Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO EL TALA, CATAMARCA, ARGENTINA, A TRAVÉS DE ÍNDICES BIÓTICOS (BMWP', ASPT', IBF) Y DE UN ÍNDICE FISICOQUÍMICO (ISCA)

Raúl Alejandro Jó Hernández
Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias,
Y coasesorado por Ing. Marta Alicia Saracho
Dra. Liliana Beatriz Salas

Guatemala, enero de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO EL TALA, CATAMARCA, ARGENTINA, A TRAVÉS DE ÍNDICES BIÓTICOS (BMWP', ASPT', IBF) Y DE UN ÍNDICE FISICOQUÍMICO (ISCA)

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

RAÚL ALEJANDRO JÓ HERNÁNDEZ
ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO AMBIENTAL

GUATEMALA, ENERO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
EXAMINADOR	Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza
EXAMINADOR	Ing. Carlos Vinicio Godínez Miranda
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO EL TALA, CATAMARCA, ARGENTINA, A TRAVÉS DE ÍNDICES BIÓTICOS (BMWP', ASPT', IBF) Y DE UN ÍNDICE FISICOQUÍMICO (ISCA)

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 31 de octubre de 2017.

Raúl Alejandro Jó Hernández

FIUSAC
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA.

Edificio T-5, Ciudad Universitaria, zona 12, Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 10 de julio de 2018

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad San Carlos de Guatemala
Presente

Ingeniero Wong:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación al Informe Final del Trabajo de Graduación titulado "EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO EL TALA, CATAMARCA-ARGENTINA, A TRAVÉS DE ÍNDICES BIÓTICOS (BMWP', ASPT', IBF) Y DE UN ÍNDICE FISICOQUÍMICO (ISCA)", del estudiante de Ingeniería Ambiental, Raúl Alejandro Jo Hernandez quien se identifica con el carné universitario número 2013 - 14072 y DPI 241769728 0101.

Sin otro particular, me suscribo a usted.

Atentamente,

Jorge Mario ESTRADA ASTURIAS
Ingeniero Químico, Col. 685
M. Sc. Ingeniería Sanitaria
PROFESOR TITULAR
Escuela de Ing. Química USAC

Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
Asesor

SAN FERNANDO DEL VALLE DE CATAMARCA, 14 DE DICIEMBRE DE 2017

SRA DECANA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CATAMARCA
MGTER LIC. SUSANA MARTÍNEZ DE MONTIEL
S/D

Tengo el agrado de dirigirme a Ud. a efectos de elevar, a los fines correspondientes, la versión impresa del Trabajo Final titulado "Evaluación de la calidad del agua del río El Tala, Catamarca-Argentina, a través de índices bióticos (BMWP', ASPT', IBF) y de un índice fisicoquímico (ISCA)".

El mismo cuenta con el aval de la directora del trabajo, Ing Marta Saracho y de la asesora Lic. Liliana Salas.

Sin otro particular saludo a Ud. muy atentamente

Raul Jo Hernandez
Alumno vocacional.
MU N° N° 00023

Avales

Lic. Liliana Salas
Asesora

Ing. Marta Saracho
Directora

15/12/17
Recibido

Guatemala, 06 de septiembre de 2018.
Ref. EIQ.TG-IF.038.2018.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **048-2018** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad de Intercambio Académico y Movilidad Estudiantil-

Solicitado por el estudiante universitario: **Raúl Alejandro Jó Hernández.**
Identificado con número de carné: **2417 69728 0101.**
Identificado con registro académico: **2013-14072.**
Previo a optar al título de **INGENIERO AMBIENTAL**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO EL TALA, CATAMARA, ARGENTINA, A TRAVÉS DE ÍNDICES BIÓTICOS (BMWP', ASPT', IBF) Y DE UN ÍNDICE FISICOQUÍMICO (ISCA)

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por: **Inga. Marta Alicia Saracho, Dra. Liliana Beatriz Salas e Ing. Jorge Mario Estrada Asturias.**

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

ESCUELA INGENIERIA QUIMICA
AREA TRABAJOS DE GRADUACION
FIUSAC

Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo

Universidad Nacional de Catamarca
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

CERTIFICADO

Por la presente, en mi carácter de **Secretario Académico** de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Catamarca, CERTIFICO que **Jo Hernández Raúl Alejandro,** PASAPORTE N° 241769728 0101 - M.U. N° 00023 culmino durante el ciclo académico 2017 el Trabajo Final titulado ***"Evaluación de la calidad del agua del río El Tala, Catamarca – Argentina, a través de índices bióticos (BMWP', ASPT', IBF) y de índice fisicoquímico (ISCA)"*** defendido y aprobado el día 20/12/2017.

Se expide el presente certificado a pedido del interesado y a los fines de ser presentado ante las autoridades que lo requieran, a los 21 días del mes de diciembre de 2017 en la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca.

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES U.N.Ca.

Lic. CESAR AUGUSTO ESCOBAL BLANCO
SECRETARIO ACADEMICO
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CATAMARCA

Ref.EIQ.TG.005.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del **Trabajo de Graduación** de la carrera de **Ingeniería Ambiental** del estudiante, **RAÚL ALEJANDRO JÓ HERNÁNDEZ** titulado: **"EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO EL TALA, CATAMARCA, ARGENTINA, A TRAVÉS DE ÍNDICES BIÓTICOS (BMWP´, ASPT´, IBF) Y DE UN ÍNDICE FISICOQUÍMICO (ISCA) "**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, enero 2019

FACULTAD DE INGENIERIA USAC
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
DIRECTOR

Cc: Archivo
CSWD/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 033.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO EL TALA, CATARMARCA, ARGENTINA, A TRAVÉS DE ÍNDICES BIÓTICOS (BMWP´, ASPT´, IBF) Y DE UN ÍNDICE FISICOQUÍMICO (ISCA),** presentado el estudiante universitario: **Raúl Alejandro Jó Hernández,** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, enero de 2019

/gdech

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANO
FACULTAD DE INGENIERIA

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por las herramientas que pusiste en mi camino para alcanzar las metas propuestas.
Mis padres	Evelyn Hernández y Raúl Jó, por su incondicional apoyo y por ser la fuente de mi inspiración y fortaleza en cada momento, así como por ser quienes creyeron en mí cada momento de este triunfo compartido.
Mis hermanos	Sebastián Jo y Gabriela Jo, por ser combustible del motor que me impulsó hacia adelante y por siempre estar a mi lado.
Mis abuelos	Josefina Salvatierra, Elvia Way y Raúl Jó, por estar presentes en cada lucha, por sus sacrificios durante mi desarrollo y por su fortaleza para acompañarme durante este triunfo.
Guatemala	Porque cada uno de los esfuerzos realizados son para mejorar las condiciones de mi tierra. Por darme todas las herramientas para mi crecimiento tanto profesional como personal.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi alma máter, por brindarme todos los conocimientos técnicos, científicos, profesionales y personales para cumplir cualquier tarea propuesta.
Facultad de Ingeniería	Por la oportunidad de formar parte de un grupo de personas comprometidas con el desarrollo de Guatemala y por impartir los conocimientos necesarios para lograrlo.
Universidad Nacional de Catamarca	Específicamente a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, por permitirme desarrollar mi trabajo de graduación en sus instalaciones y por proveer todas las herramientas necesarias durante el tiempo de estadía.
El grupo de expertos	En Argentina a la Doctora Liliana Beatriz Salas y a la Ingeniera Marta Alicia Saracho, y en Guatemala al Ingeniero Jorge Mario Estrada Asturias. Por su invaluable conocimiento plasmado en mi trabajo de graduación.

Mi familia	Por compartir conmigo este sueño del cual termina hoy una fase, por su apoyo incondicional. Por cada palabra de aliento y porque que nunca me faltó nada para alcanzar este momento.
Mis amigos de la facultad	Específicamente Luis Carlos Hernández, Sofía García, Eddy Moir y Beatriz Ortiz, por conformar a mi lado un grupo de personas comprometidas con esta pasión, por cada palabra de apoyo y por cada momento juntos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES V
LISTA DE SÍMBOLOS IX
GLOSARIO XI
RESUMEN XV
OBJETIVOS XIX
INTRODUCCIÓN XXI

1. ANTECEDENTES 1

2. JUSTIFICACIÓN 7

3. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA 9
   3.1. Definición 9
   3.2. Delimitación 9

4. MARCO TEÓRICO 11
   4.1. El agua y la problemática social 11
   4.2. Abundancia del agua en el mundo 11
   4.3. El ciclo hidrológico 12
   4.4. Clasificación del agua dulce 13
   4.5. Ríos 13
   4.6. Lagos 13
   4.7. Aguas subterráneas 14
   4.8. Varios 14
   4.9. Cuenca hidrográfica 15

4.10. El agua y sus propiedades 15
4.11. Clasificación del agua según sus características 16
4.11.1. Agua cruda o en estado natural 17
4.11.2. Aguas residuales 17
4.11.3. Agua tratada 17
4.12. Parámetros físicos, químicos y biológicos del agua 18
4.12.1. Parámetros físicos 18
4.12.1.1. Turbiedad 18
4.12.1.2. Color 18
4.12.1.3. Olor y sabor 19
4.12.1.4. Temperatura 19
4.12.1.5. Conductividad (CE) 19
4.12.1.6. Sólidos 20
4.12.1.7. Sólidos totales (ST) 20
4.12.1.8. Sólidos sedimentables (SSED) 20
4.12.1.9. Sólidos disueltos (SDT) 20
4.12.1.10. Sólidos suspendidos (SST) 20
4.13. Parámetros químicos 21
4.13.1. pH (potencial de hidrógeno) 21
4.13.2. Oxígeno disuelto (OD) 22
4.13.3. Oxígeno consumido del permanganato de potasio 22
4.14. Parámetros o características biológicas 22
4.15. Calidad del agua 23
4.16. Índices de calidad del agua 24
4.16.1. Índices fisicoquímicos 25
4.16.2. Índice simplificado de calidad del agua (ISCA) 27
4.16.3. Índices biológicos 29
4.17. Sistemas de información geográfica (SIG) 34

4.18. Características geográficas de la provincia de Catamarca, Argentina 36
4.19. Descripción del ambiente físico de la Provincia..... 37
4.19.1. Geología provincial: 37
4.19.2. Ambientes climáticos: 38
4.19.3. Hidrografía 40

5. DISEÑO METODOLÓGICO 43
5.1. Variables..... 43
5.2. Delimitación de campo de estudio 43
5.3. Recursos humanos disponibles 48
5.4. Recursos materiales disponibles 49
5.5. Técnica 50
5.6. Recolección y ordenamiento de la información 51
5.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información 52
5.8. Análisis de los resultados 52
5.8.1. Métodos y modelos de datos 62
5.8.2. Mapas de zonificación con SIG 62
5.8.3. Programas utilizados para el análisis de datos..... 63

6. RESULTADOS 65
6.1. Evaluación biológica de la calidad del agua 65
6.1.1. Índice BMWP' ajustado para el NOA 65
6.1.2. Índice ASPT' (Average Score Per Taxon) 69
6.2. Índice Biótico de Familias (IBF) 70
6.3. Evaluación fisicoquímica de la calidad del agua..... 72
6.3.1. Cálculo de la variable "T" 72
6.3.2. Cálculo de la variable "A" 74

6.3.3. Cálculo de la variable “B” 76
6.3.4. Cálculo de la variable “C” 77
6.3.5. Cálculo de la variable “D” 79
6.3.6. Cálculo del índice ISCA 80
6.4. Parámetro complementario 82
6.5. Correlación de los índices bióticos (BMWP’, ASPT’ e IBF) con el índice fisicoquímico (ISCA) 83
6.6. Mapas de la variación longitudinal de la calidad del agua del Río El Tala 85

7. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS 91

CONCLUSIONES 101
RECOMENDACIONES 103
BIBLIOGRAFÍA 105
APÉNDICES 117

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Localización de la provincia de Catamarca y sus departamentos. IGN Argentina (QGIS) 37
2. Ubicación de las estaciones de muestreo a lo largo del Río El Tala 46
3. Estaciones de muestreo 48
4. Muestreo para la evaluación biológica de la calidad del agua 51
5. Estereomicroscopio Arkano (0,7 a 4 x 10-15) utilizado en la identificación de las muestras 53
6. Separación de las muestras biológicas para su clasificación taxonómica 54
7. pHmetro portátil modelo Hanna HI 8424 55
8. Multiparamétrico Hach modelo SensIon 5 56
9. Valoración de oxígeno consumido del permanganato de potasio 58
10. Microfiltrado de la muestra para la determinación de sólidos suspendidos totales 59
11. Muestras de agua del Río El Tala para análisis de OD 61
12. Determinación de OD por el método de Winkler 61
13. Familias de macroinvertebrados bentónicos encontrados en el Río El Tala, Catamarca, Argentina 67
14. Variación longitudinal de la calidad del agua del Río El Tala según el Índice BMWP' 69
15. Variación longitudinal de la calidad del agua del Río El Tala según índice ASPT' 70

16. Variación longitudinal de la calidad del agua del Río El Tala según índice IBF 72
17. Valores promedio de la variable “T” para cada estación de muestreo 74
18. Promedio de la variable “A” en cada estación de muestreo 75
19. Promedio de la variable B en cada estación de muestreo 77
20. Promedio de la variable C en cada estación de muestreo 78
21. Promedio de la variable D en cada estación de muestreo 80
22. Variación longitudinal de la calidad del agua según índice ISCA (promedio) 82
23. Correlación entre los resultados de los índices ISCA BMWP’ 84
24. Correlación entre los resultados de los índices ISCA – ASPT’ 84
25. Correlación entre los resultados de los índices ISCA – IBF’ 85
26. Mapa de la variación longitudinal de la calidad del agua según índice ISCA 86
27. Mapa de la variación longitudinal de la calidad del agua según índice BMWP’ 87
28. Mapa de la variación longitudinal de la calidad del agua según índice ASPT’ 88
29. Mapa de la variación longitudinal de la calidad del agua según índice IBF (QGIS 2.12.3 y ArcMap 10.2.2) 89

TABLAS

I. Resumen del cálculo de las variables para la ecuación ISCA 28
II. Clases de calidad del agua según índice ISCA 28
III. Familias de macroinvertebrados bentónicos y sus correspondientes puntuaciones asignadas para la obtención del índice BMWP’, ajustado para el NOA 31

IV. Clases de calidad del agua según los valores del índice BMWP' ajustado para el NOA y código de colores 32
V. Clases de calidad según los valores de referencia del índice ASPT' 32
VI. Valores de tolerancia de macroinvertebrados utilizados en la determinación de ÍBF 33
VII. Sistema de clasificación de agua basado en los valores del IBF 34
VIII. Estaciones de muestreo en el Río El Tala 47
IX. Presencia (1) / ausencia (0) de las familias de macroinvertebrados bentónicos, reportados para el Río El Tala, Catamarca 66
X. Puntaje del índice ASPT' 69
XI. Cálculo del Índice IBF (A: abundancia; VT: valor de tabla) 71
XII. Variable "T" para el índice ISCA 73
XIII. Cálculo de la variable "A" para el índice ISCA 75
XIV. Cálculo de la variable "B" para el índice ISCA 76
XV. Cálculo de la variable "C" para el índice ISCA 78
XVI. Cálculo de la variable "D" para el índice ISCA 79
XVII. Cálculo del índice ISCA 81
XVIII. Valores del ISCA en cada estación y fecha de muestreo 81
XIX. pH del agua del Río El Tala 82
XX. Correlación de los índices de calidad del agua (coeficiente de correlación de Spearman) 83

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ρ	Coeficiente del test de Spearman
°C	Grados Celsius
msnm	Metros sobre el nivel del mar
µS/cm	Microsiemens por centímetro
N/A	No aplica
OC	Oxígeno consumido
OD	Oxígeno disuelto
pH	Potencial de hidrógeno
SST	Sólidos suspendidos totales
T	Temperatura

GLOSARIO

Afluente	Cuerpo de agua cuya desembocadura no se produce en el mar sino en un río de mayor importancia.
Agua residual cruda	Agua residual que no ha recibido tratamiento, de origen ya sea doméstico, comercial, industrial o combinación de estos.
Bioindicador	Indicador biológico que permite intuir o descifrar fenómenos, actuales o pasados, relacionados con la calidad ambiental.
Biota	Conjunto de las especies biológicas, flora, fauna y organismos que habitan un sitio.
BMWP	Biological Monitoring Working Party. Índice biótico.
Cauce	Lugar físico y concreto en el cual transcurre un río.
Correlación	Indica la correspondencia o relación recíproca que se da entre 2 ó más valores. Define estadísticamente la fuerza y dirección lineal que se establece entre dos o más variables.

Ecosistema	Comunidad de seres vivos que habita un área, cuyos procesos vitales tienen una relación entre sí.
Evaluación de calidad del agua	Monitoreo inmediato de los parámetros de un cuerpo de agua para la detección de la calidad ambiental del recurso.
GPS	Global Positioning System. Sistema global.
Hábitat	Lugar que cumple con las condiciones para el establecimiento de la vida de algunas especies, en el cual se establece una población.
Índice biótico	Cuantificación de la calidad ambiental de un sistema, en este caso hídrico, según el tipo de biota que se desea evaluar y que se encuentre establecida en el mismo.
IBF	Índice Biótico de Familias.
ISCA	Índice Simplificado de la Calidad del Agua.
Larva	Animal en estado de desarrollo que después del momento de abandono de las cubiertas de huevo es capaz de nutrirse a sí mismo pero que no ha adquirido la forma y organización propia de un adulto de su especie.

Macroinvertebrado	Insectos que son observables a simple vista, con medidas que van entre los 2 milímetros y 30 centímetros.
Microcuenca	Terreno delimitado por las partes altas de sierras o montañas, el cual se desprende de la medida básica de la hidrología. Área en la cual se concentra el total de agua para desplazarse por distintos procedimientos y desembocar a una quebrada, arroyo, río o lago.
NOA	Nor Oeste Argentino.
Organismos bentónicos	Aquellos que viven en el fondo de los cuerpos acuáticos y realizan sus funciones vitales en dependencia del sustrato.
Parámetro	Valor numérico que se considera para el estudio de una materia en específico.
Pupa	Fase de desarrollo de un organismo macroinvertebrado, posterior al estado de la larva y previo al de la adultez.
Shape	Un archivo digital conocido como *shapefile* con extensión .shp, el cual contiene características que pueden ser puntuales, lineales o poligonales de un elemento que se encuentra georreferenciado al globo terráqueo en un sistema de coordenadas,

	aplicado en software para la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG).
SIG	Sistemas de Información Geográfica.
Taxón	Grupo de organismos emparentados que debido a su clasificación y características recibe un nombre en latín para su sencilla identificación a nivel mundial.

RESUMEN

Actualmente tres cuartas partes de la tierra están cubiertas por agua; de esta fracción, el 0,02 % forma parte de los ambientes de agua dulce, tanto lóticos como lénticos, de los cuales el hombre puede obtener agua para consumo, riego y recreación. Por lo expuesto, es muy necesario conocer la calidad biológica y fisicoquímica del agua destinada a los diferentes usos que le darán los seres humanos.

La población de San Fernando del Valle de Catamarca sufre actualmente un déficit en materia de abastecimiento de agua. Una de las principales fuentes es el Río El Tala. Los objetivos de este trabajo final fueron: evaluar la calidad del agua del Río El Tala, mediante índices bióticos basados en macroinvertebrados bentónicos: BMWP' (Biological Monitoring Working Party), ajustado para el NOA , ASPT' (Average Score Per Taxon) e IBF (Índice Biótico de Familias); evaluar la calidad fisicoquímica del agua, aplicando el Índice Simplificado de Calidad de Agua (ISCA); relacionar los valores del ISCA con los valores de los índices bióticos para establecer la aptitud del recurso hídrico para diferentes usos y elaborar mapas de zonificación de la calidad del agua del Río El Tala por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Se establecieron cuatro estaciones de muestreo siguiendo la Ruta Provincial Nº 4, km 5 (ingreso al Camping Municipal), km 9 (Loma Cortada); km 16 y km 22. La calidad biológica se evaluó utilizando tres índices bióticos basados en macroinvertebrados bentónicos: BMWP', ASPT' e IBF. Para su cálculo, en cada estación de muestreo se obtuvieron tres muestras con muestreador tipo Surber (de 0,09 m2 de superficie y 300 µm de abertura de

malla), fijadas *in situ* con alcohol etílico 96 %. En laboratorio y bajo estereomicroscopio se separaron, determinaron (hasta el taxón familia) y contaron los organismos. Se conservaron en tubos Eppendorf con solución de alcohol etílico 70 %. Para la evaluación fisicoquímica se obtuvo el Índice Simplificado de Calidad de Agua (ISCA). La toma de muestras y las determinaciones se realizaron siguiendo técnicas estandarizadas, APHA, AWWA y WEF-IRAM N° 29012-3/98, así como
ISO 5667-3/94.s. Las correlaciones se obtuvieron aplicando el *test* no paramétrico de Spearman con el programa Infostat 2017e.

El mapa de zonificación longitudinal de calidad de agua se elaboró combinando los programas ArcMap 10.2.2 y QGis 2.12.3. El valor del índice BMWP' varió en el rango de 83 a 90, clasificando al agua en la clase de calidad I: muy buena. El índice ASPT' alcanzó valores entre 5,19 y 7,0 que correspondieron con la clase de calidad: sin impacto. El valor del índice IBF varió en puntajes que la establecieron en 3 clases de calidad: 3,69, correspondiente a la clase I: excelente; 3,89 y 4,15 correspondientes a la clase II: muy buena, y 4,7, correspondiente a la clase III: buena.

Los valores del índice ISCA en todas las estaciones de monitoreo fueron mayores a 90 puntos, lo cual correspondió a la clase de calidad: aguas claras sin aparente contaminación. La calidad del agua está protegida, se da por sentado una ausencia total de amenazas. El índice ISCA presentó una correlación lineal positiva con el índice BMWP', con un coeficiente $\rho = 1$. Los mapas de variación longitudinal de la calidad del agua muestran la codificación de colores para cada uno de los índices aplicados y responden a los puntajes establecidos anteriormente. La evaluación de la calidad del agua del Río El Tala en el tramo estudiado evidenció resultados favorables, caracterizándolo como recurso hídrico sin impactos ambientales significativos. El análisis correlativo de

las variables permitió mostrar la estrecha relación entre los parámetros fisicoquímicos y bióticos de un cuerpo de agua.

OBJETIVOS

General

Evaluar la calidad del agua del Río El Tala, mediante índices bióticos (BMWP', ASPT' e IBF) basados en macroinvertebrados bentónicos y mediante la aplicación del índice Simplificado de Calidad del Agua (ISCA), para establecer una relación de los resultados obtenidos y elaborar mapas de zonificación mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Específicos

1. Evaluar la calidad del agua del Río El Tala, mediante índices bióticos basados en macroinvertebrados bentónicos (BMWP', ASPT' e IBF).

2. Evaluar la calidad fisicoquímica del agua del Río El Tala, aplicando el Índice Simplificado de Calidad de Agua (ISCA).

3. Relacionar los valores del ISCA con los valores de los índices bióticos para establecer la actitud del recurso hídrico para diferentes usos.

4. Elaborar mapas de zonificación de la calidad del agua del Río El Tala por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

INTRODUCCIÓN

El manejo adecuado del recurso hídrico permite el desarrollo sostenible de cualquier región en el mundo. Como herramienta de protección se establecen mecanismos de control y monitoreo de su calidad ambiental, con el objetivo de garantizar la existencia para futuras generaciones y para promover la planificación de obras de carácter hidráulico que permitan continuar aprovechando el agua de una manera sostenible con el sector natural, social e industrial.

Paralelamente al desarrollo de la humanidad, las descargas de aguas residuales domésticas e industriales empezaron a contaminar los recursos hídricos y a deteriorar los ecosistemas, por lo cual se hizo necesario implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales. En la actualidad la disponibilidad de agua en cantidad suficiente y de buena calidad es una de las principales necesidades de una población. Es preciso diagnosticar los problemas relacionados con la calidad del agua, vincular dichos problemas con los diferentes usos deseados para el agua y determinar las variables que necesitan ser monitoreadas en conjunto para conocer la calidad del recurso hídrico[1].

Guatemala cuenta con una red hídrica superficial que cubre cerca de 1 000 km^2 de los 108 900 km^2; cuenta con aproximadamente 27 000 km lineales de cursos de agua superficial. Pero aunque los recursos hídricos superficiales son abundantes, están distribuidos de manera desigual, sufren cambios

[1] SIERRA RAMÍREZ, Carlos Alberto. *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico.*, p. 78.

estacionales y generalmente están contaminados[2]. Dicha contaminación es originada por el vertido en las fuentes de agua de todo tipo de desechos, problema que con el pasar de los años crece de manera desmesurada y sin una aparente solución.

En Argentina la concientización del monitoreo de la calidad ambiental de los recursos hídricos ha crecido de manera exponencial, dando como resultado el desarrollo de diferentes líneas de investigación que han adaptado medidas e índices internacionales de control para los ecosistemas existentes en una región en específico. La adaptación de índices de bioindicación acompañados por análisis fisicoquímicos de calidad del agua ha mejorado el alcance de los resultados obtenidos por los investigadores. Se han generado así oportunidades certeras, realistas y adecuadas para que las autoridades pertinentes puedan desarrollar actividades de evaluación, control y seguimiento de la calidad ambiental de sus recursos hídricos, como también la construcción de infraestructura que permita la prevención de la contaminación del agua.

La ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca, capital de la provincia de Catamarca, tiene una superficie aproximada de 687 km^2 y una población de 160.058 habitantes. Uno de los principales problemas que afectan a sus habitantes es el déficit crónico de abastecimiento hídrico, el cual se ve agudizado en la época de verano por la disminución en el caudal y en el aporte de las fuentes superficiales. En adición a ello existe el riesgo de la contaminación del recurso hídrico debido a descargas de efluentes cloacales crudos o de sistemas cloacales que son volcados de manera directa e indirecta en la cuenca hidrográfica[3].

[2] SPILLMAN, Robert; y otros. *Water resource assesment of Guatemala.* p. 32.
[3] SARACHO, Marta; y otros. *Análisis de la variabilidad espacial de la calidad del agua del Río El Tala, Catamarca.* p. 4.

El Río El Tala es un curso de agua que es utilizado tanto para abastecimiento de agua potable a la población de San Fernando del Valle de Catamarca (actualmente alimenta dos plantas de tratamiento), como para usos recreativos[4]. Su corriente es de flujo permanente y de régimen pluvial y recibe el aporte de varias fuentes[5].

La presente investigación se realizó para evaluar la calidad del agua del Río El Tala por medio de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores y de parámetros fisicoquímicos, lo que se representó en mapas de zonificación. Este estudio, promovido por el Programa de Intercambio y Movilidad Académica (PIMA), pretende generar una doble vía de intercambio de conocimientos y desarrollo. Para el tema de investigación propuesto, la Universidad de San Carlos de Guatemala seleccionó a un estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, quien trabajó en un importante curso de agua de la provincia de Catamarca, Argentina.

En el proceso de investigación se ha reconocido la importancia de la aplicación de un índice biótico: BMWP', ajustado para la región del Noroeste Argentino, que generó resultados confiables de la calidad del agua, los cuales, al complementarse con el índice fisicoquímico ISCA, posibilitaron una comprensión integral del funcionamiento del ecosistema.

[4] S.A.P.E.M. *Aguas de Catamarca.* p.34
[5] LOBO, Patricia; ALVES, Julio; VARELA, Miguel. *Conceptos de hidrología. Hidrología de Catamarca. p.83.*

1. ANTECEDENTES

El agua es un recurso esencial que requiere la máxima atención de los Estados por ser indispensable para la preservación de la vida y encontrarse expuesta al deterioro, en ocasiones irreversible, ocasionado por un uso irresponsable e intensivo. El monitoreo periódico de los cuerpos de agua es una de las actividades más importantes para la gestión del recurso hídrico. Esta actividad permite la detección temprana de cambios en la calidad del recurso. Sin embargo, el monitoreo no es solo hacer mediciones: se reconoce cada vez más que los datos deben estar disponibles. La comunicación de los resultados implica una retroalimentación y, además, permite que la información recopilada sea utilizada en las decisiones de gestión de los recursos naturales[6].

El monitoreo de las fuentes de agua se convierte en una herramienta de gran importancia para su vigilancia. Los indicadores ambientales nacen como respuesta a la necesidad de obtener información relevante sobre diversos temas ambientales; los datos obtenidos se deben presentar en un formato que permita su análisis y que sea favorable para el uso de estadísticas. Siendo la calidad del agua una problemática a nivel mundial, diversos países en consecuencia con la realidad han observado, investigado y desarrollado proyectos que, con fundamento científico, han realizado aportes importantes para el monitoreo de la calidad ambiental de sus recursos naturales[7].

Horton propuso, en el año 1965, el uso del primer índice de calidad, ICA (Índice de Calidad Ambiental), para la estimación de patrones o condiciones de

[6] SIERRA RAMIREZ, Carlos Alberto. *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico.* p. 65.
[7] CASTRO, Mario; y otros. *Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global.* P.54..

contaminación acuática, siendo pionero en la generación de una metodología unificada para su cálculo. Aplica diez variables incluyendo las comúnmente monitoreadas como el oxígeno disuelto, recuento de coliformes, pH, conductancia específica, alcalinidad, contenido de cloruro y temperatura.

El índice universal de la calidad del agua (UWQI), implementado a partir de 1981 en Cuba, pondera 23 variables fisicoquímicas y microbiológicas que pueden ser a su vez básicas o complementarias de acuerdo a los diferentes usos del agua.

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (DEAM, 2014), de Colombia, propone para evaluar la calidad del agua en corrientes superficiales el índice ICA, valor numérico que califica en cinco categorías dicha calidad, con base en las mediciones obtenidas para un conjunto de cinco o seis variables, registradas en una estación de monitoreo “j” en el tiempo “t”. De manera análoga se han aplicado metodologías estandarizadas en la realización de investigaciones en todo el mundo. En Latinoamérica se puede destacar las siguientes:

En Paraguay se evaluó la calidad del agua del arroyo Aguapey mediante el empleo del Índice Simplificado de Calidad de Agua (Alonso, 2007). Mediante la aplicación de esta metodología, con el respaldo de legislación actualizada y vigente dentro del territorio, se realizaron muestreos entre julio de 2012 y febrero de 2013, en las cuatros estaciones presentes en dicho país. Al analizar los datos obtenidos se pudo determinar que el agua del arroyo Aguapey se encontraba medianamente contaminada por presencia de materia orgánica y se hizo énfasis en que durante las estaciones de primavera y verano (la primera y segunda del año) se presenció la mayor cantidad de contaminación debido a actividades agropecuarias y urbanas.

El índice Biological Monitoring Working Party (BMWP') fue establecido en Inglaterra en 1970, como un método sencillo y rápido para evaluar la calidad del agua usando los macroinvertebrados como bioindicadores[8]. Este método es de fácil utilización, ya que la identificación de los macroinvertebrados a nivel de familia no requiere de mucho esfuerzo taxonómico, de dinero y de tiempo, y por el contrario, es mucha la información que se obtiene sobre la calidad biológica del agua. Los aspectos biológicos han adquirido una creciente importancia en el estudio de los sistemas acuáticos, debido a que las variables fisicoquímicas no determinan con precisión la calidad de las aguas y solo dan una idea puntual sobre ella. La utilización de las comunidades acuáticas como bioindicadores permite emplearlas como testigos biológicos del nivel de deterioro ambiental de las corrientes superficiales y evidenciar las condiciones y los cambios ecológicos acaecidos en ellas.[9]

Sierra Ramírez, en 2011, desarrolló una amplia evaluación sobre el tema para el control y manejo de cuerpos de agua lenticos (lagos y embalses) y lóticos (ríos) no solo en Medellín, Colombia, sino en toda Latinoamérica. Consideró diferentes aspectos generales a tener en cuenta para poner en marcha una investigación enfocada a la preservación, protección y mejoramiento de los cuerpos de agua dulce superficiales.

Acuña, en 2013 desarrolló una investigación titulada: *Determinación de la calidad del agua en la subcuenca del Río Quiscab, departamento de Sololá, Guatemala mediante dos índices bióticos, ETP (Ephemeroptera-Trichoptera-Plecoptera) y BMWP-CR (Biological Monitoring Working Party ajustado para Costa Rica).* Concluye que estos índices son aplicables a cuerpos de agua más

[8] ROLDAN, Patricia; VILLAGRA, Mónica. *Ictiofauna del Arroyo Tala, Provincia de Catamarca, Argentina.* p. 45.
[9] ALBA-TERCEDOR, Julio. *Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos*. p. 67.

poblados de comunidades bióticas; la falta de las mismas determina resultados no confiables.

La influencia de la calidad fisicoquímica sobre la biota del agua de la microcuenca del Río Contreras, Municipio de Guatemala, fue estudiada aplicando los índices ISQA (Simplified Index for Water Quality) y BMWP-CR, según Mendéz Spiegeler en 2015. La calidad del agua fue evaluada entre regular a mala a lo largo de la cuenca en la época de estiaje y el tipo de correlación entre ambos índices no fue lineal sino polinómico de segundo grado.

En la República Argentina se estudiaron parámetros de evaluación, control y monitoreo de la calidad del agua mediante la aplicación de macroinvertebrados bentónicos como indicadores de la calidad del agua de los ríos de montaña del noroeste, en la región entre los paralelos del 22° y 30° de latitud S y los meridianos de 62° y 69° de longitud O, para un total de 557 921 km2[10]. Se concluye sobre la importancia del desarrollo de herramientas con criterios numéricos para el desarrollo del índice BMWP' adaptado para el NOA.

En Catamarca, la evaluación de la calidad del agua de ambientes lóticos se ha realizado en diferentes cursos de agua pertenecientes a la gran cuenca del río del Valle. Al respecto se pueden citar a: Grosso, et al. (1999) y Vides Almonacid, et al. (1999), con sus trabajos en ríos del Departamento Andalgalá. Cursos de agua del departamento Capayán fueron estudiados por: Salas (2000); Salas y Malandrini (2001); Garaventa, et al. (2002); Salas (2005); Salas y L. de Grosso (2005ª y 2005b); Salas, et al. (2005); Salas (2006ª y 2006b); Salas y L. de Grosso (2006); Rodríguez Garay (2007), Salas (2007), Tomasi, et al. (2010), Chapes (2010), Ferrer y Salas (2011), Aldana (2011), Mestrocoldi

[10] DOMÍNGUEZ, Eduardo, FERNÁNDEZ, Hugo. *Calidad de los ríos e la cuenca del Salí (Tucumán, Argentina) medida por un índice biótico.* p. 22.

(2011), Ramos (2017). Cativa (2013) trabajó en el Río Mutquín (Departamento Pomán). El Río El Tala (Departamento Capital) fue estudiado por Colla, et al. (2013). En el Departamento Ambato, Zelarayán Medina y Salas (2014ª y b) investigaron los ríos Las Juntas y Ambato. Reportes realizados por distintos investigadores muestran, de manera considerable, los resultados del uso de índices bióticos, por su facilidad de aplicación y por el hecho de contar con indicadores específicamente desarrollados para el NOA, en Argentina.

En Catamarca, los antecedentes sobre la aplicación del ISCA son escasos. Se pueden mencionar los trabajos de Saracho, en 2004, quien lo calculó para caracterizar el agua del Río El Tala, estudio complementado con indicadores bacteriológicos. Según la teoría, en la aplicación de índices de calidad de agua resulta importante la confrontación de resultados de diversos tipos de índices.

Si bien el presente estudio se desarrolló en el Río El Tala, ubicado en San Fernando del Valle de Catamarca, capital de la provincia de Catamarca en el noroeste de la República Argentina, se considera que los resultados obtenidos pueden servir en Guatemala para el desarrollo, a futuro, de líneas de base para la adaptación de índices bióticos existentes en la ejecución de proyectos que puedan considerar las características y riqueza faunística presente en los cuerpos de agua del país.

Guatemala es un país rico en recursos naturales; entre ellos es importante destacar la red hídrica dentro del país. Guatemala posee 38 cuencas hidrográficas, una red de 27 000 km lineales y un volumen de escorrentía total de 100 millones de m3, los cuales se distribuyen en tres vertientes principales, la del Océano Pacifico, la del Mar Caribe y la del Golfo de México. También posee más de 300 lagos y lagunas, siendo el mayor de ellos el Lago de Izabal,

con una extensión de 589 km2. El río más caudaloso es el Usumacinta, con un caudal medio anual de 1 776 m3/s, seguido por otros importantes como el Río Motagua, con 189 m3/s, y el Cahabón con 166 m3/s. En total los cuerpos de agua ocupan una superficie de 1 600 km2 del país.

Los cuerpos superficiales de agua en Guatemala abastecen a muchas comunidades y, debido a un deficiente o inexistente sistema de tratamiento de agua, se descarga constantemente agua residual de origen doméstico, industrial y/o comercial de manera directa a los ríos, arroyos, quebradas, etc. El aumento en la densidad poblacional, con una tasa del 2,5 % anual en el área rural y 3,4 % en el área urbana, según el Instituto Nacional de Estadística (INE) en el año 2006, dificulta la capacidad estatal para el desarrollo de proyectos que contribuyan a una distribución de agua eficiente, que optimice su calidad y mejore la calidad de vida de los habitantes del país.

2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente la Ciudad de Guatemala ha experimentado un evidente deterioro en la calidad de los recursos naturales, todos en función de la deficiencia en materia de manejo de los desechos sólidos (desde su generación hasta su disposición final), como también en descarga de agua residual a cuerpos receptores sin ningún tipo de tratamiento previo. Existen evidentes casos, como el del Río Las Vacas y el Río Villalobos, en los cuales el impacto de las descargas de agua residual, tanto de tipo doméstico como industrial, han llegado a afectar la salud de los pobladores que habitan los sectores aledaños al cauce de estos cuerpos superficiales de agua dulce.

Es importante mencionar que, a nivel municipal, la Dirección de Medio Ambiente de la Municipalidad de la Ciudad de Guatemala ha llevado a cabo diferentes investigaciones en función de elaborar un atlas de la calidad ambiental de los recursos naturales del cinturón ecológico municipal, mediante la combinación de índices biológicos y fisicoquímicos para establecer un dictamen sobre la calidad del agua de los recursos superficiales a un nivel ecosistémico. Entre estas investigaciones puede mencionarse las realizadas por Méndez Spiegeler en 2015 y Acuña en 2013. Sin embargo, dichos procesos investigativos tienen conclusiones similares; resulta complejo correlacionar los resultados obtenidos por medio de una evaluación biótica con los obtenidos por medio de una evaluación fisicoquímica de la calidad del agua.

En contraste a lo desarrollado en Guatemala, la República de Argentina, de manera más específica en la Universidad Nacional de Catamarca, ha desarrollado diversas investigaciones en ambas temáticas de manera individual.

Entre ellas puede mencionarse la realizada por Saracho y otros autores en los años 2004 y 2006 y las desarrolladas por Salas y otros autores a partir del año 2000. Estas investigaciones tienen como común denominador que se cuenta con metodologías estandarizadas para la toma de muestras y análisis de resultados. Entre estos se pueden destacar la adaptación del Índice Biológico Biological Monitoring Working Party (BMWP') al Nororiente Argentino (NOA).

La presente investigación forma parte del Programa de Intercambio y Movilidad Académica (PIMA), como parte de la Organización de Estados Iberoamericanos, en su eje ambiental. La realización del presente trabajo de graduación tiene como objetivo el conocimiento de metodologías aplicadas en el extranjero para su posterior adaptación por parte del proponente en su país.

Se aplicará el Índice Simplificado de la Calidad del Agua (ISCA) y los índices bióticos Biological Monitoring Working Party (BMWP'), ajustado para el NOA, ASPT' (Average Score Per Taxon) e Índice Biótico de Familias (IBF), para correlacionarlos por medio del *test* no paramétrico de Spearman, para establecer un relación directa entre los parámetros fisicoquímicos del agua y el nivel de perturbación del ecosistema acuático, para posteriormente graficarlos mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) para su monitoreo periódico.

3. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

3.1. Definición

Guatemala sufre actualmente una problemática enfocada no solo al abastecimiento de agua potable sino a la calidad de los cuerpos que abastecen a sus pobladores. El continuo deterioro de la calidad de los recursos hídricos, como también la carencia de metodología estandarizada para su evaluación, no permiten el mejoramiento del abastecimiento a toda la población guatemalteca

En la actualidad Guatemala ha desarrollado líneas investigativas para el análisis de la calidad de los recursos hídricos desde el enfoque fisicoquímico, sin embargo, es importante establecer parámetros para el estudio de la calidad del agua de cuerpos superficiales desde un enfoque ecosistémico, evaluando los cuerpos de agua, los parámetros fisicoquímicos y su dinámica con la biota presente en ellos. Para ello es necesaria la aplicación de índices fisicoquímicos de la calidad del agua y su incidencia en el ecosistema estudiado.

3.2. Delimitación

El estudio tiene los siguientes alcances y límites:

- Geográfico: se realizó en la Ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca, en la Provincia de Catamarca en la República de Argentina, En el Río El Tala, paralelo a la Ruta Provincial N°4 del kilómetro 5 al 22.
- Personal: la población que reside en la Ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca es de clase social media y media alta.

- Temporal: se realizó durante los meses de septiembre de 2017 a diciembre de 2017.
- Temático: los temas relevantes que se abordarán en la presente investigación son: calidad del agua de recursos superficiales, índices fisicoquímicos de calidad del agua, índices biológicos de calidad del agua y uso de SIG para zonificación de la calidad del agua de recursos superficiales.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. El agua y la problemática social

Actualmente existe una amplia problemática en torno al aprovechamiento del agua y la calidad de la misma según sus diferentes usos. A lo largo de los años se debate y discute sobre la insuficiencia de agua en el mundo y, agregado a eso, el mal uso que se le da. La escasez de agua[11] afecta a más de 1 000 millones de personas, de los cuales 800 se encuentran en situación límite, circunstancia principalmente localizada en el continente africano. El agua se está haciendo no apta para su potabilización a consecuencia de la contaminación de los cursos de agua superficiales y acuíferos, por vuelcos de efluentes y/o infiltración de productos tóxicos procedentes de las actividades antrópicas. El agua contaminada tanto por productos químicos como por agentes bacteriológicos, víricos, y otros. Mata más hombres que todas las guerras juntas; tal es el caso del cólera, disenterías, parálisis infantil, etc.[12] La contaminación de los recursos hídricos es una situación que afecta a la humanidad desde hace muchos años, razón por la cual surge la necesidad del control y monitoreo de la calidad del agua dada su importancia para la vida.

4.2. Abundancia del agua en el mundo

El agua circula naturalmente a través de los océanos, la atmósfera, lagos, ríos, glaciares y aguas subterráneas. El aire y el agua son los elementos físicos más móviles que tiene el planeta Tierra y su movilidad genera el ciclo del agua.

[11] UNESCO. *Agua para todos, agua para la vida.* p. 76.
[12] PÉREZ PÉREZ, Félix; PÉREZ GUTIÉRREZ, José Félix. *Agua y medio ambiente.* p. 12.

La circulación constante del agua desde los océanos a la atmósfera (evaporación), desde la atmósfera a la Tierra o de regreso a los océanos (precipitación) y desde la Tierra a los océanos y atmósfera (evaporación y escorrentía), puede ser llamada el ciclo planetario del agua y existen muchos subciclos regionales y locales.

Del total de agua disponible en el planeta, el 96,6 % se encuentra en los océanos; del 3,4 % restante, el 2 % se encuentra en forma de glaciales y nieves perpetuas y solo el 1,4 % está disponible para el consumo humano. Cabe resaltar la enorme disparidad entre el inmenso volumen de agua salada y la pequeña fracción de agua dulce, así como el largo tiempo de permanencia del hielo polar y de las aguas subterráneas, frente a la breve permanencia del agua en la atmósfera[13].

El racionamiento del recurso resulta complejo y tiene poco alcance; en función de ello, desde tiempos ancestrales la población busca situar sus comunidades cerca de los cuerpos de agua superficiales para abastecimiento y para descarga inadecuada de sus desechos, debido a un descontrolado plan de manejo[14].

4.3. El ciclo hidrológico

Para comprender la interacción de la tierra con los ciclos naturales en los que se involucra el agua se introduce el concepto del ciclo hidrológico. Este ciclo cuenta con condiciones específicas que hacen y relacionan el total de agua que se mueve en la superficie terrestre o la hidrósfera.

[13] UNESCO. *Agua para todos, agua para la vida.* p. 76.
[14] SIERRA RAMIREZ, Carlos Alberto. *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico.* p. 43.

> El ciclo se visualiza iniciándose con la evaporación del agua en los océanos. El vapor de agua resultante es transportando por las masas móviles de aire. Bajo condiciones adecuadas el vapor se condensa para formar las nubes, las cuales, a su vez, pueden transformarse en precipitación. La precipitación que cae sobre la tierra se dispersa de diversas maneras. La mayor parte de esta es retenida temporalmente por el suelo en las cercanías del lugar donde cae, y regresa eventualmente a la atmosfera por evaporación y transpiración de las plantas. Otra porción de agua que se precipita viaja sobre la superficie del suelo o a través de este hasta alcanzar los cauces de los ríos. La porción restante penetra más profundamente en el suelo para recargar los acuíferos. El agua subterránea se mueve hacia zonas más bajas y con el tiempo pueden incorporarse a los océanos. Sin embargo, una parte importante de la escorrentía superficial y del agua subterránea regresa a la atmosfera por medio de evaporación y traspiración, antes de alcanzar los océanos.[15]

4.4. Clasificación del agua dulce

El ciclo hidrológico explica la relación íntima que existe entre las diversas representaciones de agua sobre la superficie de la tierra, a continuación, se presenta su clasificación:

4.5. Ríos

Denominados también corrientes, se caracterizan porque fluyen en una sola dirección con velocidades que oscilan entre 0,1 y 1 m/s, que son altamente variables y dependen también de las condiciones climáticas y el área de drenaje. Generalmente la calidad del agua es importante en el sentido del flujo.[16]

4.6. Lagos

En estos sistemas la velocidad promedio del agua es relativamente baja; oscila entre 0,01 y 0,001 m/s (en la superficie). Por ello permanece dentro del

[15] LINSLEY KOHLER, Paul. *Hidrología para ingenieros.* p. 230.
[16] SIERRA RAMIREZ, Carlos Alberto. *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico.* p. 45.

mismo por períodos que van desde algunos días hasta varios años. La calidad del agua está gobernada por el estado trófico y los períodos de estratificación.

4.7. Aguas subterráneas

Conocidos también como acuíferos, el flujo dentro de ellos es bastante estable en cuando a velocidad y dirección, con velocidades que oscilan entre 10-10 y 10-3 m/s, los que están determinados por la porosidad y la permeabilidad del estrato. El movimiento de agua dentro de los acuíferos es bastante complejo y requiere estudios específicos[17].

4.8. Varios

Existen cuerpos que se caracterizan por su variabilidad hidrodinámica. Los más importantes son:

- Embalses: son considerados un punto intermedio entre lagos y ríos; la calidad del agua y la hidrodinámica dependen de las reglas de operación.
- Ciénagas: son consideradas un punto intermedio entre lago y acuífero.
- Estuario: son considerados intermedios entre ríos y el mar.

Los diversos regímenes hidráulicos que clasifican los diferentes cuerpos de agua hacen que estos se caractericen por su tamaño y las condiciones climáticas dentro de la cuenca. El caudal de un río es el principal representante de variabilidad. En lagos y embalses lo más importante es el estado trófico (cantidad de biomasa fitoplanctónica, transparencia, concentración de

[17] SIERRA RAMIREZ, Carlos Alberto. *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico.* p. 56.

nutrientes y sustancias húmicas) y el régimen térmico. Mientras que en aguas subterráneas es importante el grado de saturación del suelo[18].

4.9. Cuenca hidrográfica

En hidrología la unidad básica de estudio es la cuenca; por medio de ella se establece un parámetro territorial que no respeta fronteras. "…Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. La definición anterior se refiere a una cuenca superficial; asociada a cada una de éstas, existe también una cuenca subterránea, cuya forma en planta es semejante a la superficial. De ahí la aclaración de que la definición es válida si la superficie fuera impermeable. Desde el punto de vista de su salida, existen fundamentalmente dos tipos de cuencas: endorreicas y exorreicas. En las primeras el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago; en las segundas, el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar…"[19].

4.10. El agua y sus propiedades

"El agua es una sustancia química compuesta por moléculas discretas de H2O. La molécula de agua es angular; el ángulo H-O-H es de 105° y la distancia H-O es de 1,01 A°"[20], que puede presentarse en la naturaleza en cualquiera de los tres estados: líquido, gas (vapor) y sólido (hielo).

El agua, en su estado de total pureza, existe solamente en laboratorio. Esto se debe a que el agua, en el momento en que entra en contacto con los diversos sistemas ambientales, disuelve un gran número de compuestos químicos que suelen alterar su composición natural. A las características que

[18] LINSLEY KOHLER, Paul. *Hidrología para ingenieros.* p. 235.
[19] MIJARES APARICIO, Francisco. *Fundamentos de hidrología de superficie.* p. 102.
[20] BLESA, Mario; y otros. *Agua y ambiente. Un enfoque desde la química.* p. 122.

posee el agua, que la distinguen de los demás líquidos, ya sea que se encuentre contaminada o no, se las conoce como propiedades del agua. El agua según su estado natural posee una cantidad de parámetros que pueden ser cuantificables y evaluables para comparaciones posteriores.

- Contaminación del agua

La contaminación de un cuerpo de agua se refiere a:

> "…La introducción por el hombre directa o indirectamente de sustancias o energía lo que origina problemas como: daños en los organismos vivos, efectos sobre la salud de los humanos, impedimento de actividades acuáticas como natación, buceo, cabotaje, pesca, etc., e interferencia sobre actividades económicas como el riego, el abastecimiento de agua para la industria, etc…."[21].

Para describir la calidad de un recurso hídrico se procede generalmente a medir variables físicas, químicas o biológicas (bioensayos) y/o a utilizar índices de calidad del agua. Para ambas formas se utilizan metodologías de campo y de laboratorio y los datos obtenidos deben ser analizados e interpretados frente a normativas nacionales e internacionales específicas.

4.11. Clasificación del agua según sus características

De acuerdo a sus características se pueden distinguir los siguientes tipos de agua: cruda, tratada y residual.

