:

- Los valores de calidad del agua establecidos en las normas nacionales e internacionales (Tabla 21), ya que estas regulan la concentración permisible de parámetros de calidad en cuerpos de agua que tienen como uso principal la conservación de fauna y flora, esta investigación contemplo la normativa internacional por que brinda valores de referencia para parametros que la norma nacional no comptempla para este uso del agua, como el caso del fosforo total, nitrógeno total, los coliformes fecales y los sólidos suspendidos totales (Tabla 21). También se uso la norma de vertimientos a cuerpos de agua, teniendo en cuenta que la gran mayoría de los humedales reciben aguas residuales por medio de vertimientos puntuales o conexiones erradas.
 - Decreto 1594 de 1984 del Ministerio de Agricultura de Colombia, se dictan y establecen parámetros y criterios de calidad que debe tener el recurso para la preservación de la fauna y flora en aguas dulces.
 - Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se establecen parámetros y valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.
 - Norma Ecuatoriana de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua. Dicta criterios de calidad para la preservación de flora y fauna en aguas dulces frías o cálidas, y en aguas marinas y de estuarios.
 - Decreto Supremo N° 002 – 2008 del Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM) sobre estándares nacionales de calidad ambiental para el agua y conservación del ambiente acuático, establece el

nivel de concentración de parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente de los ecosistemas acuáticos.

- Decreto N° 33903-MLNAE-S del Ministro de Ambiente y Energía de Costa Rica, reglamenta los criterios y metodología que serán utilizados para la evaluación de la calidad de los cuerpos de agua superficiales
 - Decreto 253/79 del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente de Uruguay, se aprueban normas para prevenir la contaminación ambiental, mediante el control de las aguas destinadas a la preservación de los peces en general y de otros integrantes de la flora y fauna hídrica.
 - Norma Chilena 1333/78 de la Comisión Nacional del Medio Ambiente, se fijan límites máximos para los diferentes parámetros que son considerados como requisitos de calidad del agua.
 - Resolución 257 de 2005 de Brasil, dicta la clasificación de las masas de agua y las directrices ambientales para su uso y establece las condiciones y normas de descarga de efluentes, y otros asuntos. Brinda criterios para aguas destinadas a la armonía del paisaje, la conservación y preservación del equilibrio natural de los ambientes y las comunidades acuáticas.
 - Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life, brinda directrices de calidad del agua destinadas a proporcionar protección del agua dulce y marina e impone límites permisibles para proteger las formas de vida acuática.
- Los objetivos de calidad de humedales de Bogotá (Tabla 10).
 - Los rangos de concentración de contaminantes en agua dulce (Anexo A)

Tabla 21 Objetivos y Criterios Normativos de Calidad del Agua para protección de la fauna y flora.

Normas y Objetivos de calidad en humedales	Oxígeno Disuelto (mg/L)	Temperatura (°C)	pH (unidades)	Nitrógeno total (mg/L)	Fosforo Total (mg/L)	Conductividad	DBO5 (mg/L)	SST (mg/L)	DQO (mg/L)	Coliformes Fecales (NMP/100 ml)
Colombia: Decreto 1594 de 1984	>5		6,5 a 9				1-15		<100	
Objetivos de calidad para Afluentes	>2	25	6 a 8	10	5		50	100	150	1000000
Objetivos de calidad al interior	>2	17	6 a 8	10	2		50	90	150	1000000
Ecuador: Norma de calidad ambiental y descarga de efluentes.	>6	20°C ± 3	6,5 a 9							200
Perú: Decreto Supremo N° 002 - 2008 -MINAM	>5		6,5 a 8,5	1,6	0,4		<5	<25		1000
Costa Rica: Decreto N° 33903-MINAE-S			6,5 a 8,5					<25	<20	<20

Uruguay: Decreto 253/79	>5	6,5 a 8,5			<10		2000
Chile: Norma Oficial Nch1333.Of78	>5	6 a 9					
Brasil: CONAMA Res 2005 357	>4	6 a 9			<10		2500
Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life	≥ 6,5 y ≤9,5			Ultra-Oligotrófico	<4	<25	
				Oligotrófico	4-10		
				Mesotrófico	10-20		
				Mesoeutrófico	20-35		
				Eutrófico	35-100		
				Hipereutrófico	>100		

Fuente: (El autor)

3.2.2.1. Curva de concentración de oxígeno en función de la calidad.

El OD es uno de los constituyentes más importantes del ICAHUMB para definir la salud del ecosistema, debido a su vitalidad en los organismos del agua. Esta curva se realizó a partir de los datos disponibles de concentración de oxígeno disuelto y temperatura contemplados en los registros históricos de calidad del agua de humedales. La gráfica de oxígeno en el ICA se diseñó en función del porcentaje de saturación, debido a que el oxígeno depende y es inversamente proporcional a la temperatura y el índice no pretende solapar información.

El oxígeno disuelto se expresa en términos de porcentaje de la saturación y se puede estimar a partir de la siguiente relación [31]:

$$\%OD_{Sat} = \frac{OD}{OD_{Sat}} \times 100$$

Donde OD_{Sat} es el OD saturado en determinada temperatura en °C para el agua. el OD_{Sat} se calcula utilizando la siguiente relación:

$$OD_{Sat} = \frac{1}{(0,001639T + 0,06282)} - 1,279$$

De acuerdo a los registros históricos de calidad del agua, la concentración máxima de OD que presentan los humedales de Bogotá es de 7,9 mg/L, la mínima de 0,5 mg/L y en promedio la concentración es de 3,2 mg/L.

La tabla 22 presenta los valores de referencia que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del subíndice y el gráfico 2 se muestra la curva de saturación de Oxígeno obtenida en función de la calidad.

Tabla 22 Criterios de referencia del Oxígeno Disuelto para el ICAHUMB.

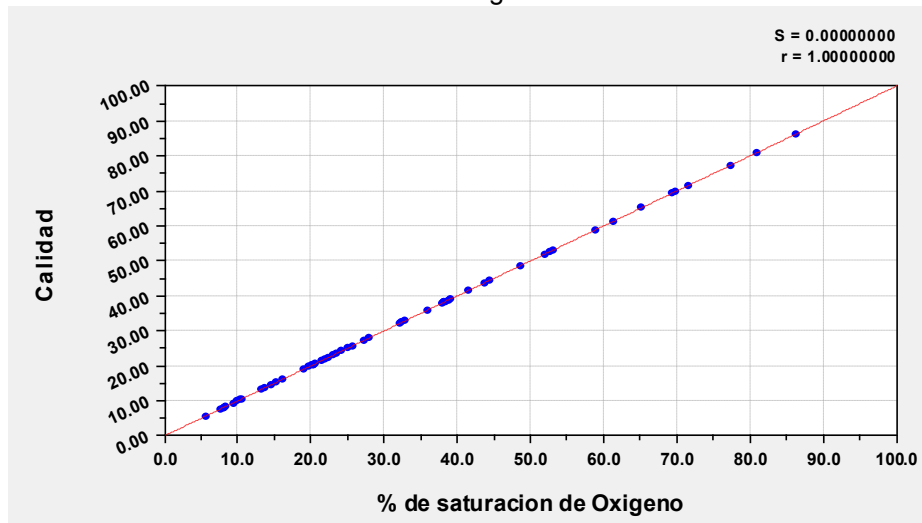
OD (mg/L)	Temperatura*	DO sat	% OD
0,8	18,34	9,487666315	8,43199975
0,9	17,98	9,556501698	9,417672161
3	20,2	9,145506764	32,80299361
4,9	18,6	9,438493307	51,91506569
4	17,7	9,61065189	41,62048574

2	16,4	9,869321732	20,26481712
2	16,7	9,808543921	20,39038634
3	19,78	9,220853947	32,5349476
2	20,28	9,131277359	21,90274067
2	16,3	9,889729345	20,22300035
2	17,5	9,649663151	20,72611208
3	19,3	9,308309839	32,22926667
6,4	19,72	9,231706837	69,32629159
7,4	20,26	9,134831067	81,00861358
2,2	16,56	9,836824221	22,36494168
1,8	18,32	9,49146755	18,96440135
0,9	20,8	9,039724771	9,956055332
1	17,68	9,614540479	10,4009131
6,4	16,68	9,81257515	65,22243042
7	16,9	9,768392208	71,65969436
7,5	17,28	9,692899648	77,37622664
0,5	21,08	8,991091071	5,561060343
0,7	20,52	9,088821269	7,701768792
3,4	18,38	9,480071888	35,86470694
1	17,96	9,560351703	10,45986624
1,5	16,58	9,832775348	15,25510293
1,5	14,32	10,30976391	14,54931474
2,3	16,9	9,768392208	23,54532815
2	19	9,363713466	21,35904743
5,9	17,7	9,61065189	61,39021647
4,5	19,56	9,260757864	48,5921354
4,2	18,6	9,438493307	44,49862773
1,6	16,34	9,88155734	16,19177975
2,6	17,9	9,57191815	27,16278973
3,6	18,3	9,495271471	37,91360796
7,1	15	10,16199308	69,86818378
0,8	16,6	9,828729425	8,139404041
3,7	18,34	9,487666315	38,99799885
2,2	18,14	9,525799838	23,0951735
2,7	17,5	9,649663151	27,98025131
0,8	16,54	9,840876045	8,129357553
2,5	17,04	9,740458601	25,66614266
1,3	16,34	9,88155734	13,15582104
7,9	20,22	9,141945768	86,41486398
3,6	18,62	9,434729366	38,15689736
3,8	16,18	9,914317321	38,32840807
4,9	19,28	9,311985462	52,62035707
5,3	15,9	9,972112454	53,14821734
2,3	18,18	9,518151539	24,16435576
1,9	17,66	9,618431846	19,7537398
5,9	15,72	10,00958268	58,9435163
4	14,48	10,27465192	38,93075921
2,3	20,02	9,177665591	25,06083902
3,9	15	10,16199308	38,37829813
1,3	18,16	9,521974334	13,65263079

Fuente: (El autor)

El grafico 2 muestra el modelo lineal que representa %OD, que a su vez esta expresado por la ecuación $y=x+1E-14$, donde x es el oxigeno disuelto en porcentaje de saturación.

Gráfico 2 Curva de concentración de Oxígeno obtenida en función de la calidad.



Q=60, si %OD>100.

Se debe considerar que los valores de sobresaturación no indican la salud del cuerpo de agua, sino por el contrario evidencian que puede existir un exceso de algas debido a su alta producción de oxígeno (fenómeno asociado a la eutrofización de las aguas), situación indeseable para cuerpos de agua presentes en los humedales ya que repercute en su calidad. Por ello para este modelo, cuando los valores saturación están por encima del 100% la calidad decrece a 60.

