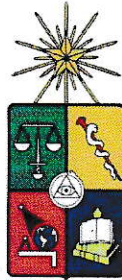


UCH-FC  
Q. Ambiental  
F 475  
C. 1



FACULTAD DE CIENCIAS

UNIVERSIDAD DE CHILE

**“ÍNDICES DE CALIDAD DE AGUA COMO HERRAMIENTA PARA LA  
EVALUACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES: CASO DE ESTUDIO RÍO  
LLUTA”**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial  
de los requisitos para optar al Título de:

**Químico Ambiental**

**Tania Carolina Figueroa Díaz**

Director de Seminario de Título: Sr. Julio Vallejos A.

Profesor Patrocinante: Dra. Ximena Molina P.

**Noviembre de 2014**



## INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TITULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el o (la) candidato (a):

### TANIA FIGUEROA DÍAZ

“ÍNDICES DE CALIDAD DE AGUA COMO HERRAMIENTA PARA LA EVALUACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES: CASO DE ESTUDIO RÍO LLUTA”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

#### COMISIÓN DE EVALUACIÓN

*Sr. Julio Vallejos.*

**Director Seminario de Título**

*Dra. Ximena Molina.*


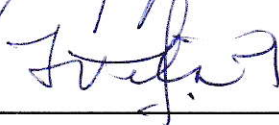

**Profesora Patrocinante**

*M.Cs. Sylvia Copaja.*

**Presidenta**

*M.Cs. Irma Vila.*

**Correctora**

pp   
  
  
  


Santiago de Chile, Noviembre 2014

## RESEÑA



Nací el 19 de junio de 1986, en Santiago de Chile. Cursé mi enseñanza básica y media en el Colegio Parroquial San Miguel.

Luego de meditar por largo tiempo decidí postular a la carrera de Química Ambiental de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile donde procedí con mis estudios.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quiero agradecer al Instituto Nacional de Hidráulica por permitirme realizar mi trabajo de tesis, muy especialmente al Sr. Julio Vallejos por su apoyo en este proceso.

Mis gratitudes también a las profesoras Sylvia Copaja, Irma Vila y Ximena Molina por sus correcciones, tiempo y conocimientos sobre el tema.

## RESUMEN

Un índice de calidad de agua (ICA), consiste básicamente en una expresión simple de una combinación más o menos compleja de un número de parámetros que puede ser representado por un número, un rango, una descripción verbal, un símbolo o un color.

El objetivo principal de este trabajo es estudiar diferentes Índices de calidad de agua aplicado en el río Lluta como una herramienta de evaluación de aguas superficiales continentales.

En el estudio se utilizaron las bases de dato de la Dirección General de Aguas (DGA) de las estaciones de calidad de agua del río Lluta tales como, Colpitas en Alcérreca, Caracarani en Alcérreca, Lluta en Tocontasi y Lluta en Panamerica.

Según la base de datos histórica de la zona se evidencia que la cantidad de boro y arsénico en el agua del río Lluta efectivamente sobrepasan la norma chilena de riego NCh 1333, siendo apta sólo para el riego de especies tolerantes a este ambiente.

Se aplicaron varios índices tales como el Índice simplificado de calidad de agua (ISQA) de España, CCME-WQI (Canadian Council of Ministers of the Environment – Water Quality Index) de Canadá y el índice de calidad de agua Cade-Idepe de Chile.

Se puede señalar que el índice de calidad de agua más adecuado para ser aplicado en el río Lluta es el CCME-WQI de Canadá. Presenta una estructura de cálculo que permite una evaluación más amplia e integral de la calidad del agua, ya que considera la variación en el tiempo y en el espacio. En su elaboración no se obliga a adoptar parámetros específicos para el cálculo, sino que deja abierta la elección de los mismos al buen juicio profesional y de acuerdo a la norma chilena vigente. Con esta flexibilidad

que da el índice es más fácil realizar un análisis en lugares donde las variables del monitoreo son acotadas.

## ABSTRACT

A water quality index, is basically a simple expression for a more or less complex number of parameters that can be represented by a number, a range, a verbal description, a symbol or a color combination.

The main objective of this study is to applicate different water quality indexes to Lluta river as a tool for the evaluation of surface water.

To this purpose data bases obtained from water quality stations Lluta of General Water Direction at Lluta river (Colpitas in Alcérreca, Caracarani in Alcérreca, Lluta in Tocontasi and Lluta in Panamerican) were used.

According to the historical database of the area it is evident that the amount of boron and arsenic in the Lluta river water actually exceeds the Chilean quality standard for irrigation (NCh 1333), being suitable only for irrigation of tolerant species in this environment.

Several water quality indexes were compared simplified index of water quality (ISQA) of Spain, CCME-WQI (Canadian Council of Ministers of the Environment - Water Quality Index) of Canada and the index of water quality Cade-Idepe of Chile, in order to find the most adequate for Lluta river.

The results show that the CCME-WQI Canada is better than other indexes as it presents a structure calculation that allows a wider, comprehensive evaluation of water quality, since it considers the variation in time and space. In its application it is not necessary to adopt specific parameters for calculation, but leaves open the choice of them to the good professional criteria and in agreement with the current Chilean

standard trial. With the flexibility given by the index it is easier to perform an analysis in areas where monitoring variables are bounded.



## ÍNDICE

<b>I</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1	<b>Antecedentes generales</b> .....	<b>8</b>
1.1.1	Descripción general .....	8
1.1.2	Población.....	9
1.1.3	Geografía física .....	10
1.1.4	Actividades económicas.....	11
1.1.5	Usos del agua .....	12
1.2	Características antrópicas de la cuenca.....	13
1.3	Calidad de agua del río Lluta .....	15
1.4	<b>Objetivo general</b> .....	<b>17</b>
1.5	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>17</b>
1.6	<b>Hipótesis</b> .....	<b>17</b>
<b>II</b>	<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>18</b>
2.1	Recopilación de antecedentes .....	18
2.2	Análisis histórico de la calidad de agua del río Lluta .....	19
2.3	Aplicación de los índices de calidad de agua para el río Lluta .....	19
2.3.1	ICA Cade-Idepe.....	19
2.3.2	CCME-WQI de Canadá.....	23
2.3.3	Índice simplificado de calidad de aguas (ISQA) .....	27

2.4	Análisis de las ventajas y limitaciones de los índices de calidad de agua aplicados.....	30
2.5	Selección de un índice de calidad de agua para el río Lluta.....	30
<b>III</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>31</b>
3.1	Análisis histórico de la calidad de agua del río Lluta.....	31
3.2	Aplicación de los índices de calidad de agua para el río Lluta .....	42
3.2.1	ICA Cade-Idepe.....	42
3.2.2	CCME-WQI de Canadá.....	45
3.2.3	Índice simplificado de calidad de aguas (ISQA).....	46
3.3	Análisis de las ventajas y limitaciones de los índices de calidad de agua aplicados.....	49
3.4	Selección de un índice de calidad de agua para el río Lluta.....	50
<b>IV</b>	<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>52</b>
4.1	Análisis histórico de la calidad de agua del río Lluta.....	52
4.2	Aplicación de los índices de calidad de agua para el río Lluta .....	53
4.2.1	ICA Cade-Idepe.....	54
4.2.2	CCME-WQI de Canadá.....	55
4.2.3	Índice simplificado de calidad de aguas (ISQA).....	56
<b>V</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>57</b>
<b>VI</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>58</b>
<b>VII</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>61</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Región de Arica y Parinacota. (DICTUC, 2008a) .....	9
Figura 2 Distribución de la demanda de agua superficial ( $m^3/s$ ) del río Lluta de los diferentes usuarios.....	13
Figura 3 Estaciones de calidad de agua en el río Lluta. (DICTUC, 2008c).....	15
Figura 4 Estaciones de calidad de agua de la DGA. (Modificado DICTUC 2008). .....	18
Figura 5 Descripción de un diagrama de cajas. (sitio web recursostic).....	32
Figura 6 Gráficos de caja de pH para las diferentes estaciones de calidad de agua. ..	33
Figura 7 Gráficos de caja de conductividad para las diferentes estaciones de calidad de agua.....	35
Figura 8 Gráficos de caja de oxígeno disuelto para las diferentes estaciones de calidad de agua.....	37
Figura 9 Gráficos de caja de boro para las diferentes estaciones de calidad de agua.	39
Figura 10 Gráficos de caja de arsénico para las diferentes estaciones de calidad de agua.....	41

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Índices de calidad del agua creados en el mundo. (García, 2012b)	4
Tabla 2	Continuación índices de calidad del agua creados en el mundo. (García, 2012c)	5
Tabla 3	Continuación índices de calidad del agua creados en el mundo. (García, 2012d)	6
Tabla 4	Continuación índices de calidad del agua creados en el mundo. (García, 2012e)	7
Tabla 5	Resultados censo preliminar realizado en 2012.	10
Tabla 6	Caudal por tipos de usos del agua (m <sup>3</sup> /s) para la cuenca del río Lluta.	13
Tabla 7	Definición de parámetros en ICA Cade-Idepe.	20
Tabla 8	Clasificación de la calidad del agua ICA Cade-Idepe.	23
Tabla 9	Categorías del índice de calidad de agua CCME.	27
Tabla 10	Clasificación de la calidad de agua según el índice ISQA.	29
Tabla 11	Índice de calidad de agua en la estación Caracarani en Alcérreca.	43
Tabla 12	Índice de calidad de agua en la estación Colpitas en Alcérreca.	43
Tabla 13	Índice de calidad de agua en la estación Lluta en Tocontasi.	44
Tabla 14	Índice de calidad de agua en la estación Lluta en Panamericana.	44
Tabla 15	Resumen de los resultados por estación ICA Cade-Idepe.	44
Tabla 16	Resultados obtenidos del índice CCME para cada estación de calidad de agua.	45
Tabla 17	Índice ISQA para la estación Colpitas en Alcérreca.	46
Tabla 18	Índice ISQA para la estación Caracarani en Alcérreca.	47
Tabla 19	Índice ISQA para la estación Lluta en Tocontasi.	47

Tabla 20 Índice ISQA para la estación Lluta en Panamericana. ....	48
Tabla 21 Resumen de los resultados ISQA por estación. ....	48
Tabla 22 Ventajas y limitaciones de los índices de calidad de agua aplicados. ....	49
Tabla 23 Continuación tabla ventajas y limitaciones de los índices de calidad de agua aplicados .....	50

## I INTRODUCCIÓN

La calidad del agua se refiere a las características físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de aguas superficiales y subterráneas. Estas características afectan la capacidad del agua para sustentar tanto a las comunidades humanas como la vida vegetal y animal (sitio web cec).

Algunos sistemas hidrográficos chilenos se caracterizan por el reducido tamaño de las cuencas y el corto recorrido y fuerte pendientes de los ríos. Estas características contribuyen a que los problemas de contaminación tengan un ámbito espacial más reducido y favorezcan los procesos de auto purificación de los cauces. Sin embargo, desde la región metropolitana al norte, la escasa disponibilidad de las aguas y la alta magnitud relativa de las extracciones, determina que la capacidad de dilución de contaminantes sea baja y que se tenga una mayor vulnerabilidad frente a los procesos de contaminación (Peña y Salazar, 1993).

La grave sequía y la mala calidad del agua afecta principalmente al norte de Chile (Gobierno de Chile, 2013) debido a la falta de lluvias, el sobre otorgamiento de derechos de agua y mineras, tienen al norte de Chile en una muy difícil situación. La región de Arica y Parinacota presenta serios problemas en la calidad de agua con altos valores de boro, arsénico y otros metales debido a la presencia de salares, suelos salinos y bajas precipitaciones que no permiten una dilución de los contaminantes aguas abajo, concentrándose debido a la alta evaporación sufrida en el segmento (Cade-Idepe y DGA, 2004a).

Para evaluar la calidad de agua tradicionalmente se ha utilizado una gran variedad de parámetros fisicoquímicos (como pH, conductividad, temperatura, oxígeno disuelto,

composición química del agua, entre otros) que expresan las propiedades del agua y cómo éstas afectan la capacidad de ser utilizada para satisfacer distintos usos. Los parámetros físico-químicos dan una información extensa de la naturaleza de las especies químicas del agua y sus propiedades físicas (Orozco y col, 2005a). La ventaja de los métodos físico-químicos se basa en que sus análisis suelen ser más rápidos y pueden ser monitoreados con mayor frecuencia.

Independiente del tipo de parámetros usados en el monitoreo de una estación de calidad, siempre se genera un gran número de datos, que requieren de un tratamiento e interpretación adecuada (Samboni y col, 2007).

Inicialmente el objetivo de los análisis de la calidad del agua estaban destinados a acotar una serie de parámetros físicos y químicos identificados en función de su capacidad para afectar a los distintos usos antrópicos, con especial atención a aquellos relacionados con propiedades que podían suponer un claro riesgo para la salud de las personas. Posteriormente se generó la necesidad de evaluar también cómo ciertos tipos de contaminación afectaban a la estructura y funcionamiento de los ecosistemas asociados a los cursos de agua (sitio web magrama).

Fue en 1965 cuando Horton propuso el primer índice para evaluar la calidad de las agua. Un índice de calidad de agua, consiste básicamente en una expresión simple de una combinación más o menos compleja de un número de parámetros, los cuales sirven como una medida de la calidad de agua. El índice puede ser representado por un número, un rango, una descripción verbal, un símbolo o un color (U. de Pamplona, 2010).

Posteriormente se ha propuesto una gran variedad de índices como intento por presentar un único dato que agrupe la gran variedad de parámetros existentes para determinar la calidad del agua (sitio web magrama). Su ventaja radica en que la información puede ser más fácilmente interpretada que una lista de valores numéricos. Consecuentemente, un índice de calidad de agua es una herramienta comunicativa para transmitir información. Los usuarios de esta información pueden estar estrechamente relacionados, como: biólogos, ingenieros sanitarios y ambientales, administradores de recursos hídricos; o en su defecto personas apenas familiarizados con la misma, como el caso de los usuarios, abogados y público en general; sin embargo, unos y otros podrán rápidamente tener una idea clara de la situación que expresa el índice tales como contaminación excesiva, media o inexistente, entre otras, de fácil comprensión.

Diversos países han desarrollado distintos índices de calidad de agua para caracterizar los cuerpos de agua superficial presentes en su territorio. Muchos de estos índices, a pesar de haber sido desarrollados para las condiciones propias de una región o un país, han sido ampliamente utilizados en el mundo y validados en diferentes estudios.

A partir de estos, varios autores y entidades de control ambiental han realizado modificaciones para adaptarlos a las condiciones específicas de diferentes ecosistemas hídricos. En la siguiente tabla se muestran los distintos índices de calidad de agua creados en diversas partes del mundo. En ella, además, se detalla la metodología utilizada, con sus respectivos parámetros, rangos de calidad (valores de calidad que otorga cada país) y metodología (García, 2012a).



**Tabla 1 Índices de calidad del agua creados en el mundo. (García, 2012b)**

Año	Índice	País	N°Variables	Parámetros	Metodología	Rango de calidad
	Idaho	Estados Unidos	5	OD, turbiedad, fosfatos totales, coliformes fecales y CE.	Agregación: Ecuación logarítmica.	Valores de 0 a 3 distribuidos en 3 rangos de clasificación.
1970	WQI NSF	Estados Unidos	9	T°, pH, OD, DBO, SDT, turbiedad, coliformes fecales, nitratos y fosfatos totales.	Subíndice: Curvas de calidad	Valores de 0 a 100 distribuidos en 5 rangos de clasificación.
					Agregación: Promedio ponderado (aritmético o geométrico)	
1975	IQA CETESB	Brasil	9	T°, pH, OD, DBO, SDT, turbiedad, coliformes fecales, nitrógeno total y fósforo total.	Subíndice: Curvas de calidad.	Valores de 0 a 100 distribuidos en 5 rangos de clasificación.
					Agregación: Promedio geométrico ponderado.	
1980	Oregon	Estados Unidos	8	T°, pH, OD, DQO, ST, nitratos y amonio, fósforo total y coliformes fecales	Subíndice: Curvas y Ecuaciones.	Valores de 0 a 100 distribuidos en 5 rangos de clasificación.
					Agregación: Promedio armónico cuadrado no ponderado.	
1981	ICG	España	23	Básicos: OD, DQO, DBO, SST, nitratos, pH, CE, coliformes fecales y fosfatos totales	Subíndice: Curvas de calidad.	Valores de 0 a 100 distribuidos en 5 rangos de clasificación.
				Complementarios: cloruros, sulfatos, detergentes, cianuros, fenoles, cromo hexavalente, Ca, Mg, Na, Cd, Cu, Hg, Pb, Zn.	Agregación: Promedio aritmético ponderado	

**Tabla 2 Continuación índices de calidad del agua creados en el mundo. (García, 2012c)**

Año	Índice	País	N°Variables	Parámetros	Metodología	Rango de calidad
1982	ISQA	España	5	T°, OD, DQO, SST y CE	Subíndice: Ecuaciones	Valores de 0 a 100 distribuidos en 5 rangos de clasificación de acuerdo a 6 usos del agua.
					Agregación: Sumatoria	
1987	Dinius	Estados Unidos	12	T°, pH, OD, DBO, color, CE, nitratos, alcalinidad, dureza, cloruros, coliformes totales y fecales.	Subíndice: Ecuación.	Valores de 0 a 100 distribuidos en 6 rangos de clasificación de acuerdo a los 5 usos del agua.
					Agregación: Promedio geométrico ponderado.	
1991	Rojas	Colombia	6	pH, OD, DBO, SDT, turbiedad y coliformes fecales.	Subíndice: Curvas de calidad.	Valores de 0 a 100 distribuidos en 5 rangos de clasificación.
					Agregación: Promedio geométrico ponderado.	
1997	ICA Río Cali	Colombia	3	OD, DBO y coliformes fecales.	Subíndice: Curvas de Calidad.	Valores de 0 a 100 distribuidos en 5 rangos de clasificación.
					Agregación: Ecuación lineal con parámetros	
1997	Montoya	México	18	CE, pH, OD, DBO, ST, SST, nitratos, nitritos, amonios, turbiedad, color alcalinidad, dureza, cloruros, grasas y aceites, fosfatos, detergentes, coliformes totales y fecales.	Subíndice: Ecuaciones	Valores de 0 a 100 distribuidos en 5 rangos de clasificación de acuerdo a 5 usos del agua.
					Agregación: Promedio aritmético ponderado dividido por la sumatoria de los ponderadores.	