[21] SIERRA RAMIREZ, Carlos Alberto. *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico.* p. 72.

4.11.1. Agua cruda o en estado natural

Es el agua que se encuentra en el medio ambiente y que no ha recibido ningún tratamiento que no sea natural (como la filtración por cuerpos geológicos o autodepuración de curso de agua), tal como agua subterránea, agua superficial, océanos o lluvia. Usualmente muchas comunidades se abastecen del agua en este estado, sin conocer los riesgos latentes de consumir agua sin previo tratamiento, ya que la calidad del agua cruda varía según la posición geográfica, el origen de la misma (mar, subterránea, superficial, etc.), la situación cultural, costumbres y hábitos de las poblaciones que tienen acceso al recurso. La principal causa de la modificación de la calidad del agua es la actividad humana.

4.11.2. Aguas residuales

Es el agua que ha sido utilizada por el hombre. Los generadores de aguas residuales se pueden agrupar en aguas residuales domésticas, industriales y comerciales. El conocimiento del agua con estas características es beneficioso para estar al tanto de los mecanismos de diseño, operación y control de los sistemas de tratamiento de agua residual (recolección y tratamiento). Es importante destacar que el agua residual contiene alta carga de contaminantes químicos (tales como metales pesados, nutrientes, etc.) y contaminantes biológicos (tales como virus o bacterias patógenas).[22]

4.11.3. Agua tratada

Comprende el agua a la cual se le han modificado sus características físicas, químicas y biológicas para que cumpla con las exigencias del uso que

[22] KIELY, Gerard. *Ingenieria ambiental: fundamentos.*, p. 223.

se prevé darle. Es decir, la calidad del agua requerida para consumo humano no es la misma que la necesaria para el riego de sembradíos, o de uso industrial.

4.12. Parámetros físicos, químicos y biológicos del agua

Existe una gran diversidad de parámetros y muchas maneras diferentes de medirlos. Las agencias internacionales que se dedican al estudio de la calidad del agua han estandarizado los criterios de calidad y metodología para su determinación. Algunos de dichos parámetros se analizan en este trabajo.

4.12.1. Parámetros físicos

Estos parámetros están relacionados directamente con las condiciones estéticas del agua. Entre ellos se puede citar:

4.12.1.1. Turbiedad

Es la capacidad que tienen los materiales suspendidos en el agua para obstaculizar el paso de la luz. Puede ser originada por material inorgánico como arcillas, arenas etc., u orgánicas, tales como microorganismos, humus, entre otras.

4.12.1.2. Color

Es generado por las sustancias disueltas en el agua y por material coloidal y está íntimamente relacionado con la turbiedad.

4.12.1.3. Olor y sabor

Se asocian con la presencia de sustancias indeseables y por ende causan el rechazo del consumidor. Pueden tener su origen en muchos compuestos orgánicos (bacterias y algas) e inorgánicos (metales pesados y nutrientes). Existen compuestos que dan olores característicos al agua, tales como el ácido sulfhídrico (H2S).

4.12.1.4. Temperatura

Este es probablemente el parámetro físico más importante del agua, debido a que afecta otros parámetros, tales como: viscosidad, densidad, solubilidad de gases disueltos y las velocidades de las reacciones químicas, e interviene en el diseño de la mayoría de los procesos de tratamiento del agua (coagulación, sedimentación, etc.). Juega un papel fundamental en la regulación de numerosos procesos físicos, químicos y biológicos que se llevan a cabo en los ecosistemas acuáticos[23].

4.12.1.5. Conductividad (CE)

Es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esa capacidad depende de la presencia de iones y de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura de la medición. Es decir que la conductividad eléctrica es un indicador de la cantidad de sales disueltas en el agua. Se expresa en micromhos/cm o Siemens/cm y es una medida indirecta de los sólidos totales disueltos; se pueden relacionar por un factor que va entre 0,55 y 0,9.

[23] KIELY, Gerard. *Ingenieria ambiental: fundamentos.*, p. 247.

4.12.1.6. Sólidos

Son los materiales suspendidos o disueltos en el agua. La cantidad, tamaño y tipo de sólidos caracterizan las diferentes clases de agua.

4.12.1.7. Sólidos totales (ST)

Están definidos como toda la materia residual que queda en un recipiente después de evaporar el agua a 105°C.

4.12.1.8. Sólidos sedimentables (SSED)

Es todo el material capaz de sedimentarse por sí mismo, es decir precipitar por el peso de las partículas en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono de Himhoff) en el transcurso de un período de 60 minutos.

4.12.1.9. Sólidos disueltos (SDT)

La metodología para determinar su concentración es hacer pasar la muestra por un papel de filtro y determinar los sólidos totales en el filtrado. Si se somete la muestra filtrada a evaporación en la mufla a aproximadamente 600°C se puede determinar los sólidos disueltos fijos (SDF) y, por medio de diferencia, los sólidos disueltos volátiles (SDV).

4.12.1.10. Sólidos suspendidos (SST)

El incremento en los niveles de SST en los cuerpos de agua afecta la diversidad de la vida acuática, ya que causan turbiedad en el agua y reducen la penetración de la luz solar, impidiendo el desarrollo de la vegetación acuática

natural[24]. Para su determinación se filtra la muestra bien mezclada por un filtro estándar de fibra de vidrio y se seca el residuo a 103°C-105°C. Se pueden determinar en forma aproximada como la diferencia entre los sólidos totales y sólidos disueltos. Ocupan una de las posiciones más importantes dentro de los sólidos debido a que estos son los utilizados para los diseños de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

4.13. Parámetros químicos

Los parámetros químicos del agua responden a las propiedades que intervienen a nivel molecular en el líquido, a continuación se mencionan algunos de particular interés:

4.13.1. pH (potencial de hidrógeno)

Es el término utilizado para expresar las condiciones de acidez o alcalinidad en el agua. A una temperatura determinada, la intensidad del carácter ácido o básico de una solución viene dada por la actividad del ion hidronio. El agua pura está muy poco ionizada y en el equilibrio a 25°C el producto iónico es Kw= 10 -14 (APHA-AWWA-WPCF, 1992). Pero la misma se ve afectada por diversos procesos químicos y biológicos dentro de la naturaleza, según Sierra Ramírez en el año 2011. Las aguas naturales tienen normalmente valores de pH entre 4 a 9 y la mayoría son ligeramente básicas debido a la presencia de bicarbonatos y carbonatos de metales alcalinos y alcalinos térreos. Como los organismos acuáticos son muy sensibles a los cambios de pH (la mayoría solo tolera variaciones entre 6,0 y 8,0), es muy importante controlar el impacto antropogénico, como la descarga de efluentes en los cuerpos de agua.

[24] KIELY, Gerard. *Ingenieria ambiental: fundamentos.*, p. 290.

4.13.2. Oxígeno disuelto (OD)

Dentro de un cuerpo de agua se produce y se consume oxígeno a la vez; estos fenómenos están relacionados con la descomposición (oxidación) de sustancias orgánicas y otras reacciones químicas. También puede intercambiarse oxígeno con la atmósfera por difusión o mezcla turbulenta para alterar la concentración de OD. Se expresa en mg/L o ppm. Los niveles de OD en agua natural y residual dependen de la actividad física, química y bioquímica del sistema. El análisis de OD es una prueba clave en la determinación de la contaminación del agua y en el control del proceso de tratamiento de esta.

4.13.3. Oxígeno consumido del permanganato de potasio

Se le llama así al oxígeno que consume una muestra de agua cuando se la trata con este reactivo en condiciones determinadas (30 minutos de calentamiento entre 60°C a 80°C). El consumo de oxígeno proporciona un índice de la concentración de materia orgánica de la muestra. El método es aplicable a aguas superficiales y líquidos residuales. Si el agua contiene sustancias minerales reductoras del permanganato, también reaccionarán y deben ser consideradas, para lo cual se realiza un ensayo en frío para corregir el resultado.

4.14. Parámetros o características biológicas

La calidad del agua afecta a la población nativa de organismos acuáticos, en cuanto a su abundancia, especies que la componen, productividad y condición fisiológica. Determinar el tipo de organismos presentes y su concentración proporciona herramientas para conocer la calidad del agua y para la toma de decisiones en relación al control de vertidos y conservación del

ecosistema. Los grupos que presentan las mejores condiciones como bioindicadores de la calidad de los recursos hídricos son lo macroinvertebrados y las algas.[25]

4.15. Calidad del agua

El agua es un excelente disolvente de un gran número de compuestos químicos, razón por la cual diferentes tipos de agua adquieren distintos solutos a través de la interacción continua con los sedimentos, rocas y con la atmósfera. La determinación de la calidad del agua hoy en día es un tema muy amplio y complejo, debido a la cantidad de variables involucradas en su determinación y a las concentraciones extremadamente bajas de muchas especies químicas[26]. El concepto engloba diferentes aspectos como la calidad fisicoquímica, la calidad biológica, la calidad ecológica, que pueden evaluarse con base en la determinación de parámetros fisicoquímicos y bioquímicos, detección de bioindicadores de contaminación, realización de bioensayos de laboratorio y de campo.

Una determinada fuente de agua puede tener la calidad necesaria para satisfacer los requerimientos de un uso en particular y, al mismo tiempo, no ser apta para otro. La calidad del agua es un concepto relativo que depende del uso que va a tener el agua o el sistema hídrico que se quiere evaluar, según lo cual el sistema de evaluación será diferente. Es claro que no existe una variable o un parámetro físico, químico o biológico que permita definir la calidad del agua en un determinado tiempo o sitio.[27]

[25] SIERRA RAMIREZ, Carlos Alberto. *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico.* p. 102.
[26] BLESA, Mario; y otros. *Agua y ambiente. Un enfoque desde la química.* p. 156.
[27] SIERRA RAMIREZ, Carlos Alberto. *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico.* p. 102.

Una herramienta muy utilizada en la gestión de los recursos hídricos, ya que permite integrar la información sobre su calidad, son los índices de calidad. Brindan una manera conveniente de resumir la gran cantidad de datos generados en los monitoreos y facilitan la comunicación de estos resultados, pues permiten sintetizar datos variados y complejos[28].

4.16. Índices de calidad del agua

Los índices de calidad del agua son un conjunto de parámetros interrelacionados, mediante los cuales es posible caracterizar diferentes estados de calidad. Según Sierra Ramírez, se define como índice de calidad del agua a la expresión matemática que se calcula considerando tres aspectos:

- Aspectos fisicoquímicos. Las concentraciones, especies y tipos de sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en el agua.
- Aspectos biológicos. La composición y estado de la biota acuática.
- Aspectos no acuáticos. Los cambios temporales y espaciales que se deben a factores intrínsecos y externos al sistema acuático en estudio. Por ejemplo, la canalización del cauce, la presencia de bosques en las riberas de la corriente, etc.

Los índices pueden ser usados para mejorar o aumentar y difundir la información sobre la calidad del agua. De acuerdo con Ott en 1978, los posibles usos de los índices son seis:

- Manejo del recurso: pueden proveer información a personas que toman decisiones sobre las prioridades del recurso.

[28] ROJAS, Laura; MACÍAS, Nancy; FONSECA, Diego. *El índice de calidad de agua como herramienta para la gestión de los recursos hídricos.* p. 32.

- Clasificación de áreas: para comparar el estado del recurso en diferentes áreas geográficas.
- Aplicación de normatividad: permite determinar si se está sobrepasando la normatividad ambiental y las políticas existentes.
- Análisis de la tendencia: el análisis de los índices en un período de tiempo puede mostrar si la calidad ambiental está empeorando o mejorando.
- Información pública: los índices pueden tener utilidad en acciones de concientización y educación ambiental.
- Investigación científica: simplificar una gran cantidad de datos de manera que se puedan analizar fácilmente y proporcionar una visión de los fenómenos medioambientales.

4.16.1. Índices fisicoquímicos

Por medio de estos índices se realiza una comparación de parámetros físicos y químicos para comprender la calidad del agua en estudio. Entre los índices de calidad del agua elaborados con base solo en parámetros fisicoquímicos se puede citar los siguientes:

Índice de Calidad General (ICG): utilizado en España desde los años 80. Se obtiene como combinación de 23 parámetros (nueve básicos y 14 complementarios según su influencia en la calidad), a través de una ecuación lineal que proporciona un valor entre 1 y 100.[29]

El Índice de Calidad Ambiental (ICA) desarrollado por la National Sanitation Foundation (NSF) y aplicado entre otros países por Estados Unidos,

[29] CASTRO, Mario; y otros. *Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global.* p. 74.

Canadá, Brasil y algunos de Europa[30]. La estructura de cálculo de la mayoría de los ICA se basa en la normalización de los parámetros que los conforman de acuerdo con sus concentraciones, para su posterior ponderación en función de su importancia en la percepción general de la calidad del agua. Se calcula mediante la integración de las ponderaciones de los parámetros a través de diferentes funciones matemáticas. Existen dos enfoques para el cálculo:

- El producto ponderado en el cual los pesos dan importancia a los puntajes y todos ellos son ponderados de acuerdo a la importancia de los pesos y luego son multiplicados.
- La suma ponderada, en la cual cada puntaje es multiplicado por su peso y los productos son sumados para obtener el índice si los pesos son iguales para cada puntaje. El valor del índice es llamado valor aritmético no ponderado; si la suma de los pesos no es igual, se conoce como valor aritmético de la calidad del agua, según Torres y otros autores en el año 2009.
- El Índice Simplificado de Calidad del Agua (ISCA) es aplicado internacionalmente para evaluar la calidad del agua por presentar resultados fiables, de manera rápida y económica. Este índice se aplica a cursos de agua urbanos y, a pesar de sus limitaciones en cuanto a los parámetros que incluye, ha demostrado cumplir con las condiciones requeridas para su utilización en la evaluación de los cuerpos de agua.[31]

[30] TORRES, Pablo; y otros. *Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano.* p. 56.
[31] DE LEÓN BARRIOS, Khalil. *Estudio de calidad del agua del rio Samalá del tramo Cantel – Zunil*. p. 32.

4.16.2. Índice simplificado de calidad del agua (ISCA)

Este índice es función de las siguientes variables:[32]

- Oxidabilidad de la muestra al permanganato de potasio: expresada en concentración de oxígeno consumido del permanganato, en mg/L, como medida de la concentración de materia orgánica en el agua.
- Concentración en mg/L del oxígeno disuelto en el agua: como medida de la cantidad de oxígeno consumido en procesos de oxidación química y biológica.
- Temperatura en °C de la muestra: como medida de los cambios físicos en el agua.
- Sólidos suspendidos totales en mg/L de la muestra: su origen en el agua la constituyen los procesos erosivos y extractivos, y su efecto sobre los ecosistemas acuáticos se manifiesta en la reducción de la penetración de luz y con ello en el impedimento de fotosíntesis.
- Conductividad eléctrica de la muestra en µS/cm: como medida de las sales disueltas en el agua.
- Potencial de hidrógeno (pH) de la muestra.

El cálculo del Índice Simplificado de la Calidad del Agua se realiza según la siguiente ecuación:

$$ISCA = T * (A + B + C + D)$$

Cada uno de los parámetros (A, B, C, D Y T) se calcula en función del valor de la variable físicoquímica determinada con las ecuaciones que figuran en la tabla I.

[32] HERNÁNDEZ MUÑOZ, Aurelio. *Depuración de aguas residuales.* p. 45.

Tabla I. **Resumen del cálculo de las variables para la ecuación ISCA**

Variable	Ecuación de Calculo	Indicadores	Simbología
A	30 – OC	OC≤ 10 mg/L	OC = Oxigeno consumido al permanganato de potasio
	21 – (0,35OC)	60 ≥ OC (mg/L) ≥ 10	
B	25 – 0,15(SST)	SST ≤ 100	SST = Sólidos Suspendidos Totales
	17 – 0,07(SST)	250 ≥ SST > 100	
	0	SST > 250	
C	2,5 x O_2	O_2 < 10	O_2 = Oxígeno Disuelto
	25	O_2 ≥10	
D	(3,6 – Log (CE)) x 15,4 x 0,86	CE ≤ 400mS/cm	CE = Conductividad Eléctrica t = Temperatura
		14,5 < T < 21,5	
	(3,6 – Log (CE)) x 15,4	CE ≤ 400mS/cm	
		21,5< t<25	
	0	CE > 400 mS/cm	
T	1 – ((t-20) x 0,0125)	t > 20 °C	t =Temperatura
	0	t≤ 20°C	

Fuente: elaboración propia.

El puntaje o valor del ISCA oscila entre 0 (calidad mínima) y 100 (calidad máxima). Para su caracterización según intervalos se aplica la puntuación y código de colores indicados en la tabla II.

Tabla II. **Clases de calidad del agua según índice ISCA**

Rango Índice	Calidad del agua	Color
76-100	Aguas claras sin aparente contaminación. La calidad del agua está protegida, se da por sentado una ausencia total de amenazas.	
51-75	Ligero color del agua, con espumas, y ligera turbidez del agua, no natural. La calidad del agua está protegida contra un menor grado de amenazas.	

Continuación de la tabla II.

26-50	Apariencia de aguas contaminadas y de fuerte olor. La calidad del agua es frecuentemente afectada, las condiciones a menudo no cumplen con los niveles deseados.	
0-25	Aguas negras con procesos de fermentación y olor. La calidad del agua es continuamente afectada.	

Fuente: ROS, Alejandro. *El agua, calidad y contaminación (1/2).* p. 17.

4.16.3. Índices biológicos

Los índices biológicos de calidad del agua son utilizados por sus alcances de evaluación, mediante ellos se hace una valoración de la biota presente en el cuerpo de agua y de la tolerancia o intolerancia de la misma ante las trazas de contaminación[33].

La biota que se desarrolla en un ambiente acuático resulta un buen indicador de su calidad de agua. La comunidad mejor representada es la de los macroinvertebrados bentónicos, que está integrada por organismos cuyo tamaño corporal oscila entre los 3,00 y 5,00 µm o más, ya se trate de estados inmaduros o de adultos. Diferentes taxones, tales como: platelmintos, anélidos, moluscos y artrópodos, componen esta comunidad. En general, presentan ciclos de vida prolongados en comparación con otros organismos acuáticos y una amplia distribución y abundancia[34].

La mayoría de las especies son muy estrictas respecto al hábitat y a las variables fisicoquímicas, y la eutrofización causada por la actividad humana puede llevar a la reducción o a la extinción local de las poblaciones. Estas

[33] SIERRA RAMIREZ, Carlos Alberto. *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico.* p. 120.
[34] MUNNÉ, Antoni; NARCIS PRAT, Rocío. *Delimitación de regiones ecológicas para el establecimiento de tiempos de referencia y umbrales de calidad biológica.* p. 12.

pueden aumentar sus densidades en ambientes con ligeras alteraciones. Sin embargo, cuando las condiciones se agudizan, el número efectivo se reduce considerablemente y pueden llegar a desaparecer. Los macroinvertebrados colectores y filtradores contribuyen con su actividad alimenticia a la transformación de la materia orgánica desde un estado grueso a fino y ultrafino. Los bucles alimenticios entre las especies tróficas son frecuentes y complejos. El resultado es que, desde el punto de vista sanitario, las aguas son depuradas por procesos biológicos y los materiales transportados y mineralizados[35]

Los índices bióticos basados en macroinvertebrados bentónicos son muy utilizados actualmente en estudios de calidad de agua, debido a la facilidad del muestreo, pues no requieren de métodos sofisticados, y a la rápida identificación taxonómica, al menos al nivel de familia, que es el taxón requerido en la mayoría de los índices[36].

Al evaluar la calidad del agua mediante la composición y estructura de la comunidad de macroinvertebrados, es necesario considerar que un sistema acuático presenta calidad del agua buena cuando en su cauce se establecen, de manera natural, comunidades de macroinvertebrados propias del sitio.[37]

Los índices bióticos más utilizados, basados en esta comunidad, son: BMWP' (Biological Monitoring Working Party), ASPT' (Average Store Per Taxon) e IBF (Índice Biótico de Familias).

El índice BMWP' combina el número de taxa totales con un valor de tolerancia/intolerancia donde el nivel taxonómico requerido es de familia, y su

[35] MASON, Chris. *Biology of freshwater pollution.* p. 122.
[36] NARCÍS PRAT, Rocío. *Los macroinvertebrados como indicadores de calidad de las aguas.* p. 26
[37] ALBA-TERCEDOR, Julio. *Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos.* p. 123.

valor final se obtiene de la sumatoria de los valores de tolerancia de cada una de las familias que va de 0 a 10. El índice se incrementa cuantas más familias tolerantes se encuentren, aunque pueden darse valores altos con muchas familias de puntuación intermedia[38]. Para los propósitos de esta investigación se aplicará este índice ajustado para el noroeste argentino (NOA), por Domínguez y Fernández (1998).

Tabla III. **Familias de macroinvertebrados bentónicos y sus correspondientes puntuaciones asignadas para la obtención del índice BMWP', ajustado para el NOA**

Taxón	Puntaje
Leptophlebiidae, Leptohyphidae,Perlidae, Corydalidae, Libellulidae, Leptoceridae, Odontoceridae,Psephenidae, Pyralidae	**10**
Glossosomatidae, Philopotamidae,Odonata (varias familias)	**8**
Rhyacophilidae, Limnephilidae,	**7**
Hydroptilidae, Unionidae	**6**
Oligoneuridae, Elmidae, Staphylinidae, Hydropsychidae, Tipulidae, Simuliidae, Mycetopodidae	**5**
Baetidae, Caenidae,Haliplidae, Tabanidae, Dixidae, Stratiomyidae, Empididae, Dolichopodidae, Ceratopogonidae, Psychodidae, Palaemonidae, Aeglidae, Hidracarina	**4**
Dytiscidae, Hydrophilidae, Physidae, Lymnaeidae, Planorbidae, Ancylidae, Trichodactylidae, Ostracoda, Copepoda, Hemiptera (varias familias), Hirudinea	**3**
Chironomidae, Culicidae, Ephydridae, Ampularidae	**2**
Oligochaeta, Chironomidae (rojos)	**1**

Fuente: DOMÍNGUEZ, Eduardo; FERNÁNDEZ, Hugo. *Calidad de los ríos en la cuenca del Salí (Tucumán, Argentina) medida por un índice biótico.* p. 39.

Las clases de calidad de agua y el código de colores se muestran en la tabla IV:

[38] NARCÍS PRAT, Rocío. *Los macroinvertebrados como indicadores de calidad de las aguas.* p. 15.

Tabla IV. **Clases de calidad del agua según valores del índice BMWP' ajustado para el NOA y codificación de colores**

Clase	Valor	Significado	Color
I	>50 40-50	Aguas muy limpias Aguas no contaminadas	
II	30-40	Con algún grado de contaminación	
III	20-30	Aguas contaminadas	
IV	10-20	Aguas muy contaminadas	
V	<10	Aguas fuertemente contaminadas	

Fuente: DOMÍNGUEZ, Eduardo; FERNÁNDEZ, Hugo. *Calidad de los ríos en la cuenca del Salí (Tucumán, Argentina) medida por un índice biótico.* p. 62.

El índice ASPT' (Average Store Per Taxon) se determina por medio del cociente entre el puntaje final de BMWP' y el número de familias registradas, para evitar falsos resultados debidos a la suma de muchos taxones de bajo puntaje. El valor obtenido se comparará con los valores de referencia[39].

Tabla V. **Clases de calidad según los valores de referencia del índice ASPT'**

Valor ASPT'	Significado	Color
> 5,1	Sin impacto	
4,1-5,0	Levemente impactado	
2,1-4,0	Impactado	
<2,0	**Muy impactado**	

Fuente: KLEMM, Donald; y otros. *Macroinvertebrate field an laboratory methods for evaluation of the biological integrity of surface waters.* p. 62.

[39] KLEMM, Donald; y otros. *Macroinvertebrate field an laboratory methods for evaluation of the biological integrity of surface waters.* p. 30.

El Índice Biótico de Familias (IBF) requiere de la identificación de los organismos al nivel de familia, asignando un puntaje de tolerancia correspondiente según tabla VI.

Tabla VI. **Valores de tolerancia de macroinvertebrados utilizados en la determinación del indice ÍBF**

Orden/clase	Familia	v	Orden/Clase	Familia	v
Plecoptera	Gripopterygiidae	1	Megaloptera	Corydalidae	0
	Nolonemuridae	0		Sialidae	4
	Perlidae	1	Leptidoptera	Pyralidae	5
	Diamphipnoidae	0	Platyhelminthes	Turbellaria	4
	Eustheniidae	0	Acari		4
	Austroperlidae	1	Decapoda		6
Ephemeroptera	Beatide	4	Coleoptera	Elmidae	4
	Caenidae	7		Psephenidae	4
	Leptophlebiidae	2	Diptera	Athericidae	2
	Siphlonuridae	7		Blephariceridae	0
	Oligoneuridae	2		Ceratopogonidae	6
	Ameletopsidae	2		Chironomidae	7
	Coloburiscidae	3		Empididae	6
	Oniscigastridae	3		Ephydridae	6
Odonata	Aeshnidae	3		Psychodidae	10
	Calopterygidae	5		Simuliidae	6
	Gomphidae	1		Tipulidae	3
	Lestidae	9	Amphipoda	Gammaridae	4
	Libellulidae	9		Hylellidae	8
	Coenagrionidae	9	Mollusca	Amnicolidae	6
	Cordulidae	5		Lymnacidae	6
	Petaluridae	5		Physidae	6
Trichoptera	Calamoceratidae	3		Sphaeriidae	6
	Glossosomatidae	0		Chilinidae	6
	Helicopsychidae	3	Oligochaeta		8
	Hydripsychidae	4	Hidudinea		10
	Hydroptilidae	4			
	Leptoceridae	4			
	Limnephilidae	2			
	Ecnomidae	3			
	Helichophidae	6			
	Polycentropodidae	3			
	Philopotamidae	2			
	Hydrobiosidae	0			
	Seriacosiomatidae	3			

Fuente: HAUER, Ernest; LAMBERTY, Gerald. *Methods in stream ecology.* p. 176.