3.2.2.2. Curva de pH en función de la calidad

El pH fue incluido en este índice debido a que su variación tiene efectos sinérgicos con otras sustancias, un intervalo de pH de 6 a 9 brinda protección a la vida acuática de agua dulce y los invertebrados del fondo; los valores por debajo de 5 están frecuentemente relacionados con vertimiento de aguas residuales [32]. Esta curva se realizó con base en los criterios normativos y los efectos de la variación del pH en la vida acuática (Tabla 47).

Según los registros históricos de calidad del agua el valor máximo de pH que se evidencia en los humedales de Bogotá es de 10,4, el mínimo de 4,5 y una media de 7,1 unidades.

La tabla 23 presenta los valores de referencia que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del subíndice y el gráfico 3 se muestra la curva de pH obtenida en función de la calidad. La curva es una función racional tiene un coeficiente de correlación de 0,99 y un error estándar de 5,2, la ecuación y los coeficientes del modelo se muestran en la tabla 24.

Tabla 23 Valores de referencia del pH para el ICAHUMB.

pH (unidades)	Fuente	Calidad
6,5 a 9	Colombia: Decreto 1594 de 1984	Conservación de fauna y flora
6 a 8	Objetivos de calidad para Afluentes, estudio U. Andes.	Conservación de fauna y flora
6 a 8	Objetivos de calidad al interior, estudio U. Andes.	Conservación de fauna y flora
6,5 a 9	Ecuador: Norma de calidad ambiental y descarga de efluentes.	Conservación de fauna y flora
6,5 a 8,5	Perú: Decreto Supremo N° 002 -2008 -MINAM	Conservación de fauna y flora
6,5 a 8,5	Costa Rica: Decreto N° 33903-MINAE-S	Conservación de fauna y flora
6,5 a 8,5	Uruguay: Decreto 253/79	Conservación de fauna y flora
6 a 9	Chile: Norma Oficial Nch1333.Of78	Conservación de fauna y flora
6 a 9	Brasil: CONAMA Res 2005 357	Conservación de fauna y flora
3.0 – 3.5	Efecto de los niveles de pH en la vida acuática. [33]	Poco probable que los peces sobrevivan por más de unas pocas horas en este rango, aunque se pueden encontrar algunas plantas e invertebrados a niveles de pH tan bajos como éstos.
3.5 – 4.0		Se conoce que es letal para los salmónidos.
4.0 – 4.5		Ausentes todos los peces, muchas ranas e insectos.
4.5 – 5.0		Muchos insectos ausentes. La mayoría de los huevos de peces no madurarán.
5.0 – 5.5		Bacterias que viven en el fondo de los cuerpos de agua (descomponedores) comienzan a morir. Desechos de hojas y detritus se empiezan a acumular, encerrando nutrientes esenciales e interrumpiendo los ciclos químicos. El plancton empieza a desaparecer. Caracoles y almejas ausentes. Alfombras de hongos comienzan a reemplazar a las bacterias en el sustrato.
5.5 – 6		Metales (aluminio, plomo) normalmente atrapados en sedimentos se liberan a agua acidificada en formas tóxicas para la vida acuática.
6.0 – 6.5		Camarones de agua dulce ausentes. Poco probable que sea directamente dañino a los peces a menos que el nivel de dióxido de carbono libre sea alto (en exceso de 100 mg/L)
6.5 – 8.2		Óptimo para la mayor parte de los organismos.
8.2 – 9.0		Poco probable que sea dañino a los peces, pero ocurren efectos indirectos a este nivel debido a cambios químicos en el agua.
9.0 – 10.5		Probable que sea dañino a los salmónidos y a la percha si presente por períodos prolongados.
10.5 – 11.0		Rápidamente letal para los to salmónidos. Exposición prolongada es letal a la carpa y a la percha.
11.0 – 11.5		Rápidamente letal para todas las especies de peces.

Fuente: El Autor.

Tabla 24 Ecuación y coeficientes del modelo de calidad para pH.

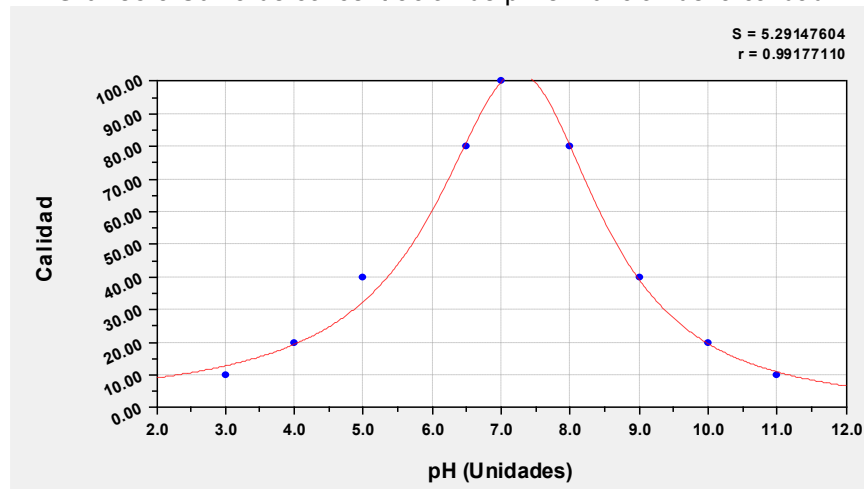
Rational Function: $y=(a+bx)/(1+cx+dx^2)$			
Coefficient Data:			
a =	b=	c =	d =
5,37	-0,21	-0,26	0,02

Donde a,b,c, y d son constantes y x representa el valor de pH.

Fuente: El Autor.

La curva ajustada representa la calidad en función del pH en el intervalo de 0 - 12 unidades.

Grafico 3 Curva de concentración de pH en función de la calidad.



Este modelo esta condicionado por el siguiente intervalo si $pH > 7$ y $< 7,5$; $Q=100$, esto se debe a que el modelo toma valores de calidad por encima de 100 para esas unidades de pH.

Fuente: El Autor.

3.2.2.3. Curva de temperatura en función de la calidad.

La temperatura fue seleccionada para integrar el ICAHUMB ya que es un factor determinante en el agua e interfiere con la concentración de otros parámetros como el caso del Oxígeno disuelto y el pH. La temperatura es un condicionante de la vida acuática que afecta muchos procesos biológicos y fisicoquímicos, por lo tanto, repercute en el efecto de los agentes contaminantes [32]; los valores entre 30.0 °C y 24.4 °C marcan los límites hasta los cuales la temperatura se asocia con una condición buena para el ecosistema. [34]

Esta curva se realizó con base en los criterios normativos como la resolución Colombiana 631 de 2015 sobre vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas (ARD) y aguas residuales no domésticas (ARnD). De acuerdo a los registros históricos de calidad del agua, el intervalo de temperatura de los humedales de Bogotá esta entre 27,32°C y 10,8°C.

Tabla 25 Concentraciones de referencia de la temperatura para el ICAHUMB.

Temperatura °C	Fuente	Calidad
20°C ± 3	Ecuador , Norma de calidad ambiental y descarga de efluentes.	Conservación de fauna y flora
25	Objetivos de calidad para Afluentes, estudio U. Andes.	Conservación de fauna y flora
17	Objetivos de calidad al interior, estudio U. Andes.	Conservación de fauna y flora
< 40	Colombia: Res. 631 de 2015 de Vertimientos Puntuales a Cuerpos de Aguas Superficiales y a los Sistemas de Alcantarillado Público.	

Fuente: El Autor.

La curva es una función racional con un coeficiente de correlación de 0,99 y un error estándar de 7,1; la ecuación y los coeficientes del modelo se muestran en la tabla 26, el gráfico 4 muestra la curva de Temperatura obtenida en función de la calidad.

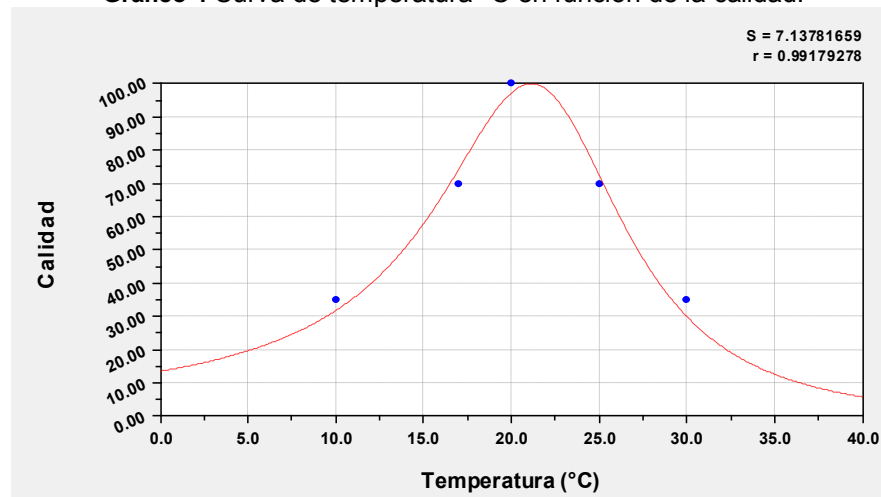
Tabla 26 Ecuación y coeficientes del modelo de calidad para pH.

Rational Function: $y=(a+bx)/(1+cx+dx^2)$			
Coefficient Data:			
a =	b =	c =	d =
13,48	-0,23	-0,08	0,002

Donde a,b,c, y d son constantes y x representa el valor de la temperatura en °C.

Fuente: El Autor.

Gráfico 4 Curva de temperatura °C en función de la calidad.



Fuente: El Autor.

La curva ajustada describe la calidad en función de la temperatura en un intervalo de 0 - 40. Si la temperatura es >40 °C la calidad es igual a 0, este valor se atribuye al límite permisible de la norma de vertimientos (Res. 631 de 2015).

