



Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Ambientales
Ingeniería Ambiental



PECES COMO BIOINDICADORES PARA LA NORMA SECUNDARIA DE CALIDAD AMBIENTAL DEL RÍO BIOBÍO

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniera Ambiental

JAVIERA SOFÍA DONOSO FACUSE

Profesora Guía: Dra. Evelyn Habit Conejeros

Profesor Co – Guía: Dr. Ricardo Figueroa

Profesor Comisión: Dr. Mauricio Aguayo

Concepción, Chile

2024

“PECES COMO BIOINDICADORES PARA LA NORMA SEGUNDARIA DE CALIDAD AMBIENTAL DEL RÍO BIOBÍO”

Profesor Guía: Dra. Evelyn Habit Conejeros

Profesor Co-Guía: Dr. Ricardo Figueroa Jara

Profesor Comisión: Dr. Mauricio Aguayo Arias



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, abril 2024

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	VII
RESUMEN	VIII
1. Introducción	1
1.1. Norma Secundaria de Calidad Ambiental	1
1.2. Río Biobío	2
1.3. Norma Secundaria de Calidad Ambiental del río Biobío.....	3
1.4. Bioindicadores	8
1.5. Bioindicadores en la NSCA	9
2. Pregunta de Investigación.....	10
3. Objetivos	10
3.1. Objetivo General.....	10
3.2. Objetivos Específicos	10
4. Metodología.....	11
4.1. Área de Estudio	11
4.2. Peces característicos por área de vigilancia	12
4.3. Análisis de los índices de diversidad por área de vigilancia	12
4.4. Análisis de variables de calidad del agua y su relación con los ensambles de peces	13
4.5. Propuestas de las especies de peces como bioindicadores	15
5. Resultados	16
5.1. Peces característicos por área de vigilancia	16
5.2. Parámetros comunitarios	27
5.3. Relación presencia y abundancia con las variables normadas de la calidad del agua del río Biobío	31
5.4. Propuesta de especies de peces bioindicadores de calidad del agua para la NSCA del río Biobío	48
6. Discusión	49
7. Conclusión	52
8. Referencias.....	53
9. Anexo	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Orden cronológico del proceso de la NSCA-BB	3
Figura 2. Estaciones del programa de monitoreo del río Biobío.....	7
Figura 3. Base de datos de peces por área de vigilancia de la NSCA del río Biobío.....	11
Figura 4. Tramos por áreas de vigilancia de la NSCA en base a los datos de peces del río Biobío..	14
Figura 5. Distribución de variables de calidad ambiental en áreas de vigilancia según su similitud por sus especies en un nMDS	23
Figura 6. Distribución de peces por áreas de vigilancia del río Biobío según su similitud por sus especies en un nMDS	24
Figura 7. Distribución de las áreas de vigilancia de los ríos afluentes según su similitud por sus especies en un nMDS	25
Figura 8. Promedio del número de individuos con respecto a la riqueza específica, por área de vigilancia de la NSCA entre los años 2006, 2013, 2016-2019	28
Figura 9. Promedio de la Riqueza de Margalef con respecto a la Equidad de Pielou, por área de vigilancia de la NSCA entre los años 2006, 2013, 2016-2019	29
Figura 10. Promedio del índice de Shannon-Wiener con respecto al índice de Simpson, por área de vigilancia de la NSCA entre los años 2006, 2013, 2016-2019	30
Figura 11. Análisis de Escalamiento Multidimensional No Paramétrico (nMDS) de los parámetros de calidad del agua, por área de vigilancia	32
Figura 12. Análisis de Escalamiento Multidimensional No Paramétrico (nMDS) de los ensambles de peces por área de vigilancia.....	33
Figura 13. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) que muestra las variables de calidad del agua que afectan a los ensambles de peces por área de vigilancia	34
Figura 14. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) de la especie de pez introducido <i>Oncorhynchus mykiss</i> (Om), caracterizado por variables ambientales por área de vigilancia.	36
Figura 15. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) que muestra las variables de calidad del agua que afectan a la estructura de los ensambles de peces por área de vigilancia, sin el compuesto fisicoquímico aluminio total.....	37
Figura 16. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) de la especie de pez introducido <i>Oncorhynchus mykiss</i> (Om), caracterizado por variables ambientales sin aluminio total, por área de vigilancia.	39
Figura 17. Análisis de Escalamiento Multidimensional No Paramétrico (nMDS) de las variables de calidad del agua por área de vigilancia, sin LA-10.....	40
Figura 18. Análisis de Escalamiento Multidimensional No Paramétrico (nMDS) de los ensamble de peces por área de vigilancia sin LA-10	41
Figura 19. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) que muestra las variables de calidad del agua que afectan a la estructura de ensambles de peces por área de vigilancia, sin el área de vigilancia LA-10	41
Figura 20. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) de ensambles de peces nativos <i>P. irwini</i> y <i>T. areolatus</i> , caracterizado por variables de calidad del agua por área de vigilancia.....	43
Figura 21. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) de ensambles de peces nativos <i>G. maculatus</i> y <i>P. trucha</i> , caracterizado por variables de calidad del agua por área de vigilancia.....	44
Figura 22. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) de ensambles de peces nativos, <i>B. maldonadoi</i> y <i>B. microlepidotus</i> , caracterizado por variables de calidad del agua por área de vigilancia	45
Figura 23. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) de ensambles de peces introducidos <i>O. mykiss</i> y <i>S. trutta</i> , caracterizados por variables de calidad del agua por área de vigilancia.....	46
Figura 24. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) de ensamble de especie de peces introducidos, <i>G. holbrooki</i> , caracterizada por variables de calidad del agua por área de vigilancia	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Niveles de variables de Calidad Ambiental por área de vigilancia en la cuenca del río Biobío (D.S N°9/2015). El color azul corresponde a excelente calidad del agua, para la conservación de las comunidades acuáticas, el color verde calidad del agua aceptable, apta para la protección y conservación de las comunidades acuática y el color amarillo buena calidad del agua, para el desarrollo de la acuicultura. 4	4
Tabla 2. Clases de calidad del agua propuesta por el MMA para diversas variables, asociada a la protección y conservación de las comunidades acuáticas. 5	5
Tabla 3. Descripción de las 14 estaciones de monitoreo de la NSCA-BB (D.S. 9/2015), con sus respectivos códigos de identificación y correspondencia con el PMBB..... 5	5
Tabla 4. Antecedentes de presencia y ausencia de especies nativas e introducidas a lo largo del cauce principal del río Biobío, incluyendo los lagos de cabecera (Icalma y Galletué). X presencia de especies 1989-1991, X roja especie descrita en 1989-1991 y no está presente actualmente, X verde especie nativa y no fue descrita en 1989-1991 y se encuentra actualmente, X amarilla especie introducida no descrita 1989-1991 y actualmente se encuentra. 9	9
Tabla 5. Listado de especies nativas e introducidas del río Biobío, su nombre común y la identificación de su presencia/ausencia (x), distribuidas en las 13 áreas de vigilancia integradas en la NSCA. 22	22
Tabla 6. Análisis de porcentaje de similitud (SIMPER) de la abundancia promedio (Av. Abund.) y su contribución porcentual en el curso principal del río Biobío y sus principales afluentes. 26	26
Tabla 7. Análisis de abundancia relativa, por especies dentro del río Biobío y sus afluentes..... 27	27
Tabla 8. Promedio por área de vigilancia de los índices de diversidad. 28	28
Tabla 9. Análisis de PERMANOVA de las especies de los índices de diversidad y su matriz de abundancia 30	30
Tabla 10. Comparación pareada de PERMANOVA. 31	31
Tabla 11. Análisis de significancia del Modelo Lineal Basado en la Distancia (DistLM) con todas las áreas de vigilancia, para determinar la proporción de similitud por un test marginal, observando sus diferencias dentro de un grupo (Pseudo-F), su valor de significancia (P) y la proporción que representa en el análisis (Prop.). 35	35
Tabla 12. Análisis de significancia del Modelo Lineal Basado en la Distancia (DistLM) con todas las áreas de vigilancia, sin la variable de calidad del agua aluminio total, para determinar la proporción de similitud por un test marginal, observando sus diferencias dentro de un grupo (Pseudo-F), su valor de significancia (P) y la proporción que representa en el análisis (Prop.). 38	38
Tabla 13. Análisis de significancia del Modelo Lineal Basado en la Distancia (DistLM) para seis áreas de vigilancia (sin LA-10), determinado con la proporción de similitud por un test marginal, observando sus diferencias dentro de un grupo (Pseudo-F), su valor de significancia (P) y la proporción que representa en el análisis (Prop.)..... 42	42

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mi familia, por el apoyo incondicional que me brindaron día a día en este difícil proceso de mi tesis, sin ellos no lo habría logrado. En especial a mis padres Jacqueline y Raúl, ya que han estado presentes toda mi vida, impulsándome a ser cada día mejor, entregándome valores y enseñanzas de vida, siempre queriendo lo mejor para mí y nunca soltarme cuando más los necesité. A mi hermana Alicia, que me acompañó desde que comencé esta travesía de estudiar Ingeniería, que a pesar de tener diferencias, siempre pero siempre estaba ahí, con sus consejos, sus críticas constructivas y animándome a ser mejor cada día de mi vida y nunca rendirme.

A mis amigas de la vida Javi, Carito, Flo y Cata, las cuales estuvieron en todo mi proceso, cada una de ellas apoyándome de diferente manera, con su compañía, una palabra de apoyo o tan solo escuchándome, a pesar de la distancia kilométrica con la Javi. A mis amigas que formé en la carrera Gabi y Ceci, gracias por tenerme fe, nunca dejar que tirarse la toalla, apoyándonos entre las 3 en este proceso y por siempre levantarme cuando pensé que no había un fin. Y no puedo dejar de mencionar a mis amigas que formé en mi deporte favorito Crossfit, Carla y Karito, quienes llegaron en el término de mi proceso de la habilitación, conociéndome con mis cambios de humor y pese a todo fueron un apoyo fundamental, conteniéndome, acompañándome o tan solo tomando una tacita de té para relajarme, gracias por hacerme sentir que si se podía lograr y por estar aunque mis ánimos eran muy fluctuantes.

También, quiero agradecer a mi profesor co-guía, Ricardo Figueroa, por estar, brindarme apoyo, tenerme mucha paciencia y siempre tener una buena disposición en enseñarme y encaminarme en todo este proceso.

Por último, al cuerpo docente y administrativo de la Facultad de Ciencias Ambientales, porque no llegué desde primer año a la carrera y aun así me acogieron con mucho cariño.

RESUMEN

Chile posee cuatro ríos con Normas Secundarias de Calidad Ambiental (NSCA), entre ellos se encuentra el río Biobío (D9/ 2015), la cual establece valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de sustancias, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la protección o la conservación del medio ambiente. Además, la NSCA indica que se deben realizar dos monitoreos de bioindicadores al año, para determinar la calidad del agua, la cual no especifica cuales son los bioindicadores que debiesen estudiarse. Al respecto, la cuenca del río posee la mayor riqueza de especies nativas de peces en Chile, registrándose 18 especies nativas y 5 introducidas. Por lo cual se plantea si ¿Existen peces nativos o introducidos como bioindicadores de calidad del agua para la NSCA?

Para ello se consideró 51 estaciones de muestreo de peces, distribuidas en 13 áreas de vigilancia en los ríos, seis están en el cauce principal del río Biobío (BI-10 a BI-60) y siete en sus principales afluentes. Los afluentes son el río Laja que se divide en tres áreas de vigilancia LA-10, LA-20, LA-30, río Vergara (VE-10), río Duqueco (DU-10), río Malleco (MA-10) y río Renaico (RE-10), caracterizando la estructura comunitaria de peces por área de vigilancia mediante análisis multivariados, y se establecieron correlaciones entre los ensambles de peces y variables de calidad del agua.

Las especies nativas que se encuentran con frecuencia de ocurrencia *Percilia irwini* y *Trichomycterus areolatus* y dentro de la categoría de especies introducidas *Oncorhynchus mykiss* y *Gambusia holbrooki*.

Se clasificaron por ensambles de peces nativos *P. irwini*, *T. areolatus*, *Galaxias maculatus*, *Percichthys trucha*, *Bullockia maldonadoi* y *Basilichthys microlepidotus*, las cuales se fueron consistentes con bajas temperaturas, alta oxigenación y abundante distribución en las áreas de vigilancia como BI-20, BI-30 y BI-40. No obstante, también se encontraron introducidos *Salmo trutta*, *O. mykiss* las cuales determinaban una buena calidad, ya que se encuentran en aguas de bajas temperaturas del agua encontrándose en BI-30, BI-40 y finalmente *G. holbrooki* mayormente en el río Laja, LA-20 y LA.30, determinando una mala calidad del agua

Se propone peces nativos o introducidos como bioindicadores de calidad ambiental y así complementar la NSCA, de este modo se indica que se debe mantener la calidad del agua para mantener las poblaciones de las especies *P. irwini* y *T. areolatus*. Al igual que realizar muestreos estacionales para identificar si las especies nativas como *P. trucha* y *B. microlepidotus*, siguen estando presentes en las áreas de vigilancia BI-20, BI-30, BI-40. Considerar la abundancia de *O. mykiss* y *S. trutta*, como buenos indicadores de calidad del agua, mientras que la presencia de las especies *C. carpio* y *G. holbrooki*, son indicadoras de mala calidad del agua para las áreas de vigilancia BI-20, BI-30, BI-40, DU-10, LA-20.

1. Introducción

1.1. Norma Secundaria de Calidad Ambiental

En Chile, el proceso de regulación ambiental se sustenta en las Bases Generales del Medio Ambiente (Ley N°19.300/1994, modificada por la Ley N°20.417/2020), la cual establece distintos instrumentos de Gestión Ambiental. Dentro de estos instrumentos se destacan las Normas de Calidad Ambiental, las cuales establecen condiciones para proteger la salud de la población y el medio ambiente (SNIFA, 2024). Existen dos tipos de Normas de Calidad Ambiental: primarias y secundarias. Las normas de calidad primarias tienen como objetivo proteger la salud de la población humana, mientras que las normas de calidad secundaria tienen por objetivo proteger o conservar el medio ambiente o la naturaleza, siendo de carácter local (Ministerio de Medio Ambiente, 2015).

La Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA) establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la protección o la conservación del medio ambiente, o la preservación de la naturaleza (Ley N°19.300/1994). En este sentido, la NSCA está diseñada para proteger la calidad de los ecosistemas y asegurar su capacidad de sustentar vida, conservando su biodiversidad y los servicios ambientales que proveen (Ley N°19.300, DS 38/2012 art 3).

En este contexto, ha surgido interés en la implementación de las NSCA en diversos ríos chilenos, debido principalmente a la contaminación y degradación ambiental que presentan estos ecosistemas (Figueroa et al., 2020). La carencia de regulaciones eficaces de contaminantes provenientes de diversas fuentes, tales como las actividades industriales, agrícolas y urbanas ha exacerbado la degradación de los ecosistemas fluviales (Ministerio de Medio Ambiente, 2020).

Dado lo anterior, la implementación de la NSCA en algunos ríos ha contribuido a establecer límites claros para proteger la calidad del agua y preservar los ecosistemas acuáticos (Rivera et al., 2019).

Actualmente los sistemas en Chile que son regulados por la NSCA son los ríos Serrano (DS N°75/2010), lago Llanquihue (DS N°122/2010), lago Villarrica (DS N°19/2013), río Maipo (DS N°53/2014), río Biobío (DS N°9/2015) y recientemente río Aconcagua (DS N°41/2023). Al respecto se destaca la cuenca del río Biobío, por su diversidad y riqueza de especies acuáticas presentes en estos ecosistemas, así como también las presiones ambientales que ha enfrentado debido al desarrollo industrial y urbano en la cuenca (Ministerio del Medio Ambiente, 2020, D.S N°38/2012 art. 3).

1.2. Río Biobío

La cuenca del río Biobío es una de las cuencas de mayor superficie de Chile, con 24.264 km² y se extiende entre los 36° y 39° Latitud Sur (Figuroa et al., 2020). Su curso principal, el río Biobío nace en los lagos Galletué e Icalma en la región de la Araucanía y desemboca en el mar en la región del Biobío. Estos lagos se clasifican como oligotróficos, lo que indica una buena calidad del agua (Valdovinos & Parra, 2006).

Recorre aproximadamente 380 kilómetros hasta desembocar en el Océano Pacífico. Es el segundo río más largo de Chile después del río Loa y posee la mayor riqueza de especies nativas de peces en Chile. Se registran 18 especies nativas, y en el mismo ambiente se encuentran 5 introducidas. (Habit et al., 2020).

La cuenca del río Biobío posee quince subcuencas menores, siendo siete de ellas los principales afluentes a lo largo del cauce; los ríos Duqueco, Bureo, Laja y Vergara, este último alimentado por los ríos Renaico, Malleco y Rehue (Valdovinos & Parra, 2006).

Las aguas del río Biobío tienen una gran cantidad de usos a lo largo de todo su cauce, de entre los cuales se encuentran actividades forestales, industriales, agrícolas, ganaderas, generación hidroeléctrica, extracción de áridos, acuicultura, uso recreacional y suministro de agua para el consumo humano (Ministerio de Agricultura, 2017).

La cuenca del río Biobío se divide en tres grandes zonas: alta, media y baja. La parte alta del río Biobío se identifica por ser de régimen pluvio-nival, la cual se extiende desde el nacimiento del río hasta antes de la confluencia del río Lirquén en Quilaco (CADE IDEPE, 2004). En esta parte de la cuenca se encuentran las tres grandes centrales hidroeléctricas de embalse en el cauce: Ralco, Pangue y Angostura (Figuroa et al., 2020).

La parte media de la cuenca del río Biobío se caracteriza por un régimen pluvial y se extiende desde el río Lirquén hasta el río Vergara en Negrete (CADE IDEPE, 2004). En esta zona, se observa una disminución significativa de la vegetación natural y un notable aumento en las plantaciones forestales y áreas destinadas a la agricultura (Figuroa et al., 2020). Los ríos Bureo, Mulchén, Lirquén y Duqueco son los principales afluentes que contribuyen a esa área de la cuenca (Dirección General de Aguas, 2014).

Se ha evidenciado cambio de uso de suelo en las cercanías de estos afluentes, con una marcada expansión de las actividades industriales, forestales y agrícolas. Según Aguayo & Féliz (2020), se ha registrado un aumento de 122 mil hectáreas en plantaciones exóticas, principalmente de *Pinus Radiata* y *Eucalyptus* sp. Asimismo, se ha observado una pérdida neta de 135 mil hectáreas en el sector agropecuario, atribuida principalmente a la conservación de terrenos para forestaciones.

De acuerdo con Figuroa et al. (2020), la mayor fuente de contaminación proviene de la industria forestal, de celulosa y papel, ubicadas en la cuenca baja desde Negrete hasta la

desembocadura, donde se encuentran tres grandes plantas de celulosa, CMPC Pacífico, CMPC Santa Fe, CMPC Laja y también se incluye a Papeles Biobío. Esta contaminación ha tenido un impacto significativo en el río y su biota acuática. A pesar de los impactos industriales, la cuenca del río Biobío se destaca como un hotspot de biodiversidad en Chile (Ulloa, 2017). Tal como se indicará, la mayor diversidad de especies ícticas del país, sin embargo, algunas se encuentran con problemas en su estado de conservación, siete se encuentran en estado Vulnerable y seis en Peligro (Habit et al., 2020), debido a las diversas actividades antrópicas que se ejercen en el río Biobío (Habit et al., 2020).

1.3. Norma Secundaria de Calidad Ambiental del río Biobío

La NSCA del río Biobío, tiene como objetivo de resguardar, preservar o recuperar la calidad de las aguas continentales superficiales, de tal modo proteger y conservar las comunidades acuáticas y los ecosistemas fluviales (Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2004).

La información para la normativa fue proporcionada por el Programa de Monitoreo de Río Biobío (PMBB) entregado por el Centro EULA-Chile, con una investigación desde 1994 a la fecha (Figuroa et al., 2020). Dicho programa realiza tres monitoreos anuales, los cuales reflejan escenarios extremos del caudal en la cuenca, invierno por las precipitaciones, primavera por el deshielo y verano por el bajo caudal (Figuroa et al., 2020).

En la Figura 1 se visualiza el proceso en una línea del tiempo desde que se creó el proyecto EULA en 1990 y las fases que se hicieron para poder llegar a obtener una NSCA del río Biobío en el año 2015.