Su cálculo se realiza con base en la ecuación:

$$IBF = \frac{\text{ni ti}}{N}$$

Donde
ni = número de individuos de una familia i

ti = puntaje de tolerancia de la familia i

N = número total de individuos de la muestra

Los valores del índice se expresan en siete clases de calidad ambiental, correspondiente a una escala de condición biológica (Hilsenhoff, 1988), (tabla VII).

Tabla VII. **Sistema de clasificación de agua basado en los valores del IBF**

Clase de calidad	Rangos del índice	Calidad del agua	Color
I	< 3,75	Excelente	
II	3,76 – 4,25	Muy buena	
III	4,26 – 5,00	Buena	
IV	5,01 – 5,75	Regular	
V	5,76 – 6,50	Relativamente mala	
VI	6,51 – 7,25	Mala	
VII	> 7.26	Muy mala	

Fuente: HAUER, Ernest; LAMBERTY, Gerald. *Methods in stream ecology.* 176 p.

4.17. Sistemas de información geográfica (SIG)

Un Sistema de Información (SI) consiste en la unión de información en formato digital y herramientas informáticas (software) para su análisis con

objetivos concretos dentro de una organización. Un SIG es un caso particular de un SI en el que la información aparece georreferenciada, es decir, incluye su posición en el espacio, utilizando un sistema de coordenadas estandarizado resultado de una proyección cartográfica (generalmente UTM). El SIG de una región contendrá información ambiental y socioeconómica de manera que se puedan consultar las características de un determinado espacio o cuáles son las áreas que cumplen con el conjunto de criterios recomendables. De este modo un SIG se convierte en una herramienta fundamental para llevar a cabo estudios de ordenación del territorio o evaluación de impacto ambiental.[40]

En sentido amplio, según García en 1996 un SIG está constituido por:

- Bases de datos espaciales: en las que se codifica la realidad mediante modelos de datos específicos.
- Bases de datos temáticas: cuya vinculación con la base de datos cartográfica permite asignar a cada punto, polígono o línea del territorio, valores temáticos.
- Conjunto de programas: que permitan manejar estas bases de datos de forma útil con diversos propósitos de investigación, docencia o gestión.
- Conjunto de ordenadores y periféricos: de entrada y salida que constituyen el soporte físico del SIG. Estas incluyen tanto el programa de gestión de SIG como otros programas de apoyo.
- Comunidad de usuarios: que puedan demandar información espacial.
- Administradores del sistema: encargados de resolver los requerimientos de los usuarios desarrollando nuevas herramientas.

La aplicación de la tecnología SIG ha crecido de manera considerable dentro de las ciencias medioambientales. En hidrología la tecnología de

[40] ALONSO SARRÍA, Francisco. *Sistemas de información geográfica.* p. 12.

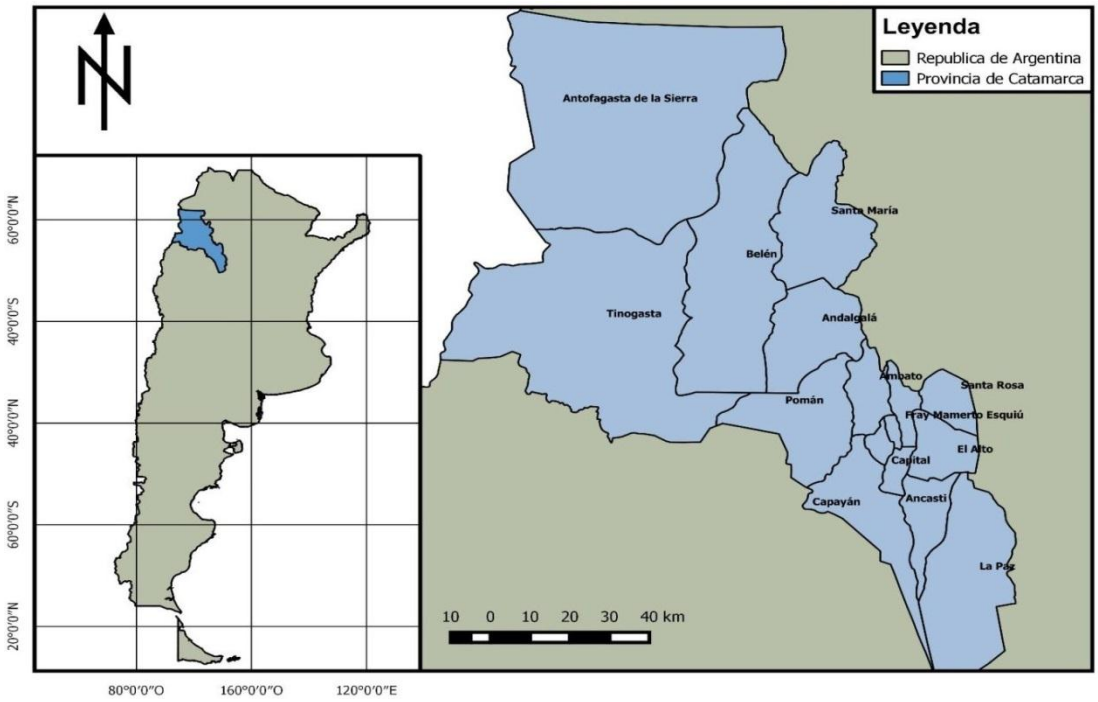
aplicación de SIG está orientada básicamente a tres líneas base de investigación: recursos hídricos, calidad de aguas y riesgos de inundación[41].

4.18. Características geográficas de la provincia de Catamarca, Argentina

La Provincia de Catamarca se ubica al Noroeste de la República Argentina, región que comparte con las provincias de Salta, Jujuy y Tucumán. Está situada en las coordenadas 21° 12' y 30° 5' Latitud sur y a los 64°56' y 69°28' de Longitud Oeste del Meridiano de Greenwich. Abarca una superficie aproximada de 100,968 km2 de variado territorio geográfico. Limita dentro de la República de Argentina con las provincias de Salta al norte, Tucumán al este, Córdoba y La Rioja al sur y con la formación de la Cordillera Andina en Chile.[42] Está dividida en 16 departamentos (figura 1): Ambato, Ancasti, Andalgalá, Antofagasta de la Sierra, Belén, Capayán, Capital, El Alto, Fray Mamerto Esquiú, Paclín, Pomán, Santa María, Santa Rosa, Tinogasta y Valle Viejo.

[41] GARCÍA, Camelo. *Áreas de aplicación medioambiental de los 'SIG'. Modelización y avances recientes.* P. 102.
[42] COSTELLO, Julio Alberto; y otros. Manual de geografía de Catamarca. P. 193.

Figura 1. **Localización de la provincia de Catamarca, Argentina**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap 10.2.2

4.19. Descripción del ambiente físico de la Provincia

A continuación se describen todas las características físicas de la provincia de Catamarca, Argentina, relacionadas al trabajo de investigación desarrollado

4.19.1. Geología provincial

Se pueden encontrar elementos que datan de los primeros tiempos de la historia de la Tierra. Se distinguen diferentes sierras conformadas con materiales como granitos, *gneis* (rocas de extrema dureza) que pertenecen a la

formación estructural de Brasilia, generalmente inexistentes en la superficie debido a que se encuentran sepultadas sobre depósitos gruesos sedimentarios. Las formaciones montañosas del periodo Paleozoico fueron desgastándose y reacomodándose hasta formar peni-planicies, que en la actualidad se observan como campos, valles y bolsones rodeados de formaciones montañosas que se originaron por el reactivamiento de las fallas existentes, que en el período Terciario, cuando el plegamiento Andínico se sobreeleva, determinó formaciones orográficas que se caracterizan por poseer las laderas occidentales generalmente abruptas y el sistema oriental con una inclinación más suave.

4.19.2. Ambientes climáticos

Los factores geográficos, como la disposición del relieve y la presencia de numerosas sierras montañosas, la mayoría ubicadas al Norte y Sur, son barrera para el paso de los vientos del Este cargados de humedad y con procedencia del océano Atlántico. Esto determina la aridez, fuertes insolaciones y variaciones térmicas diurnas y estacionales. De la misma forma la provincia no recibe los vientos procedentes del océano Pacífico por la presencia de la Cordillera de los Andes. Todo esto redunda en la escasa humedad atmosférica que muy suavemente va en aumento a medida que se avanza hacia el Este. Presenta un índice de nubosidad escaso, como también precipitaciones torrenciales y fugaces durante la estación calurosa, que representan una amenaza debido al aumento súbito del caudal de los ríos causando pérdidas por erosión del suelo suelto. La provincia de Catamarca presenta cuatro regiones climáticas:

- Clima cálido (variedad tropical Serrano): se localiza este clima en la porción noroeste de la provincia, penetrando desde Tucumán,

caracterizándose por las abundantes precipitaciones y elevadas temperaturas. Recibe la denominación de Serrano por la influencia que produce la presencia de las serranías locales. Los largos períodos de temperaturas altas suelen provocar la localización de un centro de baja presión en el centro de la provincia, atrayendo los vientos del noroeste durante la primavera y verano, alcanzando de esta manera valores barométricos de 755 milibares (Mb), punto que se altera al disminuir la temperatura a medida que se acerca el invierno, donde por lo general las presiones son altas, alcanzando valores entre 762 y 763 milibares en casi todo el territorio provincial. De esta manera en esta región climática se producen escasas heladas, las que no sobrepasan los 30 días al año, mientras que la nubosidad posee promedios de 5 en la escala general de 10. En cuanto a las nevadas, estas son casi nulas en los valles, mientras que en las elevaciones de más de 5 000 metros (para esta región las sierras de Aconquija) las nieves se manifiestan en forma casi permanente.

- Clima árido (Andino Puneño): propio de la región occidental del país, abarca una extensa franja que trasvasa los límites internacionales, pues se desarrolla en los países de Chile, Bolivia y Argentina. La configuración del elevado relieve montañoso y las no menos elevadas y amplias mesetas originan bajas temperaturas, como también reducidas precipitaciones, debido a que por el oeste, el este y el sur el Departamento Antofagasta de la Sierra se levantan barreras montañosas que obstaculizan el paso de los vientos húmedos que provienen tanto del Pacífico como del Atlántico. En esta región climática se produce el mayor déficit de agua, de esta manera las reducidas precipitaciones no superan los 100 mm y son de régimen periódico estival, sin olvidar que en el centro de la meseta puneña llegan a transcurrir varios años en que las

precipitaciones son nulas, conformando así la zona desértica y más inhóspita del país en conjunto con el centro de la Patagonia. Las presiones en la meseta alcanzan los 757 milibares (baja) durante el verano y los 763 milibares durante el invierno (alta).

- Clima árido de sierras y bolsones: como su nombre lo indica, la variedad climática se genera por la conformación topográfica de la zona. Ocupa la mayor parte de la provincia, determinando su dominio entre los climas descritos anteriormente, más específicamente en la zona correspondiente al sistema de las Sierras Pampeanas. El rasgo que caracteriza a este clima es la continentalidad, por el aislamiento y su distancia al mar. Las escasas precipitaciones no superan los 350 mm anuales, con una irregular distribución, ya que existe una estación marcadamente seca (invierno) en la que solo pueden hacerse presente finas lloviznas del sur de corta duración. Las fuertes insolaciones producen gran evaporación agudizando todavía más la sequedad del suelo. Las precipitaciones que recibe son periódicas, de verano (noviembre a marzo) irregulares, violentas, torrenciales y hasta perjudiciales para el suelo, especialmente por el escaso tapiz o cobertura vegetal que se desarrolla en este tipo de clima. De esta manera las fuertes evaporaciones producidas hacen más marcado el problema de las insuficientes precipitaciones.

4.19.3. Hidrografía

La principal cuenca que recorre la superficie de la Región Central es la cuenca del Río del Valle, y la de los ríos que nacen en las faldas orientales del Cordón de Ambato, los que cuando poseen los caudales de agua suficientes alcanzan el colector principal en el fondo del valle. El sistema está formado por

la subcuenca del Río de Las Juntas, Río de Los Puestos, Rio El Tala, Río Ambato y Río Paclín. Estos sistemas hídricos dan lugar a los más importantes asentamientos poblacionales del territorio provincial, para los cuales se han establecido, con el pasar de los años, sistemas de riego, diques, etc., que permiten el uso racional del agua para sus actividades.[43]

[43] COSTELLO, Julio Alberto; y otros. *Manual de geografía de Catamarca.* p. 194.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1. Variables

- Variables independientes:

    - Temperatura de las muestras (°C).
    - pH de las muestras.
    - Conductividad eléctrica de las muestras (µS/cm).
    - Sólidos suspendidos totales (mg/l).
    - Oxígeno disuelto (mg/l).
    - Oxígeno consumido al permanganato de potasio ($KMnO_4$) (mg/l).
    - Macroinvertebrados bentónicos recolectados en las muestras (cantidad de individuos y familia a la que pertenecen).

- Variable dependiente:

    - Índice fisicoquímico ISCA
    - Índice biológico BMWP' ajustado para el NOA
    - Índice biológico ASPT'
    - Índice biológico IBF

5.2. Delimitación de campo de estudio

La investigación se realizó en el Río El Tala, que drena una cuenca hidrológica de 140 km2 en la vertiente oriental de la Sierra de Ambato. Nace entre los cerros Bayo y Agua Colorada, a una altitud de 2 500 m.s.n.m., es de

flujo permanente y de régimen pluvial. El perfil transversal del río tiene forma de V con laderas de pendientes muy fuertes, según Saracho y otros autores en el año 2006. Infinidad de quebradas que bajan de dicho cordón montañoso se reúnen en este río aportando, la mayoría de ellas, agua de vertientes. Escurre por una quebrada de origen tectónico hacia el este hasta un lugar próximo al puesto homónimo (km 22), desde donde gira hacia el sudeste flanqueado por las cumbres de Los Ángeles al oeste y de Los Colorados hacia el este. Continúa con su recorrido hasta la zona oeste de la Ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca hasta Las Rejas, desde donde toma rumbo sureste con el nombre de Río Ongolí[44].

El clima de la zona circundante al río se encuentra influenciado por las lluvias orográficas originadas por el encuentro de los frentes húmedos sobre las laderas orientales. La temperatura ambiental disminuye de este a oeste y de sur a norte. Los vientos del noroeste alcanzan velocidades de entre 70 – 100 km/h como máximo. La persistencia de los vientos eleva la temperatura de manera considerable en dos sistemas: valle y montaña, generados por el distinto comportamiento térmico en las superficies cóncavas (valles) y convexas (montañas).[45]

En lo que respecta a la flora, el sector de la cuenca pertenece al territorio fitogeográficos de la Región Neotropical (Cabrera, 1976). Según Morlans (1995), la vegetación es la característica del distrito Chaco Serrano, en el dominio Chaqueño. El piso del bosque serrano se ubica aproximadamente entre los 700 y los 1 600 (m.s.n.m.), con predominio de las especies Schinopsis haenkeana, Lithraea termifolia; Fagara coco; Chorisia insignis; Acacia visco;

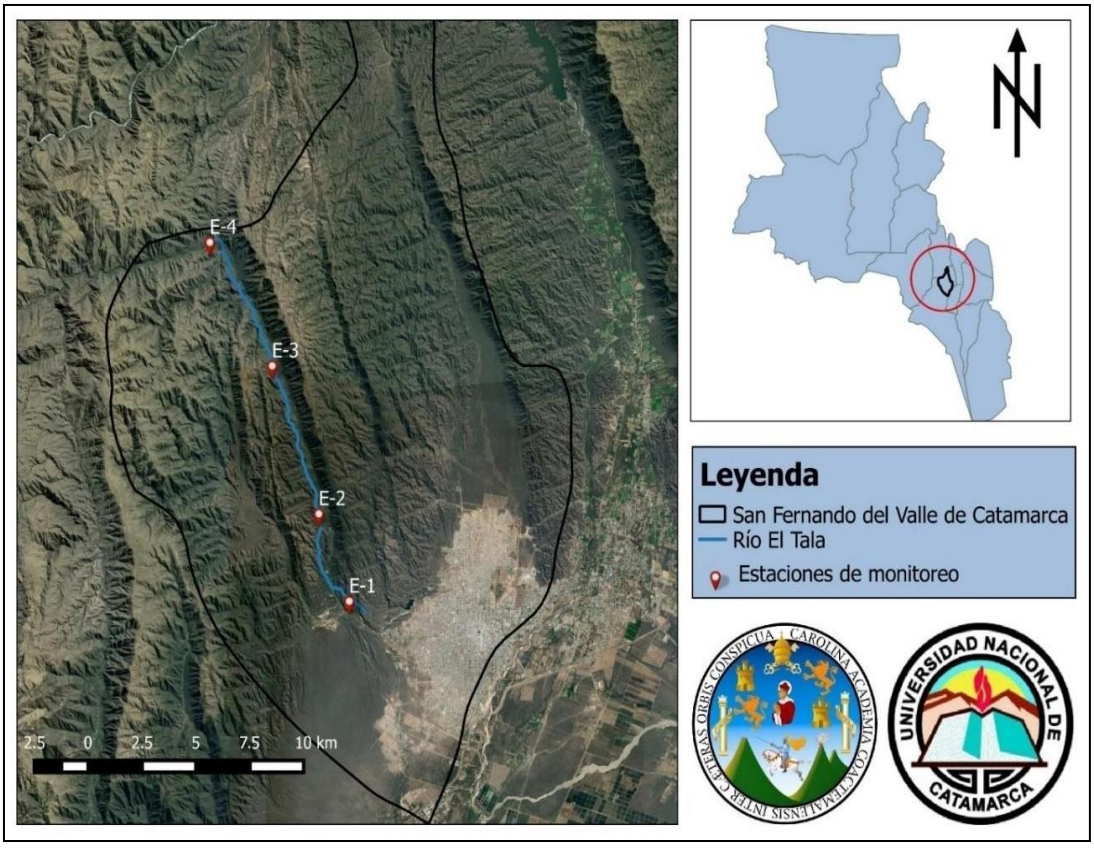
[44] LOBO, Patricia; ALVES, Julio; VARELA, Miguel. *Conceptos de hidrología. Hidrología de Catamarca. El agua del subsuelo. Cuidados del agua natural y potable.* p. 124.
[45] CARRIZO, Sandra. *Diagnóstico y propuestas para un ordenamiento ambiental.* Caso: Quebrada "El Tala". P. 8.

Ruprechtia apetala; Aspidosperma quebracho – blanco; Prosopis nigra; Jodina rhombifolia; Acacia caven; Celtis tala; Cereus validus; Stetsonia coryne y Chaguares; Porliera microphylla, Aristidia mendocina; Trichloris pluriflora; Stipa, entre otras.

El Río El Tala abastece a las plantas potabilizadoras de agua N° 1 y N°2, de San Fernando del Valle de Catamarca, por medio de un canal derivador ubicado en La Brea. El excedente es captado aguas abajo para ser derivado mediante un canal al dique El Jumeal para su reserva, según Carrizo en 1996.

El muestreo fue realizado a lo largo del río, en cuatro estaciones ubicadas desde el km 5, badén de ingreso al Camping Municipal, hasta el km 22 sobre la Ruta Provincial Nº 4 (figura 1).

Figura 2. **Ubicación de las estaciones de muestreo a lo largo del Río El Tala**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap 10.2.2.

Las estaciones referenciadas a lo largo de la ruta N°4 se indican en la tabla VIII y figuras 2, 3, 4, 5 y 6.

Tabla VIII. **Estaciones de muestreo en el Río El Tala**

E°	Referencia	Coordenadas geográficas		Elevación (msnm)
4	Km 22 Ruta Provincial N°4	S 28°19’37,9”	O 65°53’52,8”	1,429
3	Km 16 Ruta Provincial N°4	S 28°22’28,6”	O 65”52’16,6”	1,121
2	Km 9 Puente Loma Cortada, Ruta Provincial N°4	S 28°25’53,2”	O 65°50’46,4”	858
1	Km 5 Ingreso badén, Camping Municipal, Ruta Provincial N°4	S 28°27’53,9”	O 65°49’54,5”	694

Fuente: elaboración propia.

Figura 3. **Estaciones de muestreo**

Fuente: Elaboración propia.

5.3. Recursos humanos disponibles

- Investigadora: Raúl Alejandro Jó Hernández
- Asesoras de institución receptora (Universidad Nacional de Catamarca):
  - Doctora Liliana Beatriz Salas
  - Ingeniera Marta Alicia Saracho
- Asesor (Universidad de San Carlos de Guatemala)
  - Ingeniero Jorge Mario Estrada Asturias

5.4. Recursos materiales disponibles

El total del instrumental, insumos y equipo fueron provistos por el Laboratorio de Diversidad Animal I, de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN) de la Universidad Nacional de Catamarca y el Laboratorio de Agua, dependencia de la Subsecretaría de Planificación de los Recursos Hídricos, en el Centro Administrativo del Poder Ejecutivo (CAPE) del Gobierno de la Provincia de Catamarca, Argentina:

- Cristalería utilizada en laboratorio.
- Recipientes para la recolección de muestras (de agua y de material biológico).
- Vehículo.
- GPS.
- Multiparamétricos para medición de parámetros *in situ*.
- Estereomicroscopio.
- Lámparas.
- Muestreador tipo Surber (0,09 m^2 de superficie y 300 µm de apertura de malla).
- Filtros para retención de sólidos.
- Reactivos.
    - Permanganato de potasio.
    - Tiosulfato de sodio.
    - Yoduro.
    - Azida sódica.

5.5. Técnica

Para la realización de este estudio, la metodología de trabajo fue dividida en tres partes: evaluación biológica de la calidad del agua, evaluación fisicoquímica y elaboración de mapas de zonificación con SIG. Para evaluar la calidad del recurso desde el punto de vista biológico se aplicaron los índices BMWP' ajustados para el NOA, ASPT', IBF y el ISCA para evaluar la calidad fisicoquímica. El monitoreo fue realizado en la época crítica (menor caudal) que corresponde, según la Dirección de Hidrología y Evaluación de los Recursos Hídricos de la provincia de Catamarca, a los meses de septiembre, octubre y noviembre, donde el caudal medio del río es de 0,212 m3/s, siendo el caudal medio anual de 1 m3/s. El muestreo de las variables biológicas se realizó en el mes de septiembre.

Se sabe que las variables fisicoquímicas solo dan una idea puntual de la calidad del agua, indicando el grado de contaminación del recurso en la fecha y lugar del muestreo y no tienen la capacidad de mostrar los efectos acumulativos, antagónicos y sinérgicos que ocasionan los contaminantes en las comunidades biológicas existentes en los cuerpos lóticos, sí evaluadas a través de los índices bióticos[46]. Por esta razón se consideró adecuado para obtener un valor del ISCA representativo a efectos de correlacionarlo con los índices bióticos, y poder realizar un enfoque integrado de todos los parámetros que puedan definir al recurso hídrico como ecosistema, evaluar los parámetros fisicoquímicos en cada uno de los meses indicados y representar su calidad con el valor promedio. Se espera de ese modo conocer la variación longitudinal de la calidad del agua en el Río El Tala en el período crítico y tramo señalado.

[46] CARRIZO, Sandra. *Diagnóstico y propuestas para un ordenamiento ambiental.* Caso: Quebrada "El Tala". 12 p. / SIERRA RAMIREZ, Carlos Alberto. *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico.* Editoriales de la U, Medellín, Colombia: 2011, 156 p.

5.6. Recolección y ordenamiento de la información

- Muestreo para la evaluación biológica de la calidad del agua:

Las muestras de macroinvertebrados bentónicos se obtuvieron por medio de un muestreador tipo Surber, de 0,09 m2 de superficie y 300 µm de abertura de malla que posibilitó un muestreo cuali-cuantitativo. En cada estación se extrajeron tres muestras. El material recolectado se colocó en bolsas de plástico y se fijaron *in situ* con alcohol etílico al 96 % (figuras 7 y 8).

Figura 4. **Muestreo para la evaluación biológica de la calidad del agua**

Muestreador tipo Surber para obtención de muestras biológicas

Extracción de muestras biológicas

Fuente: elaboración propia.

- Muestreo para la evaluación fisicoquímica de la calidad del agua:

Para obtener el índice ISCA, las muestras de agua del río, en cada una de las cuatro estaciones, fueron extraídas en envases de plástico de 1 litro, para determinar los parámetros: oxígeno consumido del permanganato de potasio (OC) y sólidos suspendidos totales (SST).