**Tabla 3 Continuación índices de calidad del agua creados en el mundo. (García, 2012d)**

Año	Índice	País	NºVariables	Parámetros	Metodología	Rango de calidad
1998	ICAOBJ	Chile	3	OD, DBO y coliformes fecales	Subíndice: Categorías de calidad.	Valores de 0 a 4 distribuidos en 4 rangos de clasificación.
					Agregación: Promedio aritmético ponderado.	
1998	León	México	15	T°, pH, OD, DBO, DQO, SST, nitratos amonios, fosfatos, alcalinidad, dureza, fenoles, cloruros, coliformes fecales y totales.	Subíndice: Ecuaciones	Valores de 0 a 100 distribuidos en 5 rangos de clasificación de acuerdo a 5 usos de agua.
					Agregación: promedio geométrico ponderado.	
2001	CCME WQI	Canadá		Se consideran las variables que son excedidas de acuerdo a la normativa del país.	Agregación: fórmula matemática compuesta de 3 factores (F1,F2,F3)	Valores de 0 a 100 distribuidos en 5 rangos de clasificación.
2002	IAP	Brasil	20	IQA CETESB: T°, pH, OD, DBO, SDT, turbiedad, coliformes fecales, nitrógeno total y fósforo total.	Agregación: Producto entre IQA e ISTO.	Valores de 0 a 100 distribuidos en 5 rangos de clasificación.
				ISTO: Cd, Hg, Pb, cromo total, Mn, Zn, Ni, PFTHM, Al, Cu y hierro disuelto.		
2003	ICA Cade-Idepe	Chile	6	Obligatorios: pH, OD,CE, coliformes fecales, DBO5 y SS.	Subíndice: Curvas de calidad.	Valores de 0 a 100 distribuidos en 4 rangos de clasificación.
				Relevantes: Todos aquellos que sobrepasen Clase Excedencia	Agregación: Promedio aritmético ponderado.	

**Tabla 4 Continuación índices de calidad del agua creados en el mundo. (García, 2012e)**

Año	Índice	País	N°Variables	Parámetros	Metodología	Rango de calidad
2004	ICAUCA	Colombia	10	pH, OD, color, turbiedad, DBO, nitrógeno total, fósforo total, ST, SST y coliformes fecales.	Subíndice: ecuaciones Agregación: Promedio geométrico ponderado.	Valores de 0 a 100 distribuidos en 5 rangos de clasificación.
2007	UWQI	Comunidad Europea	12	Cadmio, cianuro, mercurio, selenio, arsénico, fluoruro, nitratos, OD, DBO, fósforo total, pH y coliformes totales.	Subíndice: Ecuación. Agregación: Promedio aritmético ponderado.	Valores de 0 a 100 distribuidos en 5 rangos de clasificación.

Donde:

WQI - NSF: Water Quality Index – National Sanitation Foundation.

IQA – CETESB: Índice de Qualidade da Água – Companhia de Tecnologia Ambiental do Estado de Sao Paulo.

ICG: Índice de Calidad General.

ISQA: Índice Simplificado de Calidad del Agua.

ICAOBJ: Índice de Calidad del Agua Objetivo.

CCME – WQI: Canadian Council of Ministers of the Environment – Water Quality Index

IAP: Índice de qualidade da água para Abastecimento Público.

ICAUCA: Índice de Calidad del Agua adaptado al Río Cauca.

UWQI: Universal Water Quality Index.

En las tablas 1, 2, 3 y 4 es posible observar la diversidad de índices que ha sido creado en distintas partes del mundo a través del tiempo. Se aprecian claras diferencias en la metodología empleada por cada uno de los índices descritos, de acuerdo al objetivo de calidad que desea alcanzar.

## **1.1 Antecedentes generales**

Se realiza un estudio de caso en el río Lluta que se encuentra en la XV región de Arica y Parinacota, a través del proyecto Innova Chile Corfo 11BPC-10034 "Mejoramiento del sistema de gestión y control de los recursos hídricos asignados en el río Lluta y construcción de un modelo de operación hídrica de la cuenca" del Instituto Nacional de Hidráulica para analizar los datos de calidad de agua del lugar de estudio.

### **1.1.1 Descripción general**

La cuenca hidrográfica del Río Lluta está ubicada en la XV Región de Arica y Parinacota, en el extremo norte de Chile. Tiene su origen en la Cordillera de los Andes con una elevación entre los 4.000 y 5.000 msnm. Se extiende entre los paralelos 18°- 18°30' latitud sur y meridianos 70°20'- 69°22' longitud oeste. Cubre el territorio de las Provincias de Parinacota y Arica, siendo el poblado más importante la localidad de Putre.

La cuenca del río Lluta abarca una superficie de 3400 km<sup>2</sup> y una longitud de 147 km desde su origen hasta el mar (Niemeyer y Cereceda, 1983). Presenta un escurrimiento exorreico permanente y su cuenca se clasifica como cuenca pre andina (Errázuriz y col, 1998) y sus principales tributarios son el Río Azufre y las Quebradas de Caracarani, Colpitas y Socoroma (figura1).

El río Lluta desemboca aproximadamente 10 km al norte de la ciudad de Arica, donde existen diversas especies vegetales que conforman el humedal del río Lluta.

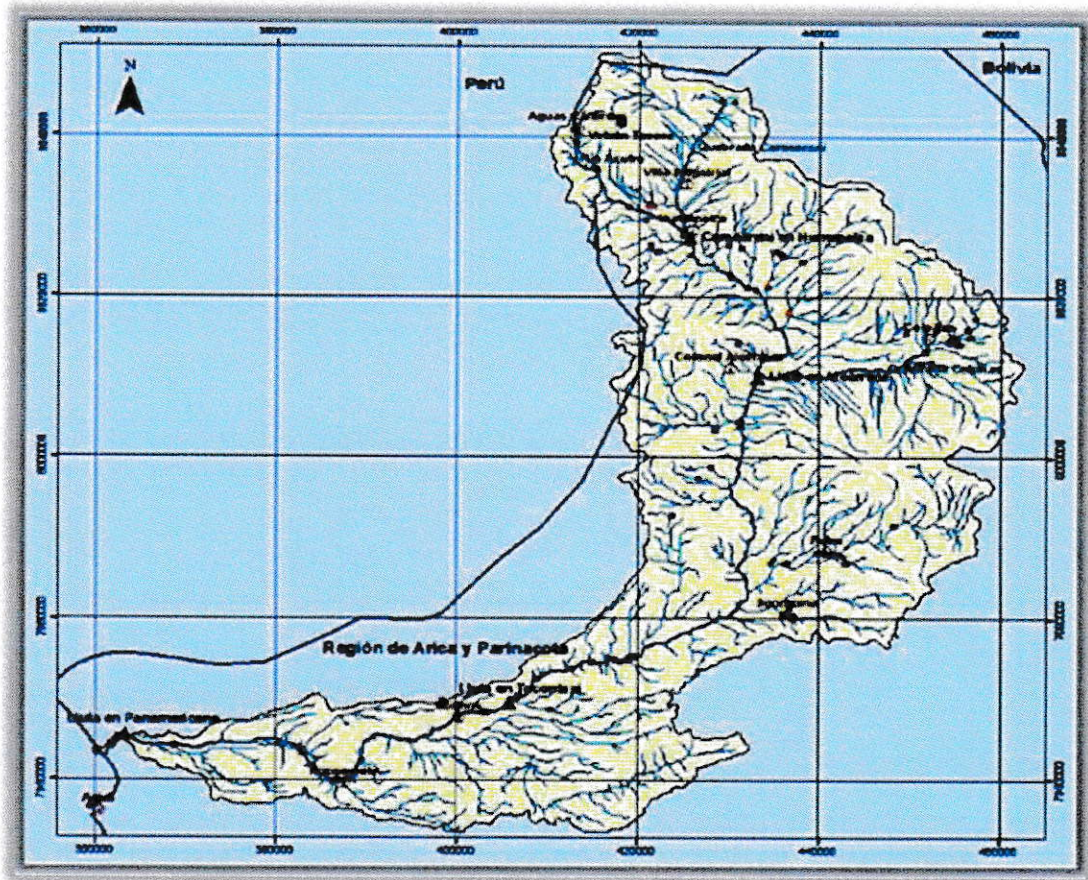


Figura 1 Región de Arica y Parinacota. (DICTUC, 2008a)

### 1.1.2 Población

La XV Región está compuesta por las provincias de Arica y Parinacota, siendo la capital regional la ciudad de Arica. La Región de Arica y Parinacota surgió tras ser segregada de la antigua Región de Tarapacá cuando entró en vigor la Ley N°20.175, el 8 de octubre de 2007.

En la siguiente tabla se muestra la cantidad de población existente en la XV región.

**Tabla 5 Resultados censo preliminar realizado en 2012.**

<b>Región</b>	<b>1982</b>	<b>1992</b>	<b>2002</b>	<b>2012 (preliminar)</b>
<b>XV de Arica y Parinacota (Habitantes)</b>	152406	172669	188463	213595

(INE, 2012)

### **1.1.3 Geografía física**

#### **1.1.3.1 Clima**

El mes más cálido en Arica tiene una temperatura media de 22,1°C y la del mes más frío es 15,8°C. El clima desértico normal se da desde el límite norte del país hasta Vallenar, con gran oscilación térmica diaria, escasas precipitaciones y cielos limpios con sequedad atmosférica, no presenta influencia del mar (R y Q Ingeniería, 2012a).

#### **1.1.3.2 Hidrografía**

El río Lluta nace a unos 3.900 m.s.n.m., en la convergencia de los ríos Azufre y Caracarani, cercano a la estación Humapalca del ferrocarril a Bolivia. En el curso superior y medio presenta los afluentes Colpitas y Putre, respectivamente. Presenta un sentido norte-sur hasta llegar a su confluencia con el río Putre, donde cambia su trazado en dirección hacia el suroeste, para luego llegar al sector de Poconchile donde se encuentra con el cordón montañoso de San Martín. En todo este tramo el río Lluta ha producido un valle bastante estrecho y profundo, el cual se encuentra limitado por vertientes bastantes abruptas y de gran altura (R y Q Ingeniería, 2012b).

En el tramo final el valle destaca por el desarrollo de amplias terrazas laterales de material fluvial que se proyectan a ambos lados del cauce principal, en donde se ha implementado una importante actividad agrícola.

### **1.1.3.3 Geología**

El volcán Tacora, clasificado como volcán activo, con estructura de estratovolcán del tipo fumarólica y ubicado en 17° 43' S 69° 46' W, influye en la calidad del agua del río Azufre, el que confiere al río Lluta, su característica de alto contenido de azufre, pH bajo y metales disueltos. Además, la presencia de formaciones de andesita (de potencial de generación ácido) aguas abajo de la junta con la Quebrada Caracarani, disminuye aún más el pH. Posteriormente, la presencia de calcita tiende a amortiguar el pH. Aguas abajo de la Quebrada Colpitas, se encuentran rocas andesíticas y volcánicas que inciden nuevamente en la calidad de las aguas del río (aumentando su acidez). Su desembocadura, está condicionada por la presencia de rocas carbonatadas, las que tienden a amortiguar el pH (Cade-Idepe y DGA, 2004b).

### **1.1.3.4 Hidrogeología**

Los acuíferos presentes en el valle son dos, uno en la parte altiplánica y otro en la zona baja del valle (entre Rosario y la Costa). En la parte alta de la cuenca, existen acuíferos poco explorados ubicados aproximadamente en la parte alta del río Caracarani y río Colpitas (R y Q Ingeniería, 2012c).

### **1.1.4 Actividades económicas**

En la cuenca del río Lluta las actividades económicas que se llevan a cabo son: el turismo, servicios y comercio (Putre), agricultura en la parte baja de la cuenca y cierta actividad minera, principalmente por la Sociedad Legal Minera Macarena y Química e Industrial del Borax Ltda.

En el río Lluta, desde el inicio del valle hasta su desembocadura en el océano pacífico se identificaron trabajos de encauzamiento y estabilización de riberas. Aguas abajo de



la localidad de Linderos se detectaron actividades de la industria agrícola. En el tramo medio y final del río Lluta se pudo apreciar asentamientos humanos cercanos al cauce (R y Q Ingeniería, 2012d).

#### **1.1.5 Usos del agua**

Dadas las condiciones de aridez y de contaminantes naturales del río, las actividades productivas están restringidas a aquellas que puedan adaptarse a dichas características, como el cultivo de especies agrícolas resistentes, la extracción de minerales, turismo y servicios.

Existen 33 asentamientos humanos en esta cuenca, todas localidades rurales. El asentamiento más importante de la cuenca es Putre, donde se concentra prácticamente la totalidad del uso doméstico del agua de la cuenca, y es la única que cuenta con servicio de agua potable y alcantarillado proveniente de la red pública. Para 1996 esta localidad demandaba 0,46 L/s obtenidos en forma subterránea, considerando sólo el sector residencial (Cade-Idepe y DGA, 2004c).

La Empresa de Servicios Sanitarios de Tarapacá S.A. también ocupa aguas subterráneas de la cuenca del río Lluta, a través de la extracción de pozos ubicados a lo largo del río, en el sector más cercano al mar, después de lo cual la aguas son desalinizadas y usadas para abastecer las demandas de agua potable de parte de la población de Arica. Según los registros de derechos otorgados de la DGA (DICTUC, 2008b), esta empresa cuenta con un caudal otorgado de 278 L/s.

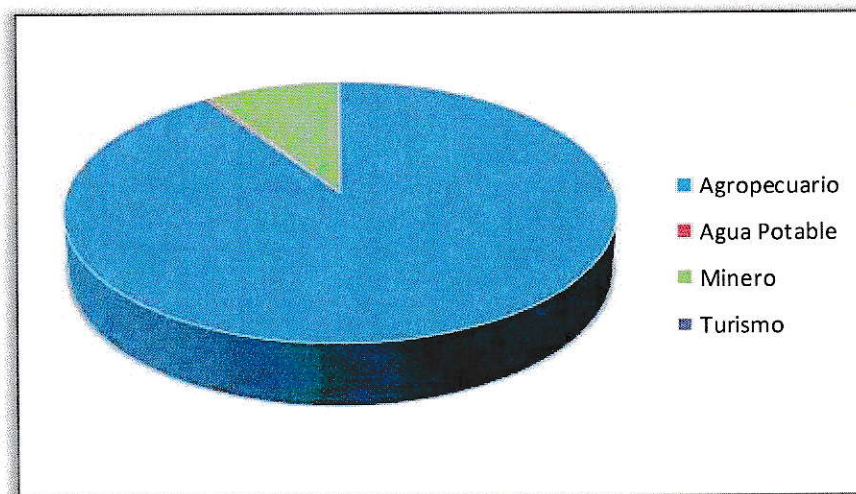
Otros usos del agua identificados por Cade- Idepe son: biodiversidad, representado por el Parque Nacional Lauca, y usos ancestrales.

La información disponible más reciente sobre uso del agua es la generada por el estudio del 2007 encargado por la DGA a los Ingenieros Consultores Ayala, Cabrera y Asociados Ltda., cuyos resultados se muestran en la tabla 6 y figura 2. A partir de estos valores es posible visualizar que el uso agrícola es el más importante de la cuenca.

**Tabla 6 Caudal por tipos de usos del agua (m<sup>3</sup> /s) para la cuenca del río Lluta.**

Caudal por uso del agua (m <sup>3</sup> /s)			
Agropecuario	Agua Potable	Minero	Turismo
2,142	0,007	0,209	0,002

(Ayala, Cabrera y Asociados Ltda, 2007)



**Figura 2 Distribución de la demanda de agua superficial (m<sup>3</sup>/s) del río Lluta de los diferentes usuarios.**

### 1.2 Características antrópicas de la cuenca

La cuenca del río Lluta prácticamente no tiene intervención humana. Según el catastro de fuentes controladas publicado por la superintendencia de servicios sanitarios con

respecto al cumplimiento del DS.90 o del DS.46, no hay establecimientos industriales que viertan sus riles al Río Lluta. Se han identificado sólo dos descargas antrópicas puntuales (R y Q Ingeniería, 2012e):

- Descarga de aguas servidas de la localidad de Putre

El caudal estimado de esta descarga es de 24 L/día. Los parámetros microbiológicos junto con lo observado en terreno indican que la contaminación orgánica es baja. El impacto de esta descarga en el río Lluta es muy pequeño, debido a que hay alrededor de 6 km antes de que la quebrada descargue en el río Lluta.

- Descarga de Ril de planta desalinizadora Desalari

Según la Declaración de Impacto Ambiental de “Aguas de Descarte en el curso bajo del Río Lluta” del proyecto “Ampliación de la Capacidad de Producción de Agua Potable en Arica; Captaciones Costeras Sondajes Lluta Bajo y Planta Desalinizadora” de la empresa de servicios sanitarios de Tarapacá, ESSAT S.A, la descarga de aguas residuales de la planta desalinizadora se realiza directamente al mar. El caudal de descarga promedio es de 80 L/s (ESSAT, 1998).

Otras fuentes de contaminación que se constataron en terreno fueron (INH, 2012):

- Trabajos de encauzamiento y estabilización de riberas: esta actividad genera un aumento de sólidos suspendidos en el río y supone algún grado de contaminación de aguas con aceites y grasas, producto de los movimientos de sustratos y el ingreso de maquinaria al cauce.
- Presencia de la industria agrícola: representa un riesgo de contaminación en las aguas por introducción de contaminantes, como pesticidas y herbicidas.

- Asentamientos humanos: la presencia de estas localidades siempre implica un riesgo de contaminación de aguas por residuos domiciliarios.

### 1.3 Calidad de agua del río Lluta

Para el monitoreo del río Lluta, existen actualmente 4 estaciones de calidad de agua de la DGA: Colpitas en Alcérreca, Caracarani en Alcérreca, Lluta en Tocontasi y Lluta en Panamericana.