3.2.2.4. Curva de la demanda biológica de oxígeno (DBO₅) en función de la calidad.

La DBO₅ fue escogida para este índice ya que representa la medida indirecta de la concentración de materia orgánica o inorgánica degradable; es muy usada para

determinar la contaminación del agua. Cuando los niveles de la DBO son altos, los niveles de oxígeno disuelto serán bajos, ya que las bacterias están consumiendo ese oxígeno en gran cantidad. [32]

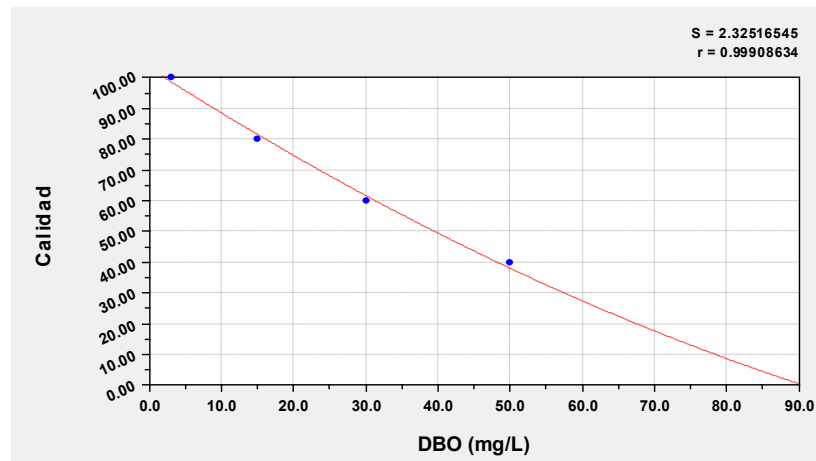
Para esta curva se usaron los valores de la norma, los objetivos de calidad para humedales de Bogotá, el índice de saprobio (tabla 45) y la escala de clasificación de la calidad del agua con base en la DBO5 (tabla 48). La Resolución 631 de 2015 establece el valor límite máximo permisible para la DBO5 (90 mg/L) en vertimientos de ARD y ARnD a cuerpos de agua superficial y alcantarillado público, este valor fue usado como para representar la peor calidad. La mejor calidad fue atribuida a concentraciones menores de 15 mg/L.

El modelo es un ajuste cuadrático con un coeficiente de correlación de 0,99 y un error estándar de 2,3, la ecuación y los coeficientes del modelo se muestran en la tabla 28. El gráfico 5 se muestra la curva de DBO₅ obtenida en función de la calidad.

Tabla 27 Concentraciones de referencia de la DBO₅ para el ICAHUMB.

DBO (mg/L)	Fuente	Calidad
1-15	Colombia: Decreto 1594 de 1984	Conservación de fauna y flora
50	Objetivos de calidad para Afluentes, estudio U. Andes.	Conservación de fauna y flora
50	Objetivos de calidad al interior, estudio U. Andes.	Conservación de fauna y flora
<5	Perú: Decreto Supremo N° 002 - 2008 -MINAM	Conservación de fauna y flora
<10	Uruguay: Decreto 253/79	Conservación de fauna y flora
<10	Brasil: CONAMA Res 2005 357	Conservación de fauna y flora
1	Índice Saprobio. [35]	Grado de contaminación Orgánica
1 -2		Poca o ninguna contaminación
2 - 6		poca contaminación
5 - 10		mediana contaminación
7 - 13		contaminación crítica
10 - 20		contaminación fuerte
> 15		contaminación muy fuerte
≤ 3 mg/L		Supercontaminado
≤ 3 mg/L	Escala de clasificación de la calidad del agua con base en la DBO5. [32]	Excelente calidad, no contaminada
> 3 y ≤ 6 mg/L		Buena Calidad: Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable
> 6 y ≤ 30 mg/L		Calidad Aceptable: Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente
> 30 y ≤ 120 mg/L		Aguas superficiales contaminadas con descarga de aguas residuales crudas principalmente de origen municipal
> 120 mg/L		Aguas superficiales con fuerte impacto de descarga de aguas residuales crudas municipales y no municipales

Gráfico 5 Curva de concentración de DBO₅ en función de la calidad.



Fuente: El Autor.

La curva ajustada describe la calidad en función de la DBO en el intervalo de 2 - 90 mg/L. Si la concentración de DBO < 2 mg/L la calidad es igual a 100, por el contrario, si la concentración de DBO > 90 mg/L la calidad es igual a 0.

Tabla 28 Ecuación y coeficientes del modelo de calidad para la DBO₅.

Quadratic Fit: $y=a+bx+cx^2$		
Coeficiente Data:		
a =	b =	c =
103,10	-1,51	0,0041

Donde a,b y c son constantes y x es el valor de la DBO en mg/L

Fuente: El Autor.

3.2.2.5. Curva de la demanda química de oxígeno (DQO) en función de la calidad.

La cantidad total de contaminantes orgánicos en el agua es medida por la DQO, de allí que fuese escogida para integrar el índice. Esta curva se basó en los datos de la normativa, los objetivos de calidad para humedales y la escala de clasificación de la calidad del agua con base en la DQO (Tabla49); además se tuvo en cuenta el criterio aportado por la norma de vertimientos (180 mg/L) como valor de peor calidad; la mejor calidad la representan valores > 40 mg/L.

El gráfico 6 se muestra la curva de la DQO obtenida en función de la calidad, la curva es una función polinómica de tercer grado con un coeficiente de correlación de 0,99 y un error estándar de 2,4, la ecuación y los coeficientes del modelo se muestran en la tabla 30.

Tabla 29 Concentraciones de referencia de la DQO para el ICAHUMB.

DQO (mg/L)	Fuente	Calidad
<100	Colombia: Decreto 1594 de 1984	Conservación de fauna y flora

150	Objetivos de calidad para Afluentes, estudio U. Andes.	Conservación de fauna y flora
150	Objetivos de calidad al interior, estudio U. Andes.	Conservación de fauna y flora
<20	Costa Rica: Decreto N° 33903-MINAE-S	Conservación de fauna y flora
≤ 10 mg/L	Escala de clasificación de la calidad del agua con base en la DQO. [32]	Excelente calidad, no contaminada
> 10 y ≤ 20 mg/L		Buena Calidad: Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable
> 20 y ≤ 40 mg/L		Calidad Aceptable: Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente
> 40 y ≤ 200 mg/L		Aguas superficiales contaminadas con descarga de aguas residuales crudas principalmente de origen municipal
> 200 mg/L		Aguas superficiales con fuerte impacto de descarga de aguas residuales crudas municipales y no municipales

Fuente: El Autor.

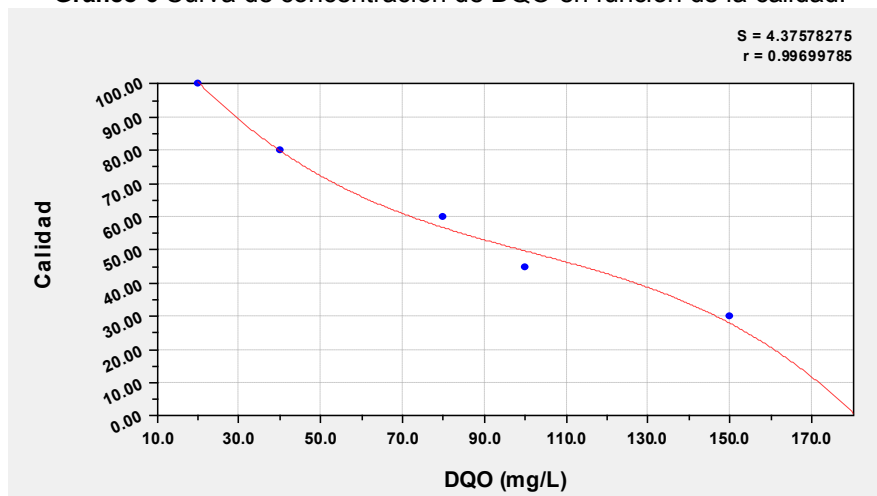
Tabla 30 Ecuación y coeficientes del modelo de calidad para la DQO.

3rd degree Polynomial Fit: $y=a+bx+cx^2+dx^3...$			
Coeficiente Data:			
a =	b =	c =	d =
129,83	-1,73	0,0014	-0,000046

Donde a,b,c,y d son constantes y x representa el valor de la DQO en mg/L

Fuente: El Autor.

Gráfico 6 Curva de concentración de DQO en función de la calidad.



Fuente: El Autor.

Si DQO < 10 mg/L, Q=100 y si DQO > 180 mg/L, Q=0

La curva ajustada representa la calidad en función de la DQO en el intervalo de 20 - 180 mg/L. Si la DQO < 20 la calidad es igual a 100, Si la DQO > 180 la calidad es igual a 0.

3.2.2.6. Curva de Sólidos suspendidos totales en función de la calidad.

Los sólidos suspendidos son un parámetro del índice, radica su importancia porque provocan turbiedad en el agua reduciendo la cantidad de luz solar que penetra en el medio acuático, limitando la actividad fotosintética importante para la producción de oxígeno. Los SS en el agua natural se presentan casi siempre por debajo de los 25 mg/L, los niveles entre 200 y 400 mg/L indican que el medio está contaminado y a partir de 75 mg/L la situación es especial para los peces [36].

Esta curva fue diseñada bajo los criterios dados por la normativa, los objetivos de calidad para humedales y los rangos de concentración de sólidos suspendidos en el agua (Tabla 50); para este modelo el valor límite que representaba la peor calidad es equivalente a 100 mg/L (Valor fijado en la norma de vertimientos Res. 631-2015); la mejor calidad estaba dada por los valores contemplados en la norma.

En el gráfico 7 se muestra la curva de la SST obtenida en función de la calidad; la ecuación y los coeficientes del modelo se muestran en la tabla 32.

Tabla 31 Concentraciones de referencia de los SST para el ICAHUMB.

DQO (mg/L)	Fuente	Calidad
100	Objetivos de calidad para Afluentes, estudio U. Andes.	Conservación de fauna y flora
90	Objetivos de calidad al interior, estudio U. Andes.	Conservación de fauna y flora
<25	Perú: Decreto Supremo N° 002 -2008 -MINAM	Conservación de fauna y flora
<25	Costa Rica: Decreto N° 33903-MINAE-S	Conservación de fauna y flora
<25	Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life	Conservación de fauna y flora
100	Colombia: Res. 631 de 2015	Aguas Residuales
SST < 10	Clases de concentración de solidos suspendidos en el agua. [36]	Calidad muy alta
10 < SST < 25		Calidad alta
25 < SST < 50		Calidad media
50 < SST < 75		Calidad baja
75 < SST < 150		Contaminación fuerte
150 < SST < 300		Contaminación Muy Fuerte
300 < SST < 500		Contaminación Critica
SST < 500		

Fuente

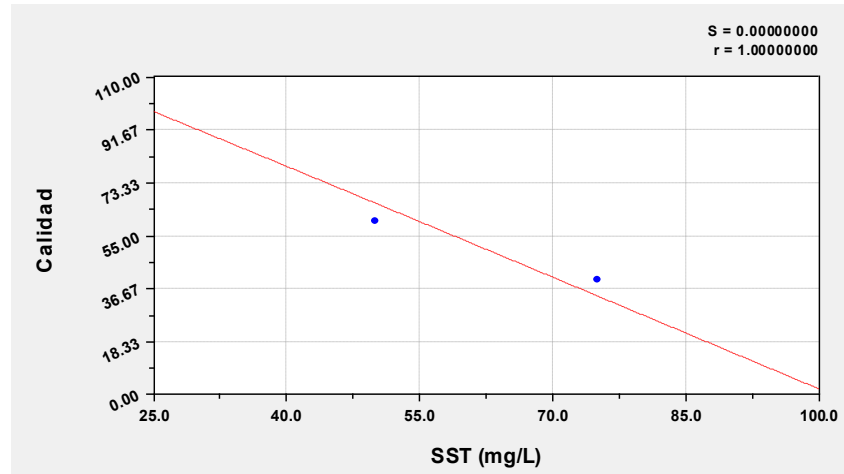
Tabla 32 Ecuación y coeficientes del modelo de calidad para la SST.