Para la determinación de oxígeno disuelto (OD), las muestras fueron recolectadas en recipientes de vidrio de 300 ml con tapón esmerilado. Se realizó la fijación del oxígeno *in situ* para su análisis en laboratorio mediante el método de Winkler. Esta determinación, al igual que OC y SST, fueron realizados en el Laboratorio de Agua, dependiente de la Subsecretaría de Planificación de los Recursos Hídricos, en el Centro Administrativo del Poder Ejecutivo (CAPE) del Gobierno de la provincia de Catamarca. *In situ* se determinaron los siguientes parámetros: conductividad eléctrica, potencial de hidrogeno (pH) y temperatura, con un potenciómetro portátil Hanna, modelo HI 8424 y un multiparámetro portátil Hach modelo SensIon 5. El muestreo y análisis fueron realizados según los procedimientos fijados en métodos estandarizados y descritos en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA y WEF del año 2012, siguiendo las especificaciones de extracción, almacenamiento y transporte establecidas en las normas IRAM N° 29012-3/98 e ISO 5667-3/94.

5.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Todos los datos iniciales recolectados en campo fueron tabulados en laboratorios para su posterior ordenamiento en Excel 2010, para su posterior análisis en los laboratorios correspondientes.

5.8. Análisis de los resultados

Se realizó el análisis para la evaluación biológica de la calidad del agua. El análisis de las muestras se realizó en el Laboratorio de Diversidad Animal I (Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Centro de Biodiversidad, UNCA). El procesamiento comprendió la separación de los macroinvertebrados de la muestra, compuesta por sustrato y restos de vegetación, para su posterior

determinación taxonómica hasta el taxón familia. Se utilizó un estereomicroscopio Arkano (figura 5) y las claves disponibles de Domínguez y Fernández (2009).

Figura 5. **Estereomicroscopio Arkano (0,7 a 4 x 10-15) utilizado en la identificación de las muestras**

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Separación de las muestras biológicas para su clasificación taxonómica**

Fuente: elaboración propia.

Con el listado faunístico obtenido, se calcularon los índices bióticos: BMWP' ajustado para el NOA, ASPT' e IBF para cada estación, integrando los resultados de las tres muestras. El material biológico recolectado y clasificado se conservó en tubos Eppendorf con solución de alcohol etílico al 70 %, debidamente etiquetados para conformar una colección.

- Análisis para la evaluación biológica de la calidad del agua

Parámetros determinados en campo: debido a la variabilidad en sus valores, los siguientes parámetros fueron medidos en cada estación de muestreo con instrumentación específica:

- Potencial de hidrógeno (pH) de la muestra: a una temperatura determinada, el carácter ácido o básico de una solución está dado por la concentración de los iones hidronio (H+) y de los iones hidroxilo (OH-), medidos en una escala que va del 1–14. El pH de las muestras analizadas fue determinado *in situ* aplicando el Método 4500-H+B y utilizando un pHmetro portátil modelo HI 8424 Hanna (figura 11).

Figura 7. **pHmetro portátil modelo Hanna HI 8424**

Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Multiparamétrico Hach modelo SensIon 5**

Fuente: elaboración propia.

- Temperatura de la muestra: fue determinada aplicando el Método 2550 B y utilizando un medidor multiparamétrico portátil modelo Hach–SensIon 5 que también fue utilizado para medir la conductividad (figura 12).

- Conductividad eléctrica de la muestra en µS/cm: fue determinada aplicando el Método 2510 B. Este consiste en la medida directa de la conductividad por medio de una sonda o celda, previamente estandarizada con una solución de conductividad conocida (1000 µS/cm) como medida de las sales disueltas en el agua.

- Parámetros determinados en laboratorio:

Oxidabilidad de la muestra al permanganato de potasio, expresada en concentración de OC en mg/L. Para garantizar los resultados, las muestras fueron transportadas y conservadas a una temperatura de 4 °C y analizadas tan pronto llegaron al laboratorio siguiendo la técnica, que es una adaptación del Método 5220 C: en un Erlenmeyer de 500 ml se colocó 100 mL de muestra. Se agregó 10 mL exactamente medidos de solución de permanganato de potasio 0,0125 N (la normalidad de la solución se ajustó a partir de una solución madre de permanganato de potasio 0,1 N en el momento de realizar la técnica, utilizando la solución de ácido oxálico para la valoración. 1 mL de esta solución equivale a 0,1 mg de oxígeno). Se agregó 10 mL de solución de ácido sulfúrico (1+3) y se sumergió el Erlenmeyer en un baño maría a 80°C, cuidando que el nivel del agua en el baño sobrepase al del líquido en el Erlenmeyer durante 30 minutos. Transcurrido este tiempo se retiró el Erlenmeyer del baño. El permanganato de potasio debe estar en exceso, por lo que en este paso debe verse el frasco con su color violeta característico. Se agregaron 10 mL de solución de ácido oxálico exactamente medidos y la muestra se decoloró en este paso. Se valoró por retorno con solución de permanganato de potasio hasta obtener una coloración rosada débil y persistente. La valoración se realizó entre los 60 – 80 °C controlando la temperatura.

Cálculos: la determinación del oxígeno consumido se realizó según la relación 1.3:

$$OC = \frac{(Vc - Vf) * 1}{v} \quad (1.3)$$

Donde:

OC = oxígeno consumido (mg/L)
Vc = volumen gastado en la titulación en caliente (mL)
Vf = volumen gastado en la titulación en frío (mL)
v = volumen de la muestra tomado (mL)

Figura 9. **Valoración de oxígeno consumido del permanganato de potasio**

Fuente: elaboración propia.

- Sólidos suspendidos totales de la muestra según Método 2540 D. Los sólidos suspendidos totales son el material retenido sobre un filtro estándar después de la filtración de una muestra bien mezclada de agua. Estos sólidos son secados a 103–105°C.

Figura 10. **Microfiltrado de la muestra para la determinación de sólidos suspendidos totales**

Fuente: elaboración propia.

- Concentración del oxígeno disuelto en el agua: Método 4500-O C. de Winkler. Se basa en la adición de solución de manganeso divalente, seguido de álcali fuerte, a la muestra contenida en un frasco con tapón de vidrio de cierre hidráulico. El OD oxida rápidamente una cantidad equivalente del precipitado disperso de hidróxido manganoso divalente a hidróxido con mayor estado de valencia.

En ausencia del OD:

$Mn^{2+} + 2\ OH^- \rightarrow Mn(OH)_2$ (Precipitado blanco)

En presencia de OD:

$Mn^{2+} + 2OH^- + O_2 \rightarrow MnO_2 + H_2O$ (Precipitado marrón)

En presencia de iones yoduro, en solución ácida, el manganeso oxidado revierte al estado divalente, con liberación de yodo en cantidad equivalente al contenido original de OD.

$$Mn_2O_2 + 2I^- + 4H^+ \rightarrow Mn^{2+} + I_2 + 2H_2O$$

Se valoró, luego, ese yodo con una solución patrón de tiosulfato de sodio 0,025 M. El punto final de la titulación se puede detectar visualmente con un indicador de almidón o con técnicas potenciométricas (figuras 15 y 16).

Como interferencia pueden presentarse los nitritos que liberan yodo a partir de los yoduros:

$$2NO^{2-} + 2I^- + 4H^+ \rightarrow I_2 + N_2O_2 + 2H_2O$$
$$N_2O_2 + 1/2^oO_2 + H_2O \rightarrow 2NO^{2-} + 2H^+$$

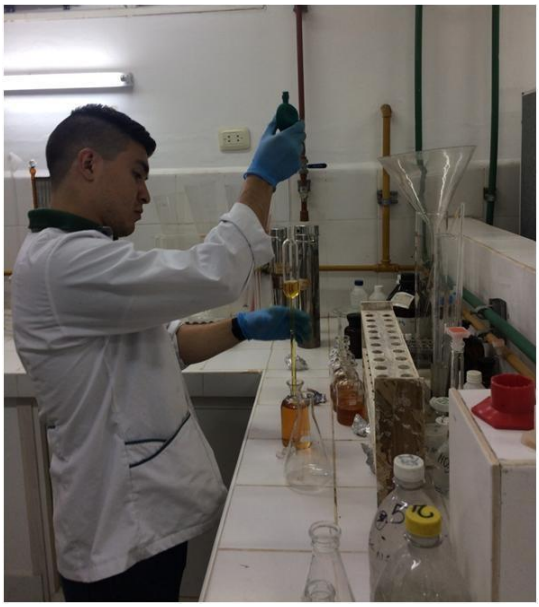
Para reducir las interferencias se aplicó azida sódica. Esta modificación elimina eficazmente la interferencia producida por el nitrito.

$$NaN_3 + N^+ \square\ N_3H + Na^+$$
$$N_3H + NO^{2-} + H^+ \square\ N_2 + N_2O + H_2O$$

Figura 11. **Muestras de agua del Río El Tala para análisis de OD**

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Determinación de OD por el método de Winkler**



Fuente: elaboración propia.

Determinado los parámetros citados se procedió al cálculo del Índice Simplificado de la Calidad del Agua, según la siguiente ecuación:

$$ISCA = T * (A + B + C + D)$$

El cálculo de cada uno de los coeficientes y determinación de la calidad fisicoquímica del agua se realizó de acuerdo a lo consignado en las tablas I y II.

5.8.1. Métodos y modelos de datos

Se describe a continuación la metodología aplicada a los datos recolectados en campo para su zonificación por medio de sistemas de información geográfica:

5.8.2. Mapas de zonificación con SIG

Los mapas de zonificación fueron elaborados utilizando dos plataformas de SIG: ArcMap 10.2.2 y QGis 2.12.3., con archivos de tipo *shapefile* (formato.shp) utilizados como base para el estudio y obtenidos como recursos virtuales del Instituto Geográfico Nacional de Argentina[47]. A través de estos se identificaron los tramos según las clases de calidad de agua obtenidas para cada índice (BMWP', ASPT', IBF e ISCA), por medio de una escala de colores. Se realizó un juego de mapas para cada índice calculado, que podrán ser utilizados como herramientas de toma de decisiones y como una base de datos gráfica de la calidad ambiental del Río El Tala.

[47] Instituto Geográfico Nacional de Argentina. http://www.ign.gob.ar/sig. Consulta: 13/ de noviembre de 2017.

5.8.3. Programas utilizados para el análisis de datos

El procesamiento estadístico de los datos obtenidos se realizó con Microsoft Excel 2010, para elaborar tablas y gráficos. Los análisis de correlación entre variables fisicoquímicas e índices bióticos se efectuaron con el software estadístico Infostat 2017e. El software para el procesamiento estadístico de los datos (Infostat 2017e) fue provisto por FACEN-UNCA. La licencia del software utilizado para la elaboración de los planos (QGIS 2.12.3 y ArcMap 10.2.2.) es propiedad del investigador principal.

6. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los cálculos y valores obtenidos de los índices utilizados para realizar la evaluación biológica y fisicoquímica de la calidad del agua del Río El Tala, la correlación entre los mismos y los mapas de zonificación.

6.1. Evaluación biológica de la calidad del agua

Los resultados de los índices biológicos propuestos se muestran en las tablas IX a XI.

6.1.1. Índice BMWP' ajustado para el NOA

En la tabla IX se muestran los resultados de presencia (1) / ausencia (0) de las familias de macroinvertebrados bentónicos, en las estaciones de muestreo del Río El Tala, según el índice BMWP' ajustado para el NOA. En la figura 13 se muestran algunas de las principales familias de macroinvertebrados bentónicos recolectados en el río.

Tabla IX. **Presencia (1) / ausencia (0) de las familias de macroinvertebrados bentónicos, reportados para el Río El Tala, Catamarca**

Familias	Estaciones			
	1	**2**	**3**	**4**
Leptophlebiidae	1	1	1	1
Leptohyphidae	0	1	1	1
Perlidae	0	1	1	1
Corydalidae	0	0	0	1
Leptoceridae	1	0	0	0
Odontoceridae	1	0	0	1
Psephenidae	1	1	0	1
Pyralidae	0	1	1	0
Philopotomidae	0	1	0	0
Zygoptera	1	1	1	0
Anisoptera	1	0	1	0
Hydroptilidae	1	0	1	1
Elmidae	1	1	1	1
Hydropsychidae	0	0	1	0
Simuliidae	0	0	0	1
Baetidae	1	1	1	1

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Familias de macroinvertebrados bentónicos encontrados en el Río El Tala, Catamarca, Argentina**

Empididae (Diptera)	**Ceratopogonidae (Diptera)**	**Psychodidae (Diptera)**
Aeglidae (Arthropoda: Crustacea)	**Acari (Arthropoda: Chelicerata)**	**Physidae (Mollusca: Gastropoda)**
Perlidae (Plecoptera)	**Pyralidae (Lepidoptera)**	**Corydalidae (Megaloptera)**
Leptophlebiidae (Ephemeroptera)	**Leptohyphidae (Ephemeroptera)**	**Baetidae (Ephemeroptera)**

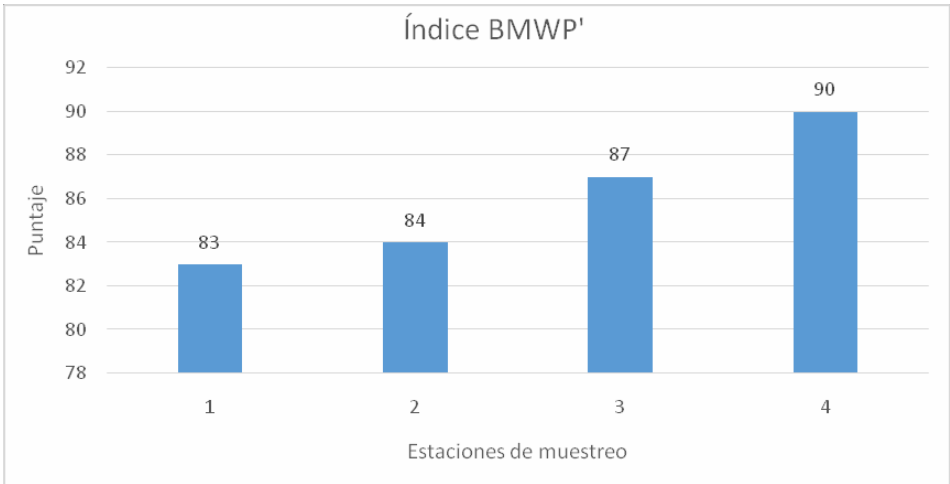
Continuación de la figura 13.

Leptoceridae (Trichoptera)	**Glossosomatidae (Trichoptera)**	**Hidrobiosidae (Trichoptera)**
Hydroptilidae (Trichoptera)	**Hydropsichidae (Trichoptera)**	**Zygoptera (Odonata)**
Anisoptera (Odonata)	**Elmidae (larva) (Coleoptera)**	**Elmidae (adulto) (Coleoptera)**
Psephenidae (Coleoptera)	**Simuliidae (Diptera)**	**Chironomidae (Diptera)**

Fuente: elaboración propia.

La variación longitudinal de la calidad del agua según el índice BMWP' ajustado para el NOA se muestra en la figura 14.

Figura 14. **Variación longitudinal de la calidad del agua del Río El Tala según el Índice BMWP'**



Fuente: elaboración propia.

6.1.2. Índice ASPT' (Average Score Per Taxon)

Los resultados obtenidos para este índice se presentan en la tabla X.

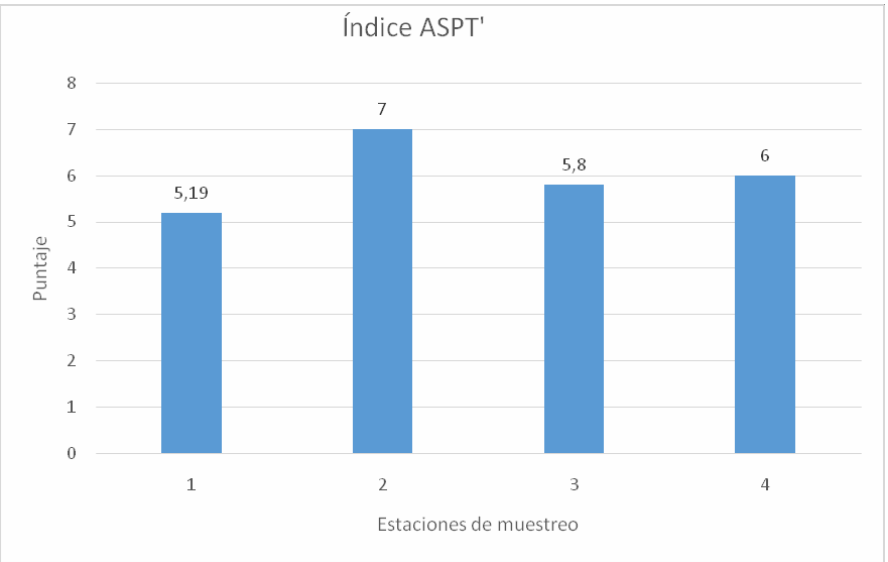
Tabla X. **Puntaje del índice ASPT'**

	Estaciones			
	1	**2**	**3**	**4**
Puntaje BMWP'	83	84	87	90
Taxas presentes	16	12	15	15
Puntaje ASPT'	5,19	7,00	5,80	6,00

Fuente: elaboración propia.

La figura 15 muestra la variación longitudinal de la calidad del agua del Río El Tala según el índice ASPT':

Figura 15. **Variación longitudinal de la calidad del agua del Río El Tala según índice ASPT'**



Fuente: elaboración propia.

6.2. Índice Biótico de Familias (IBF)

Los valores obtenidos para este índice IBF en cada estación de muestreo se presentan en la tabla XI.

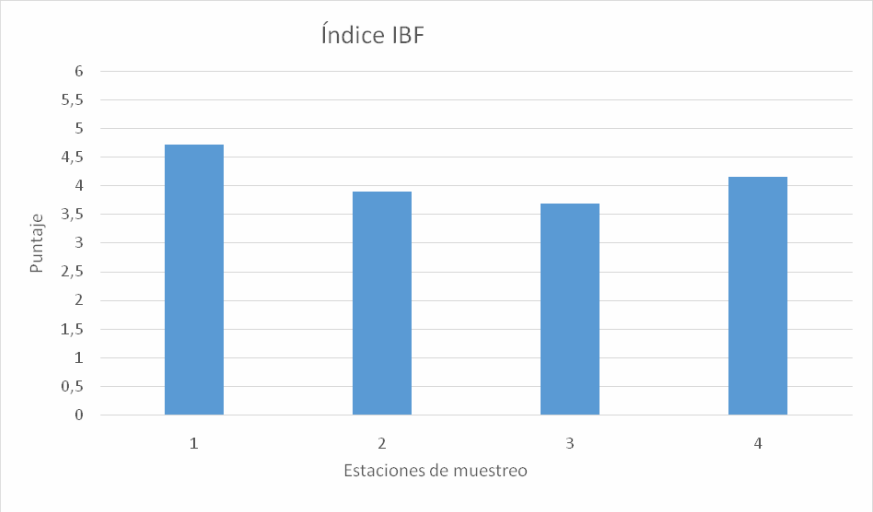
Tabla XI. **Cálculo del Índice IBF (A: abundancia; VT: valor de tabla)**

Taxa	VT	E 1		E 2		E 3		E 4	
		A	VT x A						
Corydalidae	0							2	0
Hydrobiosidae	0	2	0			4	0	6	0
Perlidae	1			17	17	5	5	25	25
Gomphidae	1	1	1			1	1		
Leptophlebidae	2	72	144	9	18	70	140	7	14
Philopotomidae	2			1	2				
Psephenidae	4	9	36	16	64	47	188	41	164
Elmidae	4	57	228	35	140	167	668	364	1456
Acari	4	25	100			18	72	40	160
Leptoceridae	4	1	4						
Hydroptilidae	4	7	28			7	28		
Baetidae	4	8	32	5	20	93	372	76	304
Hydropsychidae	4					7	28		
Piralydae	5					1	5		
Pyralidae	5			1	5				
Cerotopogonidae	6	1	6						
Empididae	6							3	18
Simuliidae	6							3	18
Decapoda	6			3	18				
Chironomidae	7	128	896	29	203	36	252	74	518
Physidae	8	2	16						
Libelluilidae	9	2	18	3	27	2	18		
Psichodidae	10	1	10						
Odontoceridae		4	0					1	0
Leptohyphidae				10	0	20	0	2	0
Vellidae		2	0	3	0	3	0		
Sumatoria		322	1519	132	514	481	1777	644	2677
Puntaje		4,7		3,9		3,7		4,2	

Fuente: elaboración propia.

La variación longitudinal de la calidad del agua del Río El Tala según el índice IBF se muestra en la figura 16:

Figura 16. **Variación longitudinal de la calidad del agua del Río El Tala según índice IBF**



Fuente: elaboración propia.

6.3. Evaluación fisicoquímica de la calidad del agua

Los resultados de los cálculos de las variables involucradas en el índice ISCA se muestran en las tablas XII a XVI.

6.3.1. Cálculo de la variable "T"

Para el cálculo de la variable T se utilizó en el último muestreo (07/11/2017), y solo para las estaciones 1, 2 y 3, la ecuación (1), válida para el caso de que la temperatura del agua supere los 20°C:

$$T = 1 - \left((t - 20) * 0{,}012 \right) \qquad Si\ t > 20\ °C \tag{1}$$

Tabla XII. **Variable “T” para el índice ISCA**

Estación	Muestreo	t (°C)	T
1	1 (18/9/2017)	18,5	1
2		16,1	1
3		12	1
4		11,4	1
1	2 (3/10/2017)	19,8	1
2		17,5	1
3		17,2	1
4		18,1	1
1	3 (7/11/2017)	21,4	0,9
2		20,6	0,9
3		20,1	0,9
4		19,7	1

Fuente: elaboración propia.

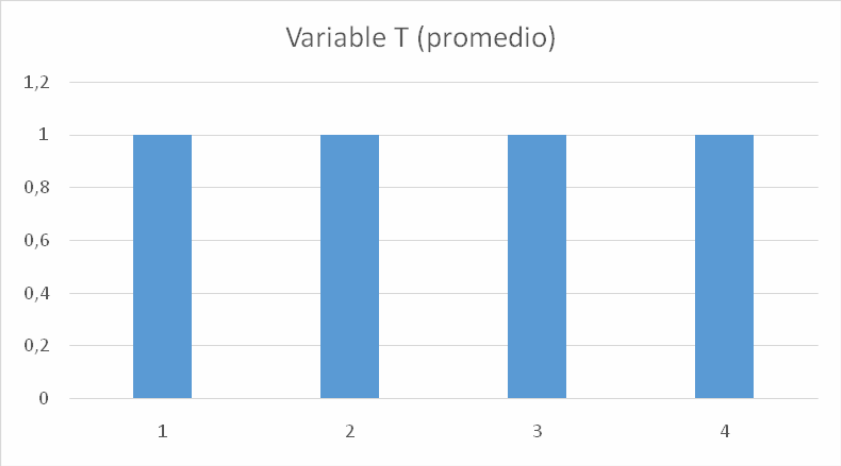
En los otros muestreos, como la temperatura del agua era inferior a 20°C se asignó a T el valor de 1:

$$Si\ t \leq 20\ °C$$

$$T = 1$$

La variable “T” puede adoptar valores que van entre 1–0,8, dependiendo de la temperatura del agua. La ponderación de esta variable es tal que 1 representa el puntaje óptimo y 0,8 el más bajo. En la figura 21 se representa los valores promedios de la variable T para cada una de las estaciones de muestreo:

Figura 17. **Valores promedio de la variable “T” para cada estación de muestreo**



Fuente: elaboración propia.

6.3.2. Cálculo de la variable “A”

Los valores del OC determinados en cada estación y fecha de monitoreo se muestran en la tabla XIII. Como los registros obtenidos de OC son menores de 10 mg/l, la variable A fue calculada mediante la ecuación (7.1). Los valores obtenidos se pueden observar en la misma tabla.

$$Si\ OC < 10\ mg/L$$

$$A = 30 - \text{OC} \qquad (7.1)$$

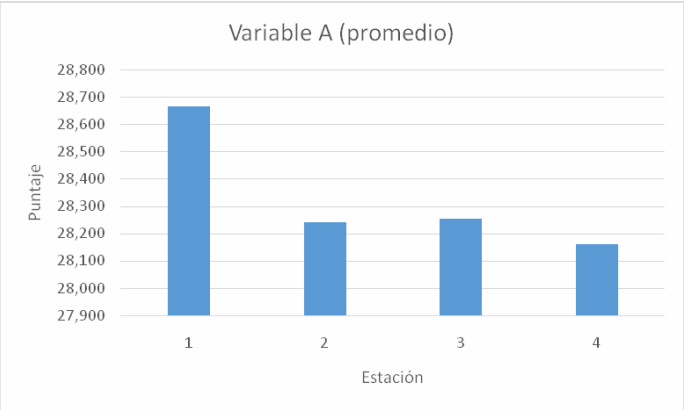
Tabla XIII. **Cálculo de la variable “A” para el índice ISCA**

Estación	Muestreo	OC (mg/L)	A
1	1 (18/9/2017)	1,4	28,6
2		2,9	27,0
3		1,9	28,0
4		1,7	28,2
1	2 (3/10/2017)	0,7	29,2
2		0,4	29,5
3		1,1	28,9
4		1,2	28,7
1	3 (7/11/2017)	1,8	28,1
2		1,9	28,1
3		2,1	27,8
4		2,4	27,5

Fuente: elaboración propia.

La variable “A” adopta valores que van entre 0 y 30, dependiendo de la concentración de OC en la muestra de agua. El puntaje está distribuido de tal manera que 30 representa el puntaje óptimo y 0 el más bajo puntaje. En la figura 22 se presentan los promedios de la variable A para cada una de las estaciones de muestreo.