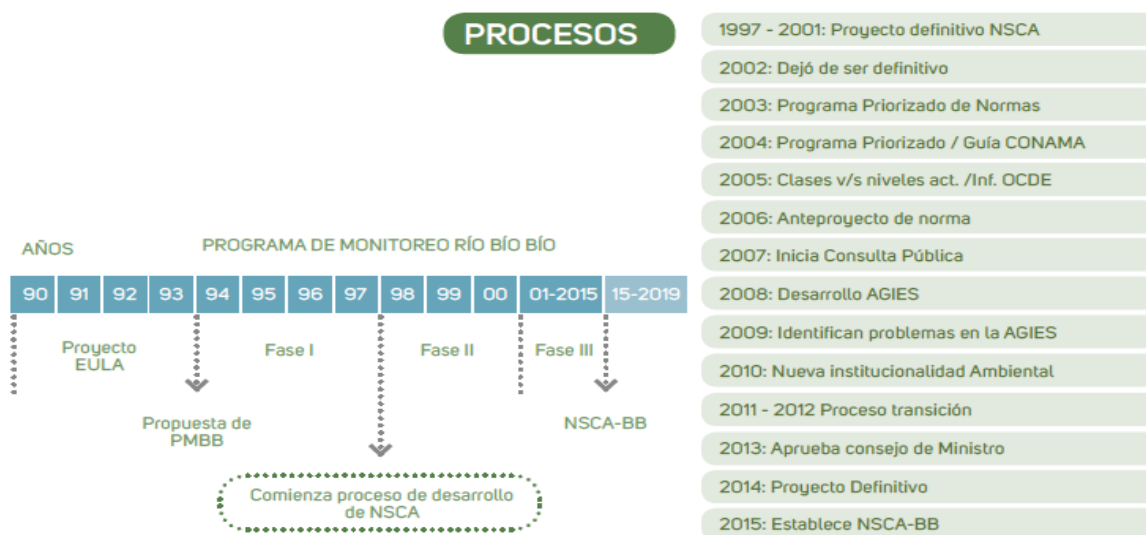


Figura 1 Orden cronológico del proceso de la NSCA-BB (Fuente: Figuroa *et al.*, 2020).

El D.S N°9/2015 del Ministerio del Medio Ambiente, establece catorce áreas de vigilancia, seis pertenecen al cauce del río Biobío y ocho a los afluentes. Cada área de vigilancia analiza diecinueve variables de calidad ambiental, y de esta manera poder determinar cuáles exceden la norma. Al momento en que se detecta una o más variables que exceden la normativa durante dos años consecutivos, se presenta un plan acción de descontaminación.

En la Tabla 1 se muestra el desarrollo propuesto por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) de los niveles de calidad ambiental por áreas de vigilancia, y en la Tabla 2 se identifican los colores que representan la calidad del agua.

Tabla 1. Niveles de variables de Calidad Ambiental por área de vigilancia en la cuenca del río Biobío (D.S N°9/2015). El color azul corresponde a excelente calidad del agua, para la conservación de las comunidades acuáticas, el color verde calidad del agua aceptable, apta para la protección y conservación de las comunidades acuática y el color amarillo buena calidad del agua, para el desarrollo de la acuicultura.

Variable	Unidad	BI-10	BI-20	BI-30	BI-40	BI-50	BI-60	BU-10	DU-10	LA-10	LA-20	LA-30	MA-10	RE-10	VE-10
Aluminio Total	mg/l	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Amonio(N-NH ₄)	mg N/l	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03
Comp. Org. Halog. (AOX)	mg/l	0,002	0,01	0,03	0,03	0,02	0,03	0,01	0,02	0,002	0,006	0,01	0,002	0,002	0,03
Cloruro	mg/l	3	7	7	8	8	-	4	4	3	3	3	4	5	6
Colif. Fecales	NMP/100ml	50	50	500	500	1000	1000	1000	1000	50	50	500	50	50	500
Conductividad	µS/cm	80	90	150	150	150	-	80	120	80	95	150	80	60	80
DBO ₅	mg/l	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
DQO	mg/l	5	5	8	8	5	7	9	6	3	3	8	6	7	10
Fósforo Total	mg/l	0,03	0,02	0,04	0,05	0,05	0,07	0,05	0,05	0,02	0,02	0,1	0,03	0,02	0,06
Hierro Total	mg/l	0,3	0,3	0,3	0,5	0,7	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4
Índice Fenol	mg/l	0,003	0,004	0,005	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,002	0,003	0,003	0,002	0,002	0,004
Nitrato(N-NO ₃)	mg N/l	0,03	0,03	0,15	0,15	0,15	0,2	0,2	0,2	0,04	0,03	0,15	0,04	0,03	0,2
Nitrito(N-NO ₂)	mg N/l	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,01	0,006	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,01
Nitrógeno total	mg/l	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,6	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,4
Ortofosfato(PO ₄)	mg/l	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,1	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,05
Oxígeno Disuelto	mg/l	10	10	9	9	8,7	8,7	9	9	9	8,7	8,7	10	9	9
pH		6,5-8,5							6,5-8,5						
Sól. Susp. totales	mg/l	8	4	7	8	9	8	10	5	2	2	5	5	5	6
Sulfatos (SO ₄)	mg/l	5	6	6	14	14	-	5	5	7	6	6	5	5	10

Fuente: Figueroa *et al.*, 2020

Tabla 2. Clases de calidad del agua propuesta por el MMA para diversas variables, asociada a la protección y conservación de las comunidades acuáticas.

Variable	Unidad	Clase 1 Excelente	Clase 2 Buena	Clase 3 Regular	Clase 4 Mala	Clase 5 Muy Mala
Aluminio Total	mg/L	0,09	0,72	1,17	1,62	>1,62
Amonio	mg N/L	0,02	0,03	0,06	0,09	>0,09
AOX	mg/L	0,002	0,006	0,03	0,05	>0,05
Cloruro	mg/L	2	7	54	100	>100
Colif. Fecales	NMP/100ml	5	50	1000	10.000	>10.000
Conductividad	µS/cm	60	80	150	220	>220
DBO ₅	mg/L	1	2	5	8	>8
DQO	mg/L	3	10	15	20	>20
Fenoles Totales	mg/L	0,002	0,004	0,007	0,01	>0,01
Fósforo Total	mg/L	0,02	0,03	0,1	0,2	>0,2
Hierro Total	mg/L	0,15	0,74	1,1	1,47	>1,47
Nitrato	mg N/L	0,02	0,04	0,2	0,4	>0,4
Nitrito	mg N/L	0,002	0,003	0,01	0,02	>0,02
Nitrógeno Total	mg/L	0,1	0,2	0,6	1	>1
Ortofosfato	mg P/L	0,01	0,02	0,11	0,2	>0,2
Oxígeno Disuelto	mg/L	≥10	≥9	≥7	≥5	<5
pH	-	6,5 - 8	6,5 - 8,5	6,3 - 8,7	6 - 9	<6, >9
Sól. Susp.Totales	mg/L	2	15	35	55	>55
Sulfato	mg/L	4	6	53	100	>100

Fuente: Figueroa *et al.*, 2020

Todas las variables de Calidad Ambiental que se presentan en la Tabla 1 tienen una calidad desde, excelente a regular en la totalidad del río Biobío (áreas de vigilancia BI-10, B-20, BI-30, BI-40, BI-50 y BI-60), así como en los afluentes Bureo (BU-10), Duqueco (Du-10), Laja (LA-10, LA-20 y LA-30), Malleco (MA-10), Renaico (RE-10) y Vergara (VE-10). En la Tabla 3 se establece el comienzo y término de cada una de las catorce áreas de vigilancia.

Tabla 3. Descripción de las 14 estaciones de monitoreo de la NSCA-BB (D.S. 9/2015), con sus respectivos códigos de identificación y correspondencia con el PMBB.

Cauce	PMBB	Área Vigilancia NSCABB	Límites Área de Vigilancia	Huso	Coordenadas UTM puntos de monitoreo	
					N	E
Biobío	-	BI-10	Desde: Naciente río Biobío Hasta: Aguas arriba río Llanquén (Ralco)	19 S	5.769.543	298.730
	BB0 BB1	BI-20	Desde: Aguas arriba río Llanquén (Ralco) Hasta: Rucalhue	19 S	5.822.183	244.243
	BB3 BB4	BI-30	Desde: Rucalhue Hasta: Aguas arriba confluencia río Vergara	18 S	5.848.113	707.512
	BB7 BB8	BI-40	Desde: Aguas arriba confluencia río Vergara Hasta: Aguas arriba confluencia río Gomero	18 S	5.880.313	694.059
	BB11	BI-50	Desde: Aguas arriba confluencia río Gomero Hasta: Puente Mecano	18 S	5.921.073	672.162
	BB13	BI-60	Desde: Puente Mecano Hasta: Desembocadura boca Norte	18 S	5.924.211	664.711
Bureo	BU2	BU-10	Desde: Naciente río Bureo Hasta: Aguas arriba confluencia río Biobío	18 S	5.836.215	722.438
Duqueco	DU1	DU-10	Desde: Naciente río Duqueco Hasta: Río Duqueco 12 km aguas arriba confluencia río Biobío	18 S	5.841.612	737.499
Laja	LA1	LA-10	Desde: Naciente río Laja Hasta: Bajo descarga central Antuco	19 S	5.867.717	265.989
		LA-20	Desde: Bajo descarga central Antuco Hasta: Aguas arriba confluencia río Caliboro	18 S	5.878.331	727.761
	LA2	LA-30	Desde: Aguas arriba confluencia río Caliboro Hasta: Puente Laja (Aguas arriba confluencia Río Biobío)	18 S	5.872.895	702058
Malleco	-	MA-10	Desde: Naciente río Malleco Hasta: Angol	18 S	5.815.814	703.168
Renaico	-	RE-10	Desde: Naciente río Renaico Hasta: Aguas arriba confluencia río Vergara	18 S	5.828.674	708.597
Vergara	VE2	VE-10	Desde: Naciente río Rehue Hasta: Aguas arriba confluencia río Biobío	18 S	5.847.707	706.500

Fuente: Informe de Resultados Campaña 75, 2019.

1.4. Bioindicadores

Los bioindicadores desempeñan un papel crucial al proporcionar mediciones que expliquen la calidad del medio ambiente y los escenarios presentes en el ecosistema (Environment Agency, 2008). Se definen como organismos o comunidades que ofrecen información sobre la calidad del agua y su entorno, permitiendo obtener una visión de la salud ambiental. Estos organismos tienen la capacidad de detectar tanto cambios a largo plazo, como eventos repentinos a corto plazo, lo que les permite identificar variaciones significativas en ríos en respuesta a alteraciones ambientales (Li et al., 2010).

Es importante mencionar que no hay bioindicadores específicos para cada proceso industrial o tipo de contaminación, ni tampoco universales que puedan aplicarse de una manera estandarizada en todas partes. Esto se debe a que los organismos suelen tener una distribución limitada y sus tolerancias a un determinado contaminante pueden variar entre las diferentes especies (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Argentina, 2020).

Se han destacado como buenos bioindicadores de ensamble de peces y macroinvertebrados para evaluar la calidad del agua de los ecosistemas acuáticos (Fierro et al., 2017). Los peces son bioindicadores aptos, por su capacidad para acumular sustancias tóxicas y su sensibilidad a bajas concentraciones de agentes mutagénicos (Minissi et al., 1996; Gustavino et al., 2001). Además, los peces de agua dulce, al tener una mayor concentración de sangre en comparación con los de agua salada, son especialmente útiles para fines de monitoreo (Al-Sabti & Metcalfe, 1995). La calidad del agua puede medirse no tan solo con la presencia o ausencia de determinadas especies o ensambles de peces, sino, también con su abundancia en un área determinada (Fierro et al., 2017).

La utilización de bioindicadores en distintos ámbitos internacionales como en Colombia y Argentina, ha demostrado su eficacia en la evaluación de la calidad del agua y la detección temprana de contaminantes. En Colombia, el seguimiento del comportamiento de peces ha permitido obtener aproximaciones más precisas sobre la calidad de agua, ya que brindan información de los cambios del curso del agua y el estado morfológico que se encuentra. También permiten realizar estudios ecotoxicológicos por su tamaño que son adecuados para realizar procedimientos analíticos en relación a la contaminación en el ambiente y afectaciones a la salud humana. (García et al., 2017). Por otro lado, en Argentina, se han realizado estudios enfocados en peces como bioindicadores, los cuales han revelado los altos niveles de metales pesados en los cuerpos de agua (Romano, 1999). Estos hallazgos confirman la utilidad de los peces como herramientas para evaluar la presencia de contaminantes y ofrecer un análisis detallado del estado de la calidad del agua, lo que podría mejorar la implementación de medidas para mitigar la contaminación en los cuerpos de agua (Romano, 1999).

1.5. Bioindicadores en la NSCA

La NSCA, especifica que se deben realizar monitoreos de bioindicadores para determinar la calidad del agua, pero no indica que comunidades se deben usar, por lo cual, se analizó la presencia y ausencia de especies de peces nativos e introducidos (Tabla 4) a lo largo del río Biobío, con la finalidad de identificar patrones de distribución y su correlación con las variables de calidad de agua. El estudio se realiza entre los años 1989-1991, 2002-2003 y 2016-2018.

Tabla 4. Antecedentes de presencia y ausencia de especies nativas e introducidas a lo largo del cauce principal del río Biobío, incluyendo los lagos de cabecera (Icalma y Galletué). X presencia de especies 1989-1991, X roja especie descrita en 1989-1991 y no está presente actualmente, X verde especie nativa y no fue descrita en 1989-1991 y se encuentra actualmente, X amarilla especie introducida no descrita 1989-1991 y actualmente se encuentra.

Especie		Sector Biobío Alto			Sector Biobío Medio			Sector Biobío Bajo			Presencia sitios antes / #sitios actuales
Nombre específico	Nombre común	Lago Icalma	Lago Galletué	Callaqui	Santa Bárbara	Negrete	Nacimiento	Santa Juana	Hualqui	Puente Nuevo	
Nativas											
<i>G. australis</i>	Lamprea de bolsa					x	x	x			3/0
<i>Ch. galusdae</i>	Pocha					x	x	x	x		3/4
<i>N. inermis</i>	Bagre grande					x		x			2/0
<i>B. maldonadoi</i>	Bagrecito			x	x	x	x			x	4/4
<i>T. areolatus</i>	Bagre	x	x	x	x	x	x	x	x	x	8/8
<i>D. nahuelbutaensis</i>	Tollo		x	x	x	x					3/3
<i>G. maculatus</i>	Puye			x	x	x	x	x	x	x	4/7
<i>A. zebra</i>	Peladilla	x	x								2/2
<i>B. microlepidotus</i>	Pejerrey	x	x	x	x	x	x	x	x	x	8/5
<i>O. mauleanum</i>	Cauque				x	x	x				2/2
<i>P. trucha</i>	Perca trucha	x	x	x	x	x	x	x	x		8/7
<i>P. melanops</i>	Perca negra						x	x			2/0
<i>P. irwini</i>	Carmelita de Concepción	x	x	x	x	x	x	x	x	x	8/9
Introducidas											
<i>O. mykiss</i>	Trucha arcoíris	x	x	x	x	x	x				5/6
<i>S. trutta</i>	Trucha café	x	x	x	x		x				5/4
<i>C. carpio</i>	Carpa común					x	x	x		x	3/4
<i>G. holbrooki</i>	Gambusia					x	x	x	x	x	2/5
# sp nativas / # sp introducidas	Muestreos 1989 - 1991	4/2	6/2	4/2	5/2	8/1	11/4	4/0	6/1	5/2	
	Muestreos 2002 - 2003	4/2	6/2	5/2	6/2	9/3	11/4	5/0	sin inf.	8/3	
	Muestreos 2016 - 2018	4/2	4/2	6/2	4/2	9/2	9/3	5/2	sin inf.	4/3	

Fuente: Habit *et al.*, 2020

Las especies nativas que están presentes en todo el río Biobío son, *Percilia irwini* (Carmelita de Concepción), *Trichomycterus areolatus* (Bagre) y *Percichthys trucha* (Perca Trucha). Por otro lado, las especies introducidas como *Cyprinus carpio* (Carpa común), *Oncorhynchus mykiss* (Trucha arcoíris), *Salmo trutta* (Trucha café) y *Gambusia holbrooki* (Gambusia) (Habit *et al.*, 2020).

Se ha demostrado que los bioindicadores son efectivos para evaluar la salud de los ecosistemas acuáticos debido a su fácil identificación (Karr *et al.*, 1986). Sin embargo, es necesario disponer de información sobre el sistema a estudiar, especialmente a largo plazo, como ocurre en el caso del río Biobío. Por lo tanto, se propone realizar un estudio en la cuenca del Biobío para determinar qué especies de peces, ya sean nativas o introducidas, representan mejor la calidad de las aguas, utilizando datos recopilados a través del programa de monitoreo a largo plazo.

2. Pregunta de Investigación

Conociendo los distintos compuestos que afectan la calidad del agua del río Biobío, según la NSCA por área de vigilancia y dado que la NSCA no especifica cuales son los bioindicadores que deberían estudiarse, esta investigación aborda la pregunta ¿Existen especies nativas o introducidas de peces que pueden ser utilizadas como bioindicadores de calidad del agua para las diferentes áreas de vigilancia de la NSCA del río Biobío?

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Determinar especies de peces nativos o introducidos que sean bioindicadores de calidad del agua para las distintas áreas de vigilancia de la NSCA de la cuenca del río Biobío.

3.2. Objetivos Específicos

- i. Analizar las especies de peces característicos en cada una de las áreas de vigilancia de la NSCA del río Biobío.
- ii. Establecer la relación de la presencia y abundancia de las distintas especies de peces con las variables normadas de la calidad del agua del río Biobío.
- iii. Realizar una propuesta de especies de peces como bioindicadores de calidad del agua para la NSCA del río Biobío.

4. Metodología

4.1. Área de Estudio

La cuenca del río Biobío cuenta con seis estaciones de muestreo en el cauce principal del río Biobío (BI-10 a BI-60) y ocho en sus principales afluentes. Los afluentes son el río Laja que se divide en tres áreas de vigilancia LA-10, LA-20, LA-30, río Vergara (VE-10), río Bureo (BU-10), río Duqueco (DU-10), río Malleco (MA-10) y río Renaico (RE-10). La NSCA comprende 14 áreas de vigilancia. La Figura 3 representa 13 áreas de vigilancia que contienen información proporcionada por el Laboratorio de Ecología y Conservación de Peces de Agua Dulce (LEC-PAD) del Centro EULA de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad de Concepción. Cabe destacar que el área de vigilancia correspondiente al río Bureo no tiene información. A partir de los datos proporcionados por LEC-PAD, se identificaron 79 puntos de monitoreo de especies de peces.

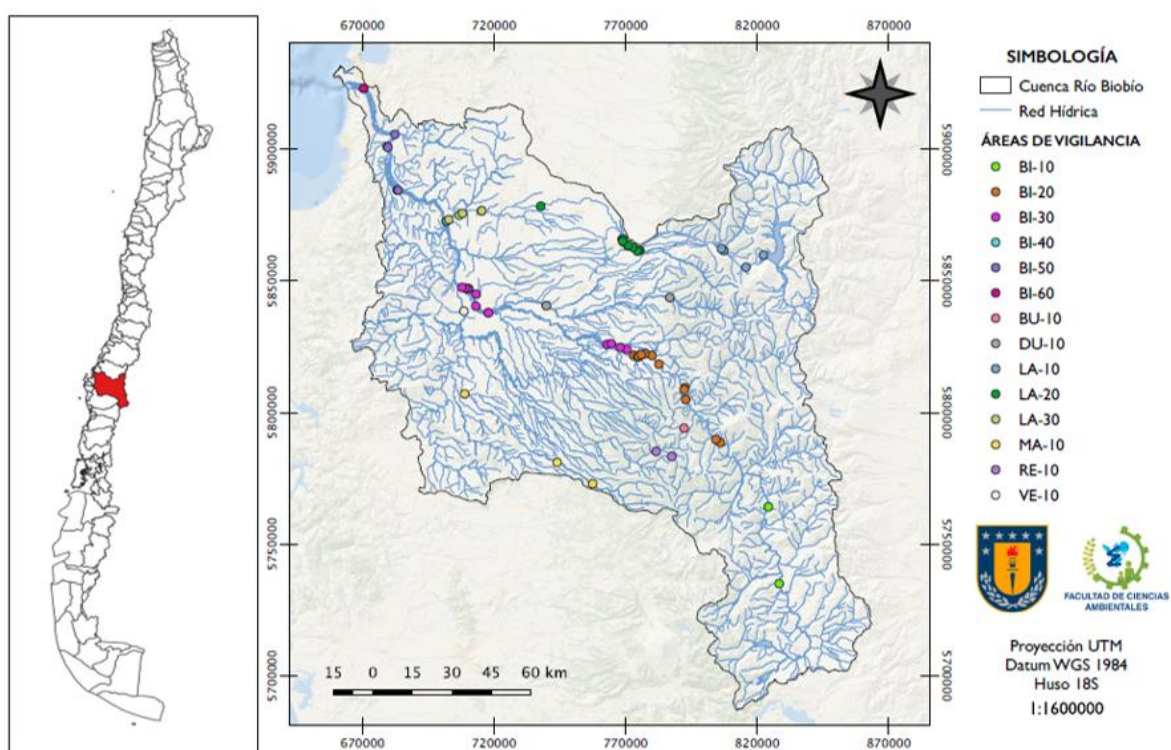


Figura 3. Base de datos de peces por área de vigilancia de la NSCA del río Biobío

Fuente: Elaboración propia

4.2. Peces característicos por área de vigilancia

Se realizó una depuración a la base de datos del LEC-PAD, donde se filtró cada sitio de monitoreo incluyendo los años 2006, 2013, 2016-2019. Obteniendo 51 estaciones de muestreos de peces, distribuidas en las 13 áreas de vigilancia.