Sinusoidal Fit: $y=a+b*\cos(cx+d)$			
Coefficient Data:			
a =	b=	c=	d =
13,97	373,45	0,0035	1,26

Donde a,b,c, y d son constantes y x representa el valor de la DQO en mg/L

Fuente: El Autor.

Gráfico 7 Curva de concentración de SST en función de la calidad.



Fuente: El Autor.

La curva ajustada describe la calidad en función de los SST en el intervalo de 25 - 100 mg/L. Si la concentración de SST < 25 la calidad es igual a 100, si SST > 100 la calidad es igual a 0.

3.2.2.7. Curva de Conductividad en función de la calidad.

La conductividad es una buena indicación del grado de mineralización del agua, es proporcional al contenido de sólidos disueltos (fundamentalmente cloruro, nitrato, sulfato, fosfato, sodio, magnesio y calcio) y una medida útil, como indicador de la calidad de aguas dulces; de allí radica su papel en el ICAHUMB.

La descarga de aguas residuales, la lluvia ácida, la erosión y la introducción en la atmósfera de materiales procedentes de combustiones suelen incrementar la conductividad. [37] En la mayoría de las aguas los rangos de conductividad están entre 150 y 450 $\mu\text{hos/cm}$; en algunos ríos muy contaminados puede alcanzar valores muy altos 750 $\mu\text{hos/cm}$, se puede considerar que la situación es especial o anormal más allá de 500 $\mu\text{hos/cm}$. En general, la conductividad disminuye gradualmente de aguas arriba a aguas abajo [36], su aumento puede indicar la presencia de aguas residuales.

Esta curva se basó en los Rangos de mineralización del agua de acuerdo a la conductividad (Tabla 58) y los datos suministrados por la literatura.

Los humedales de Bogotá tienen una conductividad promedio, máxima y mínima de 453,13 $\mu\text{hos/cm}$, 3300 $\mu\text{hos/cm}$ y 144 $\mu\text{hos/cm}$ respectivamente, de acuerdo a los registros históricos de calidad del agua.

Tabla 33 Concentraciones de referencia de la conductividad para el ICAHUMB.

Conductividad (μhos/cm)	Fuente	Calidad
C < 30	Rangos de mineralización de acuerdo a la conductividad. Nisbet, M; Verneaux, J [36]	extremadamente baja de mineralización del agua
30 <C <50		Mineralización muy débil, fuentes de agua oligotróficas
50 <C <100		Mineralización baja
100 <C <200		Mineralización moderada
200 <C <300		Mineralización lo suficientemente fuerte
300 <C <400		Mineralización fuerte
400 <C <500		Mineralización muy fuerte, agua contaminada
>500		Mineralización excesiva, agua contaminada
150 - 450	Goyenola, Guillermo [37]	Agua contaminada
50 - 1500		Aguas continentales

Fuente: El Autor.

El modelo es un ajuste cuadrático con un coeficiente de correlación de 0,99 y un error estándar de 3,42; la ecuación y los coeficientes del modelo se muestran en la tabla 34. En el gráfico 8 se observa la curva de la conductividad obtenida en función de la calidad.

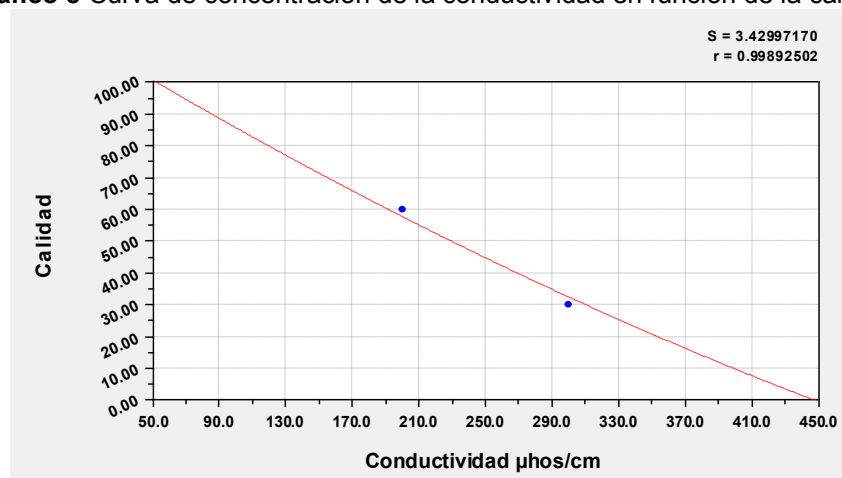
Tabla 34 Ecuación y coeficientes del modelo de calidad para la Conductividad.

Quadratic Fit: $y=a+bx+cx^2$		
Coefficient Data:		
a =	b =	c =
116,24	-0,32	0,00013

Donde a.b y c son constantes y x representa la conductividad en μhos/cm.

Fuente: El Autor.

Gráfico 8 Curva de concentración de la conductividad en función de la calidad.



Fuente: El Autor.

La curva ajustada describe la calidad en función de este parámetro en el intervalo de 50 – 450 μhos/cm. Si la Conductividad es ≤ 50 la calidad es igual a 100, Si la conductividad ≥ 450 la calidad es igual a 0.

3.2.2.8. Curva de fósforo total en función de la calidad.

El fósforo es esencial en la dinámica de los humedales, ya que es un nutriente que limita del crecimiento de algunas especies (Algas y macrofitas), su concentración se ve incrementada por la presencia de aguas residuales urbanas (concentraciones $\geq$ a 5 mg/L de P total) que traen consigo detergentes que contienen altas cantidades de fósforo.

Esta curva se construyó basada en la guía de calidad del agua Canadiense para la protección de la vida acuática, la tabla de concentración de fósforo total en diferentes fuentes de contaminación (Tabla 60), los objetivos de calidad para humedales de Bogotá y la clasificación de lagos y ríos en diferentes estados tróficos (Tabla 59).

La curva es un ajuste logarítmico que describe la calidad en función de este parámetro en el intervalo de 0,01 a 1,5 mg/L, la mejor calidad ($> 70\%$) en la curva están representadas por valores menores a 0,035 mg/L, este valor establecido en la norma de Canadá como concentración límite permisible en el agua para pasar de estado mesotrófico a eutrófico.

En Bogotá estos ecosistemas presentan valores máximos de 88,3 mg/L, mínimos de 0,02 mg/L y una media de 2,55 mg/L de acuerdo a los registros históricos de calidad del agua.

Tabla 35 Concentraciones de referencia del fósforo total para el ICAHUMB.

T _{total} (mg/L)	Fuente	Calidad	
< 0,004	Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life	Ultra-Oligotrófico	
0,004 - 0,01		Oligotrófico	
0,01 - 0,02		Mesotrófico	
0,02 - 0,035		Mesoeutrófico	
0,035 - 0,1		Eutrófico	
> 0,1		Hipereutrófico	
5	Objetivos de calidad para Afluentes, estudio U. Andes.	Conservación de fauna y flora	
2	Objetivos de calidad al interior, estudio U. Andes.	Conservación de fauna y flora	
< 0,01	Clasificación de lagos y ríos en diferentes estados tróficos	Lagos	Oligotrófico
0,02-0,03			Mesotrófico
0,03-0,1			Eutrófico
> 0,1			Hipertrófico
< 0,025		Ríos	Oligotrófico
0,025-0,075			Mesotrófico
> 0,075			Eutrófico
0,004-0,003	Concentración de fósforo total en diferentes fuentes	Agua dulce	
5 - 20		Agua de desechos domésticos	
0,05 - 1		Drenaje de agricultura	
0,003 - 1,5		Lagos eutrofizados	
0,01 - 0,04		Lagos no contaminados	
0,01 - 1		Ríos	

Fuente: El Autor.

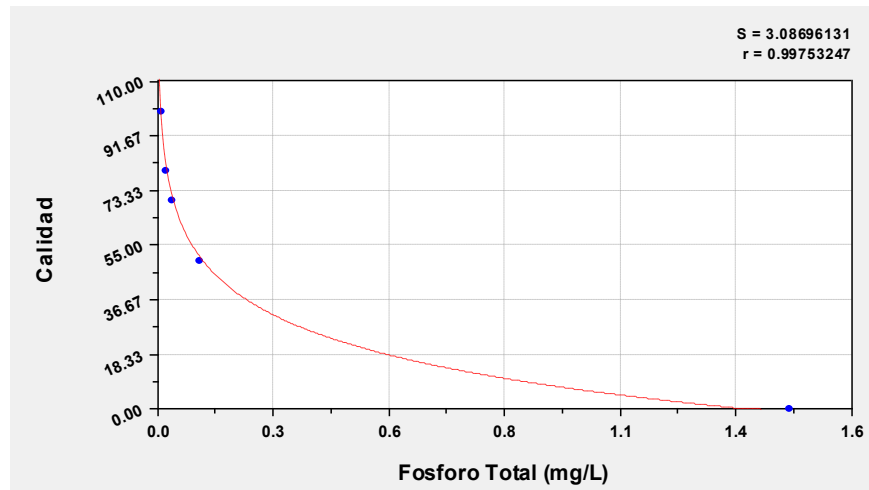
El modelo tiene con un coeficiente de correlación de 0,99 y un error estándar de 3,08; la ecuación y los coeficientes del modelo se muestran en la tabla 36. En el grafico 9 se observa la curva de fosforo total obtenida en función de la calidad.

Tabla 36 Ecuación y coeficientes del modelo de calidad para el fósforo total.

Logarithm Fit: $y=a+b*\ln(x)$	
Coefficient Data:	
a =	6,55
b =	-19,41

Donde a y b son constantes y x representa la concentración de fosforo total en mg/L
Fuente: El Autor.

Grafico 9 Curva de concentración de fósforo total en función de la calidad.



Fuente Fuente: El Autor.

La curva ajustada describe la calidad en función de la concentración de fosforo total en un intervalo de 0 a 1,5 mg/L; Si la concentración es $\geq 1,5$ mg/L la calidad es igual a 0, si fosforo total $< 0,009$ la calidad es 100.

3.2.2.9. Curva de Nitrógeno total en función de la calidad.

Esta curva se realizó basados en los criterios de la normativa, los objetivos de calidad y la tabla de clasificación de cuerpos de agua en diferente estados tróficos; ya que la norma colombiana de vertimientos no presenta valores para el nitrógeno total se decidió incluir los valores de la noma chilena del Ministerio de Secretaría General de la Presidencia que fija los límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua lacustres, esta norma nos brinda una referencia de la concentración de N_{total} en aguas residuales.