Figura 18. **Promedio de la variable “A” en cada estación de muestreo**



Fuente: elaboración propia.

6.3.3. Cálculo de la variable “B”

Las concentraciones de SST en todas las muestras analizadas fueron inferiores a 100 mg/l (tabla XIV), razón por la cual el cálculo de la variable B, que depende de SST, se realizó utilizando la ecuación (7.2):

$$Si\ SST \leq 100\ mg/L$$
$$B = 25 - 0{,}15 * (SS \qquad (7.2)$$

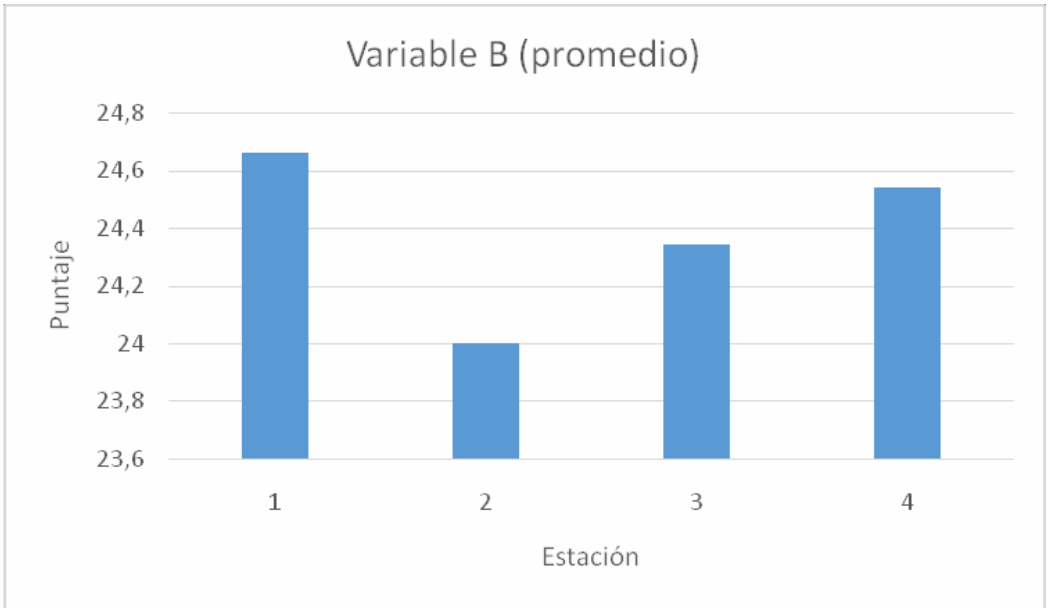
Tabla XIV. **Cálculo de la variable “B” para el índice ISCA**

Estación	Muestreo	SST (mg/L)	B
1	1 (18/9/2017)	1,2	24,8
2		6,8	23,9
3		2,4	24,6
4		0,0	25,0
1	2 (3/10/2017)	1,6	24,8
2		4,4	24,3
3		6,4	24,0
4		8,4	23,7
1	3 (7/11/2017)	4,0	24,4
2		8,8	23,7
3		4,4	24,3
4		0,8	24,9

Fuente: elaboración propia.

La variable “B” adopta valores que van entre 0 y 25, dependiendo de la concentración de los SST en la muestra. El puntaje está distribuido de tal manera que 23 representa el mejor puntaje y 0 el más bajo. En la figura 26 se presentan los valores promedios de la variable B en cada estación de muestreo.

Figura 19. **Promedio de la variable B en cada estación de muestreo**



Fuente: elaboración propia.

6.3.4. Cálculo de la variable “C”

Las concentraciones de OD (mg/l) obtenidas en las muestras extraídas en las cuatro estaciones se muestran en la tabla XV. Los valores determinados fueron inferiores a 10 mg/l, por lo cual se utilizó la ecuación 7.3 para calcular la variable C:

$$Si\ OD < 10\ mg/L$$

$$C = 2{,}5 * \qquad (7.3)$$

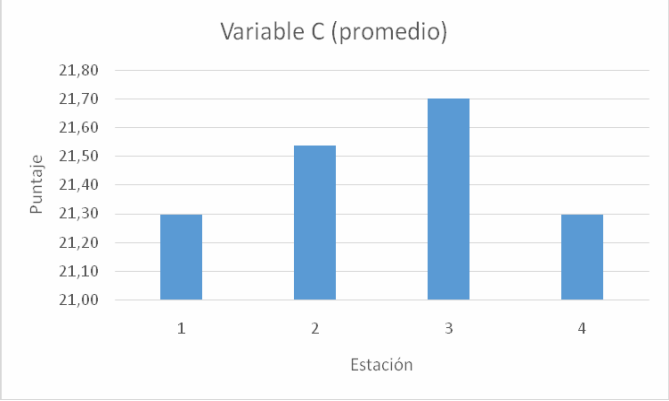
Tabla XV. **Cálculo de la variable "C" para el índice ISCA**

Estación	Muestreo	OD (mg/L)	C
1	1 (18/9/2017)	8,7	21,8
2		9,4	23,7
3		9,6	23,9
4		9,2	22,9
1	2 (3/10/2017)	8,2	20,8
2		8,5	21,3
3		8,5	21,3
4		8,3	20,8
1	3 (7/11/2017)	8,6	21,5
2		7,8	19,6
3		7,9	19,8
4		8,0	20,1

Fuente: elaboración propia.

La variable "C" adopta valores que van entre 0 y 25, dependiendo de la concentración del OD en la muestra. El puntaje está distribuido de tal manera que 25 representa el mejor puntaje y 0 el más bajo. En la figura 20 se presentan los promedios de la variable A en las estaciones de muestreo.

Figura 20. **Promedio de la variable C en cada estación de muestreo**



Fuente: elaboración propia.

6.3.5. Cálculo de la variable “D”

La variable D fue calculada con la ecuación 7.4, teniendo en cuenta los valores de conductividad eléctrica (CE) y temperatura registradas en las muestras analizadas (tabla XVI):

$$14{,}5 < t\,(°C) < 21{,}5$$

$$Si\ CE \leqq 400\ \mu S/cm \qquad (7.4)$$

$$D = (3{,}6 - \log((CE)) * \quad 15{,}4$$

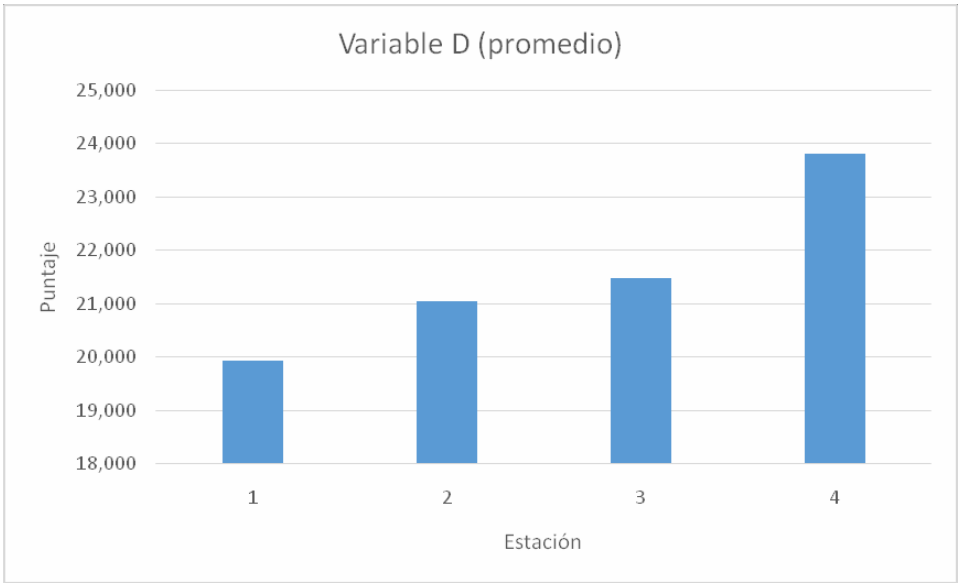
Tabla XVI. **Cálculo de la variable “D” para el índice ISCA**

Estación	Muestreo	CE (µS/cm)	D
1	1 (18/9/2017)	184,04	20,56
2		160,56	21,47
3		156,00	21,67
4		108,19	24,11
1	2 (3/10/2017)	191,78	20,29
2		175,44	20,88
3		160,82	21,46
4		113,43	23,80
1	3 (7/11/2017)	229,62	19,08
2		177,16	20,81
3		164,09	21,32
4		118,59	23,50

Fuente: elaboración propia.

La variable “D” adopta valores que van entre 0 y 25, dependiendo de la variación de la conductividad eléctrica medida en la muestra. El puntaje está distribuido de tal manera que 28 representa el mejor puntaje y 0 el más bajo.

Figura 21. **Promedio de la variable D en cada estación de muestreo**



Fuente: elaboración propia.

6.3.6. Cálculo del índice ISCA

En la tabla XVII se muestran los valores de las variables para cada estación de monitoreo y fecha de muestreo que intervienen en el cálculo del índice de la calidad fisicoquímico del agua y el valor del índice ISCA correspondiente.

Tabla XVII. **Cálculo del índice ISCA**

Estación	Fecha	T	A	B	C	D	ISCA
1	18/9/2017	1	28,6	24,8	21,8	20,56	95,70
2		1	27,0	23,9	23,7	21,47	96,26
3		1	28,0	24,6	23,9	21,67	98,32
4		1	28,2	25,0	22,9	24,11	99,34
1	3/10/2017	1	29,2	24,8	20,8	20,29	94,87
2		1	29,5	24,3	21,3	20,88	96,05
3		1	28,9	24,0	21,3	21,46	95,69
4		1	28,7	23,7	20,8	23,80	97,05
1	7/11/2017	0,9	28,1	24,4	21,5	19,08	91,58
2		0,9	28,1	23,7	19,6	20,81	91,50
3		0,9	27,8	24,3	19,8	21,32	93,20
4		1	27,5	24,9	20,1	23,50	95,99

Fuente: elaboración propia.

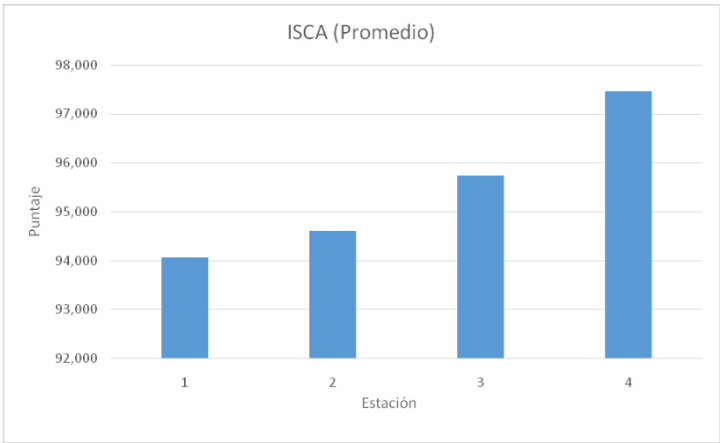
Los valores promedio del índice ISCA, en cada estación de muestreo, y la variación en el período de estudio se muestran en la tabla XVIII y figura 26:

Tabla XVIII. **Valores del ISCA en cada estación y fecha de muestreo**

c	Muestreo 18/9/17	Muestreo 3/10/2017	Muestreo 7/11/2017	ISCA (Promedio)
	ISCA	ISCA	ISCA	
1	95,70	94,87	91,58	94,05
2	96,26	96,05	91,50	94,60
3	98,32	95,69	93,20	95,73
4	99,34	97,05	95,99	97,46

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Variación longitudinal de la calidad del agua según índice ISCA (promedio)**



Fuente: elaboración propia.

6.4. Parámetro complementario

Los resultados de la medición *in situ* del pH del agua del Río El Tala se presentan en la tabla XIX:

Tabla XIX. **pH del agua del Río El Tala**

Estación	Muestreo	pH
1	18/9/2017	7,88
2		8,18
3		8,05
4		8,18
1	3/10/2017	8,680
2		7,900
3		7,860
4		7,860
1	7/11/2017	7,570
2		7,640
3		7,710
4		7,720

Fuente: elaboración propia.

6.5. Correlación de los índices bióticos (BMWP', ASPT' e IBF) con el índice fisicoquímico (ISCA)

Se realizó un cálculo de la correlación de los índices bióticos y el índice fisicoquímico para concluir de manera integral sobre la calidad ambiental actual del Río El Tala (tabla XX). Se determinó el coeficiente de correlación de Spearman (ρ), el cual se aplica a variables cuantitativas que no presentan una distribución normal, utilizando el software Infostat 2017e. Se representó el índice ISCA en función de índices bióticos: BMWP', ASPT' e IBF (tabla XX).

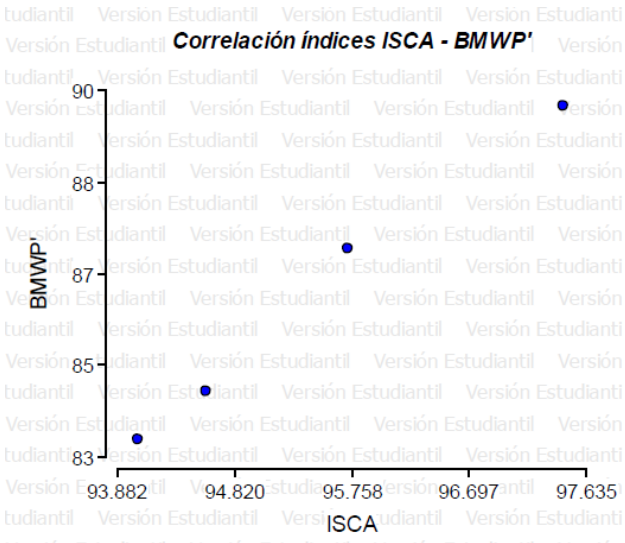
Tabla XX. **Correlación de los índices de calidad del agua (coeficiente de correlación de Spearman)**

Parámetro fijo	Variables	Coeficiente de Spearman (ρ)
ISCA (Puntaje)	BMWP' (Puntaje)	1,0
ISCA (Puntaje)	ASPT' (Puntaje)	0,4
ISCA (Puntaje)	IBF (Puntaje)	-0,4

Fuente: elaboración propia.

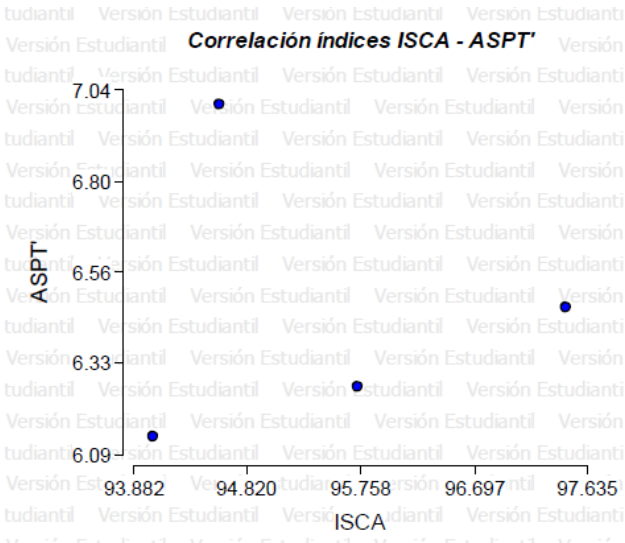
El coeficiente de correlación de Spearman puede adoptar valores en el rango de $-1 < \rho < 1$; los valores de 1 y -1 representan la mayor correlación y el signo denota si se trata de una correlación positiva (signo positivo) o de una correlación negativa (signo negativo), únicamente indicando la dirección que siguen los datos correlacionados (figuras 23, 24 y 25).

Figura 23. **Correlación entre los resultados de los índices ISCA BMWP’**



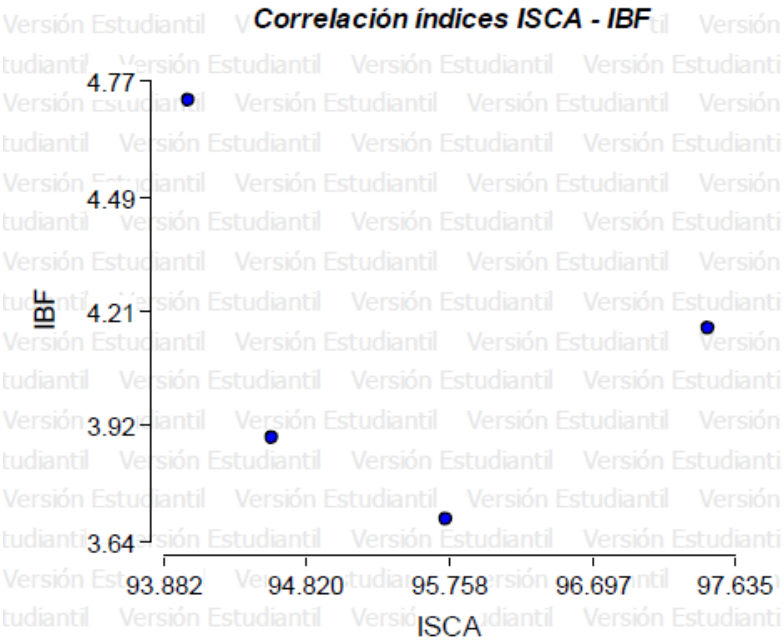
Fuente: Infostat 2016.

Figura 24. **Correlación entre los resultados de los índices ISCA – ASPT’**



Fuente: Infostat 2016.

Figura 25. **Correlación entre los resultados de los índices ISCA – IBF'**

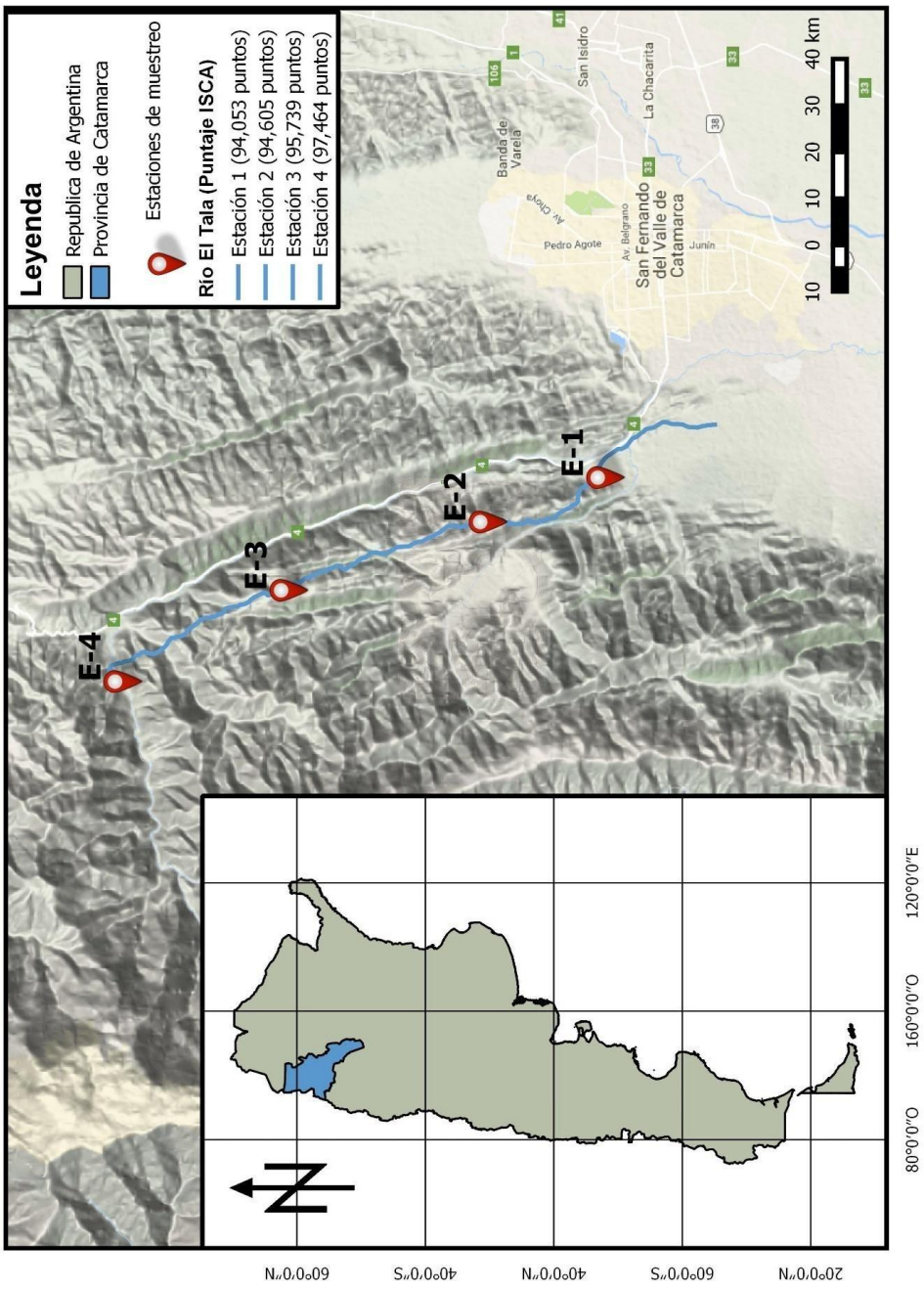


Fuente: Infostat 2016.

6.6. Mapas de la variación longitudinal de la calidad del agua del Río El Tala

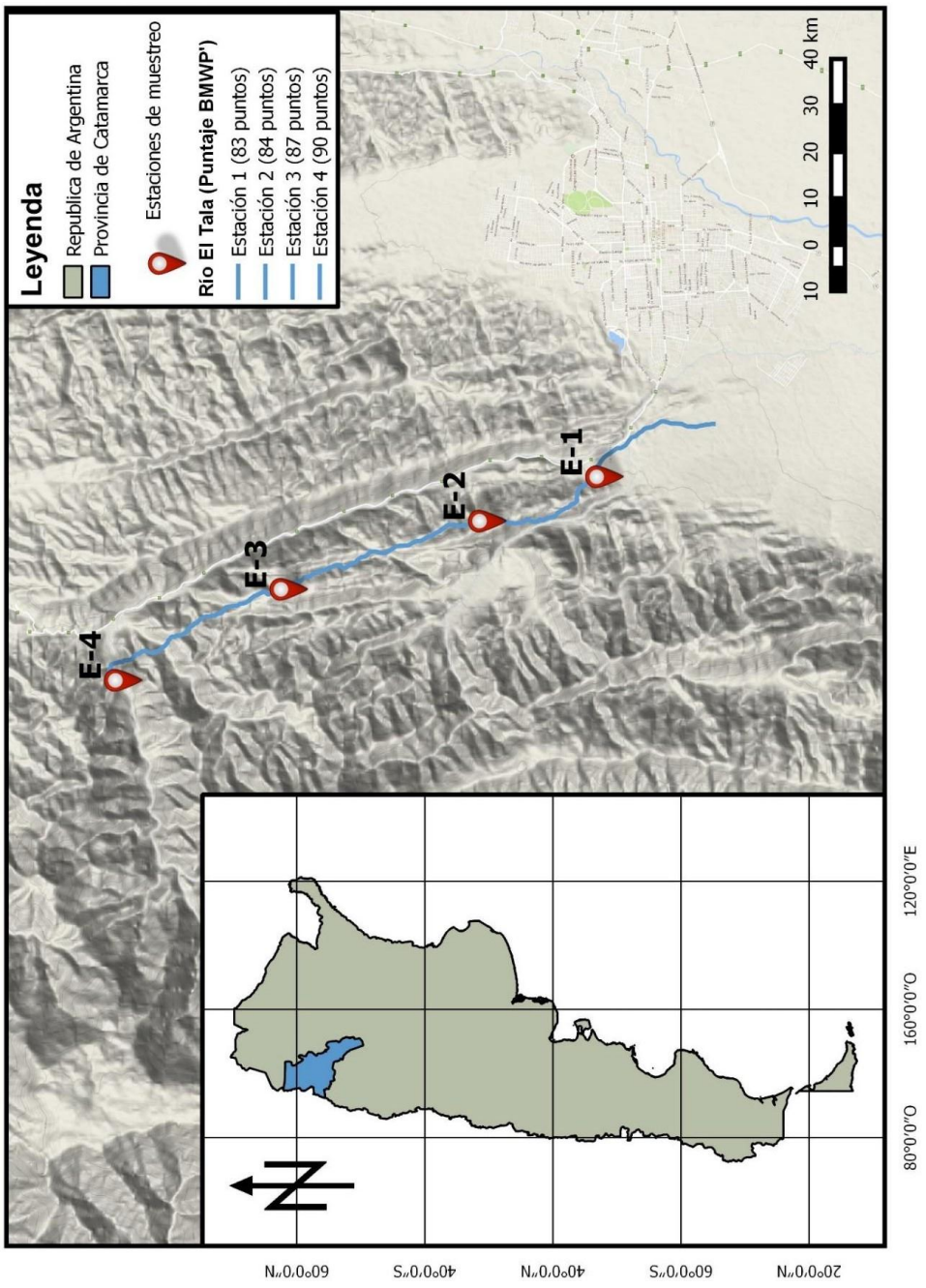
La variación longitudinal de la calidad del agua del Río El Tala en las cuatro estaciones de muestreo para los índices aplicados se puede observar en las figuras 26 a 29:

Figura 26. **Mapa de la variación longitudinal de la calidad del agua según índice ISCA**



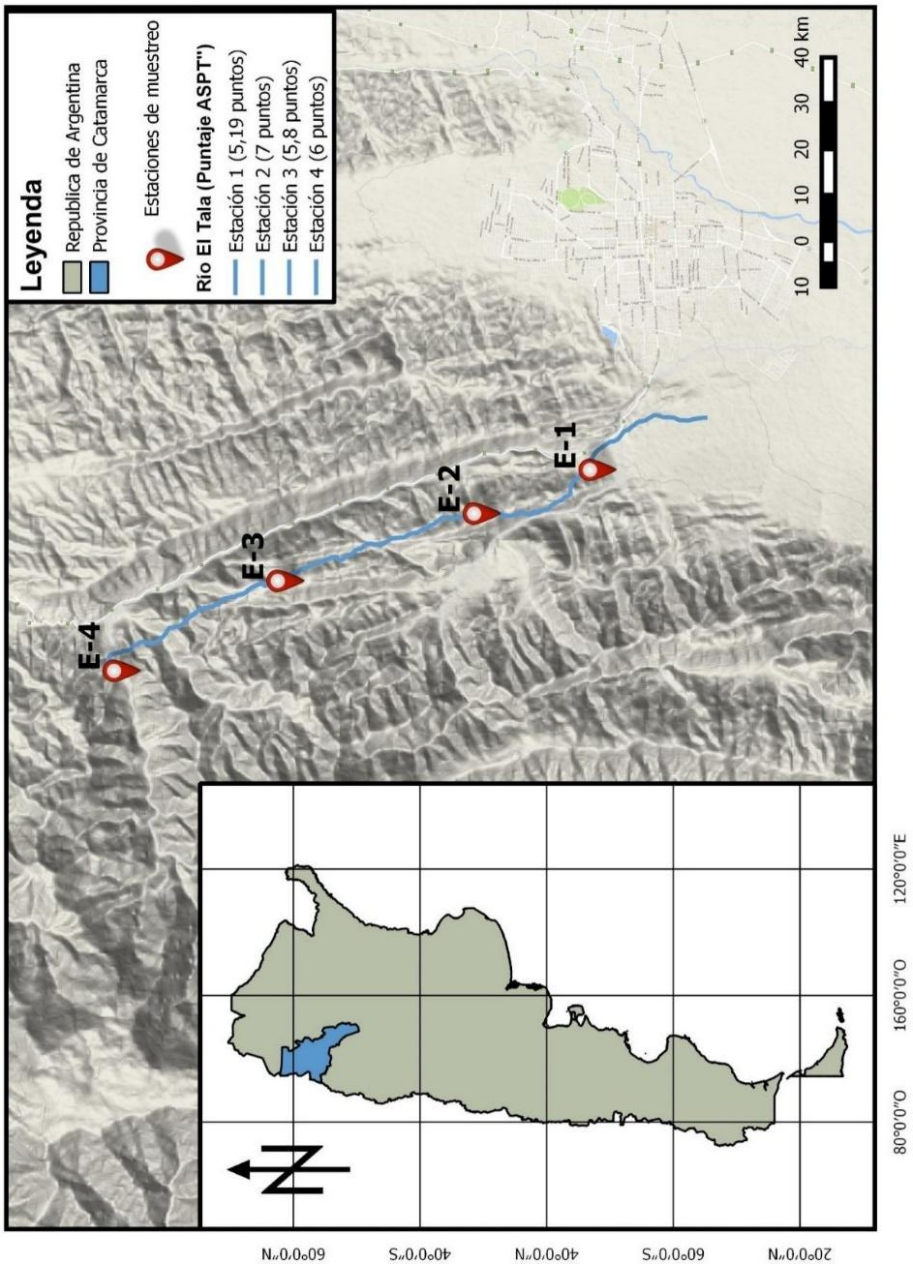
Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap 10.2.2

Figura 27. **Mapa de la variación longitudinal de la calidad del agua según índice BMWP'**



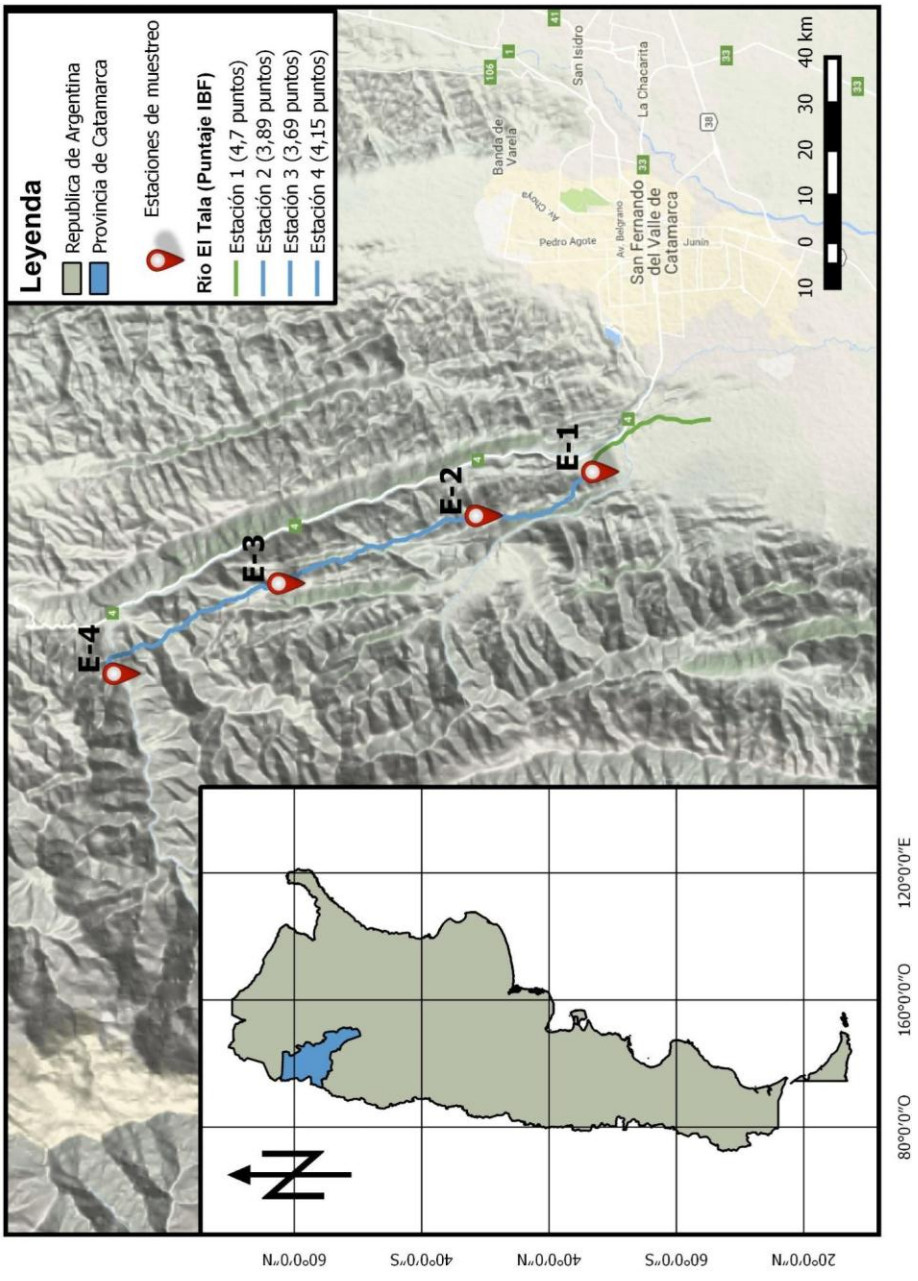
Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap 10.2.2

Figura 28. **Mapa de la variación longitudinal de la calidad del agua según índice ASPT'**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap 10.2.2

Figura 29. **Mapa de la variación longitudinal de la calidad del agua según índice IBF (QGIS 2.12.3 y ArcMap 10.2.2)**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap 10.2.2

7. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los macroinvertebrados bentónicos constituyen una importante comunidad biológica que permite caracterizar los cursos de aguas corrientes (ambientes lóticos) en Catamarca. A pesar de su importancia, si bien el análisis del estado del arte permitió detectar la existencia de varios trabajos referidos a la utilización de este conjunto de organismos para evaluar la calidad biológica del agua (Salas, 2007; Rodríguez Garay, 2007; Chapes, 2010; Cativa, 2013; Zelarayán Medina y Salas 2014 y 2014b; Ávalos Álamo y Salas, 2016), solo uno de ellos se realizó en el Río El Tala[48].

En los índices bióticos se integraron los conceptos de saprobidad y de diversidad, con la ventaja de tomar en cuenta la composición y adaptabilidad de los taxa. Estos dos últimos aspectos son considerados al determinar la tolerancia de los diferentes grupos de organismos a los factores de perturbación. La presencia o ausencia de un taxón y/o su abundancia se pondera de acuerdo a la sensibilidad que presenta el factor de perturbación que se quiere valorar.

Al analizar la composición cualitativa de la comunidad de macroinvertebrados en las cuatro estaciones de muestreo, se advierte la presencia de familias nada tolerantes a la contaminación (valor de tolerancia 10 en el índice BMWP'): Leptophlebiidae (Insecta: Ephemeroptera), Psephenidae (Insecta: Coleoptera), Leptoceridae y Odontoceridae (Insecta: Trichoptera), en la estación 1; Perlidae (Insecta: Plecoptera), Psephenidae (Insecta: Coleoptera),

[48] COLLA, Mario Fernando; y otros. *Benthic insects of the El Tala River (Catamarca, Argentina): longitudinal variation of their structure and use of insects to assess water Quality.* p. 134.

Leptohyphidae (Insecta: Ephemeroptera) y Pyralidae (Insecta: Lepidoptera), en la estación 2; Perlidae (Insecta: Plecoptera), Psephenidae (Insecta: Coleoptera), Pyralidae (Insecta: Lepidoptera), Leptophlebiida, y Leptohyphidae (Insecta: Ephemeroptera), en la estación 3, y Corydalidae (Insecta: Megaloptera), Psephenidae (Insecta: Coleoptera), Perlidae (Insecta: Plecoptera), Leptophlebiidae y Leptohyphidae (Insecta: Ephemeroptera) y Odontoceridae (Insecta: Trichoptera), en la estación 4. Su presencia por sí solas ya asegura la clase I: “aguas muy limpias” o “aguas no contaminadas” (valor de referencia: > 50) (tabla IV).

En respuesta al impacto, el índice BMWP’ disminuye. En el tramo del Río El Tala estudiado, este índice alcanzó valores entre 83 y 90 puntos (tabla XIV), junto con su derivado, el índice ASPT’, con rangos entre 5,19 y 7,00. Al comparar estos resultados con los obtenidos por Colla y otros autores en el año 2013, se puede observar que no hubo disminución en los valores de ambos índices y que, en coincidencia con los autores citados, se puede afirmar que la calidad del agua del Río El Tala corresponde a la clase I: “aguas muy limpias” (BMWP’) y “agua sin impacto” (ASPT’).

El valor del índice ASPT’ (Average Score Per Taxon) complementario al del índice BMWP´ presenta la ventaja de ser independiente al esfuerzo de muestreo, estacionalidad y eficacia en la identificación. También disminuye la recopilación de resultados falsos debido a la presencia de taxones con bajo puntaje en el índice BMWP’, mejorando la versatilidad en la interpretación de los resultados obtenidos.

El índice biótico IBF (Índice Biótico de Familias) surge de la necesidad de la incorporación de resultados cuantitativos relacionados a la abundancia de los individuos recolectados en cada muestreo, la cual no es considerada en los dos

índices previamente analizados (BMWP' y ASPT')[49]. Este índice permite establecer una relación entre la tolerancia de los macroinvertebrados bentónicos identificados ante los agentes contaminantes que interactúan con el ecosistema que habitan (tabla VI) y la abundancia de los individuos de cada familia presente. El cálculo del índice es ponderado mediante el producto de la sumatoria de la abundancia y los valores de tolerancia ante la alteración del ecosistema que habitan.

Los valores del IBF muestran una relación inversamente proporcional a la buena calidad del agua y directamente proporcional al grado de contaminación orgánica. Para cursos de agua de Catamarca fue calculado por primera vez por

Mestrocoldi (2011), para el arroyo El Arbolito (Concepción, Capayán). Su valor fue de 4,47, calidad de agua buena (valores guía: 4,26-5,00), con algo de contaminación orgánica. Por su parte, Zelarayán Medina y Salas (2014b) lo calcularon para el río Las Juntas (Las Juntas, Ambato), obteniendo un valor de 3,72, calidad de agua excelente, sin contaminación orgánica aparente (valores guía: 0,00-3,75). Ramos (2017), informa sobre el valor del IBF para el arroyo Pampichuelas (Concepción, Capayán): 4,17, calidad muy buena (valores guía: 3,76-4,25). Se eligieron para este análisis los valores correspondientes a la estación de aguas bajas.

Para el Río El Tala, el IBF varió entre 3,69 y 4,70. En las estaciones 1 y 4 reflejó clases inferiores de calidad, en relación a los otros dos índices bióticos calculados, mostrándose más exigente o más sensible a perturbaciones no detectadas por los otros. Los resultados obtenidos sugieren que este índice es un buen indicador de su calidad del agua.

[49] HILSENHOFF, Winston. *Rapid fiel assesment of organic pollution with a family level biotic index.* p.120.

El conjunto de índices bióticos utilizados en esta investigación evidencia las ventajas de la incorporación de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos a la bioevaluación de los cuerpos de agua, establecidas por Barbour y otros autores en 1999, teniendo en cuenta su capacidad de: reflejar la condición ecológica de un sitio; integrar efectos de los impactos de diferentes factores de perturbación; acumular en el tiempo el efecto de las tensiones que le han afectado y ser sensibles al impacto de factores difusos, no puntuales, que no pueden ser detectados por otros métodos.

Como segunda parte de la investigación se realizó la evaluación de los parámetros fisicoquímicos del agua del Río El Tala, por medio del Índice Simplificado de Calidad del Agua (ISCA). El índice ISCA presenta la ventaja de ser de fácil aplicación y no requerir altas inversiones económicas para la evaluación de las variables involucradas en su cálculo.

Los valores de la variable “T”, que son función de la temperatura del agua, se muestran en la tabla I. Las lecturas de este parámetro en las 4 estaciones, durante los muestreos realizados en los meses de septiembre y octubre, se encontraron por debajo de los 20°C, mientras que en el mes de noviembre se detectó un ligero incremento en su valor (entre los 20-21,4°C), lo cual indica que no hay un gradiente térmico longitudinal del agua por no recibir descargas de energía térmica y/o gran número de reacciones químicas (exotérmicas) que puedan afectar las condiciones del río.

La variable “T” adopta valores entre 1–0,8, siendo 1 el puntaje óptimo y 0,8 el más bajo, y debido a su función (multiplicativa) en la ecuación que permite calcular el índice ISCA que resulta ser uno de los parámetros más importantes. La figura 24 presenta los valores promedio de la variable “T” en las estaciones y fechas de muestreo. Se observa que la temperatura del agua en el

Río El Tala, con un puntaje de 1, presenta condiciones favorables en relación a la temperatura del agua en función de la metodología aplicada.

La variable “A”, medida de la cantidad de materia orgánica presente en un cuerpo de agua, que participa en procesos de oxidación química y bioquímica, constituye una alta carga contaminante y afecta directamente a los ecosistemas presentes, también es una medida de la contaminación antropogénica en los cuerpos de agua relacionada al establecimiento de centros poblados que realizan descargas de agua residual doméstica al río. En este estudio se la expresa a partir de la concentración en mg/l del OC. La variable “A” puede adoptar valores entre 0–30 puntos, siendo 30 el puntaje óptimo. La tabla XIII muestra los resultados obtenidos en los muestreos realizados. Los valores del OC varían entre 0,463 mg/L–2,475 mg/L, es decir en todas las estaciones las concentraciones de OC detectadas resultaron inferiores a 10 mg/L, lo que indica condiciones favorables en cuanto a la poca o nula incidencia de materia orgánica en cada una de las estaciones de muestreo. Sin embargo, en la figura 25, que presenta el gradiente longitudinal de la variable “A” en las cuatro estaciones de muestreo, se aprecia una alta dispersión de los resultados. La estación 1 presenta, en el período de estudio, el mejor puntaje para la variable “A”. Este resultado puede atribuirse a su ubicación respecto a viviendas y, por lo tanto, descargas de agua residual, ya que dicho *camping* cuenta con sistemas de saneamiento *in situ* reduciendo las descargas domésticas. Las estaciones 2, 3 y 4 (que no presentan una sustancial diferencia en los puntajes de la variable “A”) presentan valores de “A”, inferiores al correspondiente a la estación 1. Se considera que esta situación puede estar señalando el impacto de la descarga de agua residual al río, en función de que dichos sitios se encuentran rodeados de viviendas que carecen de sistema de alcantarillado. En general, las cuatro estaciones presentan baja concentración de materia orgánica debido a los

puntajes obtenidos de la variable “A”, con un máximo de 28,7 mg/L y un mínimo de 28,2 mg/L.

La variable “B” está relacionada a la concentración de sólidos SST, los cuales son transportados por acción de arrastre del agua. Presentan tamaños inferiores a 0,01 mm y no precipitan naturalmente en tiempos razonables de estancamiento, según Sierra Ramírez en el año 2011. Causan turbiedad en el agua y el efecto de Tyndall (dispersión de la luz a través de partículas coloidales), el cual con el transcurso del tiempo ocasiona problemas de eutrofización y variaciones abruptas de la temperatura del agua a diferentes profundidades. La variable “B” adopta valores entre 0–25 puntos (siendo 25 el puntaje óptimo y 0 el más bajo). En la tabla XIV se observa que los resultados de la concentración de SST en cada uno de los muestreos realizados varían entre 0 – 8,8 mg/L, demostrando así poca o nula incidencia de material en suspensión (SST ≤ 100 mg/L). Sin embargo, en la figura 25 referida al gradiente longitudinal de la variable “B” para las 4 estaciones de muestreo, se puede observar que la estación 1 presenta el mejor puntaje, evidenciando la baja incidencia de procesos de meteorización del suelo y arrastre de sedimentos debido a la disminución de la velocidad de flujo. Las estaciones 2 y 3 presentan una disminución del puntaje (y aumento de los SST), debido al aumento de las perturbaciones en el cauce natural del río. Teniendo en cuenta los puntajes de la variable “B”: máximo de 24,61 mg/L y un mínimo de 24,22 mg/L, se puede decir que el agua en las cuatro estaciones de muestreo presenta poca presencia de material en suspensión.

La variable “C” está relacionada con la concentración de OD en el agua y puede adoptar valores entre 0–25 puntos (siendo 25 el puntaje óptimo y 0 el más bajo). El OD es un indicador de la contaminación del agua y constituye una de las condiciones esenciales para que exista crecimiento y reproducción

normal de organismos acuáticos, según Sierra Ramirez en el año 2011. En la tabla XVI se puede observar que los valores detectados de OD varían entre 7,8 mg/l y 9,6 mg/L, concentraciones inferiores a 10 mg/L que justifican la forma de cálculo de “C” pero mayores a 5mg/l, concentración mínima exigida por la normativa vigente en el Valle Central de Catamarca (Contrato de Concesión, 1999), para la protección de la vida acuática. La figura 27 muestra el gradiente longitudinal de la variable “C”. Las estaciones 1 y 4 presentan los puntajes más bajos, situación que puede estar relacionada a la disminución de la velocidad de flujo y estancamiento de la corriente de agua (lo cual reduce la capacidad del agua a oxigenarse de manera natural). La estación 3, donde se obtuvo el puntaje más alto, presenta las condiciones más favorables para los ecosistemas acuáticos, como lo demuestra la evaluación biológica de la calidad del agua realizada a través de los índices BMWP’, ASPT’ e IBF, que reflejan una alta abundancia y diversidad de macroinvertebrados bentónicos habitando el ecosistema acuático (475 individuos; 15 taxones). El OD mejora considerablemente las condiciones de vida del ecosistema acuático y permite el cumplimiento adecuado de sus funciones.

La variable “D” está relacionada con la CE, indicador de las concentraciones de sales disueltas en el agua, específicamente de iones. Esta variable puede adoptar valores entre 0–25 (siendo 25 el puntaje óptimo y 0 el más bajo).En la tabla XIX se observa que la CE del agua en el tramo en estudio varía entre 108,2µS/cm a 229,6 µS/cm, siendo inferior a 400 µS/cm, razón por la cual el cálculo de la variable D se hizo con la ecuación 7.4. En la figura 28 se puede observar el gradiente longitudinal de la variable “D”, la cual se comporta según lo esperado: el puntaje más bajo (correspondiente al de mayor CE) se encuentra en la estación 1 por el aumento de las concentraciones de iones producto de la mayor mineralización del agua al escurrir por el del cauce del río, mientras que en la estación 4 se presenta el puntaje más alto (correspondiente

al de menor CE). En promedio las cuatro estaciones de muestreo presentan condiciones favorables con respecto a la conductividad eléctrica del agua.

El índice ISCA se calculó con base en el promedio de los valores de las variables obtenidas en los muestreos realizados en los meses de septiembre, octubre y noviembre. En la tabla XX se presenta además la variación longitudinal del índice en cada uno de los meses de muestreo, para poder visualizar los cambios temporales de la calidad del agua del río. Los valores del índice en todas las estaciones y fechas de monitoreo fueron mayores a 90 puntos y están incluidos en el intervalo [76-100]. El valor promedio mínimo corresponde a la estación 1 (94,0 puntos) y el valor máximo a la estación 4 (97,5 puntos); el gradiente longitudinal puede ser observado en la figura 29.

Al comparar los valores del ISCA obtenidos en este estudio con los reportados por otros investigadores[50] para las mismas estaciones de monitoreo se destaca el incremento del valor de dicho índice en la estación 1 (km 5). La mejora en la calidad fisicoquímica del agua en dicha estación puede ser atribuida a la eliminación del principal afluente del río en estudio, el A° El Potrero, que le aportaba agua con una conductividad promedio de 509 µS/cm, incrementando la salinidad del rio en la estación 1. El resultado de la mezcla de agua daba como resultado un ISCA de 88,7 frente al obtenido actualmente de 94,0. A través de este índice no se detectan cambios significativos en la calidad del agua de las restantes estaciones de muestreo.

En función de lo expuesto se puede caracterizar la calidad del agua del Río El Tala como “aguas claras sin aparente contaminación. La calidad del agua está protegida, se da por sentado una ausencia total de amenazas” (tabla

[50] SARACHO, Marta; y otros. *Análisis de la variabilidad espacial de la calidad del agua del Río El Tala, Catamarca.* p. 7.

II). El río presenta, en el tramo estudiado, condiciones positivas y un estado óptimo de calidad del agua para diferentes usos en función de los valores obtenidos del ISCA.

De manera complementaria se realizó la medición del potencial de hidrógeno del agua (pH), parámetro de vital importancia para entender los procesos fisicoquímicos y biológicos que se llevan a cabo en los ecosistemas acuáticos. En la tabla XVIII se presentan los resultados de la medición del pH. Los valores registrados oscilan entre 7,57–8,68; corresponden a aguas ligeramente alcalinas y se encuentran dentro de los valores aceptables para un cuerpo de agua (6,5 – 9,0)[51].

Respecto a la correlación entre el índice ISCA y el índice BMWP', esta fue lineal positiva, con un coeficiente ρ = 1, lo que indica que el aumento del puntaje del índice ISCA se ve reflejado con un aumento del puntaje del índice BMWP'. Por otro lado, ISCA vs. ASPT' e IBF, no se correlacionaron (tabla XXIII; figuras 30, 31 y 32). No hay antecedentes previos que posibiliten su interpretación, ya que es la primera vez que se obtiene en forma conjunta, para la misma época del año y para las mismas estaciones de muestreo, este dato de correlación.

La evaluación de la calidad del agua del Río El Tala en el tramo estudiado presentó resultados favorables, caracterizándolo como recurso hídrico sin impactos ambientales significativos. El análisis correlativo de las variables permite concluir sobre la calidad del agua a nivel de ecosistema acuático, presentando un panorama amplio de la estrecha relación entre los parámetros fisicoquímicos y bióticos de un cuerpo de agua. Tomando en consideración los elementos clave y los objetivos de esta investigación, contrastando con la

[51] UNESCO. *Agua para todos, agua para la vida.* UNESCO-WWAP. p. 97.

opinión de expertos y la revisión de literatura, se redactó la interpretación de la manera que se ha visto.

CONCLUSIONES

1. El índice BMWP' ajustado para el NOA, con un puntaje mínimo de 87 y máximo de 90, permitió clasificar la calidad del agua del Río El Tala, en el tramo comprendido entre el Km 6 y Km 22, en la clase I: "aguas muy limpias".

2. La evaluación de la calidad biológica del agua a través del índice ASPT' señala que la estación 2 de monitoreo presenta las mejores condiciones del ecosistema acuático. Sin embargo, teniendo en cuenta los valores del índice obtenidos: mínimo de 5,19 y un máximo de 7, la calidad del recurso hídrico correspondiente a todas las estaciones monitoreadas puede ser clasificada como agua: "sin impacto".