Se realizaron análisis multivariados no paramétricos en PRIMER v.6 para comparar la similitud en la estructura y composición de los ensambles de peces entre las áreas de vigilancia. En primera instancia, se construyó una matriz de abundancia de peces por áreas de vigilancia, a la cual como tratamiento previo se efectuó una transformación a raíz cuadrada, con el objetivo de homogeneizar la incidencia de las especies nativas e introducidas.

A partir de la matriz se realizó un análisis de Escalamiento Multidimensional no métrico (nMDS), para determinar si los ensambles de peces presentaban similitudes en composición y abundancia de especies por área de vigilancia. En este análisis la proximidad entre los puntos en el espacio indica similitudes en términos de la composición comunitaria de las áreas de vigilancia, mientras que la separación entre los puntos sugiere disimilitud (Clarke & Gorley, 2006).

Posteriormente, se realizó un análisis de porcentaje de similitud (SIMPER) con el propósito de determinar la contribución porcentual promedio de las especies de peces por área de vigilancia. Se examinaron las 13 áreas de vigilancia, pero solo fue posible trabajar con seis de ellas, ya que las otras siete áreas de vigilancia solo contaban con un único monitoreo, lo que impedía su comparación automática en el programa. Por lo tanto, se realizó una identificación manual con la base de datos de su abundancia relativa

4.3. Análisis de los índices de diversidad por área de vigilancia

Se analizaron índices de diversidad de Shannon-Weaver (H'), riqueza de Margalef (d), la dominancia de Simpson (λ) y la equidad de Pielou (J'). Estos índices proporcionan información sobre la estructura comunitaria y la distribución de las especies en el espacio de evaluación.

El índice de diversidad H' se utiliza para medir la riqueza y abundancia relativa de especies en un sitio específico. Este índice varía de 0 a 5, donde un valor de 0 indica que solo hay una especie presente en el sitio, y un valor máximo se alcanza cuando todas las especies están representadas por el mismo número de individuos (Magurran, 2004). En otras palabras, cuanto mayor sea el valor de H' , mayor será la diversidad de especies y más equitativa será su distribución en el sitio de monitoreo. Este índice se calculó para cada área de vigilancia en el estudio de la cuenca del río Biobío utilizando el programa PRIMER v.6.,

Del mismo modo λ representa la probabilidad de que dos individuos extraídos al azar de una muestra aleatoria pertenezcan a la misma especie. Este índice varía de 0 a 1, donde 0 indica una diversidad máxima (ninguna dominancia) y 1 indica una dominancia total (una especie domina completamente la muestra). λ es el inverso de la equidad, por lo que cuanto mayor sea su valor, menor será la diversidad de especies en la muestra. La diversidad se puede calcular como $1 - \lambda$.

Posteriormente, d convierte el número de especies presentes en una muestra en un valor que indica la diversidad basada en la distribución numérica de las especies. Los valores de d varían desde 0, cuando solo hay una especie presente en la muestra, hasta valores superiores a 5, que indican una

alta diversidad. En general, valores de d por debajo de 2 sugieren una baja diversidad, mientras que valores por encima de 5 indican una alta diversidad de especies en la muestra (Moreno, 2001).

El índice J' mide la uniformidad o equitatividad en la distribución de individuos entre las especies en una comunidad. Este índice compara la diversidad observada con la diversidad máxima esperada, donde un valor de 1 indica una distribución perfectamente equitativa, es decir, todas las especies tienen la misma abundancia relativa (Reyes & Torres-Florez, 2009). Por otro lado, valores más bajos de J' indican una distribución menos equitativa, con algunas especies siendo mucho más abundantes que otras.

Por último, se realizó un Análisis Multivariado Permutacional de Varianza (PERMANOVA), para evaluar la significancia estadística de las diferencias en la composición de la matriz de abundancia y en los índices de diversidad por área de vigilancia.

4.4. Análisis de variables de calidad del agua y su relación con los ensambles de peces

Para realizar el análisis de variables de calidad del agua con peces, se consideraron siete áreas de vigilancia, ya que coincidieron estacionalmente las variables de calidad ambiental del PMBB con peces entregados por el LEC-PAD. Tres en el cauce principal BI-20, BI-30, BI-40 y cuatro afluentes DU-10, LA-10, LA-20, LA-30, entre los años 2016 al 2019, asociándose la información de composición y abundancia de los ensambles, coincidiendo estacionalmente para establecer correlaciones entre ellos.

Las variables seleccionadas pertenecientes a la NSCA, aluminio total (mg/L), amonio (mg N/L), AOX (compuestos halogenados) (mg/L), coliformes fecales (NMP/100ml), conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), demanda biológica de oxígeno (DBO5) (mg/L), demanda química de oxígeno (DQO) (mg/L), fenoles totales (mg/L), nitrato (mg N/L), nitrógeno total (mg N/L), oxígeno disuelto (mg/L), pH, fósforo total (mg/L), sólidos suspendidos (mg/L) y las variables de calidad del agua del PMBB, temperatura ($^{\circ}\text{C}$), coliformes totales (NMP/100ml).

Para realizar los análisis multivariados no paramétricos, se realizó una transformación en $\log(x+1)$ y \sqrt{x} , a las variables de calidad del agua y peces, respectivamente, para disminuir su pendiente. Adicionalmente a las variables de calidad del agua se les aplicó una normalización para estandarizar las unidades de medida. Para las variables de calidad del agua se obtuvo una matriz basada en distancia euclidiana y para las variables biológicas (especies de peces) se obtuvo una matriz basada en el índice de Bray-Curtis.

A partir de las matrices obtenidas se realizaron dos análisis de nMDS, uno para variables de calidad del agua y otro para los ensambles de peces. Lo anterior con el objetivo de explorar la similitud o disimilitud de los datos en un espacio dimensional reducido, facilitando la interpretación de las relaciones complejas entre las variables por área de vigilancia (Ramírez, 2016).

Posteriormente, se realizó un análisis de redundancia basado en la distancia (dbRDA), para explorar la relación entre las variables de calidad del agua y los ensambles de peces en el Río Biobío y sus afluentes. Este análisis permitió identificar su correlación entre los ensambles de peces y a que variables de calidad del agua se asocian más.

Para luego determinar con Bubble plots (gráficos de burbuja) facilitando la interpretación visual representada por la abundancia de cada especie, donde el tamaño de cada círculo es proporcional a esta representados por área de vigilancia (Clarke & Gorley, 2014).

Finalmente se realizó un Modelo de Distancia Lineal (DistLM), para determinar la significancia de las variables de calidad de agua sobre los ensambles de peces. Se identificó qué variables explican una mayor proporción de la varianza en la estructura comunitaria. Siguiendo el enfoque propuesto por Anderson et al. (2008), las variables predictoras se seleccionaron y ordenaron tanto de manera individual como en conjuntos específicos, basándose en su contribución porcentual a la explicación de la estructura comunitaria.

El mapa representado en la Figura 4 visualiza las siete áreas de vigilancia utilizadas con sus respectivos tramos y donde se sitúan las tres grandes centrales hidroeléctricas y las centrales de paso.

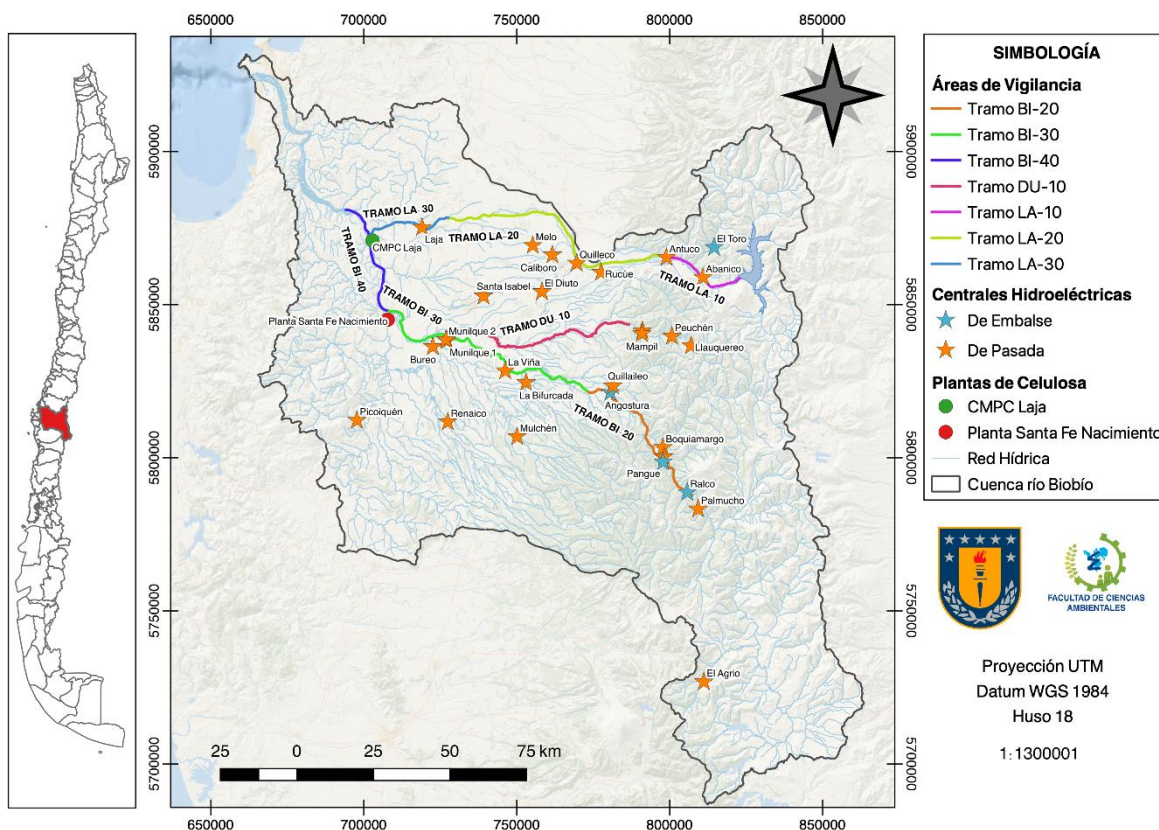


Figura 4. Tramos por áreas de vigilancia de la NSCA en base a los datos de peces del río Biobío

Fuente: Elaboración propia

4.5. Propuestas de las especies de peces como bioindicadores

Para determinar propuestas de especies de peces nativos o introducidos como bioindicadores de calidad ambiental, en primera instancia se analizó la presencia y ausencia en las áreas de vigilancia, de este modo, poder identificar que especies serían viables para considerarlas para biomonitoreos.

Para luego determinar si estas especies son condicionantes a las variables de calidad del agua de la NSCA y en base a eso, establecer criterios por área de vigilancia y por abundancia de cada una de estas especies descritas.

5. Resultados

5.1. Peces característicos por área de vigilancia

En el análisis exploratorio se identificaron 17 especies de peces, 12 nativos y 5 introducidos, determinando su presencia en las 13 áreas de vigilancia de la NSCA, lo cual es observado en la Tabla 5. En ello se reconoció que en todo el curso principal y sus afluentes se encuentran las especies nativas *P. irwini* y *T. areolotus*. También, especies como, *P. trucha*, *Ch. galusdae*, *D. nahuelbutaensis* y *B. microlepidotus*, se distribuyen en gran parte del río Biobío y sus afluentes.

Por otro lado, las especies *P. melanops* y *M. cephalus* solo se encontraron presentes en solo un área de vigilancia, BI-30 y BI-60, respectivamente. Sin dejar de lado, la presencia de especies introducidas como *O. mykiss*, *S. trutta*, con una distribución en gran parte de las áreas de vigilancia. *C. carpio*, y *G. holbrooki* se localizan en la zona media y baja del río Biobío.

Tabla 5. Listado de especies nativas e introducidas del río Biobío, su nombre común y la identificación de su presencia/ausencia (x), distribuidas en las 13 áreas de vigilancia integradas en la NSCA.

		Áreas de vigilancia														
Nombre científico	Nombre común	Especies	BI-10	BI-20	BI-30	BI-40	BI-50	BI-60	DU-10	LA-10	LA-20	LA-30	MA-10	RE-10	VE-10	Presencia sitio de muestreo
Especies nativas																
<i>Percilia irwini</i>	Carmelita de Concepción	Pi	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	13/13
<i>Trichomycterus areolatus</i>	Bagre	Ta	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	13/13
<i>Diplomystes nahuelbutaensis</i>	Tollo	Dn	x	x	x	x			x		x		x	x		8/13
<i>Cheirodon galusdae</i>	Pocha	Chg		x	x	x	x	x		x	x	x				8/13
<i>Percichthys microlepidotus</i>	Pejerrey	Bmi		x	x	x			x	x	x	x			x	8/13
<i>Galaxias maculatus</i>	Puye	Gm		x	x	x		x	x							5/13
<i>Percichthys trucha</i>	Perca Trucha	Pt		x	x	x	x	x	x		x	x	x		x	10/13
<i>Bullockia maldonadoi</i>	Bagrecito	Bma			x	x			x		x				x	5/13
<i>Geotria australis</i>	Lamprea de Bolsa	Ga			x		x					x				3/13
<i>Percichthys melanops</i>	Perca Negra	Pm			x											1/13
<i>Nematogenys inermis</i>	Bagre Grande	Ni					x	x								2/13
<i>Mugil cephalus</i>	Lisa	Mc						x								1/13
Especies introducidas																
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Trucha arcoiris	Om	x	x	x	x		x	x	x	x		x	x		10/13
<i>Salmo trutta</i>	Trucha café	St	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x		10/13
<i>Gambusia holbrooki</i>	Gambusia	Gh			x	x	x	x			x	x	x			7/13
<i>Cyprinus carpio</i>	Carpa Común	Cc			x	x	x				x		x			5/13
<i>Australoheros facetus</i>	Chanchito	Af					x									1/13
Presencia especies			5/17	9/17	14/17	12/17	9/17	9/17	9/17	6/17	11/17	8/17	8/17	5/17	5/15	

Fuente: Elaboración propia con datos entregados por el LEC-PAD.

El nMDS (Figura 5) mostró una alta similitud entre las 13 áreas de vigilancia en base a los ensambles de peces. Se distingue una tendencia de aguas arriba hacia aguas abajo, desde LA-10, con su clara separación con las otras áreas de vigilancia y los tramos BI-10, BI-20, LA-20 y RE-10 con mayo gran similitud.

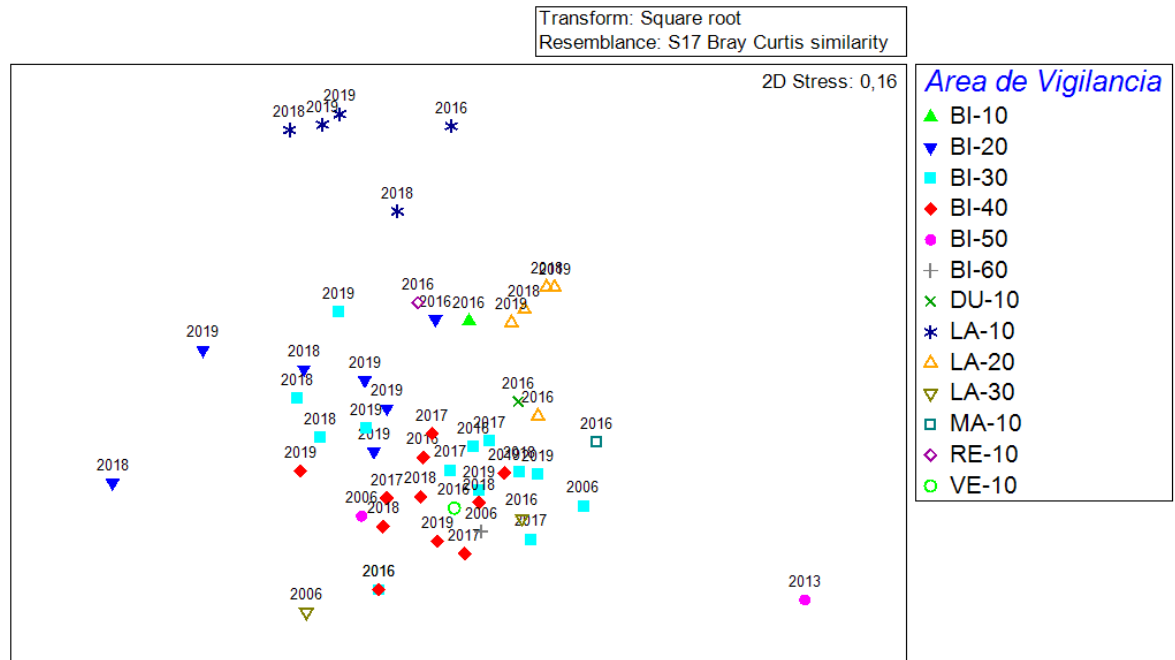


Figura 5. Distribución de variables de calidad ambiental en áreas de vigilancia según su similitud por sus especies en un nMDS

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos por el LEC-PAD.

En el nMDS correspondientes a las áreas de vigilancia del río Biobío (Figura 6), se aprecia que los ensambles de peces se muestran bastante similares, hay una tendencia entre las correspondientes a aguas arriba y hacia aguas abajo del río Biobío. Analizando la figura, se identifica que los ensambles de peces son semejantes en los tramos BI-20 y BI-30, del mismo modo, BI-30 con BI-40 tienden a tener una mayor similitud. Existen dos monitoreos de peces que se separan del resto, los cuales corresponden a BI-20 en los años 2018 y 2019, ambos con estacionalidad de verano, donde en el año 2018 se representó una frecuencia de ocurrencia con *B. microlepidotus* y *P. trucha* y en el 2019 *P. trucha* y *Bullockia maldonadoi*. BI-50 se separa del resto de las áreas de vigilancia. Debido a su frecuencia de ocurrencia de *G. holbrooki*.

Se puede apreciar en la Figura 7, que los afluentes se diferencian unos con otros, indicando un contraste en su composición y abundancia de ensambles de peces. En ello se puede observar que el río Laja, en su composición se diferencia entre áreas de vigilancia, ya que se encuentran bastante separados (LA-10 de LA-20 y LA-30).

Por otro lado, MA-10 se parece a VE-10, lo cual tiene sentido, ya que, analizando la base de datos, comparten prácticamente todas las especies de peces, ya que no se encuentran estos dos ríos cercanos uno con el otro.

La cercana similitud entre LA-30 y VE-10, ambos del 2016, se debe a que ambos monitoreos fueron realizados en la estacionalidad de verano, con similitud en las especies de peces encontrados como *B. microlepidotus* y *G. holbrooki*, donde ésta última se identificó con una frecuencia de ocurrencia en LA-30.

Las áreas de vigilancia que solo se encontraban con un solo monitoreo se ven algo parecidos, a pesar de que no se encuentran cercanas sus localizaciones entre ellas (MA-10, RE-10, VE-10, DU-10).