Los humedales de Bogotá presentan un intervalo de concentración para el N_{total} entre 118,2 mg/L y 0,27 mg/L; la concentración promedio equivale a 14,9 mg/L de acuerdo a los registros históricos de calidad del agua.

Tabla 37 Concentraciones de referencia del nitrógeno total para el ICAHUMB.

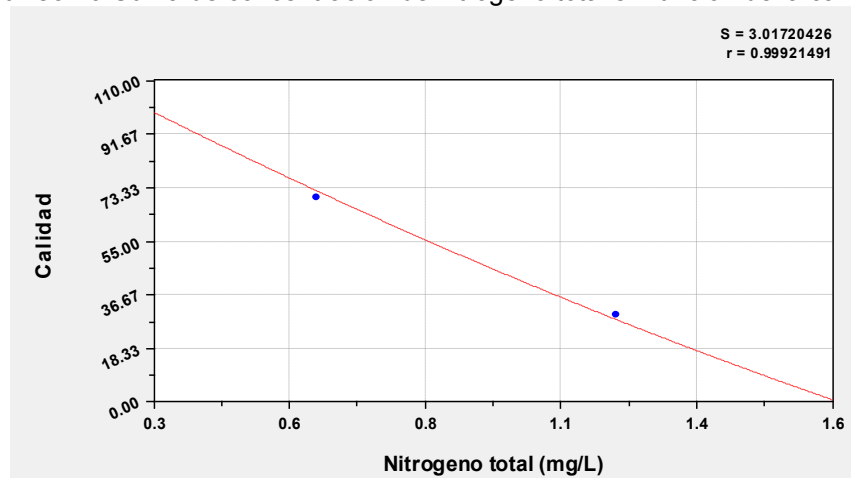
Ntotal (mg/L)	Fuente	Calidad	
≤10	Chile: Decreto 90 - 2001 , Ministerio Secretaría General De La Presidencia	Conservación de fauna y flora	
1,6	Perú: Decreto Supremo N° 002 -2008 -MINAM	Conservación de fauna y flora	
10	Objetivos de calidad para Afluentes, estudio U. Andes.	Conservación de fauna y flora	
10	Objetivos de calidad al interior, estudio U. Andes.	Conservación de fauna y flora	
< 0,35	Clasificación de lagos y ríos en diferentes estados tróficos	Lagos	Oligotrófico
0,35-0,65			Mesotrófico
0,65- 1,2			Eutrófico
> 1,2			Hipertrófico
< 0,7		Ríos	Oligotrófico
0,7 - 1,5			Mesotrófico
> 1,5			Eutrófico

Fuente: El Autor.

La curva está en un intervalo de 0,35 a 1,6 mg/L, donde la peor calidad es el valor fijado por la norma Peruana y la mejor calidad es el límite menor de un nivel productividad mesotrófico.

El modelo es un ajuste cuadrático con un coeficiente de correlación de 0,99 y un error estándar de 3,017; la ecuación y los coeficientes del modelo se muestran en la tabla 38. En el grafico 10 se observa la curva de nitrógeno total obtenida en función de la calidad.

Grafico 10 Curva de concentración de nitrógeno total en función de la calidad.



Fuente: El Autor.

La curva ajustada describe la calidad en función de este parámetro en el intervalo de 0,35 – 1,6 mg/L, Si la concentración es < 0,35 mg/L la calidad es igual a 100, Si el nitrógeno total es > 1,6 la calidad es igual a 0.

Tabla 38 Ecuación y coeficientes del modelo de calidad para el nitrógeno total.

Quadratic Fit: $y=a+bx+cx^2$		
Coefficient Data:		
a =	b =	c =
132,91	-101,02	11,49

Donde a,b y c son constantes y x representa la concentración de nitrógeno total en mg/L.

Fuente: El Autor.

3.2.2.10. Curva de E. coli en función de la calidad.

La *Escherichia coli* hace parte del índice ya que es uno de los principales indicadores de contaminación y una bacteria específica de origen fecal humano o animal en el agua. Esta curva se realizó con base en la normativa, los objetivos de calidad del agua y los criterios microbiológicos de la E.coli para evaluar la calidad del agua en sus diferentes usos;

La curva se graficó en el intervalo entre 100 y 10000 NMP/100 mg/L, los valores menores a 100 representan la calidad más alta y los valores por encima de 500 representan calidades por debajo de 60.

Tabla 39 Valores de referencia de la E. coli para el ICAHUMB.

NMP/100 ml	Fuente	Calidad
0	Criterios microbiológicos de la E.coli para evaluar la calidad del agua en sus diferentes usos [38]	Agua potable
<1		Aguas Envasadas
		Aguas dulces usadas para la recreación:
200		Natación
2000		Navegación
5000	Nivel de contaminación fecal por E. coli [39]	Paisaje
< 20		cuerpos de agua libres de contaminación fecal
> 20 - 2000		cuerpos de agua con contaminación fecal
> 2000 - 20000		Alta contaminación fecal
> 20000		Muy alta contaminación fecal
1000000	Objetivos de calidad para Afluentes, estudio U. Andes.	Conservación de fauna y flora
1000000	Objetivos de calidad al interior, estudio U. Andes.	Conservación de fauna y flora

Fuente: El Autor.

El modelo es un ajuste cuadrático con un coeficiente de correlación de 0,99 y un error estándar de 2,04; la ecuación y los coeficientes del modelo se muestran en la tabla 40. En el gráfico 11 se observa la curva de coliformes fecales obtenida en función de la calidad.

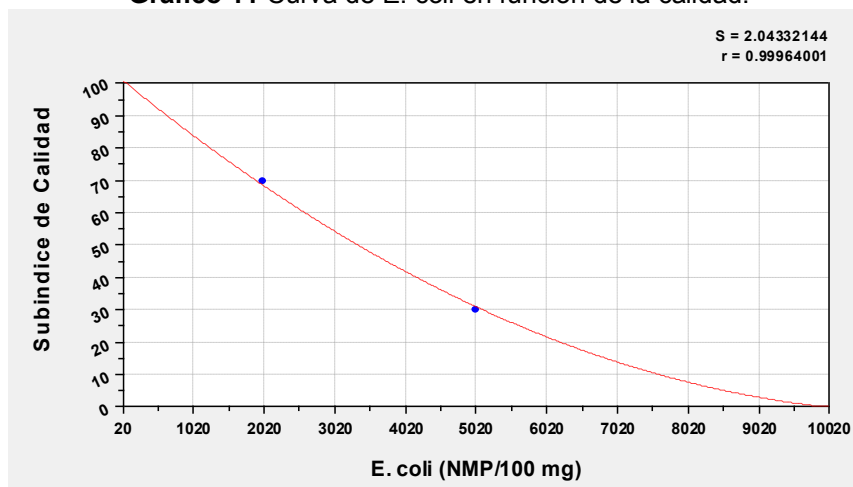
Tabla 40 Ecuación y coeficientes del modelo de calidad para los coliformes fecales

Quadratic Fit: $y=a+bx+cx^2$		
Coeficiente Data:		
a =	b =	c =
101,13	-0,0179	0,00000078

Donde a,b y c son constantes y x representa los coliformes totales en NMP/100 ml.

Fuente: El Autor.

Gráfico 11 Curva de E. coli en función de la calidad.



Fuente: El Autor.

La curva ajustada describe la calidad en función de este parámetro en el intervalo de 20 - 60 . Si la CT < 100 la calidad es igual a 100, Si CT ≥ 10000 la calidad es igual a 0. Aunque el modelo acepta los valores por debajo de 100 NMP/100ml se toma esta decisión ya que con esta concentración la calidad del agua es aplicable para el uso para la protección de fauna y flora.

En resumen el modelo matemático resultante para cada parámetro se muestra en la tabla 41.

Tabla 41: Modelos matemáticos obtenidos para cada parámetro en el Índice de Calidad.

Parámetro	Función	Ecuación	Coeficientes			
			A	b	c	d
Oxígeno disuelto	Función lineal	$y=x+1E-14$				
pH.	Función Racional	$y=(a+bx)/(1+cx+dx^2)$	5,37	-0,21	-0,26	0,02
Temperatura	Función Racional	$y=(a+bx)/(1+cx+dx^2)$	13,48	-0,23	-0,08	0,0019
DBO	Ajuste Cuadrático	$y=a+bx+cx^2$	103,10	-1,51	0,0041	-
DQO	Polinomio de 3 grado	$y=a+bx+cx^2+dx^3...$	129,83	-1,73	0,014	-0,000046
SST	Función Sinusoidal	$y=a+b*cos(cx+d)$	13,97	373,45	0,0035	1,26
Conductividad	Ajuste Cuadrático	$y=a+bx+cx^2$	116,24	-0,32	0,00013	400,00
Fosforo Total	Función logarítmica	$y=a+b*ln(x)$	6,55	-19,41	-	-
Nitrógeno Total (NKT)	Ajuste Cuadrático	$y=a+bx+cx^2$	132,91	-101,02	11,49	-
E coli.	Ajuste Cuadrático	$y=a+bx+cx^3$	101,13	-0,0179	0,00000078	-

Fuente: El Autor.

3.2.3. Selección del método de agregación.

El método de agregación es una etapa esencial en la estructuración del índice. En este procedimiento se puede perder parte de la información, por ello se busca que la ecuación seleccionada represente de la manera más simple, precisa y objetiva el nivel de calidad, en este caso basados en la presunción que el agua tendrá como uso principal la conservación de flora y fauna.

El método de agregación fue seleccionado a partir de la comparación de los resultados obtenidos de la aplicación de 5 métodos diferentes (Tabla 42); se buscaba determinar cuál es la sensibilidad de los distintos métodos de agregación a los cambios de las diferentes variables de calidad del agua, las expresiones matemáticas usaron conjuntos de datos de calidad idealizados y reales de los humedales (tabla 43).

Tabla 42 Posibles metodologías para el ICAHUMB.

Metodo de Agregacion	
Promedio ponderado	$ICA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$
Promedio Aritmético Ponderado	$ICA = \sum_{i=1}^n q_i w_i$
Promedio Geométrico no Ponderado	$ICA = \left(\prod_{i=1}^n q_i \right)^{\frac{1}{n}}$
Promedio Geométrico ponderado	$ICA = \prod_{i=1}^n Q_i^{w_i}$
Raíz Cuadrada del Promedio Armónico no ponderado	$ICA = \sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{q_i^2}}}$

Fuente: El Autor.

Ya que algunos de los métodos de agregación analizados necesitan pesos de ponderación como el promedio geométrico y aritmético ponderado, se asignaron valores a los constituyentes de calidad del agua de acuerdo a su importancia en la dinámica del ecosistema y a criterio del autor; como el caso del OD, pH y la °T a los que se les otorgó un peso mayor debido a su vitalidad en el sostenimiento y la conservación de la vida acuática.

