



# UNIVERSIDAD NACIONAL “SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”

---

ESCUELA DE POSTGRADO

## **INFLUENCIA DEL GRADIENTE DE COBERTURA GLACIAR DE LA CORDILLERA BLANCA EN LA BIODIVERSIDAD DE MACROINVERTEBRADOS BENTÓNICOS, 2019-2020**

Tesis para optar el Grado de Maestro  
en Ciencias e Ingeniería

Mención: Gestión Ambiental

**EDSON DESCIONAR PALACIOS ROBLES**

Asesora: **Mag. ROSARIO ADRIANA POLO SALAZAR**

Huaraz – Ancash - Perú

2021

N°. Registro: **T0801**



**FORMATO DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN, CONDUCENTES A OPTAR TÍTULOS PROFESIONALES Y GRADOS ACADÉMICOS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

**1. Datos del autor:**

Apellidos y Nombres: Palacios Robles Edson Desciomar

Código de alumno: 2019.4411.N.AA Teléfono: 943155850

E-mail: epalaciosr@unasam.edu.pe D.N.I. n°: 46228071

*(En caso haya más autores, llenar un formulario por autor)*

**2. Tipo de trabajo de Investigación:**

- Tesis  Trabajo de Investigación  
 Trabajo Académico

**3. Trabajo de Investigación para optar el grado de:**

Magister

**4. Título del trabajo de Investigación:**

INFLUENCIA DEL GRADIENTE DE COBERTURA GLACIAR DE LA CORDILLERA BLANCA EN LA BIODIVERSIDAD DE MACROINVERTEBRADOS BENTÓNICOS, 2019-2020

5. Escuela:

6. Programas:

**7. Asesor:**

Apellidos y nombres Polo Salazar Rosario Adriana D.N.I n°: 31662349

E-mail: rpolos@unasam.edu.pe ID ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5065-7770

8. Referencia bibliográfica:

**9. Tipo de acceso al Documento:**

- Acceso público\* al contenido completo. Acceso  
 restringido\*\* al contenido completo

Si el autor eligió el tipo de acceso abierto o público, otorga a la Universidad Santiago Antúnez de Mayolo una licencia no exclusiva, para que se pueda hacer arreglos de forma en la obra y difundirlo en el Repositorio Institucional, respetando siempre los Derechos de Autor y Propiedad Intelectual de acuerdo y en el Marco de la Ley 822.

En caso de que el autor elija la segunda opción, es necesario y obligatorio que indique el sustento correspondiente:

La presente investigación fue financiada por ProCiencia [Contrato N°08-2019-FONDECYT] por lo que se tiene un compromiso de publicarla en una revista indexada, con un contenido similar.  
Debido que las revistas indexadas no aceptan manuscritos que hayan sido publicadas anteriormente en



## 10. Originalidad del archivo digital

Por el presente dejo constancia que el archivo digital que entrego a la Universidad, como parte del proceso conducente a obtener el título profesional o grado académico, es la versión final del trabajo de investigación sustentado y aprobado por el Jurado.

\_\_\_\_\_  
Firma del autor

## 11. Otorgamiento de una licencia *CREATIVE COMMONS*

Para las investigaciones que son de acceso abierto se les otorgó una licencia *Creative Commons*, con la finalidad de que cualquier usuario pueda acceder a la obra, bajo los términos que dicha licencia implica.



*El autor, por medio de este documento, autoriza a la Universidad, publicar su trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Institucional, al cual se podrá acceder, preservar y difundir de forma libre y gratuita, de manera íntegra a todo el documento.*

Según el inciso 12.2, del artículo 12º del Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales - RENATI "Las universidades, instituciones y escuelas de educación superior tienen como obligación registrar todos los trabajos de investigación y proyectos, incluyendo los metadatos en sus repositorios institucionales precisando si son de acceso abierto o restringido, los cuales serán posteriormente recolectados por el Recolector Digital RENATI, a través del Repositorio ALICIA".