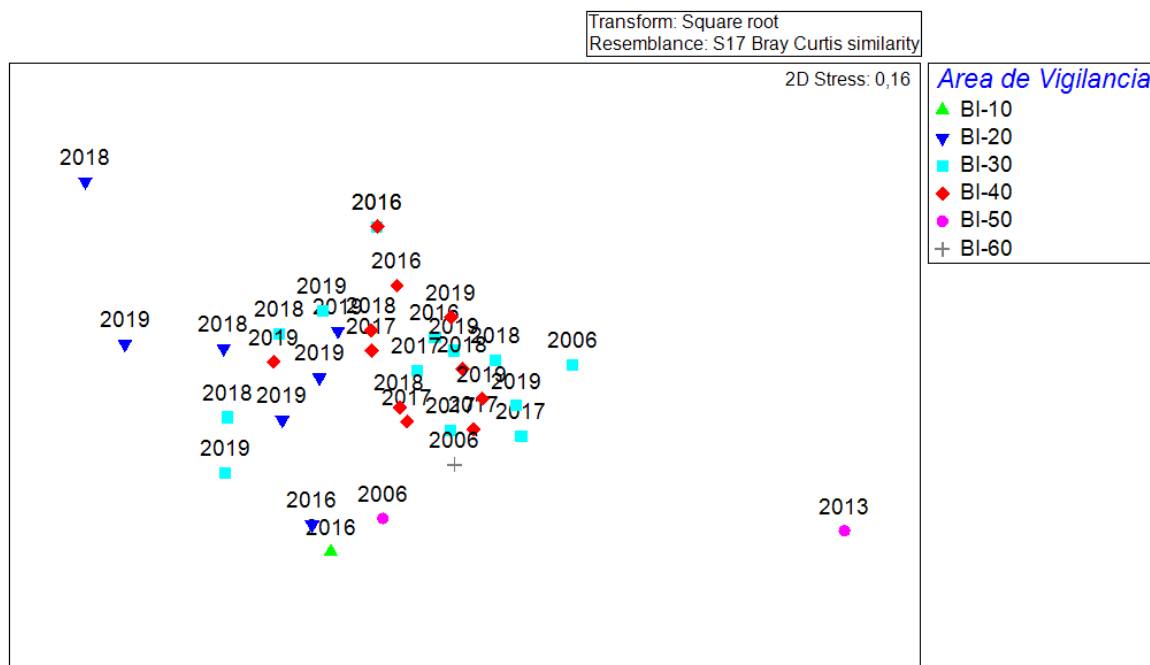


Figura 6. Distribución de peces por áreas de vigilancia del río Biobío según su similitud por sus especies en un nMDS

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos por el LEC-PAD.

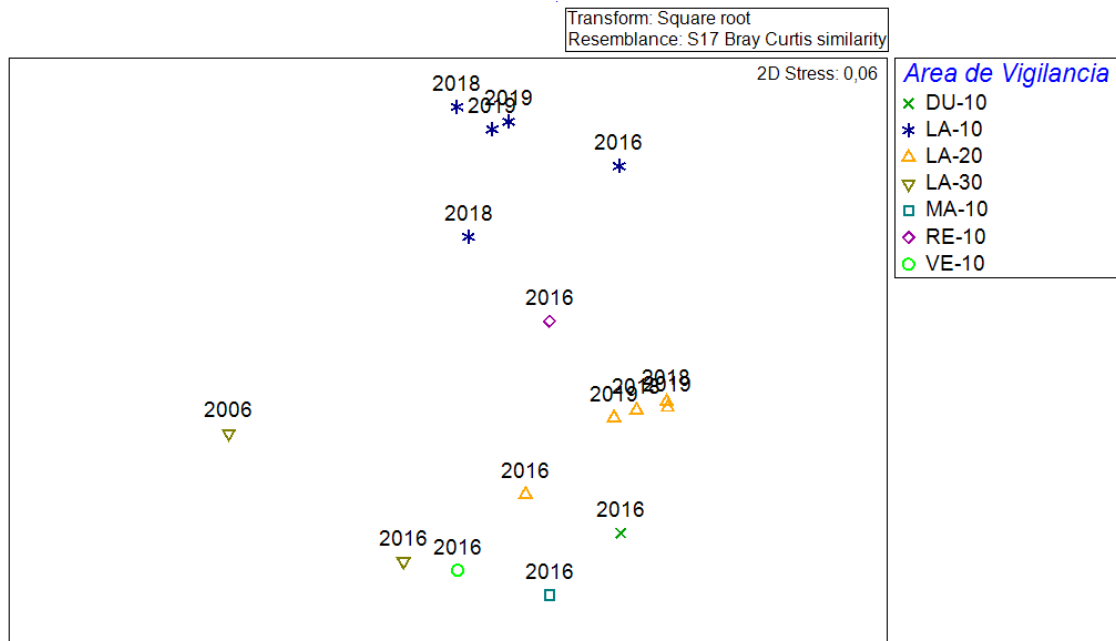


Figura 7. Distribución de las áreas de vigilancia de los ríos afluentes según su similitud por sus especies en un nMDS

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos por el LEC-PAD.

Abundancia de especies por área de vigilancia

Con el análisis SIMPER (Tabla 6) se observa que por área de vigilancia existe gran presencia de las especies nativas *P. irwini* y *T. areolatus* he introducidas *O. mykiss*, en todas las áreas de vigilancia.

Ahora bien, la especie que explica el tramo a BI-20 según su contribución es la especie *P. irwini*, sin dejar de lado la presencia de *G. maculatus*, que solo se encuentra en este tramo de el río Biobío. BI-30 y BI-40, se ve representado por especies nativas, lo cual se visualiza que existe una mayor biodiversidad entre Rucalhue y aguas arribas del río Vergara, a diferencia de LA-10, donde este explica la similitud a la especie introducida *O. mykiss*, clasificándose con poca biodiversidad, pero alta su contribución de esta. LA-30, se puede se explica mayormente por contribución de la especie introducida *G. holbrooki*, coexistiendo con las nativas características del sector *T. areolatus* y *B. microlepidotus*.

Se aprecia en la Tabla 7, las áreas de vigilancia que no se les pudo realizar un SIMPER, pero se les determinó su abundancia relativa, donde se confirma la presencia en todas las áreas de vigilancia *T. areolatus* y *B. microlepidotus* y presencia de *G. holbrooki* en el término del río Biobío y en una menor contribución porcentual en MA-10.

Tabla 6. Análisis de porcentaje de similitud (SIMPER) de la abundancia promedio (Av. Abund.) y su contribución porcentual en el curso principal del río Biobío y sus principales afluentes.

Área de Vigilancia	Especie Nativa	Especie Introducida	Abund.prom.	Contribución (%)
BI-20	<i>Percilia irwini</i>		4,74	31,24
	<i>Galaxias maculatus</i>		2,73	18,37
		<i>Oncorhynchus mykiss</i>	2,41	14,15
		<i>Salmo trutta</i>	2,75	12,66
BI-30	<i>Percilia irwini</i>		7,90	38,50
	<i>Percichthys trucha</i>		3,95	12,99
	<i>Trichomycterus areolatus</i>		4,33	9,84
	<i>Basilichthys microlepidotus</i>		2,95	8,15
	<i>Bullockia maldonadoi</i>		3,10	7,27
BI-40	<i>Percilia irwini</i>		7,63	44,50
	<i>Percichthys trucha</i>		3,00	12,93
	<i>Trichomycterus areolatus</i>		2,76	10,86
	<i>Bullockia maldonadoi</i>		2,76	10,75
LA-10		<i>Oncorhynchus mykiss</i>	6,76	71,10
LA-20	<i>Percilia irwini</i>		14,57	35,47
		<i>Oncorhynchus mykiss</i>	8,54	19,21
	<i>Trichomycterus areolatus</i>		6,99	17,06
LA-30		<i>Gambusia holbrooki</i>	5,92	28,91
	<i>Trichomycterus areolatus</i>		3,77	25,49
	<i>Basilichthys microlepidotus</i>		5,47	19,27

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Análisis de abundancia relativa, por especies dentro del río Biobío y sus afluentes.

Área de Vigilancia	Especie Nativa	Especie Introducida	Abundancia Relativa (%)
BI-10	<i>Trichomycterus areolatus</i>		46,50
	<i>Percilia irwini</i>		34,00
BI-50	<i>Percilia irwini</i>		58,33
		<i>Gambusia holbrooki</i>	16,67
BI-60	<i>Percilia irwini</i>		42,28
		<i>Gambusia holbrooki</i>	30,89
DU-10	<i>Percilia irwini</i>		52,09
	<i>Trichomycterus areolatus</i>		22,28
MA-10	<i>Basilichthys microlepidotus</i>		32,68
	<i>Percilia irwini</i>		28,40
		<i>Gambusia holbrooki</i>	16,93
RE-10		<i>Oncorhynchus mykiss</i>	39,82
	<i>Percilia irwini</i>		35,40
VE-10	<i>Trichomycterus areolatus</i>		57,06
	<i>Percilia irwini</i>		31,90

Fuente: Elaboración propia.

5.2. Parámetros comunitarios

En la Anexo 1, se ve representado el número de individuos y la riqueza específica por área de vigilancia, los que se relacionaron con los índices de diversidad. La Tabla 8 resume esta información, mostrando que la mayor riqueza específica se registró en las áreas de vigilancia BI-60, DU-10 y MA-10. Sin embargo, no existió comparación con otros años, (Anexo 1), ya que todas las muestras de DU-10 y MA-10, fueron recolectadas en verano del 2016, sin variación estacional. De igual modo se graficó en las Figuras 9 y 10, una relación entre los índices de diversidad y su promedio por área de vigilancia en la Tabla 8. Y las áreas de vigilancia con menor número de especies se encuentran en BI-20, LA-10 y BI-50. El área de vigilancia con menor riqueza de especies fue LA-10, donde comienza el río Laja hasta la central Antuco.

Tabla 8. Promedio por área de vigilancia de los índices de diversidad.

Área de Vigilancia	S	N	D	J'	H'	λ
BI-10	5	200	0,75	0,76	0,53	0,653
BI-20	6	72	1,39	0,80	0,62	0,69
BI-30	8	203	1,39	0,71	0,62	0,66
BI-40	7	127	1,28	0,65	0,54	0,58
BI-50	5	60	0,88	0,53	0,34	0,42
BI-60	9	123	1,66	0,67	0,64	0,70
DU-10	9	359	1,35	0,59	0,56	0,64
LA-10	3	65	0,488	0,47	0,21	0,26
LA-20	7	446	1,06	0,72	0,62	0,67
LA-30	7	143	1,30	0,82	0,66	0,75
MA-10	9	514	1,28	0,71	0,68	0,76
RE-10	5	113	0,84	0,80	0,56	0,68
VE-10	5	163	0,78	0,64	0,45	0,56

Fuente: Elaboración propia con datos laboratorio LEC-PAD

En la Figura 8, se representa la relación entre la riqueza específica (S) y el número total de individuos (N). Se identificó que la mayor cantidad de individuos se encontró en las áreas de vigilancia LA-20 y MA-10. Estas áreas de vigilancia se encuentran entre la central Antuco y nacimiento del río Malleco hasta Angol respectivamente.

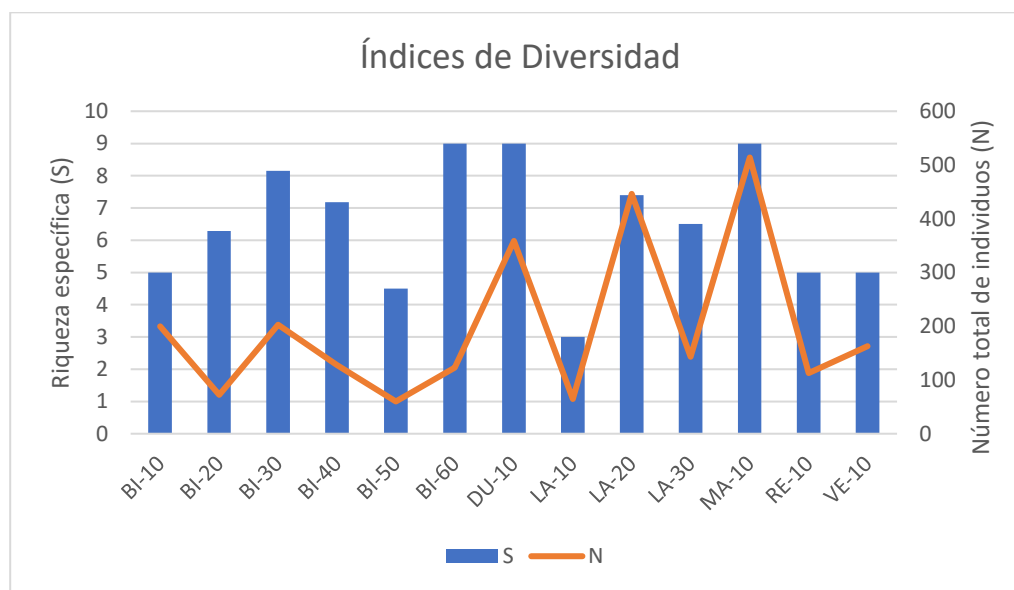


Figura 8. Promedio del número de individuos con respecto a la riqueza específica, por área de vigilancia de la NSCA entre los años 2006, 2013, 2016-2019

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 9 representa la comparación entre el índice de riqueza de Margalef (d) y la equidad de Pielou (J').

Donde se identificó que Margalef su diversidad de especies por área de vigilancia es baja, esto debido a que según Moreno (2001), si se presentan valores menores a 2, se sugiere que existe una baja diversidad de especies, en este caso de peces y los valores representados en la figura, son de 0 a 1,8. Dentro de los resultados más destacables se encuentra el tramo LA-10 con un valor de 0,4, teniendo la más baja biodiversidad, porque está dominada por una sola especie, a diferencia de BI-60, que es el área de vigilancia que más biodiversidad de especies.

Por otro lado, la equidad de Pielou mide se obtuvieron valores entre 0 y 0,9, donde el área de vigilancia que se acerque más a cero es porque contiene en su muestra una especie que destaca más y si es 1, todas las especies son igualmente abundantes. El mismo ejemplo de LA-10, aquí se contempla una equidad de 0,4, ya que existen pocos individuos en ese tramo y hay una mayor abundancia de una especie, la cual se encuentra representada en esa área de vigilancia. Así mismo en BI-20, LA-30 y RE-10, donde su valor está más cercano a 1, siendo 0,8 en los 3 tramos, identificándose que existe una cercanía a una igualdad entre los individuos analizados en cada área de vigilancia.

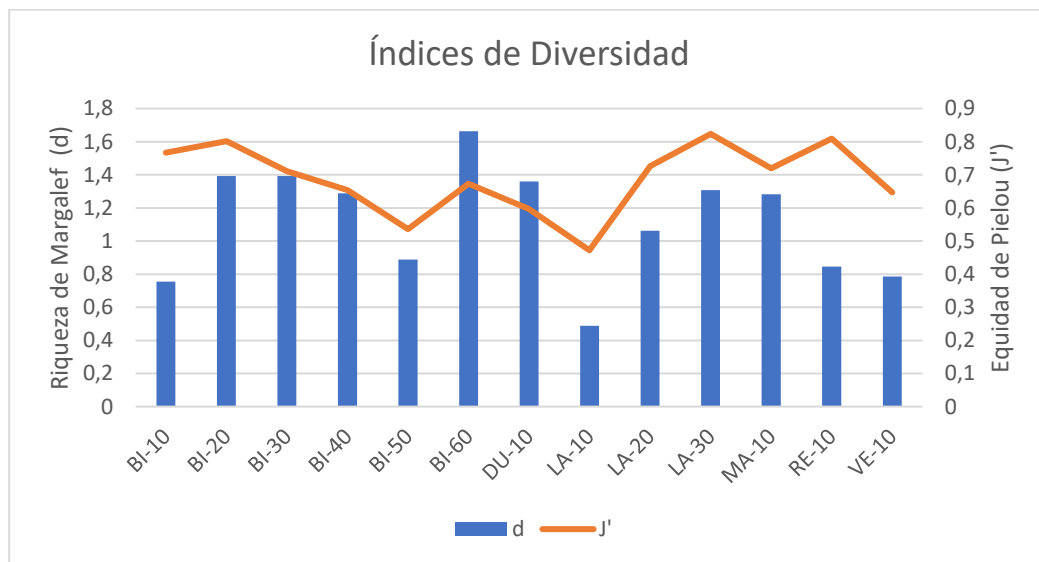


Figura 9. Promedio de la Riqueza de Margalef con respecto a la Equidad de Pielou, por área de vigilancia de la NSCA entre los años 2006, 2013, 2016-2019

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 10, se ven representados, el índice de Shannon-Weaver (H') y dominancia de Simpson (λ). Posee una consistencia entre ambos índices, ya que, con Simpson se explica que los valores varían ser entre 0 y 1, esto caracterizando que, si se acerca a 1, la dominancia de una especie es mayor y si se acerca a 0, existe mayor diversidad. LA-10 se determina con una dominancia de 0,2 lo que indica que se encuentran pocas especies a diferencia de BI-60, LA-30 y MA-10, en donde sus valores son en todas esas áreas de vigilancia es de 0,7. Esto quiere decir que al estar más cercano a 1, hay una especie que indica una dominancia total. Del mismo modo, el índice de Shannon, que es opuesto a Simpson, ya que, si una comunidad tiene baja diversidad, significa que está dominada por una especie, entonces la diversidad es baja.

LA-10, con un índice de Shannon de 0,2 y al ser un valor cercano a 0, tiene una baja biodiversidad y lo domina una especie.

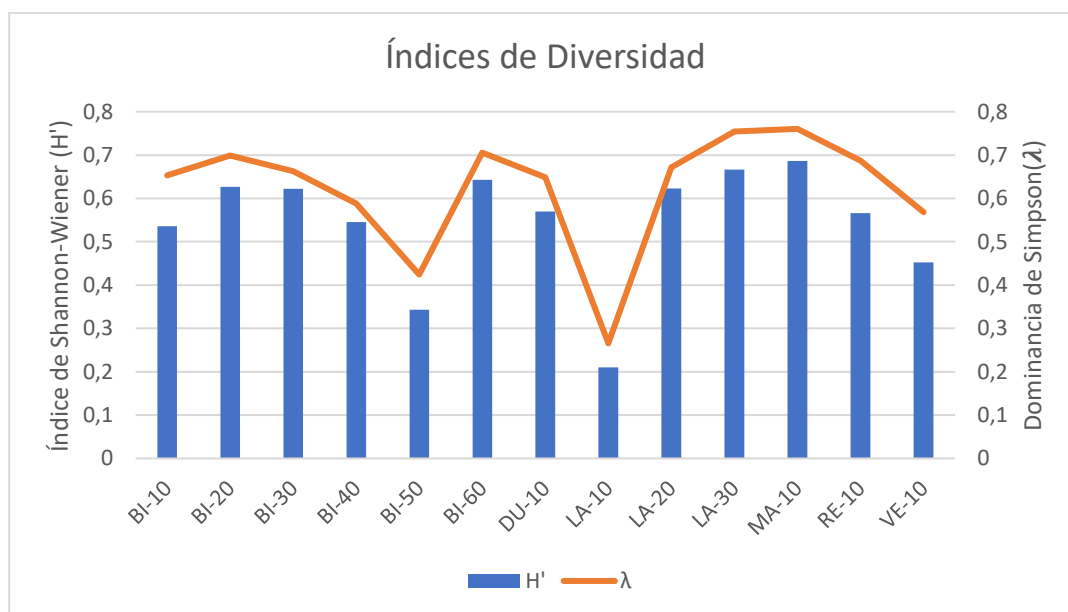


Figura 10. Promedio del índice de Shannon-Wiener con respecto al índice de Simpson, por área de vigilancia de la NSCA entre los años 2006, 2013, 2016-2019

Fuente: Elaboración propia.

Los índices de diversidad representados en la Tabla 8, y la matriz de abundancia de especies de peces, se representaron para analizar si existe diferencia significativa por área de vigilancia (Tabla 9).

Tabla 9. Análisis de PERMANOVA de las especies de los índices de diversidad y su matriz de abundancia

	Fuente	Suma de sus Cuadrados (SS)	Pseudo-F	P(perm)
Índices de Diversidad	Área de Vigilancia	27837	2,6786	0,001
Especies de peces	Área de Vigilancia	49180	3,6851	0,001

Fuente: Elaboración propia en base a datos entregados por el Laboratorio LEC-PAD con el programa PRIMER V6

El análisis, refleja diferencias significativas entre los tramos estudiados ($p < 0,001$), tanto para los índices de diversidad como para las especies que aportan más abundancia. En la Tabla 10, se observan los pares de tramos que se encuentran las diferencias significativas con $p < 0,001$ para cada PERMANOVA.

Se identificó que el río Laja principalmente, en la matriz de abundancia se encuentran diferencias significativas con las áreas de vigilancia de la zona baja y media del río Biobío, al igual que entre la zona alta y media del río Biobío.

A diferencia con los índices de diversidad solo se encontró entre BI-40 y LA-20, lo que demuestra, que solo existe una sola diferencia significativa de entre todas las áreas de vigilancia estudiadas.

Tabla 10. Comparación pareada de PERMANOVA.