Tabla 43 Pesos de ponderación asignados a las variables de calidad del agua del ICAHUMB

Parámetro	Pesos
% Oxigeno	0,14
PH.	0,14
Temperatura	0,14

DBO	0,09
DQO	0,09
SST	0,09
Conductividad	0,06
Fosforo Total	0,09
Nitrógeno Total (NKT)	0,09
E coli.	0,07

Fuente: El Autor.

Se plantearon cuatro casos para evaluar la sensibilidad de los métodos, los resultados fueron:

Caso 1: Para esta simulación se usaron datos idealizados que representan buena calidad del agua (Tabla 44); se logró evidenciar que en general los cinco métodos de agregación presentan valores altos muy similares en el índice, indicando alta calidad del agua; demostrando que las ecuaciones no presentan problemas de ambigüedad ni de eclipsamiento cuando los valores indexados representan buena calidad.

Tabla 44 Análisis de sensibilidad de los métodos de agregación, Caso 1.

Parámetro	Datos de calidad del agua	Método de agregación	Resultados ICA
Oxígeno (mg/L)	8	1. Promedio ponderado	96,89
pH.	7	2. Promedio Aritmético Ponderado	96,45
Temperatura	23		
DBO	3	3. Promedio Geométrico no Ponderado	96,84
DQO	10		
SST	25	4. Promedio Geométrico ponderado	96,40
Conductividad	55		
Fósforo Total	0,01	5. Raíz Cuadrada del Promedio Armónico no ponderado	96,76
Nitrógeno Total (NKT)	0,4		
E coli.	120		

Fuente: El Autor.

Caso 2: este ejercicio usó datos idealizados que representan mala calidad del agua, se observó que los cinco métodos de agregación presentan valores finales muy cercanos, el valor más bajo lo obtuvo la Raíz Cuadrada del Promedio Armónico no ponderado con 10,02 en contraste con un 12,12 del promedio ponderado; En general todos los métodos representan adecuadamente la baja calidad del agua, demostrando que las ecuaciones no tienen problemas de ambigüedad ni de eclipsamiento, ilustrando de forma lógica la calidad de los datos integrados.

Tabla 45: Análisis de sensibilidad de los métodos de agregación, Caso 2.

Caso 2			
Parámetro	Datos de calidad del agua	Método de agregación	Resultados ICA

Oxígeno (mg/L)	1	1.Promedio ponderado	12,12
pH.	4	2.Promedio Aritmético Ponderado	12,76
Temperatura	35		
DBO	70	3.Promedio Geométrico no Ponderado	11,38
DQO	170		
SST	90	4.Promedio Geométrico ponderado	12,02
Conductividad	400		
Fosforo Total	1	5. Raíz Cuadrada del Promedio Armónico no ponderado	10,02
Nitrógeno Total (NKT)	1,5		
E coli.	8000		

Fuente: El Autor.

Caso 3: Este caso uso valores reales de un muestreo realizado en el año 2013 en uno de los colectores de aguas lluvias del humedal de Capellania, los datos integrados por los métodos de agregación indican que el agua tiene niveles muy bajos de OD nocivos para la vida acuática; presenta una alta concentración de nutrientes, además la elevada cantidad de E. coli evidencia la presencia de aguas residuales que traen consigo material fecal.

Los cinco métodos aplicados arrojaron resultados muy variados, por un lado el promedio ponderado y el promedio aritmético ponderado presentan problemas de eclipsamiento ya que no reflejan la mala calidad del agua como lo indican los subíndices; los promedios geométrico ponderado y no ponderado representan de forma lógica los datos indexados, pero la raíz cuadrada del promedio armónico no ponderado fue el ICA más bajo lo que permite evidenciar la susceptibilidad de éste a los cambios de las concentraciones de los parámetros.

Tabla 46 Análisis de sensibilidad de los métodos de agregación, Caso 3.

Caso 3			
Parámetro	Datos de calidad del agua	Método de agregación	Resultados ICA
Oxígeno (mg/L)	0,8	1.Promedio ponderado	39,97
pH.	6,26	2.Promedio Aritmético Ponderado	43,65
Temperatura	18,34		
DBO	24	3.Promedio Geométrico no Ponderado	14,26
DQO	68		
SST	39	4.Promedio Geométrico ponderado	17,21
Conductividad	355		
Fósforo Total	1,62	5.Raíz Cuadrada del Promedio Armónico no ponderado	1,82
Nitrógeno Total (NKT)	1,6		
Coliformes Fecales	31000		

Fuente: El Autor.

Caso 4: En este ejercicio se usaron **los** valores de un muestreo realizado en 2013 a un espejo de agua del humedal Juan Amarillo, según los datos el agua posee características adecuadas para el desarrollo de la vida acuática pero existe una concentración considerable de nutrientes que puede alterar el nivel de calidad.

Se evidenció que todos los métodos obtuvieron valores cercanos, para los métodos 1 y 2 el resultado es muy similar, al igual que para los métodos 3 y 4, sin embargo, el método 5 presentó el valor más bajo demostrando su sensibilidad a los cambios de variables individuales

Tabla 47 Análisis de sensibilidad de los métodos de agregación, Caso 4.

Caso 4			
Parámetro	Datos de calidad del agua	Método de agregación	Resultados ICA
Oxígeno (mg/L)	7,5	1.Promedio ponderado	80,64
pH.	7,024	2.Promedio Aritmético Ponderado	80,96
Temperatura	17,28		
DBO	2	3.Promedio Geométrico no Ponderado	77,10
DQO	30		
SST	17	4.Promedio Geométrico ponderado	77,70
Conductividad	127,8		
Fosforo Total	0,16	5.Raíz Cuadrada del Promedio Armónico no ponderado	68,60
Nitrógeno Total (NKT)	1		
Coliformes Fecales	14,8		

Fuente: El Autor.

En conclusión el método 5: La raíz cuadrada del promedio armónico no ponderado fue la más sensible a los cambios de las variables individuales y refleja las variaciones de las concentraciones de los parámetros individuales de forma mucho más lógica; por ello sera la ecuación utilizada para calcular el ICA de este estudio.

Se pudo concluir que el método 1 y 2 tienden a representar niveles de calidad muy altos lo que muestra un efecto de eclipsamiento y de ambigüedad al sobreestimar la calidad del agua; el método 3 y 4 alcanzan valores de calidad similares, sus pocas diferencias radican de la ponderación con los pesos de las variables en una de las ecuaciones, estos métodos confrontan un grado menor de eclipsamiento y ambigüedad porque se ven influenciadas por variables de calidad más altas, representando con mayor calidad un agua que en realidad tiene un valor de calidad más bajo; el quinto método muestra un valor muy por debajo de los demás ya que esta ecuación no se ve influenciada por ningún constituyente en específico, demostrando que la expresión no presenta problemas de eclipsamiento ni de ambigüedad.

De acuerdo a la literatura raíz cuadrada del promedio armónico no ponderado es un buen medio para la agregación de los subíndices, porque no presenta problemas de eclipsamiento ni ambigüedad [40]. Esta es una mejor función que el promedio geométrico, ya que presentaba una mayor sensibilidad a cambios en las variables individuales. Esta ecuación permite a las variables más críticas transmitir una mayor influencia sobre el valor final del índice, situación que es más deseable a que el índice se vea influenciado por los subíndices a los que se les otorga mayor peso [41].

3.2.4. Fase de diseño de la escala general de calidad

El último paso en la estructuración del índice es el diseño de la escala de calidad, ésta se realizó con base en los en las concentraciones referenciadas en la normativa y la literatura, probando diferentes valores para las variables en la obtención del índice. La calidad del agua con respecto al ICAHUMB puede ser clasificada según la escala ilustrada en la tabla 45:

Tabla 48 Escala de calidad para el ICAHUMB

Valores del Índice	Grado de Calidad	Escala de Color
0 - 40	Muy pobre, el agua presenta niveles de contaminación alta y muestra condiciones que no son favorables para la vida acuática	
40-50	Pobre: El humedal presenta un grado medio de contaminación, el agua debe ser potencialmente tratada, se presume que existen vertimientos de aguas residuales al ecosistema	
50-60	Aceptable: algunos de los parámetros se hallan en el límite o exceden los criterios de calidad, sin embargo las condiciones son parcialmente favorables para el desarrollo de la fauna y flora	
60- 80	Buena: El agua satisface el uso para conservación de fauna y flora, presenta niveles contaminación bajos.	
80-100	Excelente: el agua no presenta contaminación, las condiciones son altamente favorables para el ecosistema	

Fuente: El Autor.

3.2.5. Validación del índice.

Se realizó un ejercicio de validación del índice usando los datos contemplados en los registros históricos de calidad del agua para dos puntos de muestreo del humedal Córdoba tomados en el año 2013, el canal Callejas y Molinos; además se utilizaron los datos de dos puntos del humedal Juan Amarillo tomados en el tercio alto del espejo de agua para el año 2013 (Tabla 49).

La tabla 50 ilustra los resultados obtenidos de la aplicación del ICAHUMB a los datos de calidad del agua. Los resultados indican que los afluentes del humedal Córdoba presentan una calidad del agua muy pobre que tiene niveles de contaminación altos y condiciones no favorables para la vida acuática; para el humedal Juan Amarillo los resultados muestran que la calidad del agua es aceptable, aunque algunos de los parámetros se hallan en el límite o exceden los criterios de calidad, sin embargo las condiciones son favorables para el desarrollo de la fauna y flora.

Tabla 49: Datos para la validación del índice ICAHUMB.

	Datos de Muestreo humedal Córdoba		Datos de Muestre humedal Juan Amarillo	
Año de muestreo	2013	2013	2013	2013
Punto muestreado	Canal callejas	Canal Molinos	Espejo 2-Tercio alto -Calle 127B Cra 95A	Espejo 3-Tercio alto -Calle 127B Cra 95ª
Parámetro				

OD	3,7	2,2	7	7,5
pH	7,164	6,948	7,074	7,024
Temperatura	18,34	18,14	16,9	17,28
DBO ₅	20	28	2	2
DQO	58	64	23	30
SST	24	28	18	17
Conductividad	339,4	266,4	149,4	127,8
Fosforo total	1	1,6	0,07	0,1673
NKT	10,1	12,5	1,3	1
E. coli	90400	179300	14,8	14,8

Fuente: El Autor.

Tabla 50: Resultados de la validación del índice ICAHUMB.

Humedal	Punto de muestreo	ICA	Escala de calidad	
Córdoba	Canal callejas	19,3	Muy pobre, el agua presenta niveles de contaminación alta y muestra condiciones que no son favorables para la vida acuática	
	Canal Molinos	1,82		
Juan Amarillo	Espejo 2-Tercio alto -Calle 127B Cra 95A	52,4	Aceptable: algunos de los parámetros se hallan en el límite o exceden los criterios de calidad, sin embargo las condiciones son parcialmente favorables para el desarrollo de la fauna y flora	
	Espejo 3-Tercio alto -Calle 127B Cra 95A	68,6		

Fuente: El Autor.