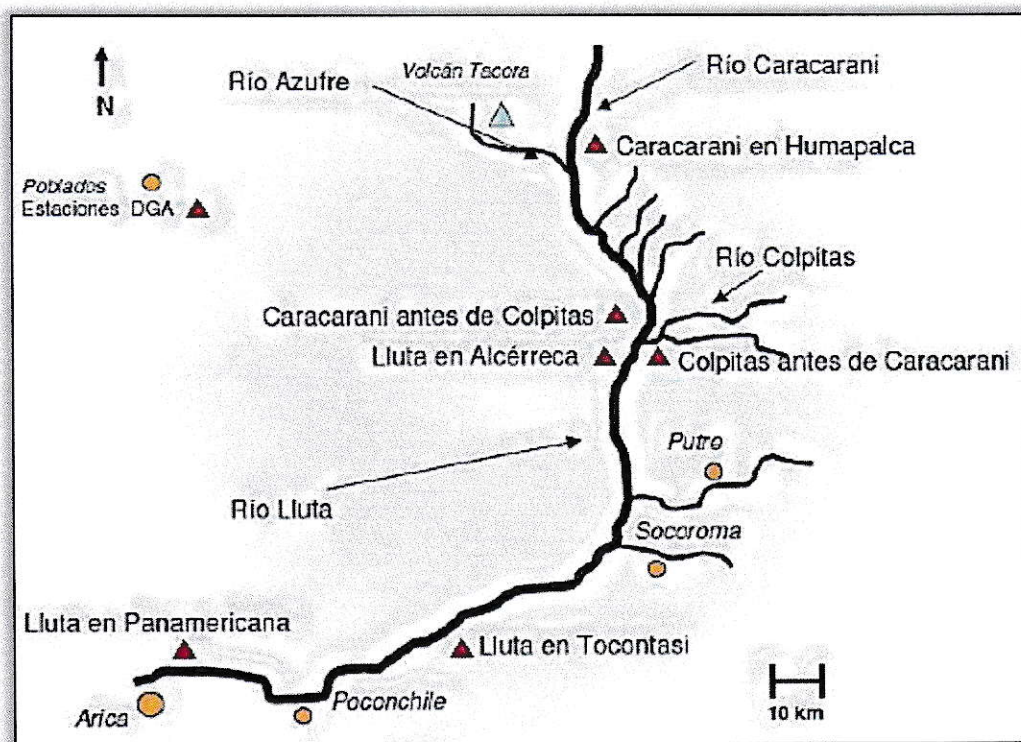


Figura 3 Estaciones de calidad de agua en el río Lluta. (DICTUC, 2008c)

La calidad natural del agua superficial de la cuenca está regulada por procesos naturales, influenciada fuertemente por las siguientes características que explican la situación actual del río Lluta y sus tributarios (DEP, 2010):

- En general, la calidad natural del río es clasificada (División de Estudios y Planificación) como de regular a mala calidad, donde exceden la clase de excepción de boro, arsénico, oxígeno disuelto, pH, cobre, aluminio, hierro, cromo, manganeso, conductividad eléctrica, sulfatos, zinc, cloruros y plomo.
- La parte alta de la cuenca está influenciada fuertemente por los factores volcánicos y los salares.
- La parte media y baja está influenciada por los efectos del suelo salino dado por la alta concentración de nitrato de sodio y otros compuestos en la cuenca.

De acuerdo a estas características, el río Lluta y sus principales tributarios tienen una evidente contaminación de origen natural en que prevalecen altos valores de boro, arsénico, compuestos inorgánicos y metales debido a la presencia de salares, suelos salinos y bajas precipitaciones que no permiten una dilución de los contaminantes aguas abajo.

El principal contaminante es el boro, que es atribuible a la presencia de depósitos salinos como boratos, abundantes en el norte de Chile. La NCh 1333 establece una tolerancia oficial para aguas de riego de 0,75 mg de B/L de agua, y en el agua del Lluta hay un valor promedio aproximado e histórico de 10 mg/L (JICA, 1995). No menor son los valores de arsénico procedentes de la campaña de monitoreo de la DGA y que presentan rangos entre los 0,1 mg/L a 0,6 mg/l y la NCh 1333 establece una tolerancia máxima para aguas de riego 0,1 mg de As/L de agua (Cade-Idepe y DGA, 2004d).

Para este trabajo se seleccionarán tres diferentes índices de calidad de agua, donde los objetivos son los siguientes:

#### **1.4 Objetivo general**

- ✓ Estudiar diferentes Índices de calidad de agua para el río Lluta como herramienta para la evaluación de aguas superficiales.

#### **1.5 Objetivos específicos**

- ✓ Determinar la calidad histórica de agua del río Lluta mediante un análisis de distribución con datos otorgados por la DGA.
- ✓ Aplicar tres diferentes índices de calidad de agua para el río Lluta.
- ✓ Analizar las ventajas y limitaciones de los índices de calidad de agua aplicados.
- ✓ Seleccionar el índice de calidad de agua más adecuado para aplicar en el río Lluta.

#### **1.6 Hipótesis**

El índice de calidad de agua (ICA) es una herramienta eficaz para evaluar la calidad de aguas superficiales.

## II METODOLOGÍA

### 2.1 Recopilación de antecedentes

Para el análisis de calidad de la cuenca del río Lluta se utilizó la información otorgada por la DGA de Arica. La información pertenece a las estaciones de calidad de agua Colpitas en Alcérreca, Caracarani en Alcérreca, Lluta en Tocontasi y Lluta en Panamericana (figura 4). Además es muy importante mencionar que los análisis que se realizaron de acuerdo a la calidad de agua de riego. Esto es porque como mencionamos en la sección anterior el uso del agua del río Lluta es en casi su totalidad destinada para uso agrícola.

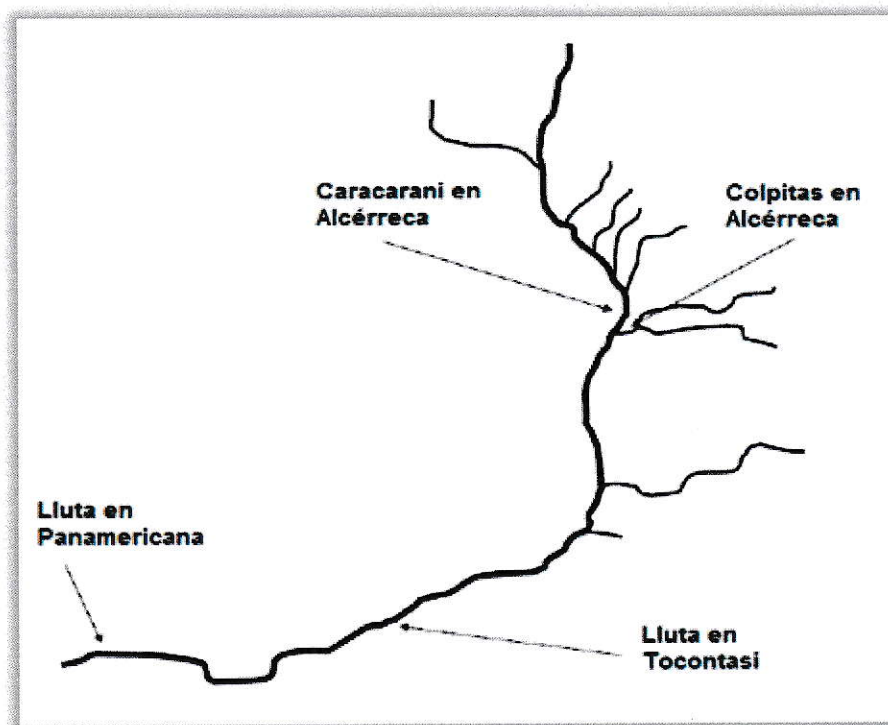


Figura 4 Estaciones de calidad de agua de la DGA. (Modificado DICTUC 2008).

## **2.2 Análisis histórico de la calidad de agua del río Lluta**

Para el análisis histórico se utilizaron los datos otorgados por la DGA de las estaciones Colpitas en Alcérreca (1980-2012), Cararcarani en Alcérreca (1980-2012), Lluta en Panamericana (1980-2012) y Lluta en Tocontasi (2010-2012). Luego a partir de estos datos se realizó un análisis de diagramas de caja para cada estación de calidad en el software estadístico Minitab y se comparó con la norma chilena de riego 1333.

## **2.3 Aplicación de los índices de calidad de agua para el río Lluta**

De los ICAS mencionados en las tablas 1, 2, 3 y 4 sólo se utilizaron tres para realizar una mejor comparación. Se calculó el ICA Cade-Idepe, CCME-WQI de Canadá y el índice simplificado de calidad de aguas ISQA de España ya que estos tres presentan diferente estructura de cálculo lo cual hizo más interesante el análisis. Esto se realizó con los datos otorgados por la DGA de las estaciones de calidad de aguas ya mencionadas.

Es muy importante destacar que por la falta de medición de parámetros químicos y la poca periodicidad de los muestreos no fue posible realizar un análisis estadístico para reducir las variables, al contrario como la cantidad de mediciones otorgadas por la DGA fue más bien escasa se tuvo que rescatar al máximo la información.

### **2.3.1 ICA Cade-Idepe**

La consultora Cade Idepe, en su estudio "Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad" (2005), definió un ICA representativo a la situación de Chile basado en el método del índice de calidad de agua de la NSF (National Science Foundation) de los Estados Unidos.



El índice propuesto por Cade-Idepe incluye parámetros seleccionados como obligatorios que son algunos de los de mayor ponderación en la metodología del WQI. Adicionalmente se seleccionó parámetros definidos como relevantes, que presentan excedencia con respecto a la clase de excepción definida en la guía Conama para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas (CONAMA, 2004). Estos deben ser distintos de los obligatorios y su número es variable para cada cuenca.

En la tabla 7 se presentan los parámetros seleccionados como obligatorios y las características que deben cumplir los parámetros seleccionados como relevantes.

**Tabla 7 Definición de parámetros en ICA Cade-Idepe.**

<b>Parámetros Obligatorios</b>	<b>Parámetros Relevantes</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Oxígeno Disuelto (OD)</li> <li>-pH</li> <li>-Conductividad eléctrica (CE)</li> <li>-Coliformes fecales (CF)</li> <li>-Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)</li> <li>-Sólidos Suspendidos (SS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Los que excedan la clase excepción de la cuenca de en estudio.</li> </ul>

(Cade-Idepe y DGA, 2004e)

Esta selección de parámetros obedece a las características que presenta la calidad de agua en cada cuenca, de tal modo que el índice que se propone representa una forma integral de observar la calidad del agua.

En el anexo B se presenta los valores establecidos en la clase de excepción por la guía Conama para cada parámetro de calidad. A partir de los valores establecidos en esta tabla es posible definir aquellos parámetros considerados como relevantes para cada cuenca en estudio y que forman parte de la selección de variables incluidas en el ICA.

Es importante destacar que la guía Conama es un documento referencial no oficial que actualmente no es utilizado por el Ministerio del Medio Ambiente.

Existen variadas formas de integrar los diferentes parámetros considerados dentro de un ICA. La forma más simple de integrar estos parámetros es por una media aritmética ponderada según su importancia, tal como muestra la ecuación 1.

$$ICAS = \sum_{i=1}^n w_i * Q_i \quad \text{Ec 1}$$

En donde:

$w_i$ : Corresponde a la ponderación o peso de los parámetros que componen el ICA, sabiendo que los obligatorios en conjunto pesan 70% y que los relevantes o principales pesan en conjunto 30%.

$Q_i$ : Corresponde a la estandarización de los valores de los parámetros; se lee de las curvas adjuntas en la metodología.

Además, los factores de ponderación deben cumplir con la restricción que muestra la ecuación 2.

$$\sum_i^n w_i = 1 \quad \text{Ec 2}$$

- **Ponderación de parámetros**

El índice de calidad de aguas propuesto por Cade-Idepe 2004 considera 6 parámetros que son obligatorios y que ponderan el 70% del índice. El restante 30% incluye los parámetros seleccionados como relevantes y que corresponden a aquellos que en algún momento o estación de calidad no cumplen con la clase excepcional definida en la guía de Conama.

Los ponderadores o pesos ( $w_i$ ), se seleccionan según los siguientes criterios:

- Los seis parámetros obligatorios pesan cada uno  $w_i = 11,67\%$  con  $i=1\dots6$ , con una ponderación total de 70%.
- Los parámetros relevantes pesan en total 30%, que se reparte en ponderaciones iguales para cada uno de ellos, es decir si son 10 parámetros se tendrán pesos individuales de  $w_i = 3\%$  para  $i=1\dots10$ .

- **Normalización de parámetros**

Para disponer de escalas porcentuales normalizadas, Cade-Idepe consideró como referencia el sistema elaborado por la NSF en su índice WQI, el cual se basa en curvas de estandarización que relacionan los valores físicos de los parámetros con una escala porcentual. Esto quiere decir que Cade-Idepe utilizó la guía de la Conama tomando los valores de las clases excepción, la clase 1, la clase 2 y la clase 3 y las graficó otorgándole un valor de 0 a 100. Por ejemplo en el anexo B (guía Conama clase excepción) la conductividad va de  $600 \mu\text{S/cm}$  (clase excepción) a  $2250 \mu\text{S/cm}$  (clase 3) que se muestra en el anexo C. Esta curva de estandarización da una función polinómica la cual sirve para otorgar el valor correspondiente de conductividad. Si la conductividad es mayor de  $600 \mu\text{S/cm}$  el valor es 100, por el contrario si la conductividad está por debajo de los  $2300 \mu\text{S/cm}$  el valor 0. El resto de las conductividades correspondería al valor que indique la curva. En el anexo D hay un ejemplo de cálculo.

Las curvas de estandarización utilizadas representan la relación entre el valor medido de un parámetro de calidad de agua y su correspondiente asignación de clase de acuerdo a los valores establecidos en la Guía Conama. Cada curva tiene, en la abscisa

el rango de concentración, y en la ordenada, el puntaje de 0 a 100 correspondiente al valor del parámetro en forma porcentual (Qi). Estas curvas se encuentran en el anexo C.

- **Rangos de calidad**

El ICAS chileno variará entre cero y cien, siendo cero un agua de mala calidad, mientras que un valor cercano a cien representa un agua de muy buena calidad o excelente. El rango del ICA puede ser asimilado a una escala nominal cualitativa que refleja globalmente la calidad del agua. En la tabla 8 se aprecia los rangos utilizados para clasificar la calidad del recurso.

**Tabla 8 Clasificación de la calidad del agua ICA Cade-Idepe.**

Rango	Calidad
90-100	Excelente-Muy Buena
70-90	Buena
50-70	Regular
25-50	Mala

(Cade-Idepe y DGA, 2004f)

### 2.3.2 CCME-WQI de Canadá

El Índice de calidad CCME-WQI (Canadian Council of Ministers of the Environment – Water Quality Index) del agua es una herramienta para proporcionar procedimientos consistentes para las jurisdicciones canadienses que reportan información sobre la calidad del agua.

El cuerpo de agua al que se le aplicará el índice puede estar definido por un punto de muestreo o por varios. Con un solo punto se obtendrán buenos resultados si se cuenta con suficientes datos para el mismo. Entre más puntos se incluyan, más general será

la conclusión a la que se llegue, aunque se perderá la información de la posible variabilidad entre dichos puntos.

El período de tiempo escogido dependerá de la cantidad de datos disponible y de los requerimientos del usuario. Usualmente se emplea un período mínimo de un año debido a que los datos sobre un cuerpo de agua se colectan para cubrir este espacio de tiempo. Se pueden combinar datos de años diferentes, especialmente cuando la información en cierto año está incompleta, pero al igual que con los puntos de muestreo se perderá información sobre la variabilidad. En este caso como la cantidad de datos otorgados por la DGA es escasa (de 1 a 3 muestras por año) se utilizarán los datos históricos de cada estación de calidad.

Aunque no se especifica un número máximo de parámetros, es recomendable que para el cálculo del índice se empleen como mínimo cuatro parámetros del que se tengan al menos cuatro valores (4 muestreos). La selección de los parámetros es crítica para garantizar que el índice nos dé una información acertada del sistema que se estudia. En este análisis se ocuparon cuatro parámetros: pH, conductividad, boro y arsénico que son los únicos datos que se tienen en todas las estaciones. Estos parámetros fueron comparados con la NCh 1333 de riego, ya que este índice tiene la flexibilidad de adecuarse a las normas del lugar que se está analizando.

Para el cálculo del índice son necesarios tres factores (Rojas y col, 2009a):

F1 (alcance) representa el porcentaje de parámetros que no cumplen con lo normado ("parámetros fallidos"), al menos una vez en el periodo que se analiza, con respecto al número total de parámetros:

$$F1 = \left( \frac{\text{parámetros fallidos}}{\text{total de parámetros}} \right) * 100 \quad \text{Ec 3}$$

F2 (frecuencia) representa el porcentaje de ensayos individuales que dieron resultados diferentes a lo normado (ensayos fallidos) del total de ensayos que se realizaron. Con ensayos se refiere a análisis de laboratorio que se realizan para cada parámetro.

$$F2 = \left( \frac{\text{ensayos fallidos}}{\text{total de ensayos}} \right) * 100 \quad \text{Ec 4}$$

F3 (amplitud) representa cuan diferente dio el resultado del ensayo con respecto al valor establecido.

Este factor se calcula en tres etapas:

1. El número de veces por el cual cada valor fallido es mayor (o menor, en el caso de que lo normado sea un valor mínimo) que el valor establecido se denomina "excursión". En el caso de que el valor calculado no deba exceder lo normado se calcula de la siguiente forma:

$$\text{excursión}_i = \left( \frac{\text{valor fallido}_i}{\text{valor normado}_j} \right) - 1 \quad \text{Ec 5}$$

En el caso de que el valor calculado no deba ser menor que lo normado se calcula de la siguiente forma:

$$\text{excursión}_i = \left( \frac{\text{valor normado}_i}{\text{valor fallido}_j} \right) - 1 \quad \text{Ec 6}$$

2. A continuación se calcula la suma normalizada de las excursiones (nse, siglas en inglés), dividiendo la sumatoria de las excursiones entre el total de ensayos

realizados (tanto los que dieron valores que no cumplen con lo normado como aquellos que si cumplen):

$$\mathbf{nse} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{excursión}_i}{\text{total de ensayos}} \quad \mathbf{Ec 7}$$

3. Finalmente el factor F3 se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$\mathbf{F3} = \left( \frac{\mathbf{nse}}{0,01\mathbf{nse}+0,01} \right) \quad \mathbf{Ec 8}$$

Una vez que se tienen los tres factores, el índice puede calcularse, sumando los tres valores como si fueran vectores. La suma de los cuadrados de cada factor es igual al cuadrado del índice. Esta aproximación trata al índice como un espacio tridimensional donde los factores se colocan a lo largo de cada eje (x, y, z). Con este modelo, el índice cambia de manera directamente proporcional con los cambios que se produzcan en los valores de los factores.

$$\mathbf{CCME WQI} = 100 - \left( \frac{\sqrt{\mathbf{F1}^2 + \mathbf{F2}^2 + \mathbf{F3}^2}}{1,732} \right) \quad \mathbf{Ec 9}$$

El valor de 1.732 normaliza el resultado a un valor entre 0 y 100, donde 0 representa la “peor” calidad y 100 la “mejor” calidad de agua.