Índices de diversidad	Matriz de abundancia
BI-40 y LA-20	BI-20 – BI-40
	BI-20 - LA-20
	BI-30 - LA-10
	BI-30 - LA-20
	BI-40 - LA-10
	BI-40 - LA-20

Fuente: Elaboración propia en base a datos entregados por el Laboratorio LEC-PAD con el programa PRIMER V6.

5.3. Relación presencia y abundancia con las variables normadas de la calidad del agua del río Biobío

Se analizaron las 19 variables de calidad del agua con los ensambles de peces, y realizaron dos nMDS (Figura 11 y 12). Esto debido a la disminución a siete áreas de vigilancia, ya que se disminuyeron para establecer una correlación entre peces y calidad del agua.

En la Figura 11 con las variables de calidad del agua, se visualiza claramente que existe una tendencia desde aguas arriba, hacia aguas abajo. El área de vigilancia que más se parece entre sus monitoreos es BI-20, donde los puntos identificados son más similares en los distintos años, esto demuestra que no ha variado su calidad del agua. BI-30 y BI-40 en gran parte mantienen una alta similitud, ya que tiene una tendencia hacia aguas abajo. Existe una variabilidad en BI-40, esto debido a que son sistemas naturales y tienden a existir cambios constantes.

Por otro lado, la separación de LA-10 en verano del 2018 e invierno del 2019, se determinó que en esos años existieron condiciones anómalas. En invierno se explica por las lluvias y movimiento de áridos, aguas abajo y en verano por el levantamiento o remoción de áridos por maquinaria, por el desarrollo de obras en el puente Tucapel, por ende, los índices de aluminio aumentaron considerablemente, lo que no es representativo, ya que sucedieron por condiciones antrópicas. No obstante LA-20 a simple vista se ve bastante similar. Por ende, la calidad del agua tiene una tendencia desde aguas arriba con las áreas de vigilancia BI-20 y LA-10, como hacia aguas abajo mostrando claramente BI-40, LA-20, LA-30 y DU-10

En la Figura 12, entre BI-20 BI-30 y BI-40, tienden a tener mayor similitud entre sí, pero igual se manifiesta una tendencia nuevamente de aguas arriba hacia aguas abajo. La estructura de ensambles de peces por área de vigilancia entre el río Biobío y los afluentes, indica una diferencia considerable, principalmente en LA-10, ya que tiende a ser distinta su composición de peces a diferencia de las otras áreas de vigilancia, encontrándose aguas arriba del río. Aguas abajo se

encuentra una similitud entre LA-20 y DU-10, esto a pesar de que su localización no es cercana entre las áreas de vigilancia, comparten considerablemente en los monitoreos del año 2016 en las especies *P. irwini*, *T. areolatus* y *D. nahuelbutaensis*. Finalmente, el tramo LA-30 tiende a tener una mayor similitud con el cauce principal en BI-30, mayormente en el año 2017, compartiendo gran cantidad de especies que se encuentran en mayor presencia y contribución en ambas áreas de vigilancia, tales como, *B. microlepidotus* y *G. holbrooki*.

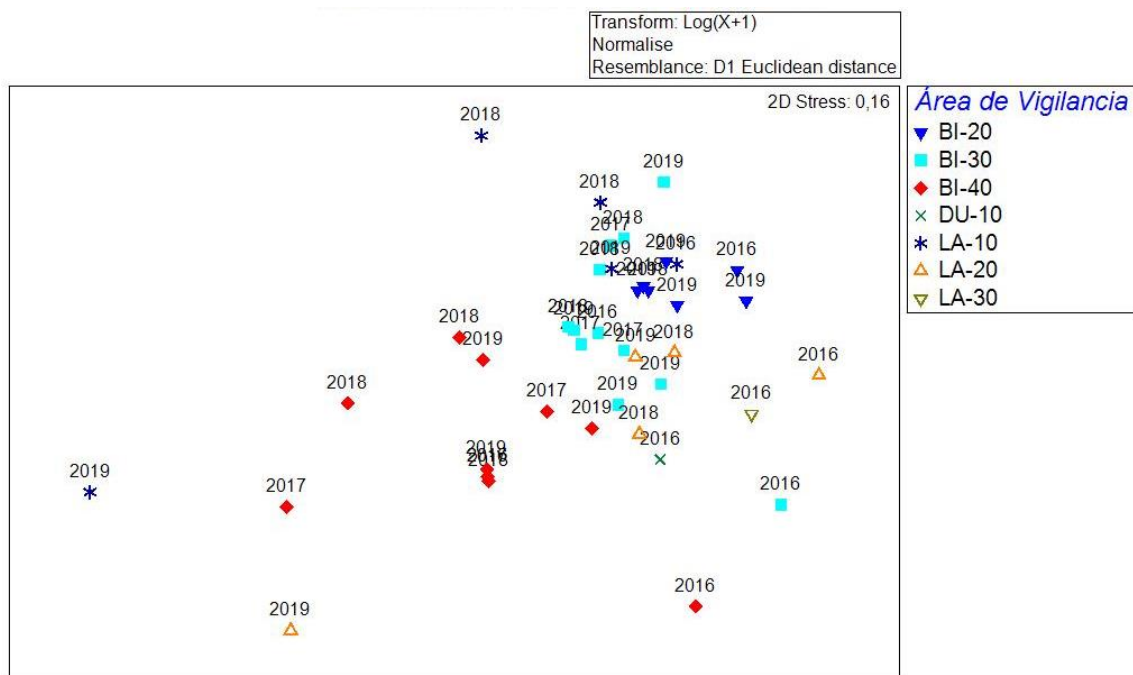


Figura 11. Análisis de Escalamiento Multidimensional No Paramétrico (nMDS) de los parámetros de calidad del agua, por área de vigilancia
Fuente: Elaboración propia.

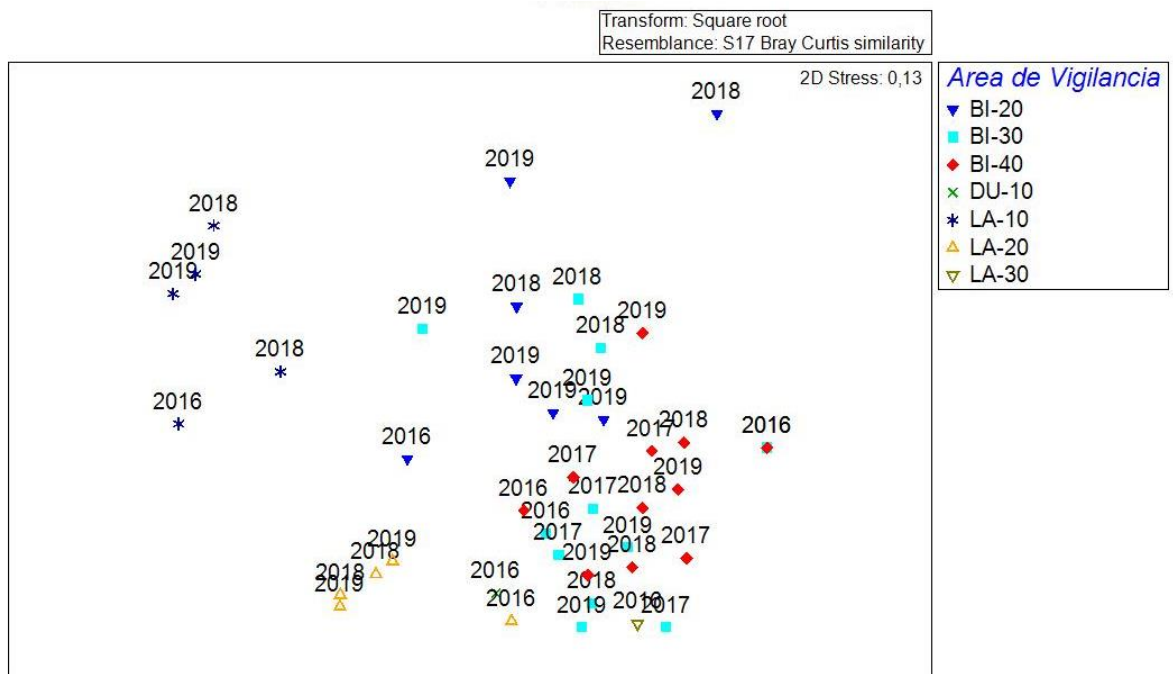


Figura 12. Análisis de Escalamiento Multidimensional No Paramétrico (nMDS) de los ensambles de peces por área de vigilancia
Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, en la Figura 13, se observan los ensambles de peces unido a las variables de calidad del agua. En primera instancia LA-10 se ve asociado con aluminio total, ya que, como se puede identificar, está totalmente separado de las otras variables, demostrando que la estructura comunitaria es diferente.

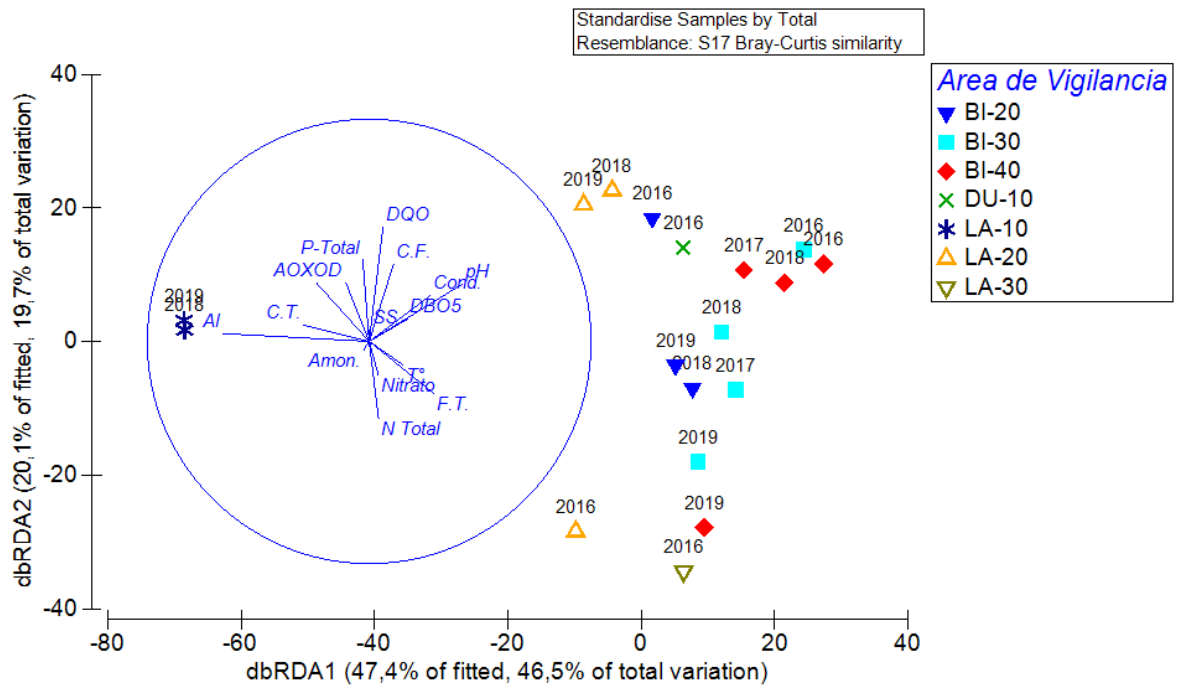


Figura 13. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) que muestra las variables de calidad del agua que afectan a los ensambles de peces por área de vigilancia
Fuente: Elaboración propia

Según la significancia en el DistLM representada en la Tabla 11, donde se determinó la proporción de explicación del total de la varianza, que, aluminio total y pH, explicando un 29,8% y un 24,1% respectivamente. Estas son las variables de calidad del agua que explican el dbRDA (Figura 13) a la estructura comunitaria de los peces, el cual, viene dado por el aluminio total, lo cual es significativo, y en segundo el pH.

Tabla 11. Análisis de significancia del Modelo Lineal Basado en la Distancia (DistLM) con todas las áreas de vigilancia, para determinar la proporción de similitud por un test marginal, observando sus diferencias dentro de un grupo (Pseudo-F), su valor de significancia (P) y la proporción que representa en el análisis (Prop.).

Compuestos	Abreviación	Pseudo-F	P	Prop.
Aluminio Total	Al	6,798	0,004	0,298
Amonio	Amon.	0,415	0,837	0,025
Halógenos	AOX	1,446	0,154	0,082
Coliformes Fecales	C.F.	0,963	0,289	0,056
Coliformes Totales	C.T.	2,758	0,072	0,147
Conductividad	Cond.	1,352	0,238	0,077
Demanda Biológica de Oxígeno	DBO5	0,545	0,735	0,032
Demanda Química de Oxígeno	DQO	1,772	0,129	0,099
Fenoles Totales	F.T.	1,139	0,315	0,066
Nitrato	Nitrato	1,110	0,357	0,064
Nitrógeno Total	N Total	1,495	0,193	0,085
Oxígeno Disuelto	OD	1,797	0,119	0,101
pH	pH	5,084	0,004	0,241
Fósforo Total	P-Total	1,057	0,342	0,061
Sólidos Suspendidos	SS	1,644	0,119	0,093
Temperatura	T°	2,494	0,078	0,134

Fuente: Elaboración propia en base al programa PRIMER V6

Y de este modo, se determinó mediante un Bubble plot (Figura 14) que la especie que se encuentra en mayor abundancia es *O. mykiss*. Esto no quiere decir que las truchas estén relacionadas con aluminio, ya que, como se mencionó anteriormente, existieron condiciones anómalas y por ende, los niveles de aluminio aumentaron en los años que se investigaron.

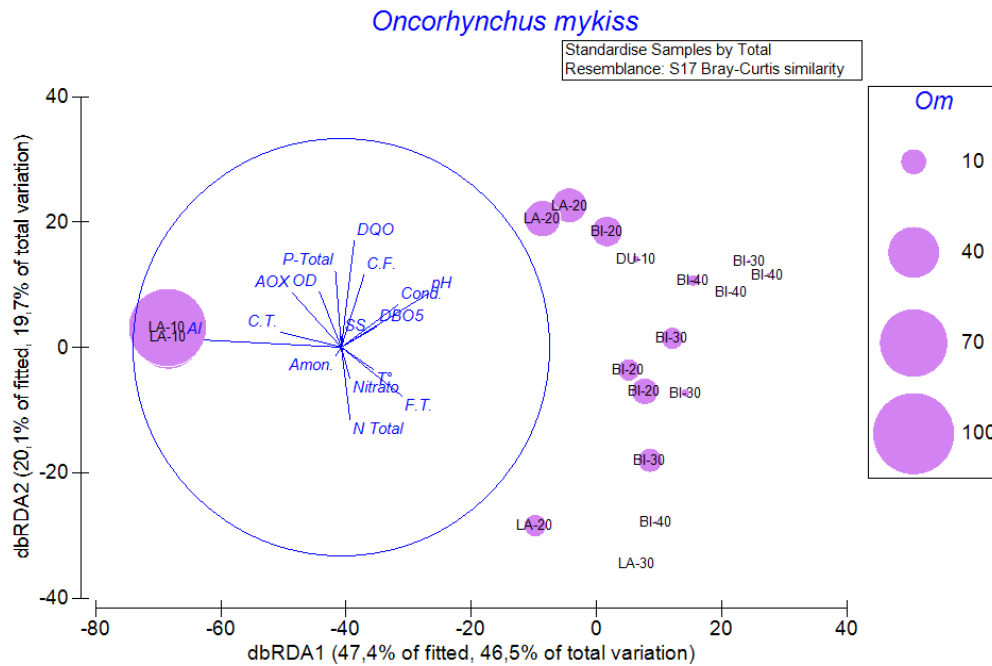


Figura 14. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) de la especie de pez introducido *Oncorhynchus mykiss* (Om), caracterizado por variables ambientales por área de vigilancia.

Fuente: Elaboración propia.

Como ya se demostró en la Figura 13, que el aluminio total era la variable de calidad del agua que explicaba el área de vigilancia LA-10, a pesar de que no son representativas con las truchas, es por eso por lo que se realizó nuevamente el estudio, pero en esta ocasión sin la variable aluminio total y así poder identificar que otras variables se relacionan con LA-10.

En la Figura 15, LA-10, tiene mayor incidencia con coliformes totales, amonio y compuestos halogenados, pero de igual modo, existe una gran diferencia con las otras áreas de vigilancia, esto debido a la alta presencia de *O. mykiss*, indicada en la Figura 16. Por ende, se sigue diferenciando, pero otras variables de calidad del agua toman más peso en este análisis.

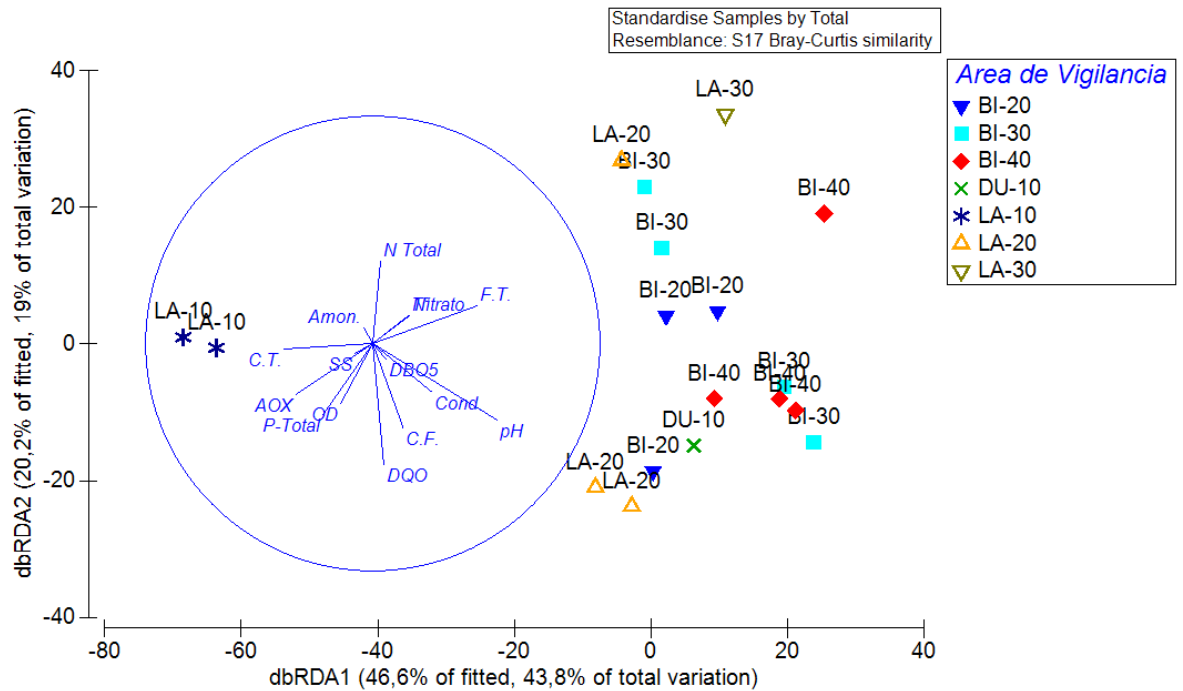


Figura 15. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) que muestra las variables de calidad del agua que afectan a la estructura de los ensambles de peces por área de vigilancia, sin el compuesto fisicoquímico aluminio total

Fuente: Elaboración propia.

En este caso el DistLM (Tabla 12), toma más fuerza el pH con un 24,1% y le sigue los coliformes totales con un 14,7% de explicación sobre la calidad del agua según la estructura comunitaria de los peces. Esto demuestra que no varía tanto el análisis, ni sus porcentajes de explicación, tan solo se eliminó el aluminio total y las demás variables se siguieron comportando de igual manera.

Tabla 12. Análisis de significancia del Modelo Lineal Basado en la Distancia (DistLM) con todas las áreas de vigilancia, sin la variable de calidad del agua aluminio total, para determinar la proporción de similitud por un test marginal, observando sus diferencias dentro de un grupo (Pseudo-F), su valor de significancia (P) y la proporción que representa en el análisis (Prop.).