Este índice usa 10 variables que son comúnmente medidas y monitoreadas por las entidades públicas encargadas de la administración de los ecosistemas. El diseño de este índice permite hacer la valoración de la calidad del agua en los humedales tanto para los afluentes como los cuerpos de agua, el ICA permite hacer el seguimiento de la calidad del agua para entender los cambios sobre las condiciones del medio.

4. Impacto social, humanístico del proyecto

Los humedales de Bogotá han sido víctimas de constantes tensiones ambientales que vienen deteriorando la calidad ambiental de los ecosistemas. Durante los últimos años el gobierno distrital ha invertido grandes cantidades de dinero buscando recuperar, rehabilitar y conservar los humedales, es por ello que adelanta actividades relacionadas con la corrección de las conexiones erradas, la separación de los alcantarillados de aguas lluvias y aguas negras y la construcción de estructuras que retienen los sólidos que a su vez funcionan como sistemas de biotratamiento con macrofitas, a pesar de lo anterior, en la actualidad las autoridades encargadas de la administración de los humedales no han establecido objetivos de calidad que permitan hacer el control y seguimiento de los afluentes y cuerpos de agua, ni mucho menos poseen una herramienta que permita evaluar de forma integral y objetiva la calidad del agua presente en los humedales; de allí que este índice específico (ICAHUMB) para aguas destinadas a la conservación de

fauna y flora tenga la capacidad de proveer información que pueda ser usada por los encargados para toma de decisiones, de tal manera que se puedan direccionar los recursos y las estrategias adecuadas para prevención y corrección de los impactos que generan desequilibrios en la calidad del agua de los humedales.

Los ecosistemas de humedal en Bogotá prestan una variedad de servicios ambientales que contribuyen a la mejora de la calidad de la vida de los ciudadanos, por ello el ICAHUMB es un gran aporte para su conservación, evaluación y seguimiento, además de favorecer en la protección de la fauna y flora endémica de estos.

5. Conclusiones

La calidad del agua es un aspecto esencial que debe ser considerado hoy en día ya que las fuentes de agua son limitadas, por ello es necesario la creación de métodos y herramientas que contribuyan en su evaluación y protección; una de las herramientas que se ha propuesto son los índices de calidad de agua (ICA), estos brindan resultados de forma práctica y fácil de ser interpretados por el público en general, siguiendo criterios de calidad.

Para los humedales de Bogotá se han propuesto herramientas de evaluación de la calidad del agua que no son representativas de los ecosistemas por el contrario son adaptadas de otros lugares y para condiciones muy diferentes a las que tienen los humedales capitalinos, como el Water Quality Index de Canadá presentado por en un estudio de la Universidad de los Andes en convenio con la Secretaría de Ambiente.

Esta investigación construyó un índice específico para la evaluación de la calidad del agua en los humedales con base en los registros históricos de calidad realizados por la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá y la normativa ambiental nacional e internacional; esta herramienta es de vital importancia para establecer medidas de manejo que protejan los humedales, teniendo en cuenta que estos tienen como objetivo principal la conservación de fauna y flora.

El índice (ICAHUMB) integra once variables de calidad en una ecuación sensible a los parámetros más críticos y que no sobreestima la calidad del agua, su diseño incluyó un análisis de sensibilidad con diferentes registros de datos reales e idealizados que demostraron que efectivamente la expresión no está influenciada por ningún parámetro y no presenta problemas de ambigüedad ni eclipsamiento. El ICAHUMB fue validado tomando los datos de los registros históricos de calidad obtenidos en el año 2013 para cuatro puntos de muestreo, dos de ellos en el humedal Córdoba y los otros dos en el humedal Juan Amarillo, los resultados evidenciaron que ambos humedales tienen una calidad del agua baja, para el caso del humedal Córdoba los dos puntos eran afluentes que presentaban un elevado nivel de contaminación posiblemente por la presencia de aguas residuales y el

Humedal Juan Amarillo aunque obtuvo un valor aceptable de calidad presenta excesivas concentraciones de algunos parámetros.

En general la metodología demostró ser acertada y capaz de integrar valores de diferentes parámetros de calidad que permiten la evaluación integral de la calidad en los humedales de Bogotá, por ello se recomienda promover este estudio con el fin de que se planteen objetivos de calidad que garanticen la adecuada evaluación y el seguimiento de la calidad del agua de los humedales. Además se recomienda la investigación de indicadores que permitan la evaluación de los sedimentos existentes en el fondo del vaso hidráulico de los afluentes y cuerpos de agua.

6. Referencias

- [1] T. V. Quevedo Garcia, «Propuesta de Índices de Calidad del Agua para Ecosistemas Hídricos en Chile,» Santiago de Chile, 2012.
- [2] C. Prakirake, P. Chaiprasert y S. Tripetchkul, «Development of specific water quality index for water supply in Thailand,» *Songklanakarian Journal of Science and Technology*, vol. 31, n° 1, pp. 91-104, 2009.
- [3] P. Walsh y W. Wheeler, «Water Quality Index Aggregation and Cost Benefit Analysis,» Washington, DC, 2012.
- [4] T. Abbasi y S. A. Abbasi, *Water Quality Indices*, Elsevier, 2012, p. 362.
- [5] F. J. Torres Vega, *Desarrollo y Aplicación de un Índice de Calidad de Agua para ríos en Puerto Rico*, Mayagüez, 2009, p. 219.
- [6] H. Boyacioglu, Development of a water quality index based on a European, Izmir: Dokuz Eylul University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, 2007, p. 6.
- [7] M. Guzmán Arroyo, *Las aguas superficiales, Programa de Ordenamiento Ecológico y Territorial del Estado de Jalisco*, Chapala: Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Instituto de Limnología, 1997.
- [8] Organización de los Estados Americanos OEA, «Metodología estadística para la medición de la calidad de los recursos hídricos en los países de la comunidad Andina,» Instituto Lima, Peru, 2004.
- [9] CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, «cetesb.sp.gov.br,» [En línea]. Available: <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/108-indices-de-qualidade-das-aguas>. [Último acceso: 27 12 2014].
- [10] A. Ramirez, N. Fernandez y F. Solano, «Índices Físico Químicos de Calidad del Agua, Un Estudio Comparativo,» IWA, 2003.

- [11] N. Fernandez , F. Solano y G. Ramos, «Icatest V 1.0 Una herramienta Informática para el análisis y valoración de la calidad del Agua,» *Bistua*, vol. II, nº 2, pp. 1-10, 2005.
- [12] A. M. Sancha F y C. Espinoza C, «Determinación de contenido natural e índices de calidad: ¿presente y futuro de calidad de aguas?,» Santiago, Chile, 2001.
- [13] P. Torres, C. H. Cruz y P. J. Patiño, «Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano, UNA REVISIÓN CRÍTICA,» *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 8, nº 15, p. 16, 2009.
- [14] R. O. Ball y R. L. Church, «Water Quality Indexing and Scoring,» *Journal of Environmental Engineering*, vol. Vol. 106, nº No. 4, pp. 757-771, 1980.
- [15] W. R. Ott, *Environmental Indices: Theory and Practice*, Michigan: Ann Arbor Science, 1978.
- [16] A. RAMÍREZ ‡, R. RESTREPO y G. VIÑA, «Cuatro indices de contaminacion para la caracterizacion de aguas continentales. Formulaciones y Aplicacion.,» *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, vol. 1, nº 3, p. 19, 1997.
- [17] D. A. Dunnette, *A Geographically Variable Water Quality Index Used in Oregon.*, Oregon: Journal of the Water Pollution Control Federation, 1979.
- [18] N. J. Fernandez Parada y F. Solano Ortega , «Análisis comparativo de los índices de calidad (ICA's) y de los índices de contaminación (ICO's) del agua,» de *Índices de Calidad y de Contaminación del Agua*, Pamplona, Colombia, Universida de Pamplona, 2005, p. 26.
- [19] UNEP, *Global Drinking Water Quality Index Development and Sensitivity Analysis Report*. Ontario, Canada, 2007.
- [20] E. Marquez Canosa, «Curso Diseño de un índice de calidad del agua para el manejo y gestion de corrientes superficiales,» Lima, Campus Universidad Agraria La Molina (UNALM), 2008.

- [21] S. Dinius, «Design Of An Index Of Water Quality,» 1987.
- [22] A. M. Sancha F y C. Espinoza C , «Memorias XIV congreso chileno de ingeniería sanitaria y ambiental AIDIS - CHILE,» de *Determinación de contenido natural e índices de calidad: ¿presente y futuro de calidad de aguas?*, Santiago de Chile, División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile., 2001, p. 157.
- [23] S. K. Prabhata y T. Aditya , «Improved Method for Aggregation of Water Quality Subindices,» *Journal of environmental engineering*, pp. 220-225, 2007.
- [24] Secretaria de Ambiente, «VIII fase del programa de seguimiento y monitoreo de efluentes industriales y corrientes superficiales de Bogotá D.C.,» Alcaldia Mayor de Bogota, Bogota D.C., 2009.
- [25] «/www.ramsar.org,» THE RAMSAR CONVENTION SECRETARIAT, 2014. [En línea]. Available: <http://www.ramsar.org/es/acerca-de/la-convenci%C3%B3n-de-ramsar-y-su-misi%C3%B3n>. [Último acceso: 19 06 2015].
- [26] Departamento Técnico Administrativo de Medio Ambiente - Alcaldia Mayor de Bogotá D.C., «Política de Humedales del Distrito Capital.,» Dama, Bogotá, D. C., Colombia., Bogotá D.C., Primera edición, Enero de 2006.
- [27] Secretaria Distrital de Ambiente, «ambientebogota.gov.co,» Alcaldia Mayor de Bogota, 2015. [En línea]. Available: <http://ambientebogota.gov.co/web/sda/humedales..> [Último acceso: 23 09 2015].
- [28] Redacción Bogotá, «En el declarado humedal de El Salitre, si habria concha acustica,» *El Espectador*, p. 1, 05 2011.
- [29] Universidad de los Andes, «Monitoreo en humedales de Bogotá - Informe Final,» Bogotá, 2010.
- [30] P. Gargallo Valero y M. S. Figueras , «5campus.com,» 2006. [En línea]. Available: <http://www.5campus.com/leccion/factorial>. [Último acceso: 15 Octubre 2015].