Existen cinco categorías y se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 9 Categorías del índice de calidad de agua CCME.**

Valor	Categoría	Característica
95-100	Excelente	La condición del recurso es casi igual a la de su estado natural, sin apenas deterioro de su calidad.
80-94	Buena	La condición del recurso es cercana a la de su estado natural o a lo deseado, el deterioro de su calidad es menor.
65-79	Regular	La condición del recurso a veces difiere de su estado natural o lo deseado, la calidad del agua esta ocasionalmente perjudicada.
45-64	Marginal	Condición del recurso en numerosas ocasiones difiere de su estado natural o lo deseado, la calidad se deteriora frecuentemente.
0-44	Pobre	La condición del recurso usualmente difiere de su estado natural o lo deseado, la calidad casi siempre está deteriorada.

(Rojas y col, 2009b)

### 2.3.3 Índice simplificado de calidad de aguas (ISQA)

Queralt en el año 1982 desarrolló el índice simplificado de calidad del agua (ISQA) para las cuencas de Cataluña (España), el cual se basó en 5 parámetros fisicoquímicos y planteó una clasificación de la calidad del agua para 6 usos específicos del recurso, entre los cuales se destaca el abastecimiento para consumo humano (sitio web miliarium).

Índice muy fácil de utilizar que proporciona una idea rápida e intuitiva de la calidad, se obtiene a partir de una sencilla fórmula que combina cinco parámetros fisicoquímicos:

$$ISQA = E * (A + B + C + D) \quad \text{Ec 10}$$

En donde:



- E: temperatura del agua (T °C). Puede tomar valores comprendidos entre 0,8 y 1 según:

$$E = 1 \quad \text{si } T \leq 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E = 1 - (T - 20) \cdot 0,0125 \quad \text{si } T > 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- A: demanda química orgánica según la oxidabilidad del permanganato (DQO-Mn en mg/L). Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 30 según:

$$A = 30 - \text{DQO-Mn} \quad \text{si } \text{DQO-Mn} \leq 10 \text{ mg/L}$$

$$A = 21 - (0,35 \cdot \text{DQO-Mn}) \quad \text{si } 60 \text{ mg/L} \geq \text{DQO-Mn} > 10 \text{ mg/L}$$

$$A = 0 \quad \text{si } \text{DQO-Mn} > 60 \text{ mg/L}$$

Tradicionalmente ésta ha sido la forma de obtener el parámetro A, pero a partir de 2003 se empezó a calcular mediante el carbono orgánico total (COT en mg/L), que también estima la cantidad de materia orgánica presente en el agua. En este caso el parámetro A puede tomar valores comprendidos entre 0 y 30 según:

$$A = 30 - \text{COT} \quad \text{si } \text{COT} \leq 5 \text{ mg/L}$$

$$A = 21 - (0,35 \cdot \text{COT}) \quad \text{si } 12 \text{ mg/L} \geq \text{COT} > 5 \text{ mg/L}$$

$$A = 0 \quad \text{si } \text{COT} > 12 \text{ mg/L}$$

- B: sólidos en suspensión totales (SST en mg/L). Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 25 según:

$$B = 25 - (0,15 \cdot \text{SST}) \quad \text{si } \text{SST} \leq 100 \text{ mg/L}$$

$$B = 17 - (0,07 \cdot SST) \quad \text{si } 250 \text{ mg/L} \geq SST > 100 \text{ mg/L}$$

$$B = 0 \quad \text{si } SST > 250 \text{ mg/L}$$

- C: oxígeno disuelto ( $O_2$  en mg/L). Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 25 según:

$$C = 2,5 \cdot O_2 \quad \text{si } O_2 < 10 \text{ mg/L}$$

$$C = 25 \quad \text{si } O_2 \geq 10 \text{ mg/L}$$

- D: conductividad (CE en  $\mu\text{S/cm}$  a 18 °C). Si la conductividad se mide a 25 °C, para obtener la conversión a 18 °C se multiplicará por 0,86. Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 20 según:

$$D = (3,6 - \log CE) \cdot 15,4 \quad \text{si } CE \leq 4000 \mu\text{S/cm}$$

$$D = 0 \quad \text{si } CE > 4000 \mu\text{S/cm}$$

Existen cuatro categorías dependiendo del valor obtenido, se observan en la siguiente tabla:

**Tabla 10 Clasificación de la calidad de agua según el índice ISQA**

Valor del Índice	Tipo de agua
76-100	Aguas claras sin aparente contaminación.
51-75	Ligero color del agua, con espumas y ligera turbidez del agua, no natural.
26-50	Apariencia de aguas contaminadas y de fuerte olor.
0-25	Aguas negras, con procesos de fermentación y olor.

(Sitio web mailxmail)

#### **2.4 Análisis de las ventajas y limitaciones de los índices de calidad de agua aplicados.**

De acuerdo a los resultados y metodología de la aplicación de los tres diferentes índices de calidad de agua del río Lluta se analizan las ventajas y limitaciones de éstos.

#### **2.5 Selección de un índice de calidad de agua para el río Lluta**

La selección del índice más adecuado para el río Lluta se realiza según las ventajas y limitaciones que presentan los índices de calidad de agua.

### III RESULTADOS

#### 3.1 Análisis histórico de la calidad de agua del río Lluta

Para una mejor visualización del panorama que presenta la cuenca del río Lluta se realizó un análisis histórico de las variables que tienen más datos en las estaciones de calidad y que afectan la calidad de agua para uso de riego en la agricultura. Los resultados siguientes incorporan un análisis de diagrama de caja de pH, conductividad, oxígeno disuelto, boro y arsénico. El resto de parámetros que mide la DGA no fueron incluidos en el análisis ya que se tenía escasa información. Solo se contaba con la información del resto de los elementos medidos por la DGA en la estación Lluta en Panamericana.

El diagrama de caja es una presentación visual que describe al mismo tiempo varias características importantes de un conjunto de datos, tales como el centro, la dispersión, la simetría o asimetría y la identificación de observaciones atípicas (León, 2012).

Un diagrama de caja, también llamado diagrama de caja y bigotes, está formado por un rectángulo, la caja, y dos segmentos, los bigotes, uno a cada lado del rectángulo. La caja abarca el recorrido intercuartílico, que es el intervalo comprendido entre el primer cuartil  $q_1$  y el tercer cuartil  $q_3$ . Dentro de la caja se representa con un segmento la mediana de la distribución. El bigote izquierdo queda determinado por el valor mínimo y el primer cuartil y el derecho por el tercer cuartil y el valor máximo, excepto si existen valores atípicos (sitio web recursostic).

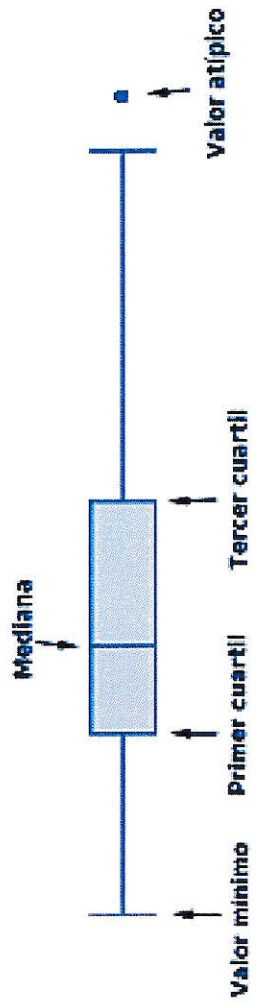


Figura 5 Descripción de un diagrama de cajas. (sitio web recursostic)

- pH

Los datos informados por la DGA se muestran en las siguientes figuras.

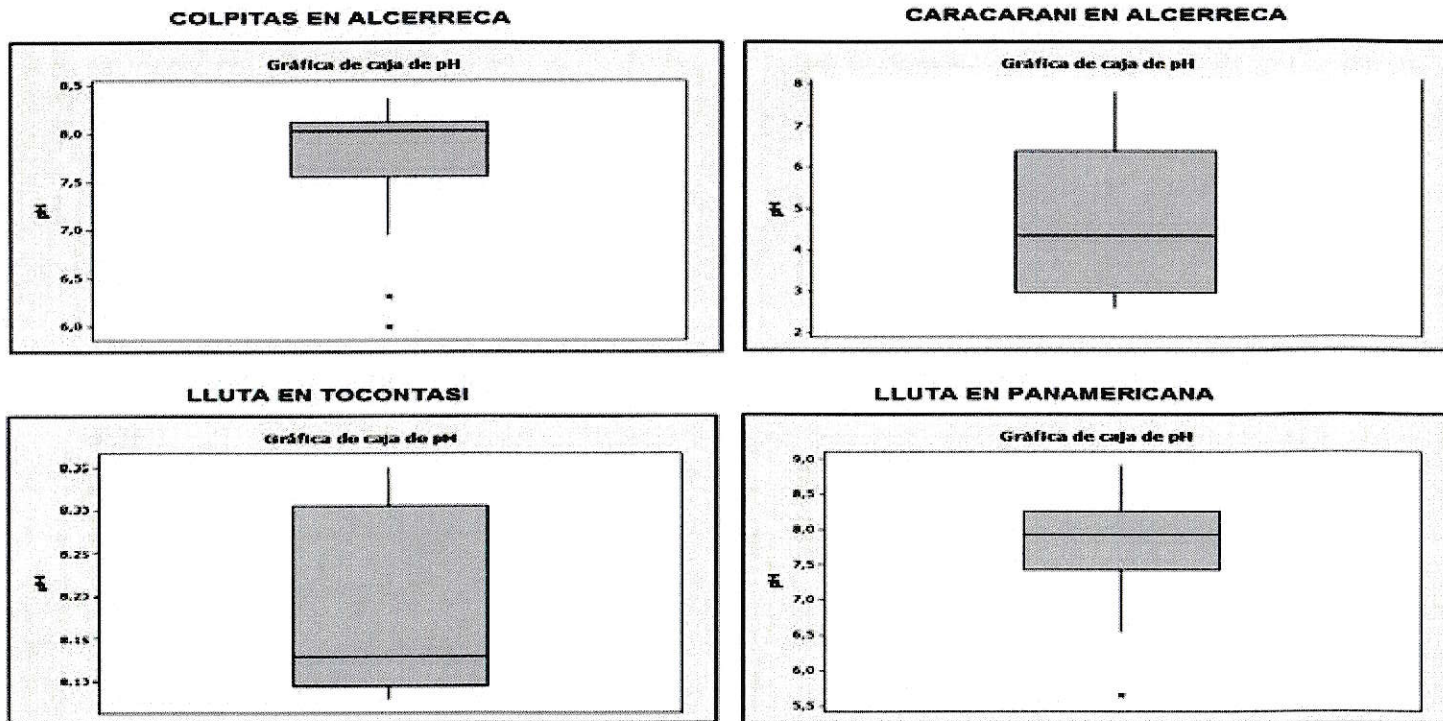


Figura 6 Gráficos de caja de pH para las diferentes estaciones de calidad de agua.



La figura 6 muestra los datos de pH otorgados por la DGA de pH. En la estación de calidad Colpitas en Alcérreca hay una clara tendencia alcalina de los datos, en cambio en la estación Caracarani en Alcérreca los datos tienen una gran variabilidad pero con una leve tendencia ácida. En la parte media del río Lluta, en la estación Lluta en Tocontasi la escala es mucho más pequeña y el pH es claramente alcalino, pero los datos otorgados por la DGA sólo representan los últimos años. La estación Lluta en Panamericana el pH presenta una tendencia neutra a básica.

Según la norma chilena 1333 el agua para riego debe tener un pH comprendido entre 5,5 y 9,0 lo que en este caso se cumple salvo en algunos períodos en la estación Caracarani en Alcérreca que presenta pH más ácidos.

- Conductividad eléctrica

Los datos informados por la DGA se muestran en las siguientes figuras.

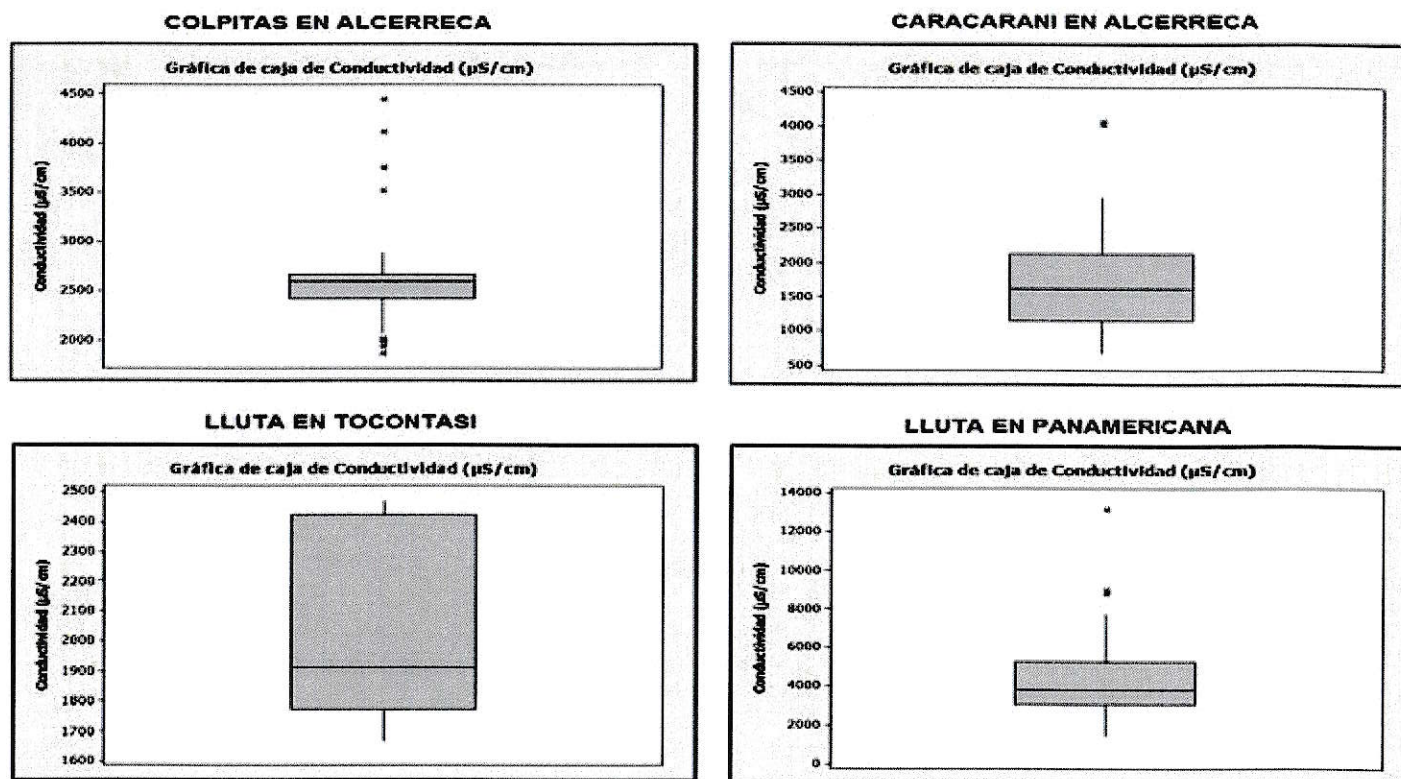


Figura 7 Gráficos de caja de conductividad para las diferentes estaciones de calidad de agua.



La figura 7 muestra los datos otorgados por la DGA de conductividad eléctrica. La conductividad en la estación Colpitas en Alcérreca presenta valores altos alcanzando un valor máximo de incluso 4437  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La estación Caracarani en Alcérreca es más estable y con rangos menores. En la parte media del río Lluta, en la estación Lluta en Tocontasi a pesar que la escala es muy pequeña (los datos sólo representan los últimos años) presenta valores de conductividad parecidos y muy poca variabilidad. Por último la estación Lluta en Panamericana la conductividad fluctúa en rangos mucho más altos que en las otras estaciones de muestreo desde 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  o 6000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con un valor máximo de 14000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

La conductividad histórica es bastante estable, salvo mediciones puntuales en la estación Lluta en Panamericana donde la conductividad fluctúa en rangos mucho más altos que en las otras estaciones de muestreo. Esta diferencia se debe a la descarga de la desalinizadora Desalari y a la mezcla que se produce con el agua de mar. Según la norma chilena 1333 el agua para riego para estos rangos entre  $3000 < c \leq 7500$   $\mu\text{S}/\text{cm}$  puede tener efectos adversos para muchos cultivos, pero puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos.

- Oxígeno Disuelto

Los datos informados por la DGA se muestran en las siguientes figuras.