Compuestos	Abreviación	Pseudo-F	P	Prop.
Amonio	Amon.	0,415	0,860	0,025
Halógenos	AOX	1,446	0,174	0,083
Coliformes Fecales	C.F.	0,963	0,290	0,057
Coliformes Totales	C.T.	2,759	0,076	0,147
Conductividad	Cond.	1,353	0,239	0,078
Demanda Biológica de Oxígeno	DBO5	0,546	0,724	0,033
Demanda Química de Oxígeno	DQO	1,772	0,145	0,100
Fenoles Totales	F.T.	1,140	0,334	0,066
Nitrato	Nitrato	1,110	0,346	0,065
Nitrógeno Total	N Total	1,496	0,193	0,085
Oxígeno Disuelto	OD	1,798	0,101	0,101
pH	pH	5,084	0,005	0,241
Fósforo Total	P-Total	1,057	0,341	0,062
Sólidos Suspendidos	SS	1,644	0,144	0,093
Temperatura	T°	2,495	0,081	0,135

Fuente: Elaboración propia en base al programa PRIMER V6

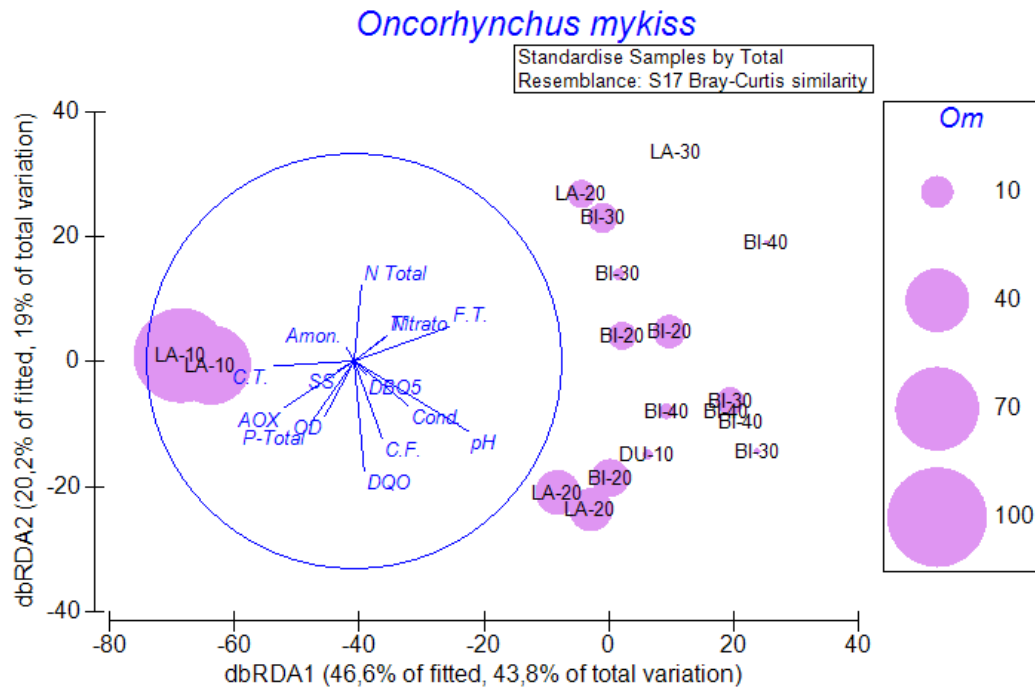


Figura 16. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) de la especie de pez introducido *Oncorhynchus mykiss* (Om), caracterizado por variables ambientales sin aluminio total, por área de vigilancia.

Fuente: Elaboración propia

Ya bien se dijo que el área de vigilancia LA-10 se separaba de las otras. Por ende, para poder visualizar de mejor manera las variables de calidad del agua se realizó nuevamente el estudio, pero sin el área de vigilancia LA-10. Por ende, se trabajó con seis áreas de vigilancia y se desarrolló nuevamente un nMDS de la calidad del agua y de ensamble de peces por separado (Figura 17 y 18) para ver su comportamiento sin esa área de vigilancia y del mismo modo un DistLM (Tabla 13) y un dbRDA (Figura 19), para ver el comportamiento de los ensambles con las variables de calidad del agua.

En la Figura 17, analizando las variables de calidad del agua, se distingue que existe una similitud entre BI-20 y BI-30, a diferencia de la separación con BI-40. Por otro lado, LA-20 tienden a estar los puntos más separados entre sí. Pero en la Figura 18, se demuestra una clara tendencia de aguas arriba a aguas abajo con los ensambles de peces, desde BI-20 con una alta similitud entre sus monitoreos y una similitud entre BI-30 y BI-40. Del mismo modo existe una tendencia con el río Laja, existiendo una separación entre LA-20 aguas arriba y LA-30 aguas abajo cercano a BI-40.

En la Figura 19, se aprecia que las áreas de vigilancia BI-20 y BI-30 predominan más bajas temperaturas, en relación con BI-40 y DU-10. En las áreas de vigilancia BI-40 y DU-10, está asociado a la presencia de DBO5, fósforo total y AOX (compuestos halogenados). Estos compuestos se encuentran directamente relacionados a celulosa y vienen de efluentes industriales de relevancia. Dentro de la zona se encuentran CELPAC, CMPC Santa Fe en Nacimiento y CMPC Laja. Por otro lado, en BI-40, el año 2019, se separa por las especies de peces encontradas, las cuales se distinguió una mayor presencia de *G. holbrooki* y *G. maculatus*. Los ensambles de peces

en LA-20 se relaciona mayormente con el incremento del DQO, en contraste con LA-30, con parámetros como el Nitrito y Nitrógeno total.

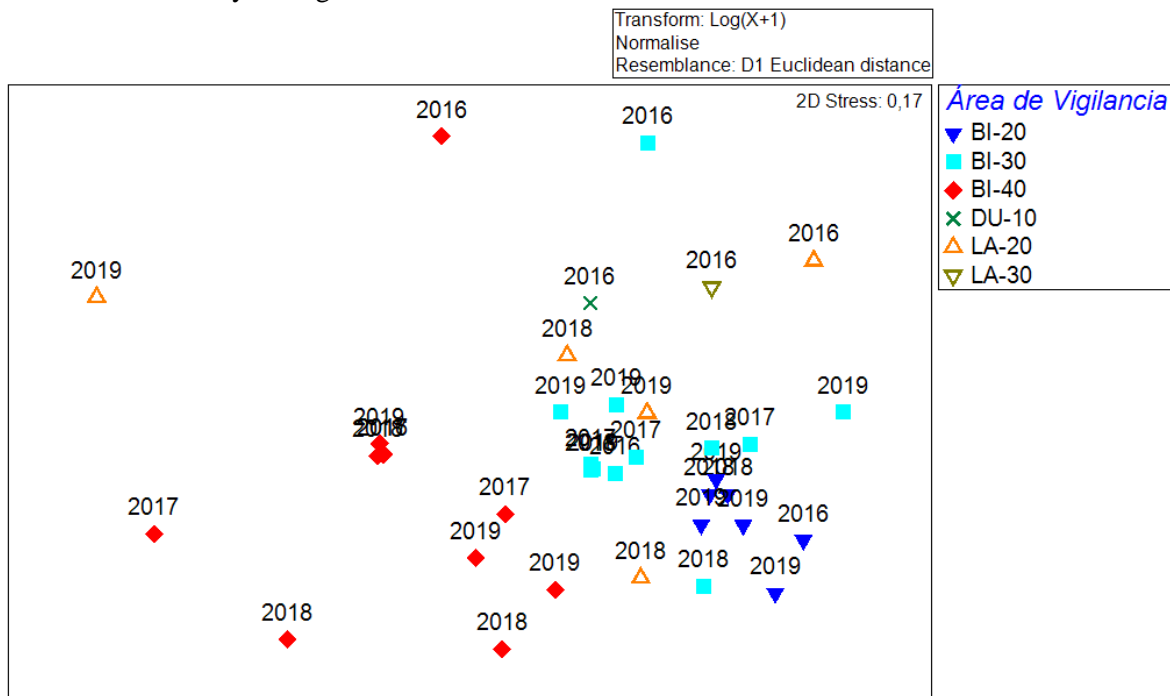


Figura 17. Análisis de Escalamiento Multidimensional No Paramétrico (nMDS) de las variables de calidad del agua por área de vigilancia, sin LA-10
Fuente: Elaboración propia.

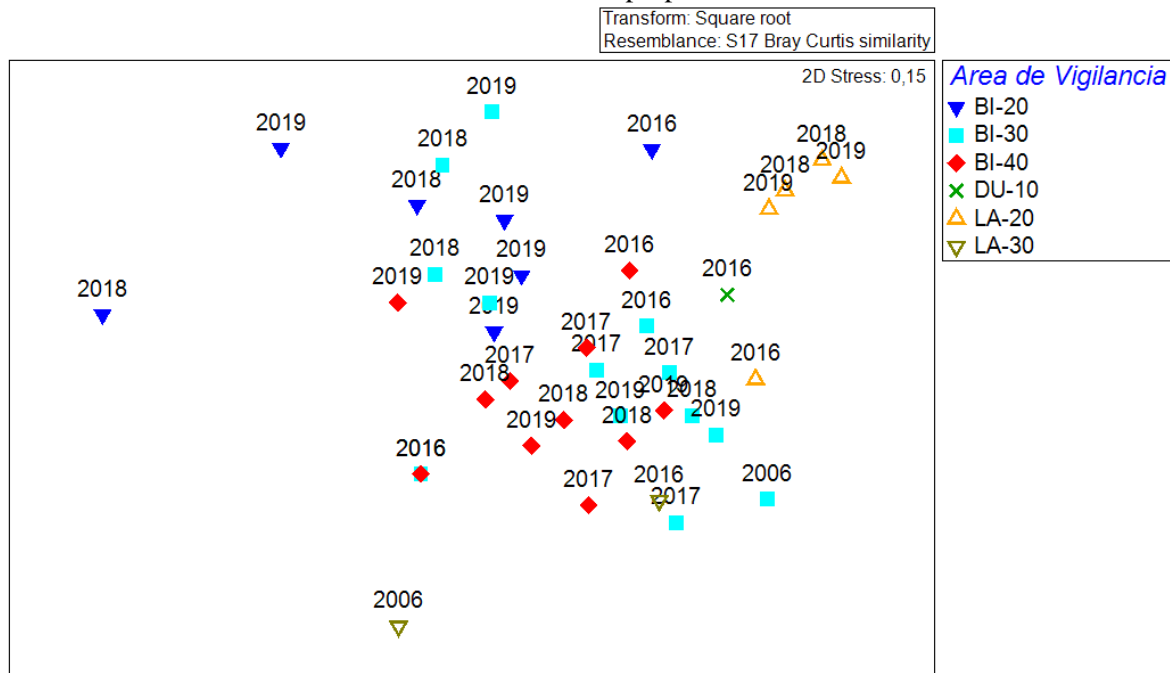


Figura 18. Análisis de Escalamiento Multidimensional No Paramétrico (nMDS) de los ensambles de peces por área de vigilancia sin LA-10

Fuente: Elaboración propia

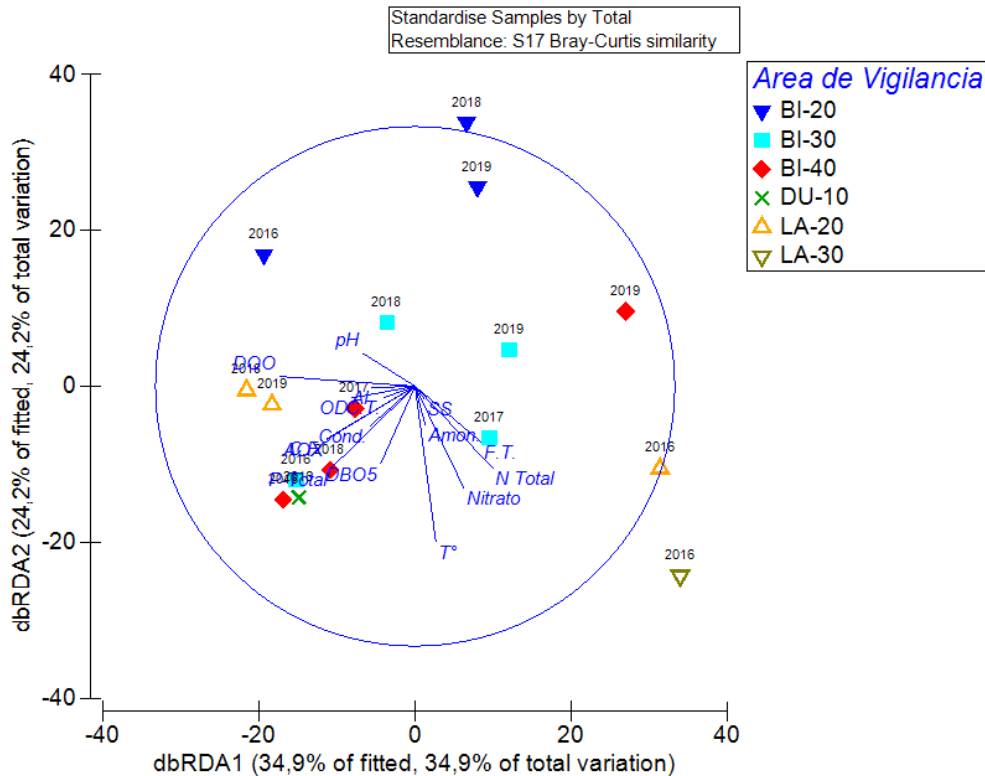


Figura 19. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) que muestra las variables de calidad del agua que afectan a la estructura de ensambles de peces por área de vigilancia, sin el área de vigilancia LA-10

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 13 se representa el DistLM sin el área de vigilancia LA-10, ya mencionado anteriormente. Se realizó para poder visualizar de mejor manera las variables de calidad del agua que explican un porcentaje de la estructura comunitaria de los peces. Se identificaron cinco, las cuales explican un porcentaje de la estructura de la calidad del agua, Temperatura (16%), Fósforo total (14%), Nitrógeno total (14%), DQO (16%) y AOX (13%).

Estas variables tienen completa relación con las especies de peces que se encuentran con mayor contribución en las áreas de vigilancia BI-20, BI-30, BI-40, DU-10, LA-20 y LA-30, identificadas en la Figura 20 hasta la N°22. Estas especies se determinaron con una revisión de los 17 ensambles de peces estudiados, para así demostrar una mejor caracterización. Dentro del espectro de las áreas de vigilancia estudiadas sin LA-10, se encuentran las especies nativas *P. irwini*, *T. areolatus*, *G. maculatus*, *P. trucha*, *B. microlepidotus* y *B. maldonadoi*; por otro lado, las especies introducidas, se determinaron con mayor contribución por área de vigilancia, *O. mykiss*, *S. trutta* y *G. holbrooki*.

Tabla 13. Análisis de significancia del Modelo Lineal Basado en la Distancia (DistLM) para seis áreas de vigilancia (sin LA-10), determinado con la proporción de similitud por un test marginal, observando sus diferencias dentro de un grupo (Pseudo-F), su valor de significancia (P) y la proporción que representa en el análisis (Prop.).

Compuestos	Abreviación	Pseudo-F	P	Prop.
Aluminio Total	Al	1,177	0,326	0,077
Amonio	Amon.	0,594	0,761	0,041
Compuestos Halogenados	AOX	2,142	0,059	0,132
Coliformes Fecales	C.F.	1,369	0,198	0,089
Coliformes Totales	C.T.	0,976	0,46	0,065
Conductividad	Cond.	0,703	0,653	0,047
Demanda Biológica de Oxígeno	DBO5	1,481	0,161	0,095
Demanda Química de Oxígeno	DQO	2,721	0,017	0,162
Fenoles Totales	F.T.	0,547	0,761	0,037
Nitrato	Nitrato	1,906	0,114	0,119
Nitrógeno Total	N. Total	2,367	0,031	0,144
Oxígeno Disuelto	OD	1,694	0,142	0,107
pH	pH	1,002	0,439	0,066
Fósforo Total	P-Total	2,418	0,025	0,147
Sólidos Suspendidos	SS	0,939	0,462	0,062
Temperatura	T°	2,709	0,009	0,162

Fuente: Elaboración propia en base al programa PRIMER V6.

En la Figura 20 están las especies *P. irwini* y *T. areolatus*. Estas especies no son buenos bioindicadores de calidad del agua, porque se encuentran en todas las áreas de vigilancia, por ende, no sirven para discernir, ya que, los rangos serían bastante amplios.

Así mismo se identificaron cuales especies nativas son buenos bioindicadores de calidad del agua, donde se encuentran en la Figura 21, dos especies *G. maculatus*, es representativa en las áreas de vigilancia BI-20, BI-30 y BI-40 asociada a bajas temperaturas y *P. trucha* se asocia AOX, DBO5 (Materia orgánica). Por otro lado, *B. maldonadoi* y *B. microlepidotus* (Figura 22) se representa mayormente en BI-30 y BI-40 asociadas a fósforo total, nitrito, AOX y demanda biológica de oxígeno, opuestos a las especies de la figura 21, pero de igual manera son indicadoras de buena calidad, ya que están presentes en todas las áreas de vigilancia mencionadas anteriormente, pero con menor frecuencia de ocurrencia.

En las Figuras 23 y 24 las especies introducidas, *O. mykiss* que se encuentra con una frecuencia de ocurrencia en BI-20 y en LA-20, con bajas temperaturas. *S. trutta*, bajas temperaturas en BI-20. *O. mykiss* y *S. trutta*, son especies considerablemente abundantes y al relacionarse con variables de calidad del agua de bajas temperaturas y alta oxigenación, indican que están en ambientes de buena calidad del agua, por ende, buenos bioindicadores de calidad del agua. Por otro lado, *G. holbrooki* se representa mayoritariamente en el término del río Laja (LA-30), esta especie se encuentra en aguas más calmadas (tipo potamón), aquí relacionado con mayores valores de nutrientes.

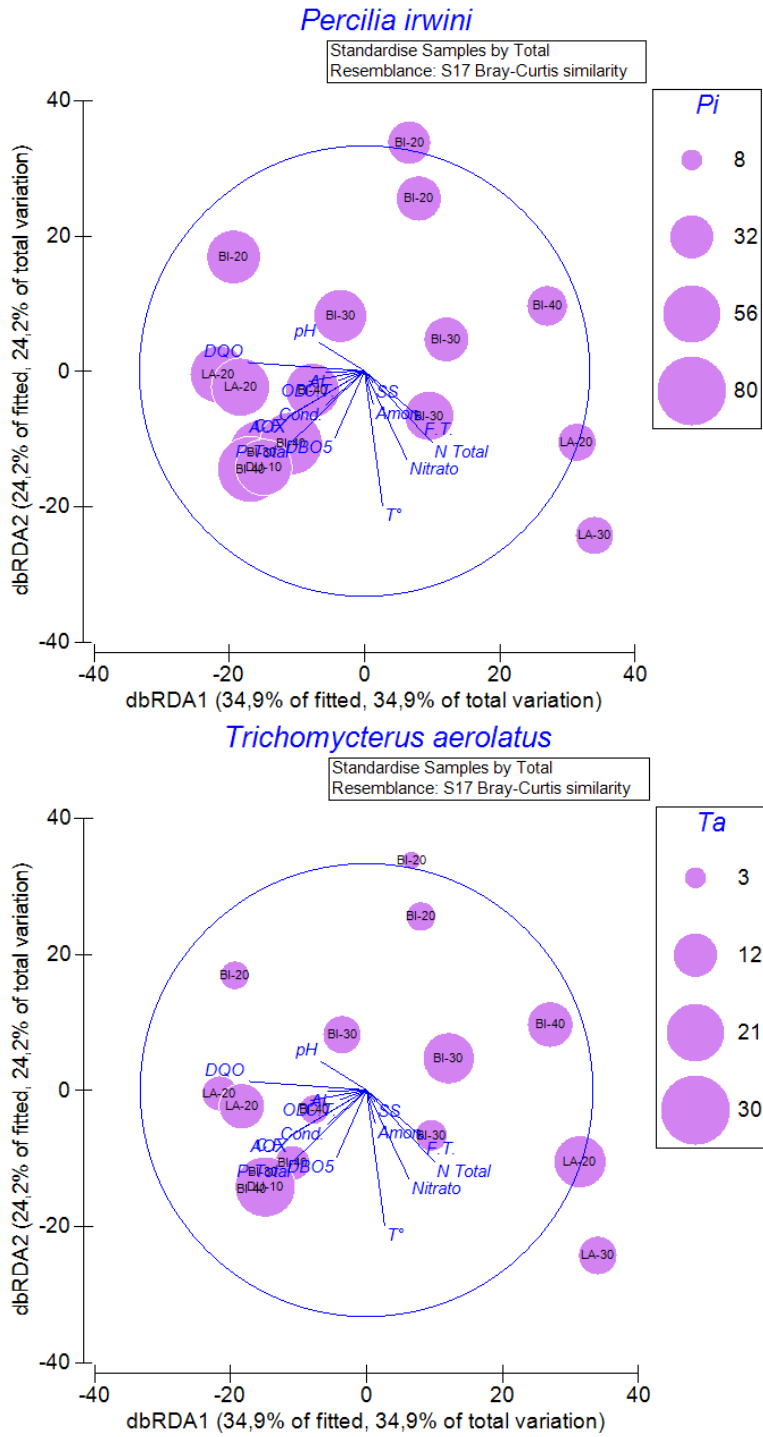


Figura 20. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) de ensambles de peces nativos *P. irwini* y *T. areolatus*, caracterizado por variables de calidad del agua por área de vigilancia