- [31] K. Raveendra , U. Alka , C. Shekhar y P. Vijay , The Yamuna River Basin: Water Resources and Environment, Springer Science & Business Media, 2011.
- [32] O. Sanchez, M. Herzig, E. Peters, R. Marquez y L. Zambrano, Perspectivas sobre la conservacion de ecosistemas acuaticos en Mexico, México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), 2007.
- [33] LaMotte Company, The Monitor's Handbook, Chestertown, 1992.
- [34] «Indice fisicoquímico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación,» *Revista de Biología Tropical*, vol. 56, nº 4, 2008.
- [35] G. Rodal Perez, «Los macroinvertebrados y su valor como indeicadores de calidad del agua,» *La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. XXIII, nº 88, pp. 375 - 387, 1999.
- [36] M. Nisbet y J. Verneaux, «Composantes Chimiques Des Eaux Courantes,» *Cambridge Journals*, vol. 6, nº 2, pp. 161-190, 1970.
- [37] G. Goyenola, Guía para la utilización de las Valijas Viajeras, Montevideo: Facultad de Ciencias, UDELAR, 2007.
- [38] D. Mora Alvarado, «Criterios microbiológicos para evaluar la calidad del agua en sus diferentes usos,» *Revista Costaricense de Salud Publica*, vol. 7, nº 13, pp. 23-33, 1998.
- [39] M. Aurazo de Zumaeta, «Aspectos Biológicos de la Calidad del Agua,» de *Manual para analisis basicos de calidad del agua de bebida*, Lima, Peru, Centro panamericano de ingenieria sanitaria y ciencias del ambiente, 2009, pp. 59 - 101.
- [40] J. Dojlido, J. Raniszewski y J. Woyciechowska, «Water quality index applied to rivers in the vistula river basin in Poland,» *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 33, nº 1, pp. 33 - 42, 1994.
- [41] C. G. Cude, «Oregon Water Quality Index: A Tool for Evaluating Water Quality Management Effectiveness,» *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, vol. 37, nº 1, pp. 125 - 137, 2001.

- [42] Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales., «Plan Nacional de Mejoramiento de Humedales en El Salvador, Catalogo de zonas criticas prioritarias en Humedales Ramsar.,» San Salvador, 2012.
- [43] G. D. Tilman, V. H. Smith y J. C. Nekola, «Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems,» *Environmental Pollution*, vol. 100, nº 1, pp. 179-196, 1999.
- [44] C. Sawyer, P. McCarty y G. Parklin, Chemistry for Environmental Engineering, McGraw-Hill, 1994.
- [45] H. J. Glynn y G. W. Heinke, Ingeniería ambiental, Mexico: Pearson Educación, 1999.

Anexo A

Rangos, criterios, índices, valores y otros criterios tenidos en cuenta para la elaboración de subíndices en función de la concentración de contaminantes en agua dulce:

Tabla 51 Descripción de las condiciones de calidad del agua aceptables y críticas para Humedales. [42]

Parámetro	Valor Aceptable	Valor Crítico
pH	5,6 - 8,4	<5.5 y > 8,5
OD (mg/L)	3,1 a 8,9	<3 y > 9
Conductividad (microSiemens/cm2)	50 a 499	>500
Coliformes Fecales	< 1000 NPM/100 ml	Superior a 1100 NPM/100 ml

Tabla 52 Criterios para el dictamen de la calidad de aguas corrientes basado en el sistema Saprobio. [35]

Clase	Grado de saprobiedad	Grado de contaminación Orgánica	Índice saprobio	DBO5 (mg/L)	O2 (mg/L)
I	oligosaprobio	Poca o ninguna contaminación	1 - < 1,5	1	> 8
I - II	oligosaprobio-betamesosaprobio	poca contaminación	11,5 - < 1,8	1 - 2	> 8
II	betamesosaprobio	mediana contaminación	1,8 - < 2,3	2 - 6	> 6
II - III	alfabetamesosaprobio	contaminación crítica	2,3 - < 2,7	5 - 10	> 4
III	alfamesosaprobio	contaminación fuerte	2,7 - < 3,2	7 - 13	> 2
III - IV	alfamesosaprobio y polisaprobio	contaminación muy fuerte	3,2 - < 3,5	10 - 20	< 2
IV	polisaprobio	supercontaminado	3,5 - 4	> 15	< 2

Tabla 53 Rangos de concentración de (OD) oxígeno disuelto y consecuencias ecosistémicas frecuentes. [37]

OD (mg/L)	Condición	Consecuencias
0	Anoxia	Muerte masiva de organismos aerobios
0 - 5.	Hipoxia	Desaparición de organismos y especies sensibles
5 - 8.	Aceptable	OD adecuadas para la vida de gran mayoría de especies de peces y otros organismos acuáticos
8 - 12.	Buena	
> 12	Sobresaturada	Sistemas en plena producción fotosintética.

Tabla 54 Efectos de los niveles de pH en la vida acuática. [33]

pH	EFFECTO
3.0 – 3.5	Poco probable que los peces sobrevivan por más de unas pocas horas en este rango, aunque se pueden encontrar algunas plantas e invertebrados a niveles de pH tan bajos como éstos.
3.5 – 4.0	Se conoce que es letal para los salmónidos.
4.0 – 4.5	Ausentes todos los peces, muchas ranas e insectos.
4.5 – 5.0	Muchos insectos ausentes. La mayoría de los huevos de peces no madurarán.
5.0 – 5.5	Bacterias que viven en el fondo de los cuerpos de agua (descomponedores) comienzan a morir. Desechos de hojas y

	detritus se empiezan a acumular, encerrando nutrientes esenciales e interrumpiendo los ciclos químicos. El plancton empieza a desaparecer. Caracoles y almejas ausentes. Alfombras de hongos comienzan a reemplazar a las bacterias en el sustrato.
	Metales (aluminio, plomo) normalmente atrapados en sedimentos se liberan a agua acidificada en formas tóxicas para la vida acuática.
6.0 – 6.5	Camarones de agua dulce ausentes. Poco probable que sea directamente dañino a los peces a menos que el nivel de dióxido de carbono libre sea alto (en exceso de 100 mg/L)
6.5 – 8.2	Óptimo para la mayor parte de los organismos.
8.2 – 9.0	Poco probable que sea dañino a los peces, pero ocurren efectos indirectos a este nivel debido a cambios químicos en el agua.
9.0 – 10.5	Probable que sea dañino a los salmónidos y a la percha si presente por períodos prolongados.
10.5 – 11.0	Rápidamente letal para los to salmónidos. Exposición prolongada es letal a la carpa y a la percha.
11.0 – 11.5	Rápidamente letal para todas las especies de peces.

Tabla 55 Escala de clasificación de la calidad del agua con base en la (DBO₅) Demanda Biológica de Oxígeno. [32]

DBO	Criterio	Descripción
≤ 3 mg/L	Excelente	No contaminada
> 3 y ≤ 6 mg/L	Buena Calidad	Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable
> 6 y ≤ 30 mg/L	Aceptable	Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente
> 30 y ≤ 120 mg/L	Contaminada	Aguas superficiales con descarga de aguas residuales crudas principalmente de origen municipal
> 120 mg/L	Fuertemente Contaminada	Aguas superficiales con fuerte impacto de descarga de aguas residuales crudas municipales y no municipales

Tabla 56 Escala de clasificación de la calidad del agua con base en la (DQO) Demanda Química de Oxígeno. [32]

DQO	Criterio	Descripción
≤ 10 mg/L	Excelente	No contaminada
> 10 y ≤ 20 mg/L	Buena Calidad	Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable
> 20 y ≤ 40 mg/L	Aceptable	Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente
> 40 y ≤ 200 mg/L	Contaminada	Aguas superficiales con descarga de aguas residuales crudas principalmente de origen municipal
> 200 mg/L	Fuertemente Contaminada	Aguas superficiales con fuerte impacto de descarga de aguas residuales crudas municipales y no municipales

Tabla 57 Rangos de concentración de solidos suspendidos en el agua. [36]

Sólidos Suspendidos (mg/L)	Clases	Ejemplos de ubicación
S.S. < 10	1	las zonas superiores de las redes: manantiales y arroyos - algunos ríos de truchas y ciprínidos

10 < S.S. < 25	2	zonas altas y medias de los ríos y prémontagne montaña: muchos ríos para la trucha y ciprínidos
25 < S.S. < 50	3	zonas medias y bajas de algunos ríos pre montaña y de tierras bajas
50 < S.S. < 75	4	las zonas más bajas de algunos grandes ríos - suelo de arcilla en los ríos
75 < S.S. < 150	5	algunos ríos de montaña en períodos de estiaje contaminados
150 < S.S. < 300	6	Estribo algunos arroyos de montaña contaminadas
300 < S.S. < 500	7	áreas individuos río y muy contaminadas - raro en la naturaleza
S.S. < 500	8	

Tabla 58 Rangos de mineralización del agua de acuerdo a la conductividad. [36]

Conductividad eléctrica $\mu\text{mhos/cm/cm}^2$	clases	mineralización	Ejemplos
C < 30	1	extremadamente baja	extremadamente baja de agua mineral - lagos de alta montaña - agua periglacial - algunas fuentes
30 < C < 50	2	Muy débil	fuentes y torrentes de montaña - lagos oligotróficos - corriente sustrato ácido
50 < C < 100	3	bajo	Macizo Central - arroyos y pequeños ríos
100 < C < 200	4	Moderado	muchos ríos costeros bretones - Alpes y Pirineos a media altura
200 < C < 300	5	lo suficientemente fuerte	regiones de piedra caliza: Zona superior
300 < C < 400	6	fuerte	regiones de piedra caliza: las zonas más bajas, llanuras de arroyos, ríos
400 < C < 500	7	muy fuerte	
	8	Excesiva	Ríos Contaminados

Tabla 59 Clasificación de lagos y ríos en diferentes estados tróficos. [43]

	Estado trófico	Nitrógeno Total (mg/L)	Fosforo Total (mg/L)
Lagos	Oligotrófico	< 0,35	< 0,01
	Mesotrófico	0,35-0,65	0,02-0,03
	Eutrófico	0,65- 1,2	0,03-0,1
	Hipertrófico	> 1,2	> 0,1
Ríos	Oligotrófico	< 0,7	< 0,025
	Mesotrófico	0,7 - 1,5	0,025-0,075
	Eutrófico	> 1,5	> 0,075

Tabla 60 Concentración de fosforo total en diferentes fuentes de contaminación. [44]

Sistema	Concentración (mg/L)
agua dulce	0,004-0,003
agua de desechos domésticos	5 - 20
drenaje de agricultura	0,05 - 1
lagos eutrofizados	0,003 - 1,5
lagos no contaminados	0,01 - 0,04
ríos	0,01 - 1

Anexo B.

Esta base de datos contempla los análisis físicos, químicos, biológicos y microbiológicos realizados por el monitoreo de la EAB-ESP a las entradas, salidas y cuerpos de agua de los humedales de la ciudad, cuyos registros se reportan desde el año 2010 hasta el año 2014 en 242 puntos de muestreo.

Se anexa una matriz de Excel con los datos.