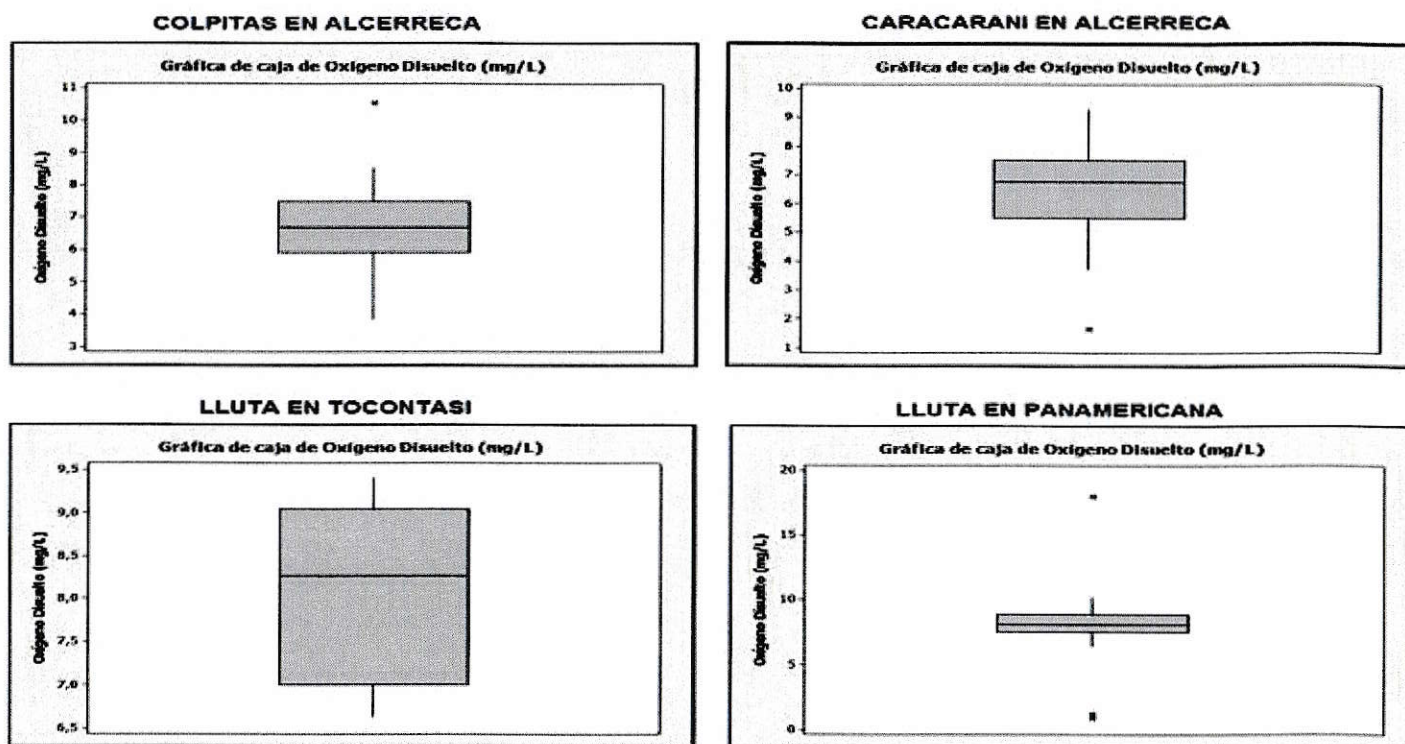


Figura 8 Gráficos de caja de oxígeno disuelto para las diferentes estaciones de calidad de agua.

La figura 8 muestra los datos otorgados por la DGA de oxígeno disuelto. La cantidad de oxígeno disuelto no presenta gran variación en las estaciones Colpitas en Alcérreca ni en Caracarani en Alcérreca, van desde 6 y 9 mg/L. En la parte media del río Lluta, la estación Tocontasi a pesar de representar menos años los datos fluctúan en los mismos rangos que las estaciones antes mencionadas. En la estación Lluta en Panamericana también los rangos pueden ser parecidos en ocasiones pero al estar en la desembocadura puede tener valores máximos de rangos muy bajos o altos.

La cantidad de oxígeno disuelto no presenta gran variación en las estaciones, incluso en la estación Lluta en Tocontasi a pesar de representar menos años los datos fluctúan por el mismo rango que las otras estaciones. En la NCh 1333 no aparecen los rangos de oxígeno disuelto, pero según los límites de la guía clase excepción de la Conama el oxígeno disuelto va de buena a muy buena calidad (de clase 2 a clase 1).

- Boro

Los datos informados por la DGA se muestran en las siguientes figuras.

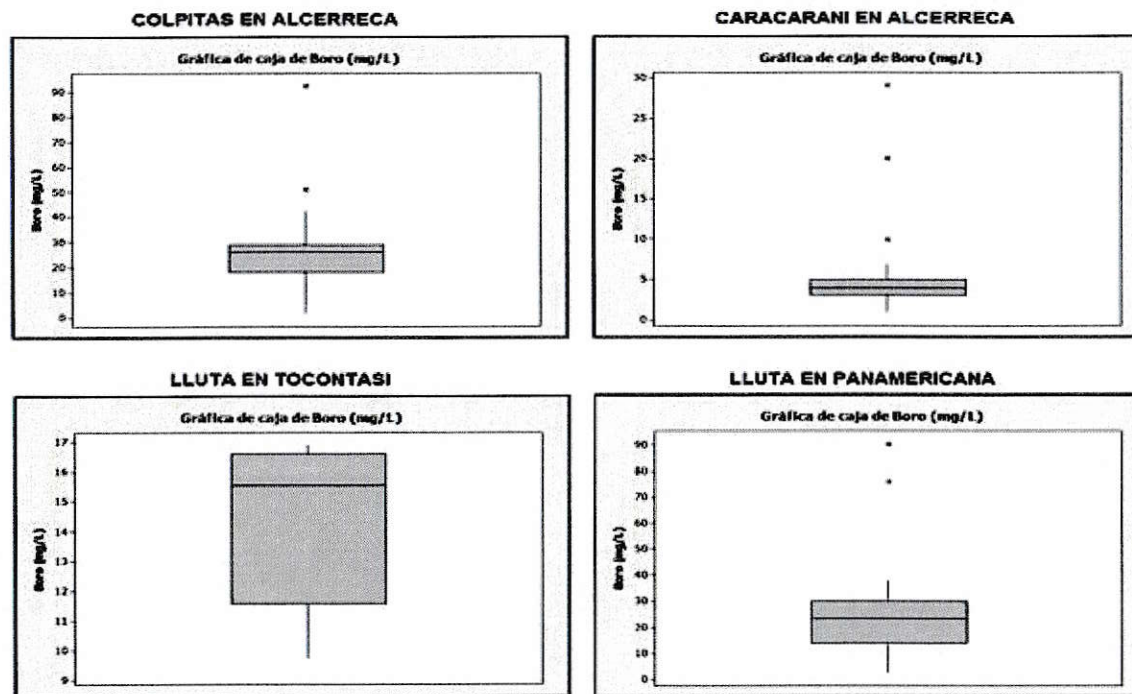


Figura 9 Gráficos de caja de boro para las diferentes estaciones de calidad de agua.

La figura 9 muestra los datos otorgados por la DGA de boro. La cantidad de boro en Colpitas en Alcérreca es constantemente alta a lo largo tiempo, que incluye un valor máximo en torno a los 92 mg/L. En la estación Caracarani en Alcérreca los valores son más bajos y fluctúan entre 3 y 6 mg/L. En la parte media del río Lluta, en la estación Lluta en Tocontasi a pesar de representar menos años los datos fluctúan entre 9,7 y 16,9 mg/L. Finalmente la estación Lluta en Panamericana los valores son tan altos como la estación Colpitas en Alcérreca (valor máximo 90 mg/L).

La cantidad de boro es constantemente alta a lo largo del tiempo en todas las estaciones de calidad. Los valores medidos están por sobre la norma chilena 1333, donde el máximo de boro en mg/L permitido para riego es de 0,75 mg/L. Se puede observar una diferencia significativa de la estación Caracarani en Alcérreca con el resto de las estaciones, ya que los valores de mg/L de boro son mucho más bajos. Las estaciones Colpitas en Alcérreca (valor máximo 92 mg/L) y Lluta en Panamericana (valor máximo 90 mg/L) presentan valores muy altos, en la primera debido a borateras existentes en una parte del tramo del río Colpitas, y en la segunda debido a la descarga de la empresa Desalari y a la mezcla natural que se produce en la desembocadura con el mar.

- **Arsénico**

Los datos informados por la DGA se muestran en las siguientes figuras.

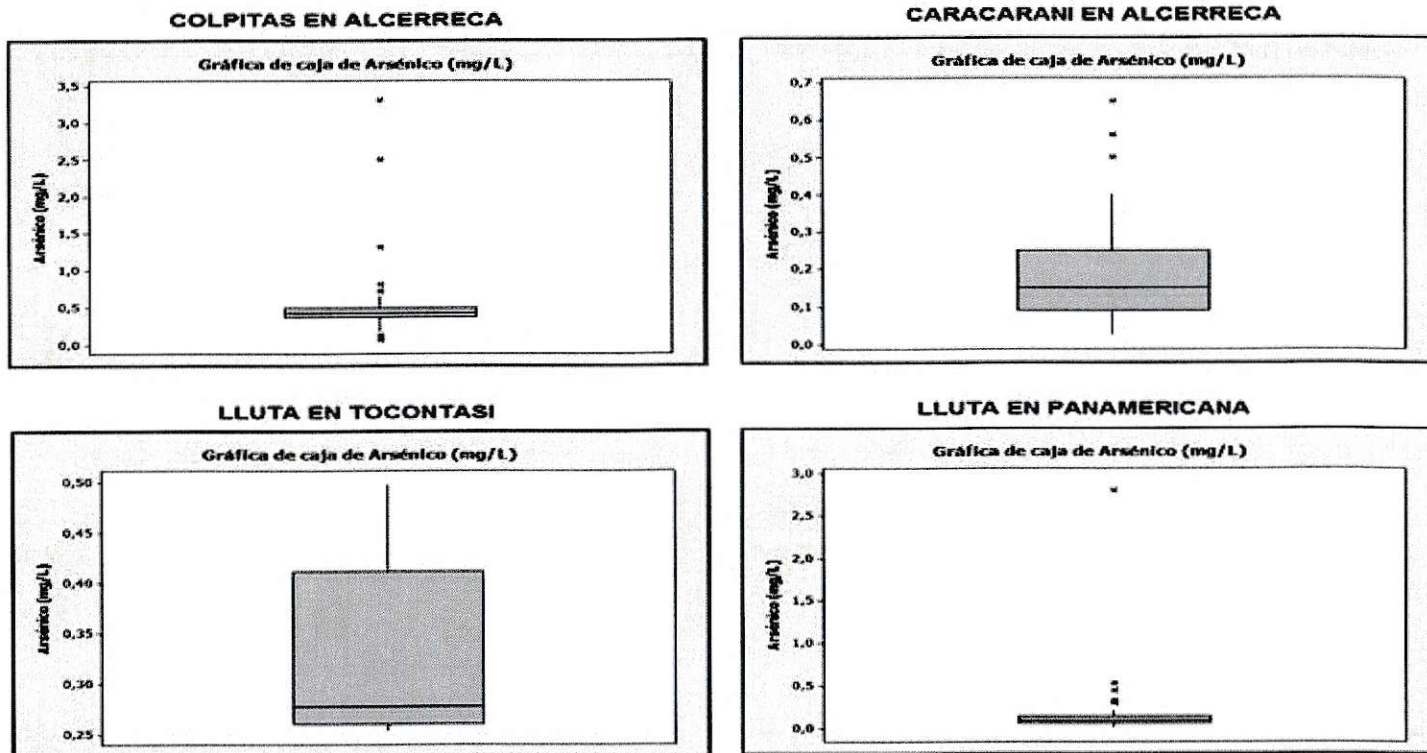


Figura 10 Gráficos de caja de arsénico para las diferentes estaciones de calidad de agua.

La figura 10 muestra los datos otorgados por la DGA de arsénico. La cantidad de arsénico en la estación Colpitas en Alcérreca fluctúa entre 0,3 y 0,5 mg/L en forma constante durante el tiempo e incluye un valor máximo en torno a 3,3 mg/L. En la estación Caracarani en Alcérreca los datos van entre 0,1 y 0,3 mg/L e incluye un valor máximo en torno a los 0,7 mg/L. En la parte media del río Lluta, en la estación Lluta en Tocontasi a pesar de representar menos años los datos fluctúan entre 0,3 y 0,4 mg/L. Finalmente la estación Lluta en Panamericana los valores son más bajos que en las otras estaciones, van entre los 0,1 y 0,3 mg/L pero puede presentar un valor máximo de 2,8 mg/L como se muestra en el gráfico.

La cantidad de arsénico para todas las estaciones de los valores medidos están casi al máximo o por sobre la norma chilena 1333, donde el máximo de arsénico en mg/L permitido para riego es de 0,1 mg/L. Se puede observar que no hay una diferencia significativa de las estaciones de calidad de agua, ya que los valores de mg/L de arsénico fluctúan un rango similar. La estaciones que presentan los valores máximos más altos son Colpitas en Alcérreca 3,3 mg/L. y Lluta en Panamericana 2,8 mg/L.

### **3.2 Aplicación de los índices de calidad de agua para el río Lluta**

#### **3.2.1 ICA Cade-Idepe**

El ICA fue calculado a través de la información otorgada por la DGA. Esta información consta de las estaciones de calidad de aguas de LLuta en Panamericana, Lluta en Tocontasi, Colpitas en Alcérreca y Caracarani en Alcérreca. Los años de medición que se pudieron utilizar son desde 1980 a 2012 ya que hay muchos vacíos de datos en años anteriores. La estación Tocontasi fue una excepción ya que fue puesta en marcha nuevamente hace unos pocos años. El ejemplo de cálculo se explica en el anexo D.

El resumen de los resultados obtenidos se muestra en las siguientes tablas:

**Tabla 11 Índice de calidad de agua en la estación Caracarani en Alcérreca.**

Caracarani en Alcérreca					
Año	ICA Cade-Idepe	Calidad	Año	ICA Cade-Idepe	Calidad
1980	32,1	Mala	1999	28,8	Mala
1983	72,5	Buena	2000	17,9	Mala
1984	73,2	Buena	2001	25,1	Mala
1985	74,3	Buena	2002	36,9	Mala
1986	32,4	Mala	2003	33,1	Mala
1987	61,8	Regular	2004	40,4	Mala
1989	68,2	Regular	2005	36,8	Mala
1990	69,9	Regular	2006	44,1	Mala
1991	19,1	Mala	2007	41	Mala
1992	22,6	Mala	2008	41,8	Mala
1994	53	Regular	2009	42,9	Mala
1995	13,8	Mala	2010	38,3	Mala
1997	3,8	Mala	2011	36,7	Mala
1998	23	Mala	2012	43,5	Mala

**Tabla 12 Índice de calidad de agua en la estación Colpitas en Alcérreca.**

Colpitas en Alcérreca					
Año	ICA Cade-Idepe	Calidad	Año	ICA Cade-Idepe	Calidad
1980	41,4	Mala	1999	51,1	Regular
1983	35	Mala	2000	51,3	Regular
1984	43,9	Mala	2001	46,2	Mala
1985	47,2	Mala	2002	48,8	Mala
1986	56,7	Regular	2003	40	Mala
1987	56,9	Regular	2004	51,4	Regular
1988	48,7	Mala	2005	45,3	Mala
1989	36,9	Mala	2006	47,1	Mala
1990	35,9	Mala	2007	43,2	Mala
1992	40,6	Mala	2008	46	Mala
1994	35	Mala	2009	47,2	Mala
1995	41,1	Mala	2010	31,6	Mala
1997	35	Mala	2011	44,2	Mala
1998	46	Mala	2012	54,9	Regular



**Tabla 13 Índice de calidad de agua en la estación Lluta en Tocontasi.**

<b>Lluta en Tocontasi</b>		
<b>Año</b>	<b>ICA Cade-Idepe</b>	<b>Calidad</b>
<b>2010</b>	50,2	Regular
<b>2011</b>	59,02	Regular

**Tabla 14 Índice de calidad de agua en la estación Lluta en Panamericana.**

<b>Lluta en Panamericana</b>					
<b>Año</b>	<b>ICA Cade-Idepe</b>	<b>Calidad</b>	<b>Año</b>	<b>ICA Cade-Idepe</b>	<b>Calidad</b>
<b>1983</b>	50	Regular	<b>2000</b>	49,8	Mala
<b>1985</b>	44	Mala	<b>2001</b>	55	Regular
<b>1986</b>	57,3	Regular	<b>2002</b>	55	Regular
<b>1987</b>	35	Mala	<b>2003</b>	41,9	Mala
<b>1988</b>	38,8	Mala	<b>2004</b>	55	Regular
<b>1989</b>	50	Regular	<b>2005</b>	55	Regular
<b>1990</b>	50	Regular	<b>2006</b>	49,8	Mala
<b>1991</b>	44	Mala	<b>2007</b>	55	Regular
<b>1994</b>	71,3	Buena	<b>2008</b>	49,3	Mala
<b>1995</b>	35	Mala	<b>2009</b>	49,9	Mala
<b>1997</b>	18	Mala	<b>2010</b>	55	Regular
<b>1998</b>	46	Mala	<b>2011</b>	55	Regular
<b>1999</b>	55	Regular	-	-	-

**Tabla 15 Resumen de los resultados por estación ICA Cade-Idepe.**

<b>Estaciones de Calidad de Agua</b>	<b>ICAS Cade-Idepe</b>	<b>Categoría</b>
<b>Colpitas en Alcérreca</b>	44,6	Mala
<b>Caracarani en Alcérreca</b>	40,3	Mala
<b>Lluta en Tocontasi</b>	54,6	Regular
<b>Lluta en Panamericana</b>	48,8	Mala

Los resultados del ICA muestran que para la estación de calidad de aguas Caracarani desde el año 1980 hasta 2012 la calidad de agua va de regular a mala, igual a lo que sucede en estación de calidad de aguas Colpitas desde 1980 al 2012. Luego al avanzar en el río Lluta la estación de calidad de aguas Tocontasi tiene una calidad de agua regular entre los años 2010 y 2011. Finalmente la estación de calidad de aguas Panamericana desde el año 1983 hasta 2011 muestra una calidad de agua de regular a mala.

### 3.2.2 CCME-WQI de Canadá

El índice de calidad de agua CCME fue calculado a través de la información otorgada por la DGA. Esta información consta de las estaciones de calidad de agua de LLuta en Panamericana, Lluta en Tocontasi, Colpitas en Alcérreca y Caracarani en Alcérreca. El análisis se hizo utilizando los años desde 1980 a 2012 ya que hay muchos vacíos de datos en años anteriores y como la cantidad de muestreos por año son muy pocos el análisis se realizó utilizando la cantidad total de parámetros por cada estación.

Como este índice permite adecuarse a las normas pertenecientes de cada país o lugar, en este caso se ocupó como guía la norma chilena de riego NCh1333. El ejemplo de cálculo de CCME WQI se explica en el anexo E.