3. El índice IBF reflejó que la estación con mayor puntaje fue la 3, clase I, calidad "excelente". La calidad del agua de las estaciones 1, 2 y 4, donde se obtuvieron valores del índice de 4,70 como máximo y mínimo de 3,69, corresponden a las clases II y III: "muy buena" y "muena" (respectivamente). En función de estos valores se puede afirmar que la calidad del agua mejora, observándose un gradiente longitudinal desde la estación 1 a la estación 3.

4. La calidad fisicoquímica del agua del Río El Tala evaluada a través del índice ISCA como función de la temperatura del agua, oxígeno consumido del permanganato de potasio, sólidos suspendidos totales, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica, se encuentra en la clase de "aguas claras sin aparente contaminación. La calidad del agua está

protegida, se da por sentado una ausencia total de amenazas", con un puntaje promedio del índice mínimo de 94,05 y un máximo de 97,46.

5. La correlación encontrada entre el índice ISCA y el índice BMWP' ajustado para el NOA fue muy buena (coeficiente de Spearman: ρ =1), evidenciando cómo la adaptación de los índices bióticos a la diversidad faunística local presenta resultados con un alto grado de confiabilidad. No se encontraron correlaciones positivas o negativas con los otros dos índices bióticos.

6. Los mapas de variación longitudinal de la calidad del agua del Río El Tala permitieron establecer la tendencia del aumento y/o disminución de la calidad del agua según los índices aplicados (BMWP', ASPT', IBF e ISCA) para el control y monitoreo futuro.

RECOMENDACIONES

1. El índice ISCA proporciona una idea rápida y puntual de la calidad de un curso de agua, pero para confirmar el estado de la calidad ambiental del recurso se recomienda su complementación con índices bióticos que reflejen la situación de los ecosistemas acuáticos presentes, mostrando los efectos acumulativos, antagónicos y sinérgicos que ocasionan los contaminantes en las comunidades biológicas existentes en los cuerpos lóticos.

2. Aplicar Sistemas de Información Geográfica (SIG) a los cuerpos de agua de San Fernando del Valle de Catamarca, para establecer herramientas que mejoren la evaluación, control y monitoreo de su calidad.

3. Considerando los resultados obtenidos en este estudio integrado, abordado por primera vez para el Río El Tala, se recomienda extender la investigación por el período de un año, a fin de evaluar las variaciones estacionales que no pudieron ser abarcadas en este trabajo.

4. Impulsar el desarrollo de líneas de investigación en Guatemala para correlacionar las variables fisicoquímicas del agua con la riqueza faunística endémica, y poder así desarrollar índices bióticos ajustados a la zona de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALBA-TERCEDOR, Julio. *Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos.* Madrid, España: IV Simposio del Agua en Andalucía (SIAGA) Vol II. Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1996. 213 p.

2. ALDANA, Gabriel. *Diversidad de insectos bentónicos en un arroyo de Yungas y sus variaciones estacionales.* Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales UNCa, Catamarca, Argentina: Universidad Nacional de Catamarca, 2011. 98 p.

3. ALONSO SARRÍA, Francisco. *Sistemas de información geográfica*. Murcia, España: Universidad de Murcia, 2010. 18 p.

4. ALONSO, Jorge. *Evaluación de la calidad de las aguas del Arroyo Aguapey mediante el empleo del Índice Simplificado de Calidad de Agua.* Escuela de Posgrado, Universidad Nacional de Itapúa, Paraguay. Itapúa, Paraguay: Universidad Nacional de Itapúa, 2013. 120 p.

5. BLESA, Mario; et. al. *Agua y ambiente. Un enfoque desde la química.* EUDEBA, Argentina: EUDEBA, 2012, 335 p.

6. CABRERA, Alfredo Lisandro. *Regiones fitogreográficas argentinas.* Buenos Aires, Argentina: Kugler WF, 1976. 85 p.

7. CARRIZO, Sandra. *Diagnóstico y propuestas para un ordenamiento ambiental.* Caso: Quebrada El Tala. Catamarca, Seminario de Facultad de Humanidades, Catamarca, Argentina: Seminario de Facultad de Humanidades,1996. 12 p.

8. CASTRO, Mario; y otros. *Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global.* Argentina: Ingeniería Sanitaria, vol. 10. 2014, 124 p.

9. CATIVA, Esteban. *Diversidad de insectos bentónicos en un tramo del Río Mutquín, Deparatamento de Pomán, Catamarca,* Argentina: Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UNCa, 2013. 54 p.

10. CENGICAÑA. *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala.* Guatemala: Investigación CENGICAÑA, 2014. 212 p.

11. CHAPES, Silvio. *Diversidad del Orden Trichoptera en un arroyo serrano: variación estacional y su relación con parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos*. Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UNCa, 2010. 131 p.

12. COLLA, Mario Fernando; y otros. *Benthic insects of the El Tala River (Catamarca, Argentina): Longitudinal variation of their structure and use of insects to assess water Quality.* Argentina: 2013, 366 p.

13. COSTELLO, Julio Alberto; y otros. *Manual de geografía de Catamarca.* San Fernando del Valle de Catamarca, Argentina. Catamarca, Argentina: Editorial Sarquis. 1993 p.

14. DE LEÓN BARRIOS, Khalil. *Estudio de Calidad del Agua del rio estudio de calidad del agua del río Samalá del tramo cantel – zunil – el palmar, Quetzaltenango*. Guatemala. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005. 165 p.

15. DOMÍNGUEZ, Eduardo, FERNÁNDEZ, Hugo. *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y biología*. Buenos Aires. Argentina: Fundación Miguel Lillo, 2009. 654 p.

16. DOMÍNGUEZ, Eduardo; FERNÁNDEZ, Hugo. *Calidad de los ríos e la cuenca del Salí (Tucumán, Argentina) medida por un índice biótico*. Argentina: Serie Conservación de la Naturaleza N°12, 1998, 39 p.

17. FALLAS, Jorge. Correlación lineal: *Midiendo la relación entre dos variables.* [en línea]. <http://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad2/complementarias/correlacion_lineal_2012.pdf>. [Consulta: 11 de octubre de 2017].

18. FERRER, William, SALAS, Liliana. *Diversidad de coleoptera (Insecta) bentónicos en el arroyo Pampichuelas (Concepción, Catamarca)*. USA: Haylly - Bios 5, 2011. 84 p.

19. GARAVENTA, Sofia; SALAS, Liliana; LUNA MERCADO, Luis. *En defensa de la biodiversidad en un ecosistema de la cuenca del río Simbolar. En Producciones Cientificas NOA 2002.* Producciones Cientificas NOA 2002. Catamarca. Catamarca, Argentina: Congreso Regional de Ciencia y Tecnología, Catamarca 2002. 12 p.

20. GARCÍA, Camelo. *Áreas de aplicación medioambiental de los 'SIG'. Modelización y avances recientes*. Madrid, España: Papeles de geografía, N° 23-24, 1996. 115 p.

21. GROSSO, Estuardo; PERALTA, Mario; ROMERO, Romero. *Invertebrados acuáticos*. Tucumán, Argentina: En: Biodiversidad de Agua Rica. Lavilla E. y J. Gonzales. BHP Koper-Fundación Miguel Lillo, 1999. 37 p.

22. HAUER, Ernest; LAMBERTY, Gerald. *Methods in stream ecology. Academic Press*, New York. New York, USA: 1996, 176 p.

23. HERNÁNDEZ MUÑOZ, Aurelio. *Depuración de Aguas Residuales.* Paraninfo S.A, Argentina: Fundación Lilo,1998. 125 p.

24. HILSENHOFF, Winston. *Rapid fiel assesment of organic pollution with a family level biotic index*. EEUU: Journal of the North American Benthological Society 7, 1988. 224 p.

25. IRAM. *Calidad ambiental. Calidad del agua*. Muestreo. Parte 3: Guía para la preservación y manipulación de las muestras. IRAM. Argentina: IRAM, 1998. 490 p.

26. ISO. *Calidad del agua.* Muestreo. Parte 3: Conservación y manipulación de las muestras de agua (ISO 5667-3). CTN 77 - MEDIO AMBIENTE, 1994.

27. KIELY, Gerard. *Ingeniería ambiental*: Fundamentos. EEUU: McGraw-Hill, 2003. 342 p.

28. KLEMM, Donald; y otros. *Macroinvertebrate Field an Laboratory Methods for Evaluation of The Biological Integrity of Surface Waters*. EEUU: Environmental Monitoring Systems Laboratory, Cincinnati, Ohaio, 1990, 62 p.

29. LINSLEY KOHLER, Paul. *Hidrologia para ingenieros*. Bogota, Colombia: McGraw-Hill Latinoamerica, 1977. 450 p.

30. LOBO, Patricia; ALVES, Julio; VARELA, Miguel. *Conceptos de hidrología. Hidrología de Catamarca. El agua del subsuelo. Cuidados del agua natural y potable.* Catamarca, Argentina: La Isla, 2008. 257 p.

31. LOPEZ, Matilde. *Estudio calidad del agua parámetros biológicos, microbiológicos y fisicoquímicos*. Chile: Universidad de Chile 2007, 89 p.

32. MASON, Chris. *Biology of freshwater pollution*. EEUU: Longman Scientific & Technical. Essex 1991, 351 p.

33. MÉNDEZ RIVERA, Jorge Leonel. *Determinación de los Índices de calidad y coeficientes cinéticos de auto depuración del agua, en la*

parte alta de la cuenca del Río Naranjo, Ubicada en los departamentos de San Marcos y Quetzaltenango. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala: Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos. 2008. 120 p.

34. MERCADO GARAVENTA, Sofia; SALAS, Liliana. *En defensa de la biodiversidad en un ecosistema de la cuenca del Río Simbolar*. Catamarca, Argentina: En producciones Cientificas 2002. Congreso Regional de Ciencia y Tecnología, 2002. 37 p.

35. MESTROCOLDI, Carlos. *Insectos bentónicos en un arroyo de Yungas de Catamarca y su aplicación para evaluar la calidad del agua, en un ciclo anual. Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Biológicas*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Catamarca, Argentina: 2011, 85 p.

36. MIJARES APARICIO, Francisco. *Fundamentos de hidrología de superficie*. Mexico, D.F.: Editorial Limusa, 1992, 129 p.

37. MORLANS, Carlos. *Regiones Naturales de Catamarca. Provincias Geológicas y Provincias Fitogeográficas*. Catamarca, Argentina: Revista de Ciencia y Técnica II.2, 1995. 36 p.

38. MUNNÉ, Antoni; NARCIS PRAT, Rocío. *Delimitación de regiones ecológicas para el establecimiento de tiempos de referencia y umbrales de calidad biológica: Propuesta de aplicación de la Directiva Marco del Agua en la cuenca del Ebro.* Barcelona, España: Actas del II Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua, 2000. 27 p.

39. MURATORE, Pablo. *Río El Tala, fuente principal de provisión de agua potable para la zona oeste de la ciudad Capital*. Catamarca, Argentina: Departamento de Geografía. Facultad de Humanidades UNCa, 1996. 8 p.

40. NARCÍS PRAT, Rocío. *Los macroinvertebrados como indicadores de calidad de las aguas*. San Miguel de Tucuman, Argentina: En Dominguez E. y H. Fernandez (Eds) Macroinvertebrados bentónicos Sudamericanos, 2008. 26 p.

41. OTT, Werner. *Water Quality Indices: A Survey of Indices Used in The United States*. S Environmental Protection Agency. EEUU: Water Quality of EEUU, 1978. 76 p.

42. PEREZ PEREZ, Felix; GUTIERREZ, José. *Agua y medio ambiente.* Catedra Félix Rodriguez de la Fuente. Reales Academias: Nacional de Medicina y Nacional de Doctores. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid, 2005. 17 p.

43. RAMOS, Vanessa. *Evaluación de la calidad biológica de agua del arroyo Pampichuelas aplicando macroinvertebrados betonicos como bioindicadores.* Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UNCa. Catamarca, Argentina: Trabajo Final de Grado de Licenciatura en Ciencias Biólogicas, 2017. 84 p.

44. RODRIGUEZ GARAY, Gabriel. *Entomofauna bentónica del arroyo Los Pinos (Capayán, Catamarca), con especial referencia al orden Diptera: variación estacional y su aplicación como bioindicadores*. Catamarca, Argentina: Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias

Biológicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UNCa, 2011. 111 p.

45. ROJAS ROMERO, Jairo. *Potabilización del agua*. Ciudad de Mexico, México: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, 1999. 88 p.

46. ROJAS, Laura; MACÍAS, Nancy; FONSECA, Diego. *El Índice de Calidad de Agua como herramienta para la gestión de los recursos hídricos*. Medio Ambiente y Desarrollo. Catamarca, Argentina: Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente. Año 9, No.16, ISSN-1683-8904, 2009. 45 p.

47. ROLDAN, Patricia; VILLAGRA, Mónica. *Ictiofauna del Arroyo Tala, Provincia de Catamarca, Argentina.* Catamarca, Argentina: Universidad Nacional de Catamarca, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. 1998, 99 p.

48. ROS, Alejandro. *El agua, calidad y contaminación* (1/2). España: Mailxmail, 2011. 17 p.

49. S.A.P.E.M. *Aguas de Catamarca*. Base de Datos. Catamarca. Catamarca, Argentina: Argentina, 2017.

50. SALAS, Liliana. *Biodiversity of mountain stream benthonic insects and their application to test the biological quality of the water*. Catamarca, Argentina: Biocell 29 (1) I.29, 2005 (b). 85 p.

51. SALAS, Liliana; CHAPES, Sandro. *Trichopterofauna of El Arbolito Water stream and its relationship with water physical-chemical and*

bacteriological parameters. Catamarca, Argentina: Biocell 37 (2). 2011. 106 p.

52. SALAS, Liliana; DE GROSSO, Luciana. *Biodiversidad de insectos bentónicos de un arroyo de Yungas de la provincia de Catamarca*. Catamarca, Argentina: Tesis de Maestría en Entomología. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo. UNT. 2005 (a). 110 p.

53. SALAS, Liliana; DE GROSSO, Luciana. *Biodiversity of Diptera Order in a stream of Yungas of Catamarca, Argentina*. Catamarca, Argentina: Biocell I.30. , 2006. 224 p.

54. SALAS, Liliana; DE GROSSO, Luciana. *Functional trophics groups (Diptera Order) of water stream Los Pinos*. Catamarca, Argentina: Biocell 31 (2), 2007. 288 p.

55. SALAS, Liliana; MALANDRINI, Beatriz. *Identificación del zoobentos de ríos de Montaña*. Catamarca, Argentina: Revista de Ciencia y Técnica Vol. VII N°10 2001, 237 p.

56. SALAS, Liliana; y otros. *Calidad de agua de dos arroyos de montaña.* Argentina: Libro de Resumenes del III Congreso Argentino de Limnología. 2005, 25 p.

57. SARACHO, Marta; y otros. *Análisis de la variabilidad espacial de la calidad del agua del Río El Tala, Catamarca*.Catamarca, Argentina: Ciencia, Vol, 2, N°2, 2006. 13 p.

58. SIERRA RAMÍREZ, Carlos Alberto. *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico.* Medellin, Colombia: Editoriales de la U, 2011. 327 p.

59. SPILLMAN, Robert; y otros. *Water Resource Assesment of Guatemala.* Guatemala: US Army Corps of Engineers. 2000, 245 p.

60. STANDARD METHODS. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.* EEUU: United States of America: American Public Health Association. American Water Works Asociation, Water Environment Federation. 21st Edición, 2005. 676 p.

61. TOMASI, Gaston; y otros. *Estudio bacteriológico, fisicoquímico y aplicación el índice BMWP', el agua del arroyos El Simbolar y piscina del balneario en Concepción, Departamento Capayán, Catamarca.* Catamarca, Argentina: Revista Ciencia Vol. 5 N°16. 2010. 38 p.

62. TORRES, Pablo; y otros. *Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica.* Medellín, Colombia: Revista Ingenierías. Universidad de Medellín, vol. 8, No. 15 especial, ISSN 1692-3324, 2009. 150 p.

63. UNESCO. *Agua para todos, agua para la vida.* París, Francia: UNESCO-WWAP. 2007. 97 p.

64. URQUIJO REGUERA, Julia; TRUEBA JAINAGA, José Ignacio. *Seguridad alimentaria y desarrollo sostenible en zonas marginales de Guatemala.* Guatemala: ETSI Agrónomos. UPM, 2001. 179 p.

65. VIDES ALMONACID, Raúl; y otros. *Bioindicadores.* Catamarca: LAVILLA, E.; GONZÁLEZ, J. (Editores). *Biodiversidad de Agua Rica Catamarca-Argentina.* Catamarca, Argentina: BHP COPPER y Fundación Miguel Lillo. U.N.T., 1999. 261 p.

66. WAYNE, Daniel. *Bioestadística: base para el análisis de las ciencias de la salud.* México, D.F: Limusa Wiley, 2010. 234 p.

67. ZELARAYÁN MEDINA, Gabriel; SALAS, Liliana. *Estructura y variación espacial de las colectividades de artrópodos en el Río Las Juntas (Catamarca, Argentina).* Catamarca, Argentina: Huayllus bios N°8. 2014. 39 p.

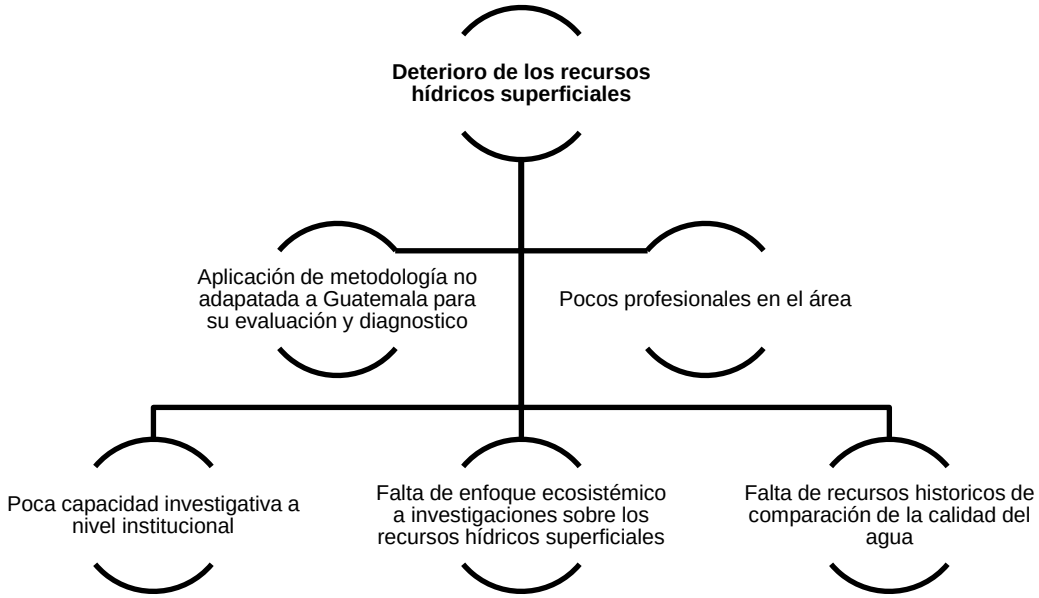
APÉNDICES

Apéndice 1**. Tabla de requisitos académicos**

Carrera	Área	Curso	Temática
Ingeniería Ambiental	Aguas	Hidrología	• Caracterización de un cuerpo de agua • Aplicación de conceptos de hidrología superficial
		Manejo adecuado de cuencas hidrográficas	• Reconocimiento de la cuenca a trabajar y manejo de las variables dentro de un afluente perteneciente a una cuenca hidrográfica • Reconocimiento de la cuenca hidrográfica para el estudio de cuerpos de agua
	Química industrial	Microbiología	• Utilización correcta del equipo (estereoscopio)
		Calidad del agua	• Alteraciones en la calidad del agua • Muestreos para calidad del agua • Parámetros de calidad del agua • Índices fisicoquímicos de calidad del agua • Índices biológicos de calidad del agua
	Topografía	Topografía	• Cambios de elevación • Curvas de nivel • Ortofotos y fotografías aéreas • Manejo adecuado de coordenadas (geográficas y UTM, GTM) • Introducción a mapeo
		Taller de sistemas de información geográfica	• Digitalización de la información • Elaboración de mapas
	Complementaria	Climatología	• Relación de variables climáticas con las condiciones del río según época seca y época lluviosa

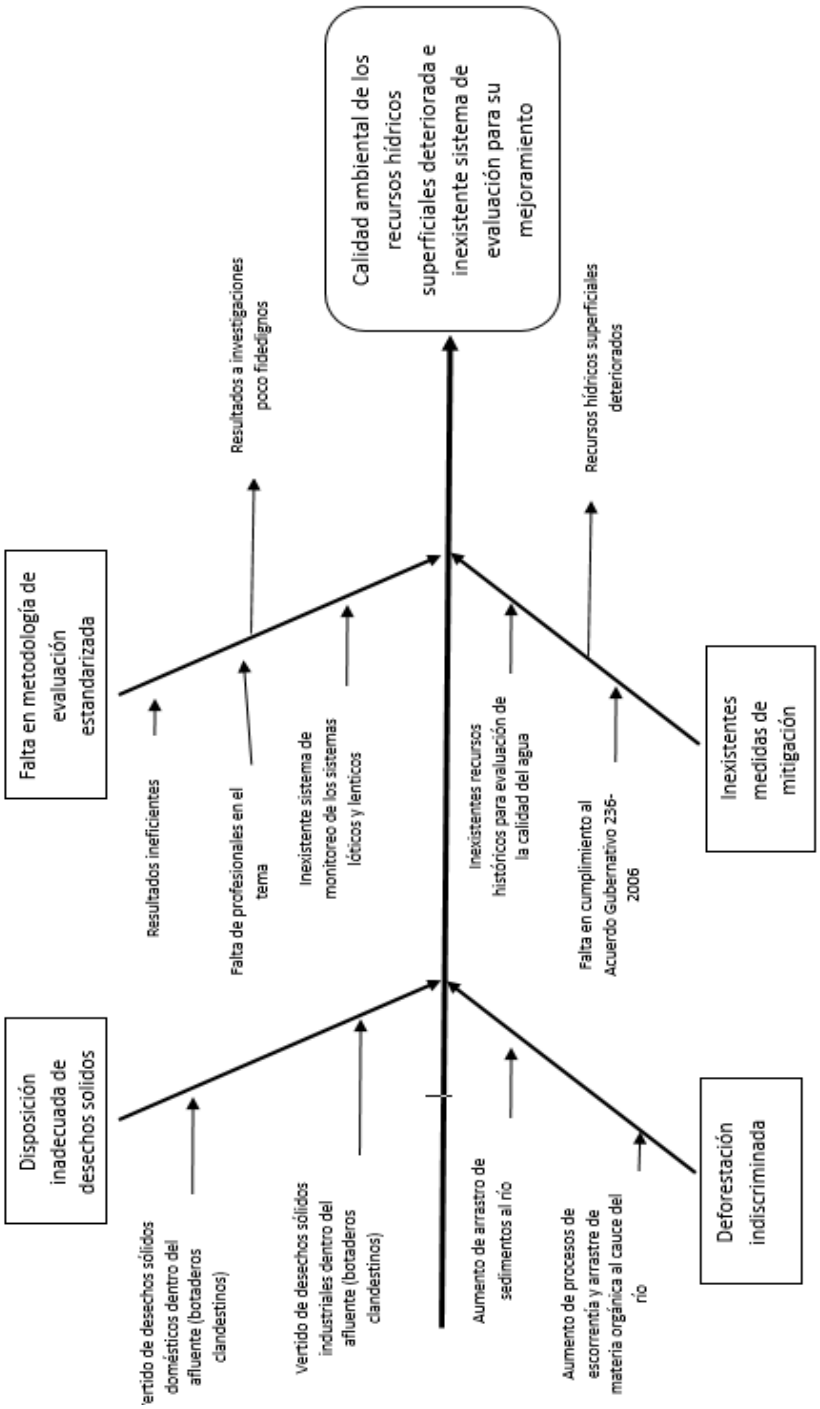
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Árbol de problemas**



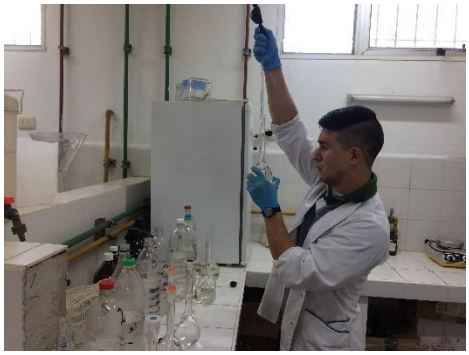
Fuente: elaboración propia.

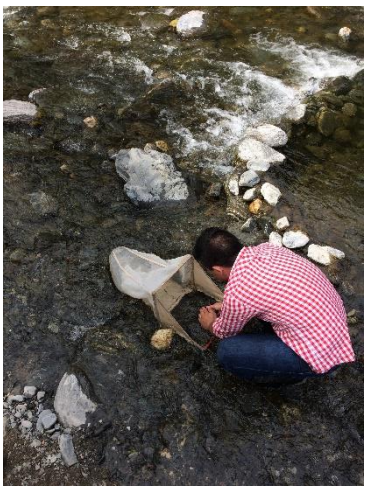
Apéndice 3**.** **Diagrama de Ishikawa**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Fotografías del área de trabajo**





Fuente: elaboración propia.