Fuente: Elaboración propia

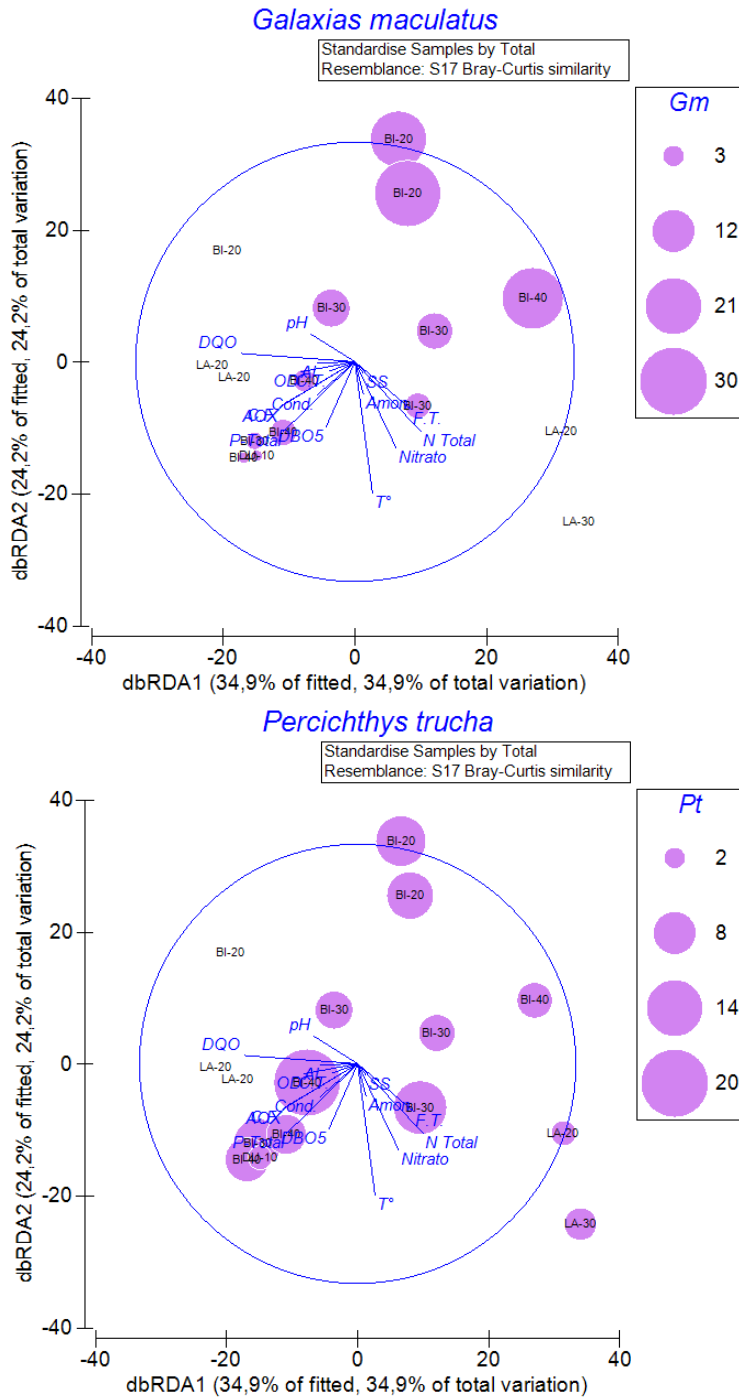


Figura 21. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) de ensambles de peces nativos *G. maculatus* y *P. trucha*, caracterizado por variables de calidad del agua por área de vigilancia

Fuente: Elaboración propia.

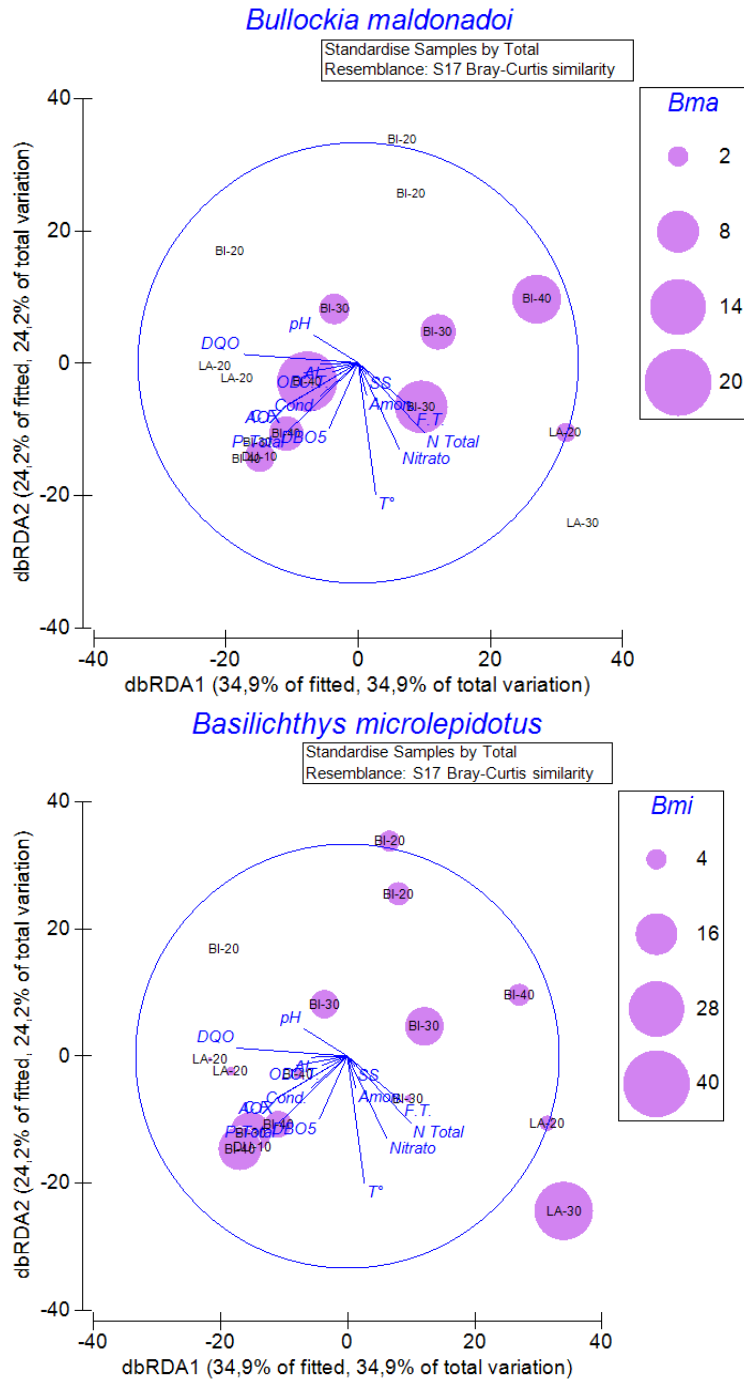


Figura 22. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) de ensambles de peces nativos, *B. maldonadoi* y *B. microlepidotus*, caracterizado por variables de calidad del agua por área de vigilancia
Fuente: Elaboración propia.

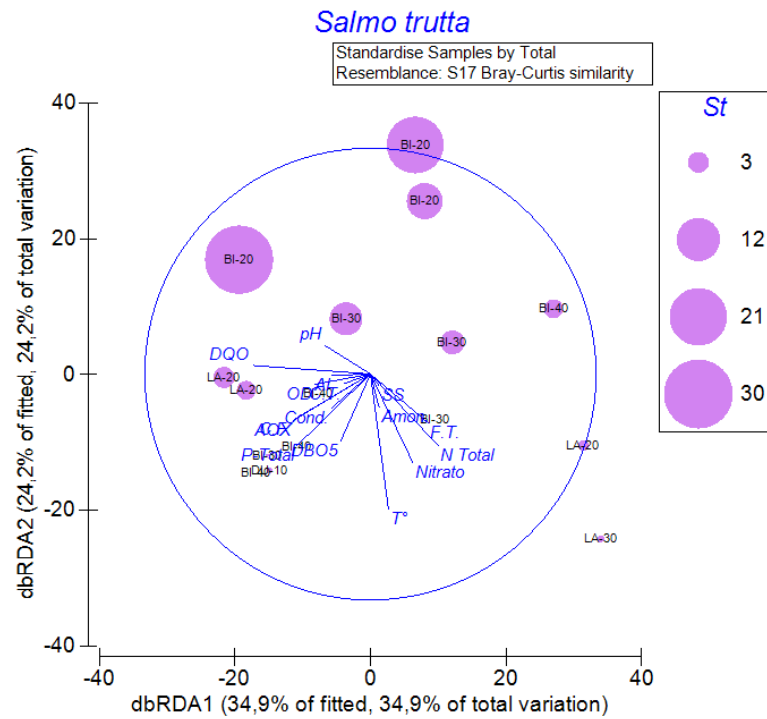
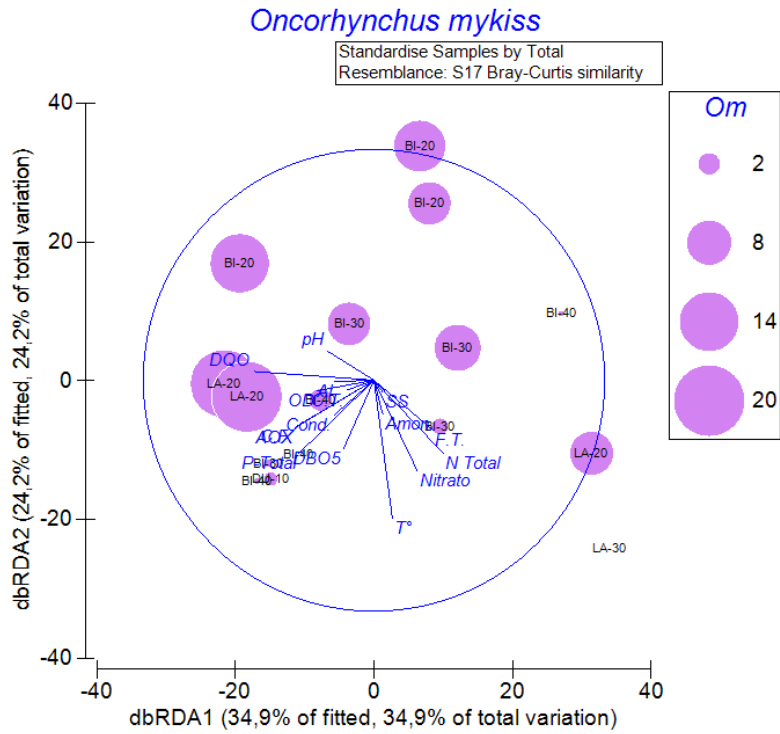


Figura 23. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) de ensambles de peces introducidos *O. mykiss* y *S. trutta*, caracterizados por variables de calidad del agua por área de vigilancia

Fuente: Elaboración propia

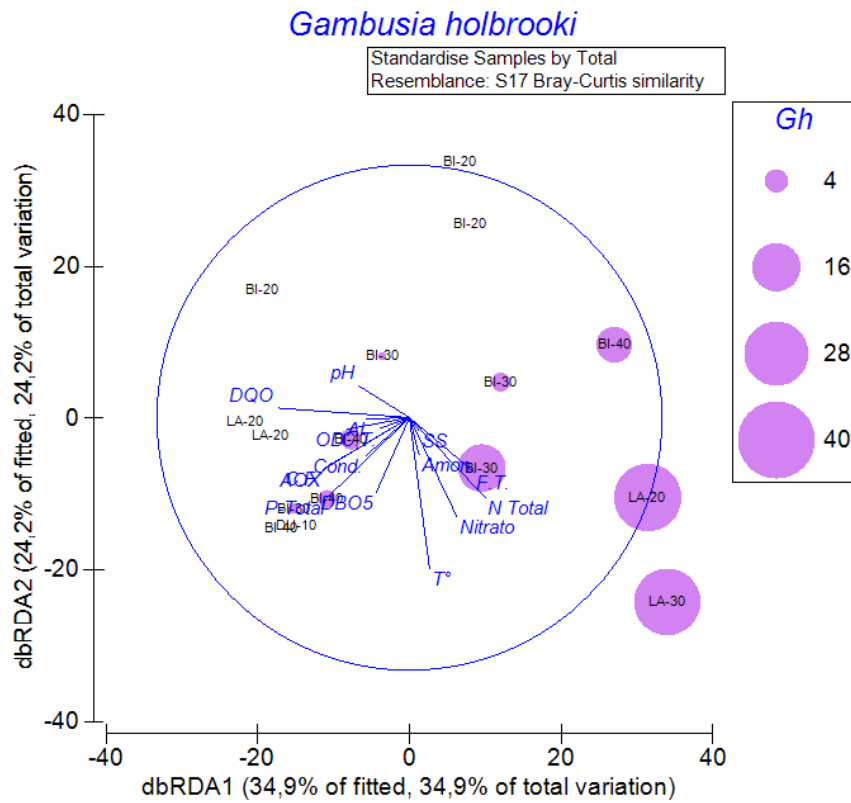


Figura 24. Análisis de Redundancia Basado en Distancia (dbRDA) de ensamble de especie de peces introducidos, *G. holbrooki*, caracterizada por variables de calidad del agua por área de vigilancia

Fuente: Elaboración propia.

5.4. Propuesta de especies de peces bioindicadores de calidad del agua para la NSCA del río Biobío

Luego de determinar la presencia de ensamble de peces nativos e introducidos por área de vigilancia y como es su comportamiento a medida que se relaciona con variables de calidad del agua, se pudo identificar que ciertas especies se asocian a áreas de vigilancia y podrían ser utilizados como bioindicadores de una buena o mala condición ambiental según su ausencia o presencia relativa, por ello se propone:

- Monitorear los ensambles de peces de *P. irwini* y *T. areolatus*, indicadores de buena calidad del agua.
- Realizar muestreos estacionales para identificar si las especies nativas como *P. trucha* y *B. microlepidotus*, siguen estando presentes en las áreas de vigilancia BI-20, BI-30, BI-40.
- Del mismo modo la presencia de *G. maculatus* en las áreas de vigilancia BI-20, BI-30, BI-40, LA-20. Y *B. maldonadoi* al menos en las áreas de vigilancia BI-20, BI-30, BI-40, LA-20, DU-10.
-
- Considerar la abundancia de *Oncorhynchus mykiss* y *Salmo trutta*, como buenos indicadores de calidad del agua
- Para finalmente mejorar la calidad de las aguas en dichas áreas de vigilancia y disminuir la presencia de las especies introducidas, ya que son indicadoras de mala calidad del agua *C. carpio* y *G. holbrooki* en las áreas de vigilancia BI-20, BI-30, BI-40, DU-10, LA-20.

6. Discusión

Los resultados obtenidos en la cuenca del río Biobío demostraron que, por la degradación de la calidad del agua en el tiempo, esta se ha visto afectada por las centrales hidroeléctricas, industrias, ciudades (residuos domiciliarios), cambios de uso de suelo (forestal y agrícola) y la invasión de especies, resaltando los cambios en la fauna íctica (Habit et al., 2020). Es por ello, que se encontraron ensambles de peces en abundancia, en las áreas de vigilancia estudiadas, pero su distribución es diferente dependiendo de la especie. Por ejemplo, *P. irwini* y *T. areolatus* se distribuyen en todas las áreas de vigilancia normadas. El rango de distribución de *P. irwini* sólo se ha encontrado en los ríos del Biobío y en los lagos Laja, Icalma y Galletué (Campos, 1993). No obstante, *T. areolatus* no representa calidad del agua claramente, sino por su tipo de hábitat, ya que aguas abajo del río Biobío su abundancia se ve disminuida, ya que su ambiente a menudo debajo de bolones en fuertes corrientes o donde el agua es baja o forma pozones entre las piedras (Ministerio de Medio Ambiente, 2020). Se encuentra en el litoral arenoso o pedregoso de los lagos en sectores donde desembocan pequeños afluentes. En estas partes se meten entre la arena y grava (Campos et al, 1993). Por ende, no son funcionales para determinar la calidad del agua en el biomonitoreo de la NSCA, ya que se *P. irwini* se adapta a las condiciones en las que se encuentre el río y *T. areolatus* depende del ambiente en el que se encuentre para poder tener frecuencia de ocurrencia. De este modo, estas deben seguir presentes en las áreas de vigilancia, ya que, si desaparecen o existe una “ausencia” en los tramos que su abundancia es mayor, puede determinar que ha ocurrido alguna intervención externa en el río.

En el área de vigilancia BI-20, las comunidades de peces han sufrido cambios importantes, debido a la construcción de tres grandes centrales hidroeléctricas y en BI-40 debido a los niveles de nitrato y del nitrógeno total que probablemente esté relacionada con otras actividades agrícolas, ganaderas y forestales (Figueroa et al., 2020).

G. maculatus se encuentra principalmente en la zona alta del río Biobío en BI-20. En este caso, si se relaciona con las hidroeléctricas, ya que los muros representan una barrera, por lo que su presencia se ha visto afectada en la cuenca del río Biobío (Habit et al., 2020). *B. maldonadoi* su presencia es en BI-30 y BI-40, sector medio del río Biobío, desde Rucalhue hasta el río Gomeró, un sector de tipo potamal, donde comienza a disminuir la pendiente del río y deja de ser turbulento; y su entorno comienza a ser de vegetación por plantaciones de *pino insigne*, *saucos* y *álamos* (Figueroa et al., 2020)

B. microlepidotus, principalmente en la zona media y baja, siendo las áreas de vigilancia BI-30, LA-30 y MA-10. Esta especie requiere una buena oxigenación, aguas transparentes y de velocidades bajas (Ministerio del Medio Ambiente, 2019), situándose desde Rucalhue hasta aguas arriba del río Vergara. Dentro de los estudios realizados, si se demuestra una contribución en esos sectores los cuales no habían sido registrados en años anteriores, indicando claramente que existe una frecuencia de ocurrencia en la especie (Habit et al., 2020).

G. holbrooki la frecuencia de ocurrencia de esta especie se relaciona en la zona baja del río Biobío y el término del río Laja, BI-50, BI-60 y LA-30. Esta especie introducida ha aumentado su número, distribución y abundancia en la cuenca, debido a su capacidad de adaptarse a impactos en el ecosistema al que invaden. Principalmente indicador de malas condiciones de la calidad del agua.

Su presencia y abundancia en las áreas de vigilancia BI-50, BI-60 y LA-30 es un indicador del deterioro y la disminución de las especies nativas en el sector bajo del río Biobío (Habit et al., 2020).

De este modo la presencia de especies introducidas, *O. mykiss* se encontró en varios tributarios LA-10, LA-20, RE-10, siendo el río Laja donde más se encuentra presente esta especie y *S. trutta*, en el sector alto del río Biobío en BI-20. Estas especies introducidas no necesariamente es algo negativo que se encuentren ensambles de peces (*O. mykiss* y *S. trutta*), ya que según Habit et al., (2020), existen antecedentes (Tabla 4) que estas especies entre los años 1981-1991 ya estaban presentes en el sector alto y medio del río Biobío, donde estos sectores son de tipo ritrón, remansos y rápidos más espaciados (Figueroa et al., 2020), por lo cual son aguas de buena calidad y alta oxigenación. De este modo con los análisis realizados, se confirma que los salmónidos son especies de buena calidad del agua, ya que su hábitat es principalmente aguas frías y con movimientos.

Por otro lado, LA-10 se determinó mediante los estudios realizados que existían altas concentraciones de aluminio total en ese tramo, sin dejar de lado AOX (compuestos halogenados), coliformes fecales y fósforo total. La composición del río Laja, es de suelos estratificados, derivados de materiales volcánicos de texturas principalmente arenosas y franco-arenosas (González, et al., 2003). Ahora, la presencia de aluminio total se expresa, por la actividad volcánica existente en la región (Dirección General de Aguas, 2004). Esto relacionado directamente con la cantidad de minerales, ignimbritas y micas, por efecto de la meteorización del volcán Antuco, provocando suelos arcillosos; y por el movimiento de tierra por escorrentía, produciendo compuestos aluminosilicatos, presentes en el curso principal del río Biobío (Dirección General de Aguas, 2004).