El resumen de los resultados obtenidos se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 16 Resultados obtenidos del índice CCME para cada estación de calidad de agua.**

Estaciones de Calidad de Agua	CCME WQI	Categoría
Colpitas en Alcérreca	39,1	Pobre
Caracarani en Alcérreca	28,8	Pobre
Lluta en Tocontasi	33,4	Pobre
Lluta en Panamericana	44,1	Pobre

El índice CCME para las estaciones Colpitas en Alcérreca, Caracarani en Alcérreca, Lluta en Tocontasi y Lluta en Panamericana la categoría es pobre, es decir, la calidad casi siempre está deteriorada. Estos resultados no difieren mucho de lo que ocurre con el índice Cade-Idepe (en general calidad de regular a mala).

### 3.2.3 Índice simplificado de calidad de aguas (ISQA)

El índice de calidad de agua ISQA fue calculado a través de la información otorgada por la DGA. Esta información consta de las estaciones de calidad de aguas de LLuta en Panamericana, Lluta en Tocontasi, Colpitas en Alcérreca y Caracarani en Alcérreca. El análisis se hizo utilizando la información desde el año 1998 al 2012 debido a la falta de datos en ciertos años para algunas variables. El ejemplo de cálculo se explica en el anexo F. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

**Tabla 17 Índice ISQA para la estación Colpitas en Alcérreca.**

<b>Año</b>	<b>ISQA</b>	<b>Tipo de agua</b>
1998	22,0	Aguas negras
1999	22,0	Aguas negras
2000	25,0	Aguas negras
2001	17,5	Aguas negras
2002	20,6	Aguas negras
2003	16,8	Aguas negras
2004	22,0	Aguas negras
2005	19,5	Aguas negras
2006	19,1	Aguas negras
2007	18,1	Aguas negras
2008	20,6	Aguas negras
2009	19,6	Aguas negras
2010	13,2	Aguas negras
2011	17,2	Aguas negras
2012	23,1	Aguas negras

**Tabla 18 Índice ISQA para la estación Caracarani en Alcérreca.**

<b>Año</b>	<b>ISQA</b>	<b>Tipo de agua</b>
1998	21,8	Aguas negras
1999	22,3	Aguas negras
2000	15,8	Aguas negras
2001	19,7	Aguas negras
2002	21,0	Aguas negras
2003	20,1	Aguas negras
2004	22,9	Aguas negras
2005	23,0	Aguas negras
2006	23,0	Aguas negras
2007	22,6	Aguas negras
2008	23,1	Aguas negras
2009	22,9	Aguas negras
2010	20,1	Aguas negras
2011	24,5	Aguas negras
2012	30,5	Aguas contaminadas

**Tabla 19 Índice ISQA para la estación Lluta en Tocontasi.**

<b>Año</b>	<b>ISQA</b>	<b>Tipo de agua</b>
2010	22,5	Aguas negras
2010	19,4	Aguas negras
2011	24,5	Aguas negras
2011	27,5	Aguas contaminadas
2010	22,5	Aguas negras
2010	19,4	Aguas negras
2011	24,5	Aguas negras

**Tabla 20 Índice ISQA para la estación Lluta en Panamericana.**

<b>Año</b>	<b>ISQA</b>	<b>Tipo de agua</b>
1998	17,7	Aguas negras
1999	19,6	Aguas negras
2000	18,3	Aguas negras
2001	21,8	Aguas negras
2002	22,2	Aguas negras
2003	16,1	Aguas negras
2004	19,3	Aguas negras
2005	19,4	Aguas negras
2006	20,1	Aguas negras
2007	19,6	Aguas negras
2008	14,4	Aguas negras
2009	22,5	Aguas negras
2010	23,6	Aguas negras
2011	23,4	Aguas negras
2012	26,4	Aguas contaminadas

**Tabla 21 Resumen de los resultados ISQA por estación.**

<b>Estaciones de Calidad de Agua</b>	<b>ISQA</b>	<b>Categoría</b>
Colpitas en Alcérreca	19,8	Aguas negras
Caracarani en Alcérreca	22,2	Aguas negras
Lluta en Tocontasi	22,9	Aguas negras
Lluta en Panamericana	20,3	Aguas negras

En general para todas las estaciones de calidad de agua el índice ISQA tiene una categoría aguas negras, es decir, con procesos de fermentación y olor. Este categórico análisis puede resultar de una mala calidad de agua y a una falta de monitoreo de parámetros que otorga una idea errónea general de la situación de calidad. En este caso sólo se tenía la mitad de los parámetros (temperatura, oxígeno disuelto y conductividad) que indica el índice.

### 3.3 Análisis de las ventajas y limitaciones de los índices de calidad de agua aplicados.

Tabla 22 Ventajas y limitaciones de los índices de calidad de agua aplicados.

índice	Ventajas	Limitaciones
<b>ISQA</b>	<p>Índice muy fácil de utilizar que proporciona una idea rápida e intuitiva de la calidad.</p> <p>No considera una gran cantidad de variables lo que evita pérdida de información al agregar matemáticamente los parámetros.</p>	<p>Precisa ser completado con otros índices para obtener una visión real de la situación.</p> <p>La clasificación de la calidad del agua (categorías) incluye seis usos específicos del recurso juntos, lo que resulta poco útil para casos puntuales como éste de calidad de agua de riego.</p> <p>No se dispone de toda la información necesaria para ser clasificada, puesto que la cantidad de variables fisico-químicas monitoreadas por la DGA es limitada.</p>
<b>ICA Cade-Idepe</b>	<p>La selección de parámetros (obligatorios y relevantes) obedece a las características que presenta la calidad de agua en cada cuenca, de tal modo que el índice que se propone trata de representar de forma integral la calidad del agua.</p>	<p>Se obliga a adoptar parámetros específicos para el cálculo según Clase Excepción.</p> <p>Considera una gran cantidad de variables que puede traer como consecuencia la pérdida de información al agregar matemáticamente los parámetros.</p> <p>Algunos parámetros seleccionados no disponen de información para ser clasificados, puesto que la cantidad de variables fisico-químicas monitoreadas por la DGA es limitada. Por lo tanto, para poder utilizar el índice es necesario ampliar la base de datos con más monitoreos y frecuencia, cubriendo al menos todos los parámetros seleccionados.</p>

**Tabla 23 Continuación tabla ventajas y limitaciones de los índices de calidad de agua aplicados**

<p><b>CCME</b> <b>WQI</b></p>	<p>Este índice tiene como ventaja que no requiere de realizar transformaciones a los parámetros que participan de la evaluación y evita la subjetividad de asignar diferente importancia o peso de los mismos dentro del cálculo del índice. Identifica aquellos parámetros que no cumplen con los niveles establecidos y la frecuencia en que se esto se produce.</p> <p>No se obliga a adoptar parámetros específicos para el cálculo, sino que deja abierta la elección de los mismos al buen juicio profesional de acuerdo a las características naturales del recurso.</p> <p>Se puede adaptar a la legislación de cada país.</p> <p>El cálculo representa la distancia geométrica entre los niveles que establecen la legislación para los diferentes parámetros que lo caracterizan y el estado en que se encuentra el recurso.</p>	<p>El cuerpo de agua al que se le aplicará el índice puede estar definido por un punto de muestreo o por varios. Con un solo punto se obtendrán buenos resultados si se cuenta con suficientes datos para el mismo. En caso contrario si se tuvieran varios puntos de muestreos, más general será la conclusión a la que se llegue, pero se perderá la información de la posible variabilidad entre dichos puntos.</p>
-----------------------------------	--	--



### 3.4 Selección de un índice de calidad de agua para el río Lluta.

Comparando los tipos de índices se puede observar que el índice ISQA necesita ser complementado con otros índices para una visión más real, en sí mismo no es suficiente para realizar un análisis adecuado de calidad de agua.

En cuanto a los índices Cade-Idepe y CCME, este último tiene como ventaja que no requiere de realizar transformaciones a los parámetros que participan de la evaluación

y evita la subjetividad de asignar diferente importancia o peso de los mismos dentro del cálculo del índice. Asimismo, identifica aquellos parámetros que no cumplen con los niveles establecidos y la frecuencia en que se esto se produce.

A diferencia del índice Cade-Idepe el índice CCME se calcula como el promedio ponderado de las transformaciones de los distintos parámetros, este representa la distancia geométrica entre los niveles que establece la legislación para los diferentes parámetros que lo caracterizan y el estado en que se encuentra el recurso.

En resumen se puede señalar que el índice de calidad de agua más adecuado para aplicarse en el río Lluta es el CCME-WQI, ya que en su elaboración no se obliga a adoptar parámetros específicos para el cálculo, sino que deja abierta la elección de los mismos al buen juicio profesional y de acuerdo a la norma chilena vigente, situación diferente en los otros índices donde no se admiten que los parámetros sean modificados de acuerdo a las características naturales del recurso. Con esta flexibilidad que da el índice es más fácil realizar un análisis de calidad de agua que cuando no se dispone de suficiente información de los parámetros seleccionados para ser clasificados, puesto que la cantidad de variables físico-químicas monitoreadas por la DGA es limitada.



## IV DISCUSIÓN

### 4.1 Análisis histórico de la calidad de agua del río Lluta

De acuerdo a los datos históricos otorgados por la DGA se puede indicar lo siguiente.

Conforme a la información otorgada por la DGA el oxígeno disuelto presenta rangos normales para un sistema oxigenado adecuado para la vida de la gran mayoría de especies de peces (Goyenola, 2007).

El pH en general del río LLuta alcanza valores entre 5 y 8. Llama la atención la estación Caracarani en Alcérreca pues tiene una gran variabilidad, pero con una leve tendencia ácida. Esto puede deberse a que el río Lluta tiene como afluente al río Azufre y al río Caracarani. El río Azufre, presenta un pH muy bajo que drena por la falda oriental del volcán Tacora hasta el río Caracarani (Cade-Idepe y DGA, 2004g) lo que le otorga acidez al río Caracarani en la formación del río Luta.

La conductividad eléctrica en la estación Colpitas en Alcérreca presenta valores altos alcanzando un valor máximo de 4437  $\mu\text{S}/\text{cm}$  esto debido a las borateras que se encuentran en Colpitas. En la estación Lluta en Panamericana la conductividad fluctúa en rangos mucho más altos que en las otras estaciones de muestreo (Caracarani, Tocontasi y Colpitas). Esta diferencia se debe a la descarga de la desalinizadora Desalari y a la mezcla que se produce con el agua de mar.

La cantidad de boro en Colpitas en Alcérreca es constante no sólo debido a las borateras, también el tratamiento de la desalinizadora Desalari (extrae agua subterránea del río Lluta) que genera un agua de rechazo denominado salmuera la que se descarga en la estación Lluta en Panamericana y éstos valores son tan altos como en la estación Colpitas (valor máximo 90 mg/L). El problema de este rechazo de

salmuera es que devuelve el boro extraído antes, pero en una mayor concentración (sitio web EOI), lo que genera mayor contaminación.

La cantidad de arsénico para todas las estaciones de los valores medidos están casi al máximo o por sobre la norma chilena 1333, donde el máximo de arsénico en mg/L permitido para riego es de 0,1 mg/L. Se puede observar que no hay una diferencia significativa de las estaciones de calidad de agua, ya que los valores de mg/L de arsénico fluctúan en el mismo rango 0,1mg/L a 0,5 mg/L. La razón de esto es que en condiciones generales oxidantes y pH de neutros a básicos el arsénico es adsorbido por los oxihidróxidos de hierro presentes, y como en general el río presenta esas condiciones en la mayoría de la estaciones de calidad las concentraciones fluctúan en el mismo rango (DICTUC, 2008d).

#### **4.2 Aplicación de los índices de calidad de agua para el río Lluta**

Los resultados podrían ser mejor analizados si se hubiese tenido una base de datos más completa, con más variables y donde los monitoreos fueran constantes en el tiempo, para así tener un mejor resultado en tiempo-espacio de la cuenca. Si la frecuencia de muestreo fuera mayor las reacciones ante un eventual episodio de contaminación podría proteger a los agricultores del río Lluta, porque ellos podrían cerrar sus canales y evitar una mayor pérdida de producción agrícola. Lo ideal de la frecuencia de muestreo es que fuera lo más seguida posible, pero eso depende del gobierno regional y de las entidades como la DGA.

Además de una mayor frecuencia, seleccionar adecuadamente los parámetros fisicoquímicos es esencial. Los parámetros utilizados por la DGA ya existentes son adecuados para realizar un control fisicoquímico, ya que tienen una amplia gama de

metales e inorgánicos, pero falta medición de sólidos suspendidos y disueltos. En este caso al ser una zona con mayor porcentaje de uso agrícola falta un control sobre los compuestos orgánicos plaguicidas e insecticidas, además de indicadores biológicos como las coliformes fecales y DBO5.

Se puede observar que en todos los índices propuestos (Cade-Idepe, CCME, ISQA) la calidad del agua del río Lluta no es buena para ninguna estación de monitoreo de acuerdo a las categorías. Esto resulta no sólo de la mala calidad de agua histórica observada del río Lluta, sino que también de la falta de datos para las variables que establece cada índice de calidad y el propósito de la categoría de cada índice.

#### **4.2.1 ICA Cade-Idepe**

Aunque el índice de calidad de agua puede ser una buena herramienta para evaluar la calidad de un curso de agua puede presentar varios inconvenientes. Uno de los mayores inconvenientes que se encontró al realizar el índice de calidad de agua es la falta de medición de los parámetros obligatorios. Las planillas de la DGA vienen con una periodicidad de muestreo que varía entre 1 y 4 veces al año y con bastantes variables sin medición, además los parámetros biológicos (DBO5 y coliformes fecales) no son medidos constantemente por la DGA por lo que no se pudieron utilizar. De los seis parámetros obligatorios las coliformes fecales, la DBO5 y los sólidos suspendidos no se incluyeron en el cálculo del ICA, ya que la DGA no suele hacer este tipo de mediciones. Dentro de los parámetros relevantes en este caso sólo se utilizó el boro y el arsénico ya que para las estaciones de calidad Caracarani en Alcérreca, Colpitas en Alcérreca y Lluta en Tocontasi sólo se tenían las mediciones de estos dos elementos, lo que acotaba la comparación entre estaciones de calidad de agua.

En cuanto a la aplicación de este índice en el año 2004 se realizó el proyecto "Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad", de la Dirección General de Aguas (DGA) y desarrollado por la empresa consultora CADE-IDEPE, para la definición de la propuesta técnica de asignación de la calidad objetivo para los cursos y cuerpos de agua prioritarios del país. El objetivo general del estudio era conocer la calidad natural y actual del agua, determinar los caudales disponibles para la dilución de contaminantes y tipificar los cursos y cuerpos de agua. El estudio consideró establecer índice de calidad de agua para 33 cuencas (Sitio web SINIA).

#### **4.2.2 CCME-WQI de Canadá**

Este índice tiene la ventaja de que se pueden utilizar los parámetros que se estimen más convenientes para el análisis, ya sean parámetros químicos, biológicos o combinación de ambos.

La selección de los parámetros es crítica para garantizar que el índice nos dé una información acertada del sistema que se estudia. Escoger un pequeño número de parámetros para los cuales no se cumple con lo normado dará una idea muy diferente del sistema de la que se obtiene si se considera un gran número de variables de las cuales solo un número pequeño no cumplirán con lo deseado (Rojas y col, 2009c).

En cuanto a la aplicación CCME es uno de los índices más utilizados reportados en la literatura, con muchos artículos publicados de diferentes países. Incluso existe un trabajo elaborado por Espejo y col (2012) quienes aplicaron el índice de calidad del agua (enfoque Canadian Council of Ministers for the Environment) en cuatro cuencas del norte de Chile (Parra, 2013).

#### **4.2.3 Índice simplificado de calidad de aguas (ISQA)**

Con este índice no se tienen en cuenta otros factores, la concentración de metales pesados, el amonio o los pesticidas que pueden alterar la calidad del agua, se deberían combinar indicadores que incluyeran un abanico más amplio de factores.

En cuanto a la aplicación el índice simplificado de calidad de agua (ISQA) es uno de los índices más utilizados en España (Orozco y col, 2005b). En Chile en 1999 se inició un programa de Monitoreo, educación sanitaria y ambiental para la recuperación y protección de los cuerpos de agua, considerando el ISQA (Debels, y col, 2005).

## V CONCLUSIONES

- ✓ El análisis histórico evidencia que la cantidad de boro y arsénico en el agua del río Lluta sobrepasa la norma chilena de riego, siendo apta sólo para riego de especies tolerantes.
- ✓ Para utilizar cualquier índice de calidad de agua superficial se requiere monitoreos y que cubran la mayor cantidad posible de parámetros tanto químicos como biológicos.
- ✓ El ICA es adecuado para dar rápidamente una imagen general del estado del recurso hídrico a las autoridades y al público. Permite comparar y deducir por ejemplo los puntos de muestreo con peor calidad del agua lo cual permite detectar problemas puntuales.
- ✓ El índice de calidad de agua más adecuado para aplicar en sitios donde las variables de monitoreo son acotadas es el CCME-WQI de Canadá. Su estructura de cálculo permite una evaluación amplia e integral de la calidad del agua, ya que considera la variación en el tiempo y en el espacio. Además deja abierta la elección de los parámetros específicos para el cálculo al buen juicio profesional y de acuerdo a la norma chilena vigente, a diferencia de los otros índices que no permiten modificación de parámetros de acuerdo a las características naturales del recurso. Esta flexibilidad hace más fácil realizar un análisis en lugares como el río Lluta.
- ✓ Según la hipótesis propuesta los índices de calidad de agua son una buena herramienta para la evaluación de aguas superficiales si se recopila la información apropiada que permita llegar a conclusiones reales de cada sitio de estudio en particular.

## VI REFERENCIAS

- Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. 2007. Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones futuras. Zona I Norte. Regiones I a IV. Santiago.
- Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA). 1995. El estudio sobre el desarrollo de los recursos de agua en la parte norte de Chile.
- Ball, R. y Church, R. 1980. Calidad de agua indexación y puntuación. Revista de Ingeniería Ambiental. Division, Sociedad Americana de Ingenieros Civiles.106:757-771.
- Cade-Idepe y DGA. 2004. Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de agua según Objetivos de Calidad. Cuenca del Río Lluta.
- CONAMA. 2004. Guía CONAMA para el establecimiento de las normas secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Marinas.
- CVC y UNIVALLE. 2007. El Río Cauca en su valle alto: Un aporte al conocimiento de uno de los ríos más importantes de Colombia. Cali.
- Debels, P., Figueroa, R., Urrutia, R., Barra, R. y Niell, X. 2005. Evaluación de la calidad del agua en el río Chillán (Chile Central) utilizando los parámetros fisicoquímicos y un índice modificado de la calidad del agua. Monitoreo y Evaluación Ambiental.110: 301.322
- DICTUC. 2008. Propuesta de calidad objetivo y análisis general de impacto económico y social cuenca Río Lluta. Bases Conceptuales y Cuantitativas. Pontificia Universidad Católica.
- División de Estudios y Planificación (DEP). 2010. Plan de Acción Estratégico para el Desarrollo Hídrico de la Región de Arica y Parinacota. Santiago.
- Errázuriz, A., González, J., Henríquez, M., Cereceda, P., González, M. y Rioseco, R. 1998. Manual de Geografía de Chile. Editorial Andrés Bello.
- ESSAT.1998. Proyecto: Aguas de Descarte en el Curso Bajo del Río Lluta.
- Fernández, N. y Solano, F. 2005. Índices de Calidad de Agua e Índices de Contaminación. Universidad de Pamplona, Colombia.
- García, T. 2012. Propuesta de índices de calidad de agua para ecosistemas hídricos de Chile. Tesis para optar al título de ingeniero civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Gobierno de Chile. 2013. Chile cuida su Agua. Estrategia Nacional de Recursos Hídricos.
- INE. Resultados Preliminares Censo de Población y Vivienda 2012. [en línea] <[http://www.cooperativa.cl/noticias/site/artic/20120831/asocfile/20120831161553/resultados\\_preliminares\\_censo\\_2012.pdf](http://www.cooperativa.cl/noticias/site/artic/20120831/asocfile/20120831161553/resultados_preliminares_censo_2012.pdf)> (2014)

Instituto Nacional de Hidráulica (INH). 2012. Innova Chile Corfo 11BPC-10034 Mejoramiento del sistema de gestión y control de los recursos hídricos asignados en el río Lluta y construcción de un modelo de operación hídrica de la cuenca.

Klohn,W. 1972. Hidrografía de las zonas desérticas de Chile. Ed. Jean B., Proyecto CHI-35 Investigación de los recursos hidráulicos en el Norte Grande.

León, G. Diagramas de cajas. 2012. [en línea] <[http://webdelprofesor.ula.ve/economia/gudberto/materias/metodos\\_estadisticos1/guias\\_apuntes/diagramas\\_de\\_caja.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/economia/gudberto/materias/metodos_estadisticos1/guias_apuntes/diagramas_de_caja.pdf)> (2014)

Niemeyer, H. y Cereceda, P. 1983. Geografía de Chile — Tomo VIII: Hidrografía. 1ª edición. Instituto Geográfico Militar. Santiago.

Orozco, C., Pérez, A., Gonzáles, M. N., Rodríguez, F. y Alfayate, J. 2005. Contaminación Ambiental. Una visión desde la Química. Tercera edición, Thomson Editoriales Spain Paraninfo, S.A.

Parra, O., Almanza, V., Urrutia, R y Baeza, C. 2013. Programa de monitoreo de la calidad del agua de las lagunas urbanas de Concepción, Chile: análisis de resultados y propuesta.

Centro de Ciencias Ambientales, EULA-Chile. 2013. Universidad de Concepción. Concepción.

Peña, H. y Salazar, C. 1993. Calidad de aguas. Serie de documentos técnicos. DGA. 1993.

Prat, N. 1998. Bioindicadores de calidad de las aguas. Memorias del curso de bioindicadores de Calidad del Agua. Universidad de Antioquia. Medellín.

Queralt, T. 1982. La calidad de las aguas de los ríos. Tecnología del Agua 4.

Goyenola, G. 2007. Oxígeno Disuelto. Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos.

R y Q Ingeniería. 2012. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto “Embalse Chironta” XV Región de Arica y Parinacota, Comuna de Arica. Capítulo 2- Caracterización del área de influencia.

Rojas,L., Alberro, N. y Frías, D. 2009. El Índice de Calidad de Agua como herramienta para la gestión de los recursos hídricos. Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN).

Samboni, N., Carvajal, Y. y Escobar, J. 2007. Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. [en línea] Revista Ingeniería e Investigación vol. 27 no.3, (172-181). <[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-56092007000300019](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092007000300019)> (2014)



Silob. 2005. Estudio de línea base ambiental para el proyecto "Entierro de línea Ossa 2 en el río Lluta". Chile.

Software Minitab v16.2.4.4 Multilenguaje.

Torres, P., Cruz, C. y Patiño, J. 2008. Índice de Calidad de Agua en Fuentes Superficiales utilizadas en la Producción de Agua para consumo humano. Una revisión crítica.

UNEP. 2007. Global Drinking Water Quality Index Development and Sensitivity Analysis Report. Ontario, Canadá.

Universidad de Pamplona. Capítulo II. Indicadores de calidad de agua. Generalidades. 2010. [en línea]

[http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home\\_10/recursos/general/pag\\_contenido/libros/06082010/icatest\\_capitulo2.pdf](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_10/recursos/general/pag_contenido/libros/06082010/icatest_capitulo2.pdf)

### Sitios web

CEC [en línea] <[http://www.cec.org/soe/files/es/soe\\_waterquality\\_es.pdf](http://www.cec.org/soe/files/es/soe_waterquality_es.pdf)> [consulta: 31 julio 2014]

Diagramas de caja [en línea] <[http://recursostic.educacion.es/gauss/web/materiales\\_didacticos/eso/actividades/estadistica\\_y\\_probabilidad/medidas/cuartiles/teoria.htm](http://recursostic.educacion.es/gauss/web/materiales_didacticos/eso/actividades/estadistica_y_probabilidad/medidas/cuartiles/teoria.htm)> [consulta: 2 noviembre 2014]

EOI [en línea] <http://www.eoi.es/blogs/hugogilarranz/2014/02/18/impacto-ambiental-de-la-salmuera-de-rechazo-de-las-plantas-desalinizadoras-y-su-possible-solucion-3/> [consulta: 28 julio 2014]

Índice ISQA [en línea] <<http://www.miliarium.com/prontuario/Indices/IndicesCalidadAgua.htm#ISQA>> [consulta: 5 marzo 2014]

Índice ISQA [en línea] <<http://www.mailxmail.com/curso-agua-calidad-contaminacion-2-2/indice-simplificado-calidad-aguas-isqa>> [consulta: 5 marzo 2014]

Métodos de evaluación de la calidad de las aguas. 2014. [en línea] <<http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/aguas-superficiales/metodos-evaluacion-calidad/>> [consulta: 24 Julio 2014]

SINIA [en línea] <<http://www.sinia.cl/1292/w3-article-31018.html>> [consulta: 31 julio 2014]



## **VII ANEXOS**

## ANEXO A

### NORMA CHILENA DE RIEGO 1333.Of78. Modificada en 1987.

#### Concentraciones máximas de elementos químicos en agua para riego.

Elemento	Unidad	Limite máximo
Aluminio (Al)	mg/L	5,00
Arsénico(As)	mg/L	0,10
Bario(Ba)	mg/L	4,00
Berilio (Be)	mg/L	0,10
Boro(B)	mg/L	0,75
Cadmio (Cd)	mg/L	0,010
Cianuro (CN)	mg/L	0,20
Cloruro (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	200,00
Cobalto (Co)	mg/L	0,050
Cobre (Cu)	mg/L	0,20
Cromo (Cr)	mg/L	0,10
Fluoruro (F <sup>-</sup> )	mg/L	1,00
Hierro (Fe)	mg/L	5,00
Litio (Li)	mg/L	2,50
Litio (cítricos) (Li)	mg/L	0,075
Manganeso (Mn)	mg/L	0,20
Mercurio (Hg)	mg/L	0,001
Molibdeno (Mo)	mg/L	0,010
Niquel (Ni)	mg/L	0,20
Plata (Ag)	mg/L	0,20
Plomo (Pb)	mg/L	5,00
Selenio (Se)	mg/L	0,020
Sodio porcentual (Na)	%	35,00
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	mg/L	250,00
Vanadio (V)	mg/L	0,10
Zinc (Zn)	mg/L	2,00

pH: El agua para riego debe tener un pH comprendido entre 5,5 y 9,0.

### Conductividad específica y sólidos disueltos totales

Clasificación	Conductividad específica, $c$ , $\mu\text{mhos/cm}$ a $25^\circ\text{C}$	Sólidos disueltos totales, $s$ , $\text{mg/L}$ a $105^\circ\text{C}$
Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales	$c \leq 750$	$s \leq 500$
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles	$750 < c \leq 1500$	$500 < s \leq 1000$
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos	$1500 < c \leq 3000$	$1000 < s \leq 2000$
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos	$3000 < c \leq 7500$	$2000 < s \leq 5000$

ANEXO B

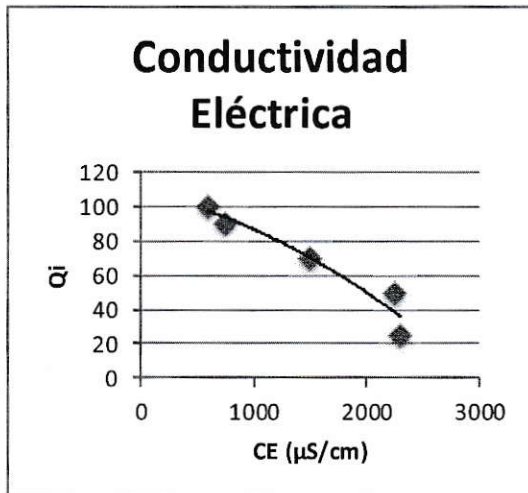
GUÍA CONAMA 2004

Grupo Compuestos o Elementos	Unidad	Clase de Excepción	Clase 1	Clase 2	Clase 3
<b>Indicadores Físicos y Químicos</b>					
Conductividad Eléctrica	µS/cm	<600	750	1.500	2.250
DBO <sub>5</sub>	mg/L	<2	5	10	20
Color aparente	Pt-Co	<16	20	100	>100
Oxígeno disuelto	mg/L	>7,5	7,5	5,5	5
pH	Rango	6,5 – 8,5	6,5 – 8,5	6,5 – 8,5	6,5 – 8,5
RAS	-	<2,4	3	6	9
Sólidos disueltos	mg/L	<400	500	1.000	1.500
Sólidos suspendidos	mg/L	<24	30	50	80
Temperatura	ΔT°C	<0,5	1,5	1,5	3
<b>Inorgánicos</b>					
Amonio	mg/L	<0,5	1	1,5	2,5
Cianuro	µg/L	<4	5	10	50
Cloruro	mg/L	<80	100	150	200
Fluoruro	mg/L	<0,8	1	1,5	2
Nitrito	mg/L	<0,05	0,06	>0,06	>0,06
Sulfato	mg/L	<120	150	500	1.000
Sulfuro	mg/L	<0,04	0,05	0,05	0,05
<b>Orgánicos</b>					
Aceites y Grasas	mg/L	<4	5	5	10
Bifenilos policlorados (PCBS)	µg/L	*	0,040	0,045	>0,045
Detergentes (SAAM)	mg/L	<0,16	0,2	0,5	0,5
Índice de Fenol	µg/L	<1,6	2	2	10
Hidrocarburos Aromáticos					
Policíclicos	µg/L	<0,16	0,2	1	1
Hidrocarburos	mg/L	<0,04	0,05	0,2	1,0
Tetracloroetano	mg/L	*	0,26	0,26	>0,26
Tolueno	mg/L	*	0,3	0,3	>0,3
<b>Orgánicos Plaguicidas</b>					
Ácido 2,4 diclofenoxiático (2,4-D)	µg/L	*	4	4	100
Aldicarb	µg/L	*	1	11	11
Aldrin	µg/L	*	0,004	0,004	0,7
Atrazina + -dealkyl metabolitos	µg/L	*	1	1	1
Captán	µg/L	*	3	10	10
Carbofurano	µg/L	*	1,65	45	45

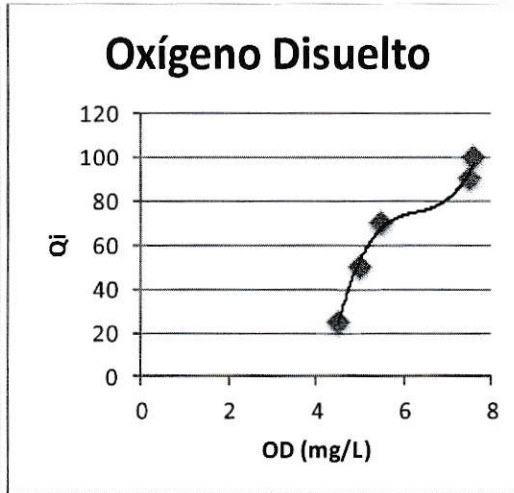
Grupo Compuestos o Elementos	Unidad	Clase de Excepción	Clase 1	Clase 2	Clase 3
<b>Orgánicos Plaguicidas</b>					
Clordano	µg/L	*	0,006	0,006	7
Clorotalonil	µg/L	*	0,2	6	6
Cyanazina	µg/L	*	0,5	0,5	10
Demetón	µg/L	*	0,1	0,1	0,1
DDT	µg/L	*	0,001	0,001	30
Diclofop-metil	µg/L	*	0,2	0,2	9
Dieldrin	µg/L	*	0,5	0,5	0,5
Dimetoato	µg/L	*	6,2	6,2	6,2
Heptaclor	µg/L	*	0,01	0,01	3
Lindano	µg/L	*	4	4	4
Paratión	µg/L	*	35	35	35
Pentaclorofenol	µg/L	*	0,5	0,5	0,7
Simazina	mg/L	*	0,005	0,01	0,01
Trifluralina	µg/L	*	0,1	45	45
<b>Metales Esenciales (Disuelto)</b>					
Boro	mg/L	<0,4	0,5	0,75	0,75
Cobre	µg/L	<7,2	9	200	1.000
Cromo total	µg/L	<8	10	100	100
Hierro	mg/L	<0,8	1	5	5
Manganeso	mg/L	<0,04	0,05	0,2	0,2
Molibdeno	mg/L	<0,008	0,01	0,15	0,5
Níquel	µg/L	<42	52	200	200
Selenio	µg/L	<4	5	20	50
Zinc	mg/L	<0,096	0,120	1	5
<b>Metales No Esenciales (Disuelto)</b>					
Aluminio	mg/L	<0,07	0,09	0,1	5
Arsénico	mg/L	<0,04	0,05	0,1	0,1
Cadmio	µg/L	<1,8	2	10	10
Estaño	µg/L	<4	5	25	50
Mercurio	µg/L	<0,04	0,05	0,05	1
Plomo	mg/L	<0,002	0,0025	0,2	5
<b>Indicadores Biológicos</b>					
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	<10	1.000	2.000	5.000
Coliformes totales	NMP/100 ml	<200	2.000	5.000	10.000

## ANEXO C

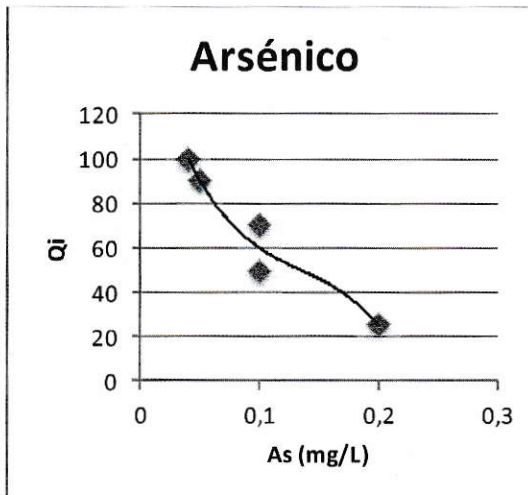
### CURVAS DE ESTANDARIZACIÓN



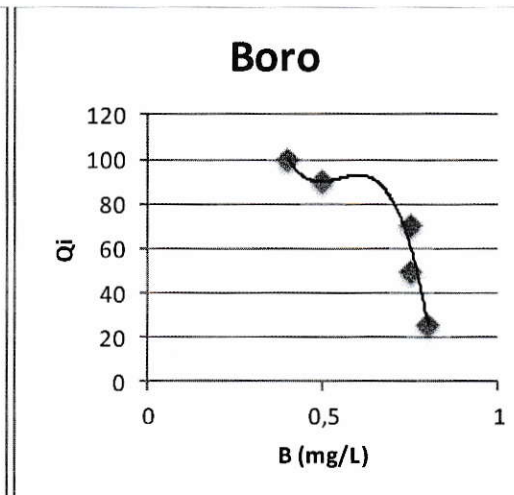
Curva de conductividad. Función polinómica:  $y = -8E-06x^2 - 0,0137x + 108,08$



Curva de Oxígeno Disuelto. Función polinómica:  $y = 7,3427x^3 - 138,82x^2 + 879,35x - 1791,2$



Curva de Arsénico. Función polinómica:  $y = -31250x^3 + 12604x^2 - 1943,8x + 159,58$



Curva de Boro. Función polinómica:  $y = -4690,5x^3 + 7682,1x^2 - 4152,7x + 832,14$

## ANEXO D

### Ejemplo de cálculo ICA , en base a Cade-Idepe, año 2004.

El cálculo se desarrolla de acuerdo a los valores establecidos en la clase de excepción por la Guía Conama para cada parámetro de calidad (anexo B).

Cabe mencionar nuevamente que la cantidad de datos otorgados por la DGA son escasos por lo que los cálculos están realizados sólo con los parámetros que se tenían.

Existen variadas formas de integrar los diferentes parámetros considerados dentro de un ICA. La forma más simple de integrar estos parámetros es por una media aritmética ponderada según su importancia, tal como muestra la ecuación.

$$ICAS = \sum_{i=1}^n w_i * Q_i$$

En donde:

$w_i$ : Corresponde a la ponderación o peso de los parámetros que componen ICAS, sabiendo que los obligatorios en conjunto pesan 70% y que los relevantes o principales pesan en conjunto 30%.