Se analizaron los índices de aluminio total en LA-10, en especial en la estacionalidad de invierno (2018-2019) y complementariamente pero no recurrente, el verano del 2018. Los índices elevados en invierno son explicados, ya que en la naturaleza se encuentra ampliamente distribuido (Ministerio del Medio Ambiente, 2017) y generalmente por la cantidad de lluvias ácidas producidas en esa estacionalidad, estas provocan erosión en el suelo y movimiento en los minerales, llevando a incrementos grandes en aguas naturales cercanas (Dirección General de Aguas, 2004). Por otro lado, el pick del verano del año 2018 se debió a la construcción del puente, por el sedimento provocado y el movimiento de tierras, ya que los vehículos atravesaban por el lecho del río (Ministerio del Medio Ambiente, 2017). Las concentraciones de fósforo total se pueden verse provocadas por los fertilizantes inorgánicos utilizados en el área agrícola o en su defecto, por uso forestal (Ministerio del Medio Ambiente, 2017). De este modo la presencia de *O. mykiss*, sobre esta variable de calidad del agua, no explica que uno sea compatible con el otro, ya que ocurrieron eventos antropogénicos y eventuales que coincidieron con los análisis realizados.

Al igual que en el Biobío, en el río Laja, los mayores cambios han ocurrido en la zona baja del río (LA-30), relacionado principalmente con el aumento de la abundancia de especies introducidas como gambusias.

Se observa que la mayoría de los afluentes realizan un aporte significativo de nutrientes, como en el caso de LA-20 y LA-30, ya que el río Laja aportaba una cantidad importante de agua de buena calidad que contribuía a la dilución del caudal del canal Biobío. En la actualidad, sin embargo, sí aporta nutrientes como fósforo total, el nitrógeno total y los sulfatos. Aunque los nutrientes de la parte alta de la cuenca son importantes, su concentración aumenta en mayor medida en la parte

central de la cuenca, en el río Biobío. En este sentido, también son importantes los ríos Duqueco y Laja por su contribución en nutrientes.

Los peces indicadores de buena calidad ambiental se ven representados por su abundancia y correlación con las variables de calidad del agua. Tales como, *P. trucha* que se distribuye en BI-20, BI-30 y BI-40, asociándose con variables de bajas temperaturas y nutrientes (nitrato y demanda biológica de oxígeno), al igual que la especie *G. maculatus*, que posee una distribución menor en el área de vigilancia BI-30. *B. microlepidotus* y *B. maldonadoi*, son indicadores de mala calidad ambiental con las variables demanda biológica de oxígeno, AOX (compuestos halogenados), oxígeno disuelto y nutrientes como fósforo total, nitrito y nitrato.

Asimismo, *O. mykiss* y *S. trutta* presentan un alto nivel de adaptación a aguas frías bien oxigenadas (Peredo-Parada et al., 2009), por ende *O. mykiss* y se representa con mayor contribución y abundancia en BI-20, BI-30 y LA-20, eso quiere decir, desde el río Llanquén hasta aguas arriba del río Vergara (Negrete), en este sitio se representan especies con bajas temperaturas, de tipo rítrón (Figuroa et al., 2020) y *S. trutta* con BI-20 y BI-30, sector alto y medio del cauce principal. Por ende, son bioindicadores de buena calidad del agua en BI-20 y BI-30.

7. Conclusión

En el presente estudio realizado en la cuenca del río Biobío se lograron identificar especies nativas e introducidas como bioindicadores de calidad del agua en las áreas de vigilancia BI-20, BI-30, BI-40, DU-10, LA-10, LA-20 y LA-30. Siendo así, seis especies nativas *P. irwini*, *T. areolatus*, *P. trucha*, *G. maculatus*, *B. maldonadoi* y *B. microlepidotus* y tres introducidas *S. trutta*, *O. mykiss* y *G. holbrooki*.

En las áreas de vigilancia del cauce principal BI-20, BI-30 y BI-40 las especies *P. trucha*, *B. maldonadoi*, *B. microlepidotus* y *G. maculatus*, siendo buenos bioindicadores de calidad del agua, ya que son especies que se ven representadas mayormente en aguas con bajas temperaturas y buena oxigenación.

El comienzo del río Laja (La-10), la especie bioindicadora es *O. mykiss*, con presencia de bajas temperaturas y buena oxigenación.

Otro punto importante es el deterioro del río Laja (LA-20 y LA-30) se ha visto que a diferencia con estudios realizados anteriormente que no existía la presencia de *G. holbrooki*. Hoy en día está presente y ha estado deteriorando el río con la invasión de esta especie.

Dentro de las 19 variables de calidad del agua, no se contempla la temperatura y es un determinante clave, ya que, si la calidad del agua varía, la temperatura varía y es directamente proporcional a las condiciones ambientales.

Finalmente, este estudio da a conocer que los peces si son buenos bioindicadores de calidad del agua en el río Biobío y sus afluentes. Sin embargo, existen sitios que se presentan relativamente abundantes unas especies más que otras correlacionándose con las variables de calidad del agua. Por lo anterior es que se deben realizar monitoreos de peces bioindicadores estacionalmente y en paralelo con las mediciones ambientales para así determinar si la calidad del agua ha cambiado y si las especies determinantes como buenos indicadores de calidad del agua sigan estando presentes.

8. Referencias

- Adams, S., Bevelhimer, M., Greeley M., Levine, D. & Teh S. (1999). Ecological Risk Assessment in a large River-reservoir. 6: Bioindicators of fish population health. *Environ. Toxicol. Chem.* 18:628-640.
- Adams, S., Greeley, M. & Ryon, M. (2000). Evaluating effects of contaminants on fish health at multiple levels of biological organization: extrapolating from lower to higher levels. *Hum. Ecol. Risk Assess.* 6, 15–27.
- Aguilar, A. (2005). Los peces como indicadores de la calidad ecológica del agua.
- AL-SABATI, K. & METCALFE, C.D. 1995. Fish micronuclei for assessing genotoxicity in water. *Mutation Research* 343(2-3):121-135.
- Anderson M., Gorley R. & Clarke., K. (2008). PERMANOVA + for PRIMER: Guide to Software and Statistical Methods. PRIMER-E: Plymouth, UK.
- Barra, R., Nieto, P., Valdovinos C. & Vidal, G. (2021). El problema no solo es la escasez de agua, sino su contaminación. <https://www.ciperchile.cl/2021/06/04/el-problema-no-solo-es-la-escasez-de-agua-sino-su-contaminacion/>
- Brower, J. & Zar, J. (1984). Field and laboratory methods for general ecology. Wm. C. Brown Co. Dubuque, Iowa. 226 pp.
- CADE IDEPE (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Correspondiente a las cuencas de los ríos Loa, Elqui, Aconcagua, Rapel, Bio-Bio, Aysén y Maipo-Mapocho. <https://mma.gob.cl/diagnostico-y-clasificacion-de-cursos-y-cuerpos-de-agua-segun-objetivos-de-calidad/>
- Chamorro, S., Hernandez, V., Matamoros V., Dominguez, C., Becerra, J., Vidal, G., Piña, B., Bayona, J.M. 2013. Chemical characterization of organic microcontaminant sources and biological effects in riverine sediments impacted by urban sewage and pulp mill discharges. *Chemosphere* 90(2): 611-619.
- Clarke, K. & Gorley, R. (2006). User manual/tutorial PRIMER v6. PRIMER-E. Plymouth, UK.
- Clarke, K. & Gorley, R. (2014). Change in marine communities: An approach to statistical analysis and interpretation. 3rd edition. Chapter 5, 5-2,5-3
- Comisión Nacional del Medio Ambiente. (2004). Guía CONAMA para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas. https://www.uach.cl/externos/epicforce/pdf/legislacionchile/agua/guia_CONAMA_establ_norm_secund_calidad_amb_agua.pdf
- Dirección General de Aguas. (2004). Cuenca del río Biobío. 154.
- Dirección General de Aguas. (2014). Apoyo a la vigilancia de normas secundarias de calidad de aguas. (Noviembre)
- Environment Agency. (2008). Review and implementation study of biomonitoring for assessment of air quality outcomes. Bristol: Environmental Agency. 2-3
- Escobar, J. (2002). La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. 10-19
- Fierro, P., Valdovinos, C., Arismendi, I., Díaz, G., Jara-flores, A., Habit, E., & Vargas-chacoff, L. (2019). Science of the Total Environment Examining the influence of human stressors on benthic algae, macroinvertebrate, and fish assemblages in Mediterranean streams of Chile. *Science of the Total Environment*, 686, 26–37.
- Fierro, P., Valdovinos, C., Vargas-Chacoff, L., Bertrán, C. & Arismendi, I. (2017). Macroinvertebrates and fishes as bioindicators of stream water pollution. *Water Quality*. Intechopen, Rijeka, 23-38.
- Figuroa R., Parra, O. & Díaz, M.E. (2020). La cuenca hidrográfica del río Biobío. En: EULA-CHILE Evolución y perspectivas a 30 años de su creación, 91-137.

- Figuroa, R., Suarez, M., Andreu, A., Ruiz, V. & Vidal, M. (2009). Caracterización ecológica de humedales de la zona semiarida en Chile central.
- García, J.M., Sarmiento, L.F., Salvador, M., Porras, L.S. (2017) Uso de bioindicadores para la evaluación de la calidad del agua en ríos: aplicación en ríos tropicales de alta montaña. Volumen 23. 48-54
- Gustavino, B., Scornajengui, K., Minissi, S. & Ciccotti E. (2001). Micronuclei induced in erythrocytes of *Cyprinus carpio* (teleostei, pisces) by X-rays and colchicine. *Mutation Research* 494 (1):151-159.
- Jia, Y. T., & Chen, Y. F. (2013). River health assessment in a large river: Bioindicators of fish population. *Ecological Indicators*, 26,24-32.
- Habit, E., K. Górski, D. Alò, E. Ascencio, A. Astorga, N. Colin, T. Contador, P. de los Ríos, V. Delgado, C. Dorador, P. Fierro, K. García, Ó. Parra, C. Quezada- Romegialli, B. Ried, P. Rivera, C. Soto-Azat, C. Valdovinos, I. Vera-Escalona, S. Woelfl (2019). Biodiversidad de ecosistemas de agua dulce. En P. A. Marquet et al. (editores), Biodiversidad y cambio climático en Chile: Evidencia científica para la toma de decisiones. Informe de la mesa de Biodiversidad. Santiago: Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación
- Habit, E., Díaz, G. & Manosalva, A. (2020). Peces nativos del río Biobío: 30 años después. En: EULA-CHILE Evolución y perspectivas a 30 años de su creación, 139-155.
- Hurtado, M.F. (2008). Calidad de las aguas del río Itata usando bioindicadores, previo a la puesta en marcha del Complejo Forestal Industrial Nueva Aldea. 13
- Instituto Nacional de Normalización. (2020). ¿Qué es una norma? Recuperado 09 de mayo de 2020, de <https://www.inn.cl/que-es-una-norma>
- Karr, J., Fausch, K., Angermeier, P., Yant, P. & Schlosser, I. (1986). Assessing Biological Integrity in Running Waters: A Method and Its Rationale. Special Publication 5. *Illinois Natural History Survey, Illinois*.
- Kraemer A., Choudhury K. & Kampa, E. (2001). Protecting Water Resources: Pollution Prevention, Thematic Background Paper – International Conference on Freshwater Bonn 2001, Secretariat of the International Conference on Freshwater Bonn 2001
- Li, L., Zheng, B., & Liu, L. (2010). Biomonitoring and Bioindicators Used for River Ecosystems : Definitions , Approaches and Trends. 2, 1510–1524. *Environmental Sciences*.
- Magurran, A. (1988). Ecological diversity and its measurement. C. Helm (Ed.). New Jersey, EE.UU.: Princeton University Press.
- Mendoza, M., Quevedo, A., Bravo, A., Flores, H., De las Islas, ML., Gavi, F. & Zamora, B. (2014). Estado ecológico de ríos y vegetación ribereña en el contexto de la nueva Ley General de Aguas de México. *Rev. Int. Contam. Ambient* vol.30 no.4 Ciudad de México nov. 2014.
- Minissi, S., Ciccotti, E. & Rizzoni, M. (1996). Micronucleus test in erythrocytes of *Barbus plebeius* (Teleostei, Pisces) from two natural environments: a bioassay for the in situ detection of mutagens in freshwater. *Mutation Research* 367 (4):245-251.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Argentina (2020). La bioindicación en el monitoreo y evaluación de los sistemas fluviales de la Argentina
- Ministerio del Medio Ambiente (2016). Monitoreo para la vigilancia de la Norma Secundaria de Calidad de Aguas de la cuenca del río Biobío.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2017). Monitoreo para la vigilancia ambiental de la cuenca del río Biobío.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2020). ¿Qué es una Norma de Calidad Secundaria? <https://mma.gob.cl/faq/que-es-una-norma-de-calidad-secundaria/>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2020). Resumen del estado del medio ambiente para la ciudadanía.
- Ministerio del Medio Ambiente (2022). Clasificación según estado de conservación. <https://clasificacionespecies.mma.gob.cl/>

- Ministerio de Obras Públicas. (2020). Mesa Nacional del Agua. Primer Informe. Enero.
- Moreno, C. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. Volumen 1.
- NCSA-BB D.S.9/2015. Establece Normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales de la cuenca del río Biobío. D.S.9/2015. Ministerio del Medio Ambiente.
- Parra, O., Angulo, M., Acuña, A., Vighi, M., Vismara, R., Faranda, F. & Munari, S. (1993). Propuesta de Programa de Monitoreo de Calidad del Agua del Sistema río Biobío (Chile Central). In F. Faranda y O. Parra (Eds), Evaluación de la calidad del Agua y Ecología del Sistema Limnético y Fluvial del río Biobío. Serie Monográficas Científicas EULA, Vol 12:397-409
- Parra, O., Muñoz, M. & Pérez, L. (2009). Gestión integrada de cuencas como base del ordenamiento territorial descentralizado. En: Von Baer, H. (Ed.). Pensando Chile desde sus regiones.
- Peredo-Parada, M., Martínez-Capel, F., Garófano-Gomez, V., Atenas, M., & Riestra, F. (2009). Base De Datos Eco-Hidrologica De Los Rios De Chile: Una Herramienta De Gestion Para Los Ecosistemas Acuaticos. *Gayana (Concepción)*, 73(1), 119–129.
- Pla, L. (2006). Biodiversidad: inferencia basada en el índice de Shannon y la riqueza.
- Ramírez, O. (2016). Análisis multivariante.
- Rivera, D., Del Río, C., Donoso, G., & Molinos, M (2019). Conflictividad judicial de aguas en Chile: caracterización y propuestas para mejorar su prevención y resolución. *Propuestas para Chile*, 183
- Romano, L. (1999). Bioindicadores de Contaminación Acuática en Peces. *Revista AquaTIC*
- Stehr, A. (2018). El Sistema Ambiental de la Cuenca del río Biobío. Seminario
La Cuenca del río Biobío: Situación ambiental actual e interrogantes respecto al proyecto de la carretera hídrica. Eula-Chile Centro de Ciencias Ambientales.
- Ulloa, M. (2017). Distribución de fauna íctica identificada a través del sistema de evaluación ambiental en la cuenca del río Biobío.
- Universidad de la Frontera: Serie Au-Sinergia Regional (Temuco, Chile), 490-494.
- Valdovinos, C. & Parra, O. (2006). La Cuenca del Río Biobío Historia Natural de un Ecosistema de uso Múltiple ANTECEDENTES GENERALES Capítulo. 4-7
- World Water Assessment Programme. (2017). World Water Assessment Programme. The United Nations World Water Development Report 2017: Wastewater the untapped resource. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France.
- Zubcoff, J. (2014). Estadística Aplicada a los Recursos Marinos. Permanova. Análisis de Permutaciones y Múltiple ANOVA.

9. Anexo

Anexo 1. Índices de diversidad por área de vigilancia. Identificando S: Riqueza específica, N: Número de individuos, d: Índice de diversidad de Margalef, J': Índice de equidad de Pielou, H': Índice de Shannon-Weaver, λ : Índice de Simpson.

Nombre	S	N	D	J'	H'	λ
BI-10-verano-2016	5	200	0,75496	0,76663	0,53585	0,65305
BI-20-verano-2016	6	159	0,98641	0,71318	0,55496	0,66144535
BI-20-invierno-2018	7	47	1,55838	0,89574	0,75699	0,80941603
BI-20-primavera-2018	4	5	1,86400	0,96096	0,57856	0,72
BI-20-verano-2019	7	86	1,34700	0,75130	0,63492	0,68875068
BI-20-otoño-2019	9	95	1,75674	0,79620	0,75977	0,77518006
BI-20-invierno-2019	4	30	0,88204	0,67022	0,40351	0,47777778
BI-20-primavera-2019	7	83	1,35782	0,82583	0,69791	0,75831035
BI-30-otoño-2006	12	515	1,76164	0,77120	0,83227	0,80295598
BI-30-verano-2016	3	61	0,48651	0,83809	0,39987	0,53963988
BI-30-primavera-2016	9	345	1,36903	0,45619	0,43531	0,42717076
BI-30-otoño-2017	7	259	1,07975	0,76903	0,64990	0,72592836
BI-30-invierno-2017	9	177	1,54555	0,49353	0,47095	0,44853012
BI-30-primavera-2017	8	216	1,30226	0,82867	0,74836	0,78223594
BI-30-verano-2018	11	237	1,82880	0,71839	0,74813	0,77676298
BI-30-invierno-2018	8	58	1,72395	0,80177	0,72407	0,7627824
BI-30-primavera-2018	5	45	1,05079	0,61158	0,42747	0,4908642
BI-30-verano-2019	12	327	1,89984	0,64640	0,69759	0,72717411
BI-30-otoño-2019	8	118	1,46729	0,74637	0,67404	0,72550991
BI-30-invierno-2019	9	240	1,45968	0,75883	0,72410	0,75270833
BI-30-primavera-2019	5	35	1,12507	0,79326	0,55447	0,65632653
BI-40-verano-2016	3	61	0,48651	0,83809	0,39987	0,53963988
BI-40-primavera-2016	6	243	0,91024	0,38856	0,30236	0,33805822
BI-40-otoño-2017	7	130	1,23266	0,69782	0,58972	0,6712426
BI-40-invierno-2017	8	97	1,53015	0,34145	0,30836	0,28100755
BI-40-primavera-2017	8	156	1,38618	0,74883	0,67626	0,72715319
BI-40-verano-2018	8	144	1,40850	0,72253	0,65251	0,68016975
BI-40-invierno-2018	6	94	1,10052	0,53362	0,41523	0,45405161
BI-40-primavera-2018	7	82	1,36156	0,53862	0,45519	0,4759072
BI-40-verano-2019	11	204	1,88036	0,76487	0,79653	0,80147059
BI-40-invierno-2019	9	137	1,62602	0,82629	0,78848	0,7918376
BI-40-primavera-2019	6	54	1,25345	0,79057	0,61518	0,71193416
BI-50-otoño-2006	5	91	0,88675	0,43386	0,30326	0,37266031
BI-50-verano-2013	4	29	0,89092	0,63678	0,38338	0,47562426
BI-60-otoño-2006	9	123	1,66245	0,67334	0,64253	0,70540022
DU-10-verano-2016	9	359	1,35978	0,59671	0,56940	0,64855176
LA-10-verano-2016	4	149	0,59953	0,32944	0,19834	0,2186388
LA-10-invierno-2018	5	51	1,01734	0,60782	0,42485	0,55747789
LA-10-verano-2018	2	27	0,30341	0,50326	0,15150	0,19753086
LA-10-verano-2019	2	57	0,24734	0,36658	0,11035	0,13050169
LA-10-invierno-2019	2	39	0,27296	0,55250	0,16632	0,22353715
LA-20-otoño-2016	11	331	1,72351	0,78133	0,81367	0,80331505
LA-20-invierno-2018	7	412	0,99651	0,63895	0,53998	0,58821519
LA-20-verano-2018	6	505	0,80327	0,82047	0,63845	0,7083384
LA-20-verano-2019	6	588	0,78410	0,74376	0,57876	0,65432227
LA-20-invierno-2019	7	394	1,00396	0,64423	0,54444	0,60237316
LA-30-otoño-2006	6	26	1,53464	0,88196	0,68630	0,76331361
LA-30-verano-2016	7	260	1,07900	0,76471	0,64626	0,74588757
MA-10-verano-2016	9	514	1,28159	0,71962	0,68669	0,76039758
RE-10-verano-2016	5	113	0,84613	0,80949	0,56581	0,68681964
VE-10-verano-2016	5	163	0,78528	0,64700	0,45223	0,56810569

Fuente: Elaboración propia con datos laboratorio LEC-PAD