$Q_i$ : Corresponde a la estandarización de los valores de los parámetros; se lee de las curvas adjuntas en la metodología.

#### Ejemplo:

Para este ejemplo se utilizará los datos promedios del año 1986 de la estación de calidad de agua LLuta en Panamericana.

pH: 7,8

oxígeno disuelto: 7,8 mg/L

conductividad: 2745  $\mu$ S/cm

boro: 13,1 mg/L

arsénico: 0,1 mg/L



- Wi

Para los parámetros obligatorios que son seis (tabla 7) sólo se utilizaron los 3 que son pH, oxígeno disuelto y conductividad. Como en conjunto los parámetros obligatorios pesan un 70% cada uno tendrá un peso de 23,3%, que se expresa como  $w_i = 0,23$  para cada parámetro.

En los parámetros relevantes se utilizarán el boro y el arsénico por que son los con más información y que alteran la calidad de agua. Como en conjunto los parámetros relevantes pesan 30% cada uno tendrá un peso de 15%, que se expresa como  $w_i = 0,15$  para cada parámetro.

- Qi

El Qi se obtiene graficando la clase excepción (anexo B) en un rango de 0 a 100. Por lo tanto cuando el valor es de muy buena calidad el valor es 100 y cuando es de muy mala calidad es 0. Si los valores son mejores o peores que el rango de la clase excepción se aproximan a 100 o a 0 según corresponda.

El Qi para los diferentes parámetros es el siguiente:

- pH

Según clase excepción guía CONAMA entre 6,5-8,5 los valores son óptimos lo que para un 7,8 de pH se traduce en un valor  $Q_i = 100$ .

- Conductividad eléctrica

Graficando la clase excepción de la CONAMA (anexo C).

$$y = -8E-06x^2 - 0,0137x + 108,08$$

$$y = -8E-06 * 2745^2 - 0,0137 * 2745 + 108,08$$

$$y = 10,2$$

Entonces  $Q_i = 10,2$

- Oxígeno disuelto

Graficando la clase excepción de la CONAMA (anexo C).

$$y = 7,3427x^3 - 138,82x^2 + 879,35x - 1791,2$$

$$y = 7,3427 * 7,8^3 - 138,82 * 7,8^2 + 879,35 * 7,8 - 1791,2$$

$$y = 106,4$$

Entonces  $Q_i = 100$  (porque  $Q_i$  es de 0-100 por lo tanto se considera 100)

Este  $Q_i$  se podría haber obtenido instantáneamente ya que es clase excepción si es mayor a 7,6 mg/L lo que resulta un  $Q_i$  de 100.

- Boro

Graficando la clase excepción de la CONAMA (anexo C).

$$y = -4690,5x^3 + 7682,1x^2 - 4152,7x + 832,14$$

Como el valor de boro (13,1 mg/L) está muy por sobre el rango máximo (0,75 mg/L) entonces se le otorga un valor de  $Q_i = 0$  de inmediato.

- Arsénico

Graficando la clase excepción de la CONAMA (anexo C).

$$y = -31250x^3 + 12604x^2 - 1943,8x + 159,58$$

$$y = -31250 * 0,1^3 + 12604 * 0,1^2 - 1943,8 * 0,1 + 159,58$$

$$y = 59,99$$

Entonces  $Q_i = 60$

➤ En resumen:

1986	Panamericana			
	Valor	wi	Qi	Qi*wi
<b>Parámetros obligatorios</b>				
Conductividad eléctrica	2745	0,23	10,2	2,3
Oxígeno disuelto	7,8	0,23	100	23
pH	7,8	0,23	100	23
<b>Parámetros Relevantes</b>				
Boro	13,1	0,15	0	0
Arsénico	0,1	0,15	60	9
	<b>ICA Cade-Idepe</b>			<b>57,3</b>

## ANEXO E

### Ejemplo de cálculo CCME-WQI

El cálculo se desarrolla de acuerdo a la norma chilena de agua de riego NCh 1333, como se ve en el anexo A. Los valores óptimos para el pH están entre 5,5 y 9, para la conductividad, boro y arsénico los valores no debieran superar los 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 0,75 mg/L de B, 0,10 mg/L de Ar.

Tabla de datos utilizados para el cálculo del índice en la estación Colpitas en Alcérreca.

Año	pH	NCh	Año	Cond	NCh	Año	B	NCh	Año	Ar	NCh
17/07/1980	7,56	C	17/07/1980	2600	NC	17/07/1980	20	NC	17/07/1980	0,73	NC
15/03/1983	7,47	C	15/03/1983	2601	NC	13/09/1983	13	NC	15/03/1983	2,51	NC
13/09/1983	8,06	C	13/09/1983	2602	NC	07/11/1983	12	NC	13/09/1983	0,45	NC
07/11/1983	7,90	C	07/11/1983	2603	NC	13/11/1984	12	NC	13/11/1984	0,20	NC
13/11/1984	7,89	C	13/11/1984	2604	NC	18/12/1984	14	NC	18/12/1984	0,44	NC
18/12/1984	8,26	C	18/12/1984	2605	NC	16/01/1985	14	NC	16/01/1985	0,42	NC
16/01/1985	7,82	C	16/01/1985	2606	NC	15/05/1985	13	NC	15/05/1985	0,53	NC
15/05/1985	7,40	C	15/05/1985	2607	NC	12/11/1985	12	NC	12/11/1985	0,37	NC
12/11/1985	7,40	C	12/11/1985	2608	NC	11/02/1986	10	NC	11/02/1986	1,32	NC
11/02/1986	7,55	C	11/02/1986	2609	NC	18/02/1986	12	NC	18/02/1986	0,36	NC
18/02/1986	7,35	C	18/02/1986	2610	NC	22/05/1986	2	NC	22/05/1986	0,38	NC
22/05/1986	7,05	C	22/05/1986	2611	NC	14/11/1986	17	NC	14/11/1986	0,40	NC
14/11/1986	7,85	C	14/11/1986	2612	NC	15/05/1987	3	NC	15/05/1987	0,18	NC
15/05/1987	6,95	C	15/05/1987	2613	NC	10/11/1987	20	NC	10/11/1987	0,40	NC
10/11/1987	7,10	C	10/11/1987	2614	NC	22/03/1988	92	NC	22/03/1988	0,64	NC
22/03/1988	7,65	C	22/03/1988	2615	NC	01/12/1989	40	NC	01/12/1989	0,37	NC
01/12/1989	7,65	C	01/12/1989	2616	NC	06/12/1990	25	NC	06/12/1990	0,42	NC
06/12/1990	8,08	C	06/12/1990	2617	NC	24/03/1992	28	NC	24/03/1992	0,41	NC
24/03/1992	7,50	C	24/03/1992	2618	NC	16/02/1995	18	NC	16/02/1995	0,55	NC
22/11/1994	6,00	C	16/02/1995	2650	NC	11/06/1995	30	NC	11/06/1995	0,50	NC
16/02/1995	8,36	C	11/06/1995	2580	NC	18/11/1997	29	NC	19/03/1998	0,47	NC
11/06/1995	7,90	C	18/11/1997	3750	NC	10/05/2000	33	NC	16/07/1998	0,30	NC
18/11/1997	7,27	C	19/03/1998	4110	NC	08/08/2000	25	NC	21/04/1999	0,32	NC
19/03/1998	6,32	C	16/07/1998	2424	NC	20/12/2000	8	NC	14/07/1999	0,37	NC

16/07/1998	7,75	C	21/04/1999	2217	NC	04/05/2001	42,5	NC	11/11/1999	0,38	NC
21/04/1999	7,98	C	14/07/1999	2092	NC	06/12/2001	30	NC	10/05/2000	0,39	NC
14/07/1999	7,43	C	11/11/1999	2700	NC	17/04/2002	24	NC	08/08/2000	0,42	NC
11/11/1999	7,80	C	10/05/2000	2378	NC	21/08/2002	27	NC	20/12/2000	0,08	C
10/05/2000	7,40	C	08/08/2000	2479	NC	18/12/2002	26	NC	04/05/2001	0,40	NC
08/08/2000	7,48	C	20/12/2000	2692	NC	19/03/2003	51	NC	06/12/2001	0,50	NC
20/12/2000	7,55	C	04/05/2001	2030	NC	01/10/2003	28	NC	17/04/2002	0,54	NC
04/05/2001	8,08	C	06/12/2001	2670	NC	26/11/2003	26	NC	21/08/2002	0,48	NC
06/12/2001	8,12	C	17/04/2002	2010	NC	24/02/2004	21	NC	18/12/2002	0,55	NC
17/04/2002	8,12	C	21/08/2002	2370	NC	09/06/2004	20	NC	19/03/2003	3,30	NC
21/08/2002	8,05	C	18/12/2002	2500	NC	27/10/2004	27	NC	01/10/2003	0,45	NC
18/12/2002	8,08	C	19/03/2003	3520	NC	23/03/2005	27	NC	26/11/2003	0,45	NC
19/03/2003	8,18	C	01/10/2003	2620	NC	16/08/2005	27,8	NC	24/02/2004	0,44	NC
01/10/2003	8,36	C	26/11/2003	2540	NC	12/12/2005	33	NC	09/06/2004	0,40	NC
26/11/2003	8,30	C	24/02/2004	1950	NC	11/04/2006	38	NC	27/10/2004	0,56	NC
24/02/2004	8,19	C	09/06/2004	2150	NC	16/08/2006	29	NC	23/03/2005	0,48	NC
09/06/2004	8,07	C	27/10/2004	2500	NC	23/11/2006	31	NC	16/08/2005	0,44	NC
27/10/2004	8,02	C	23/03/2005	2310	NC	24/04/2007	29	NC	12/12/2005	0,48	NC
23/03/2005	8,05	C	16/08/2005	2510	NC	11/07/2007	30	NC	11/04/2006	0,44	NC
16/08/2005	8,25	C	12/12/2005	2860	NC	16/04/2008	26	NC	16/08/2006	0,14	NC
12/12/2005	8,09	C	11/04/2006	2070	NC	19/08/2008	28	NC	23/11/2006	0,62	NC
11/04/2006	8,21	C	16/08/2006	2390	NC	13/11/2008	30,2	NC	24/04/2007	0,42	NC
16/08/2006	8,10	C	23/11/2006	2710	NC	14/04/2009	29	NC	11/07/2007	0,50	NC
23/11/2006	8,10	C	24/04/2007	2600	NC	18/08/2009	19	NC	29/11/2007	0,46	NC
24/04/2007	8,14	C	11/07/2007	2710	NC	19/11/2009	26,4	NC	16/04/2008	0,56	NC
11/07/2007	8,11	C	29/11/2007	2760	NC	14/04/2010	27,6	NC	19/08/2008	0,48	NC
29/11/2007	8,31	C	16/04/2008	2710	NC	28/12/2010	41,1	NC	13/11/2008	0,67	NC
16/04/2008	7,87	C	19/08/2008	2450	NC	13/04/2011	22,5	NC	14/04/2009	0,37	NC
19/08/2008	7,74	C	13/11/2008	2670	NC	09/08/2011	24,6	NC	18/08/2009	0,40	NC
13/11/2008	8,09	C	14/04/2009	2524	NC	15/12/2011	28,9	NC	19/11/2009	0,34	NC
14/04/2009	8,22	C	18/08/2009	2120	NC	17/04/2012	20,5	NC	14/04/2010	0,33	NC
18/08/2009	7,94	C	19/11/2009	2558	NC	-	-	-	28/12/2010	0,82	NC

19/11/2009	8,08	C	14/04/2010	2295	NC	-	-	-	13/04/2011	0,36	NC
14/04/2010	7,96	C	17/08/2010	2882	NC	-	-	-	09/08/2011	0,32	NC
17/08/2010	8,27	C	28/12/2010	4437	NC	-	-	-	15/12/2011	0,43	NC
28/12/2010	8,06	C	13/04/2011	2839	NC	-	-	-	17/04/2012	0,49	NC
13/04/2011	8,12	C	09/08/2011	2891	NC	-	-	-	-	-	-
09/08/2011	8,31	C	15/12/2011	1879	NC	-	-	-	-	-	-
15/12/2011	8,25	C	17/04/2012	1989	NC	-	-	-	-	-	-
17/04/2012	8,10	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-

NCh: norma chilena C: cumple norma NC: no cumple norma (-) No hay datos

Para el cálculo del índice son necesarios tres factores:

- F1 (alcance) representa el porcentaje de parámetros que no cumplen con lo normado ("parámetros fallidos"), al menos una vez en el periodo que se analiza, con respecto al número total de parámetros:

$$F1 = \left( \frac{\text{parámetros fallidos}}{\text{total de parámetros}} \right) * 100$$

En este caso la variable pH es la única que cumple con lo normado, así que sólo hay 3 parámetros (variables) fallidos de 4 parámetros.

$$F1 = (3/4)*100 = 75$$

- F2 (frecuencia) representa el porcentaje de ensayos individuales que dieron resultados diferentes a lo normado (ensayos fallidos) del total de ensayos que se realizaron. Con ensayos se refiere a análisis de laboratorio que se realizan para cada parámetro.

$$F2 = \left( \frac{\text{ensayos fallidos}}{\text{total de ensayos}} \right) * 100$$

Ensayos fallidos (NC): 177

Ensayos totales (NC + C): 242

$$F2 = (177/242)*100 = 73,1$$

- F3 (amplitud) representa cuan diferente dio el resultado del ensayo con respecto al valor establecido.

Este factor se calcula en tres etapas:

El número de veces por el cual cada valor fallido es mayor (o menor, en el caso de que lo normado sea un valor mínimo) que el valor establecido se denomina "excursión". En el caso de que el valor calculado no deba exceder lo normado se calcula de la siguiente forma, como en este caso:

$$\text{excursión}_i = \left( \frac{\text{valor fallido}_i}{\text{valor normado}_j} \right) - 1$$

Para el cálculo del valor fallido se utilizó el promedio de los valores fallidos durante los años medidos para cada variable.

Promedio de valores fallidos (NC) pH: no hay valores fallidos o que no cumplen la norma.

Promedio de valores fallidos (NC) conductividad: 2597,9  $\mu\text{S}/\text{cm}$

Promedio de valores fallidos (NC) boro: 25,3 mg/L.

Promedio de valores fallidos (NC) arsénico: 0,54 mg/L

Reemplazando en la ecuación de excursión:

$$\text{pH excursión} = (0) - 1 = -1$$

$$\text{conductividad excursión} = (2597,9/1500) - 1 = 0,7$$

$$\text{boro excursión} = (25,3/0,75) - 1 = 32,7$$

$$\text{arsénico excursión} = (0,54/0,1) - 1 = 4,4$$

A continuación se calcula la suma normalizada de las excursiones (nse, siglas en inglés), dividiendo la sumatoria de las excursiones entre el total de ensayos realizados (tanto los que dieron valores que no cumplen con lo normado como aquellos que si cumplen):

$$\text{nse} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{excursión}_i}{\text{total de ensayos}}$$

$$\text{nse} = (-1 + 0,7 + 32,7 + 4,4) / 242 = 0,15$$

$$F3 = \left( \frac{\text{nse}}{0,01\text{nse} + 0,01} \right)$$

$$F3 = (0,15 / 0,01 * 0,15 + 0,15) = 13,04$$

- Una vez que se tienen los tres factores, el índice puede calcularse, sumándose los tres valores como si fueran vectores. La suma de los cuadrados de cada factor es igual al cuadrado del índice.

$$\text{CCME WQI} = 100 - \left( \frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1,732} \right)$$

$$\text{CCME WQI} = 100 - \left( \frac{\sqrt{75^2 + 73,1^2 + 13,04^2}}{1,732} \right)$$

$$\text{CCME WQI} = 39,1$$

## ANEXO F

### Ejemplo de cálculo ISQA

ISQA se basa en 5 parámetros fisicoquímicos.

$$ISQA = E * (A + B + C + D)$$

En donde:

- E: temperatura del agua (T en °C). Puede tomar valores comprendidos entre 0,8 y 1.
- A: demanda química orgánica según la oxidabilidad al permanganato (DQO-Mn en mg/L). Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 30. A partir de 2003 se empezó a calcular mediante el carbono orgánico total (COT en mg/L), que también estima la cantidad de materia orgánica presente en el agua, pero de una manera más reproducible y fiable. En este caso el parámetro A puede tomar valores comprendidos entre 0 y 30.
- B: sólidos en suspensión totales (SST en mg/L). Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 25.
- C: oxígeno disuelto (O<sub>2</sub> en mg/L). Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 25.
- D: conductividad (CE en μS/cm a 18 °C). Si la conductividad se mide a 25 °C, para obtener la conversión a 18 °C se multiplicará por 0,86. Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 20 según:

### Ejemplo

Para este ejemplo se utilizó los datos promedios de la estación de calidad de agua Colpitas en Alcérreca en 1998. No se tiene la información del parámetro A (DQO o COT) ni del parámetro B (SST).

-Conductividad: 3267 μS/cm

-Oxígeno disuelto: 8,3 mg/L

-Temperatura: 17 °C

Calculando:

- E: temperatura del agua en °C.

$$E = 1 \quad \text{si } T \leq 20 \text{ °C}$$

$$E = 1 - (T - 20) * 0,0125 \quad \text{si } T > 20 \text{ °C}$$



Como la temperatura es de 17°C entonces  $E = 1$ .

- C: oxígeno disuelto en mg/L.

$$C = 2,5 \cdot O_2 \quad \text{si } O_2 < 10 \text{ mg/L}$$

$$C = 25 \quad \text{si } O_2 \geq 10 \text{ mg/L}$$

Como el oxígeno disuelto es de 8,3 mg/L, entonces

$$C = 2,5 \cdot 8,3 = 20,7 \text{ mg/L}$$

- D: conductividad

$$D = (3,6 - \log CE) \cdot 15,4 \quad \text{si } CE \leq 4000 \mu\text{S/cm}$$

$$D = 0 \quad \text{si } CE > 4000 \mu\text{S/cm}$$

Como la conductividad es de 3267  $\mu\text{S/cm}$ , entonces

$$D = (3,6 - \log 3267) \cdot 15,4 = 1,3$$

➤ En resumen:

$$ISQA = E(A+B+C+D)$$

$$ISQA = 1 \cdot (20,7 + 1,3)$$

$$ISQA = 22$$