## 12. Para ser verificado por la Dirección del Repositorio Institucional

Fecha de Acto de sustentación:

Huaraz,

Firma:



  
Varillas Wiliam Eduardo  
Asistente en Informática y Sistemas  
- UNASAM -

**\*Acceso abierto:** uso lícito que confiere un titular de derechos de propiedad intelectual a cualquier persona, para que pueda acceder de manera inmediata y gratuita a una obra, datos procesados o estadísticas de monitoreo, sin necesidad de registro, suscripción, ni pago, estando autorizada a leerla, descargarla, reproducirla, distribuirla, imprimirla, buscarla y enlazar textos completos (Reglamento de la Ley No 30035).

**\*\* Acceso restringido:** el documento no se visualizará en el Repositorio.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
"SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO"  
ESCUELA DE POSTGRADO

## ACTA VIRTUAL DE SUSTENTACION DE TESIS

Los miembros del Jurado de Sustentación de Tesis, que suscriben, reunidos en acto público en la Plataforma Microsoft Teams, de la Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo" para calificar la Tesis presentada por el:

Bachiller : **EDSON DESCIONAR PALACIOS ROBLES**

Título : **"INFLUENCIA DEL GRADIENTE DE COBERTURA GLACIAR DE LA CORDILLERA BLANCA EN LA BIODIVERSIDAD DE MACROINVERTEBRADOS BENTÓNICOS, 2019-2020"**

Después de haber escuchado la sustentación, las respuestas a las preguntas y observaciones finales, la declaramos:

**APROBADO CON MENSION**, con el calificativo de **\_\_DIECISIETE\_\_ (17)**

De conformidad al Reglamento General a la Escuela de Postgrado y al Reglamento de Normas y Procedimientos para optar los Grados Académicos de Maestro y Doctor, queda en condición de ser aprobado por el Consejo de la Escuela de Postgrado y recibir el Grado Académico de Maestro en **CIENCIAS E INGENIERÍA** con Mención en **GESTIÓN AMBIENTAL** a otorgarse por el Honorable Consejo Universitario de la UNASAM.

Huaraz, 19 de noviembre del 2021

Dr. Prudencio Celso Hidalgo Camarena  
PRESIDENTE

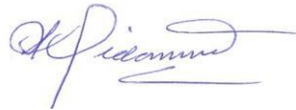
Mag. Mario Vladimir Leyva Collas  
SECRETARIO

Mag. Martín Miguel Huaman Carranza  
VOCAL

## MIEMBROS DEL JURADO

*Doctor Prudencio Celso Hidalgo Camarena*

Presidente



---

*Magister Mario Vladimir Leyva Collas*

Secretario



---

*Magister Martín Miguel Huamán Carranza*

Vocal



---

**ASESORA**

***Magister* Rosario Adriana Polo Salazar**



## AGRADECIMIENTOS

A mi familia por todo el soporte y motivación brindada para culminar cada actividad concerniente a este trabajo de investigación.

A la Msc. Rosario Polo Salazar asesoramiento incondicional en todas las etapas de mi trabajo de investigación.

A los miembros del jurado por el tiempo dedicado en la revisión del presente trabajo de investigación.

A Alberto Castañeda por el apoyo continuo en la temática de glaciares y recursos hídricos.

A Miriam Gamboa por el apoyo en la identificación taxonómica y asesoramiento metodológico.

A Hairo León, Guadalupe Heredia y Leonore Debrov por el apoyo en trabajos de campo, procesamiento e identificación.

Al Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) por promover y fomentar la investigación en el país, dando soporte científico, logístico y humano, a los nuevos y futuros científicos del país.

A mis co-asesores Katy Medina y Edwin Loarte del INAIGEM, por su disposición para absolver mis dudas, apoyo constante y, además, por permitirme conocer y trabajar con investigadores nacionales e internacionales.

Esta investigación ha sido financiada por el Concytec/ProCiencia, la Embajada Británica, el NERC y el Fondo Newton-Paulet en el marco de la convocatoria E031-2018-01-NERC “Círculos de Investigación en Glaciares”. [Contrato N°08-2019-FONDECYT], proyecto “Peruvian Glacier Retreat and its Impact on Water Security - Peru GROWS”.

## DEDICATORIA

A mi madre, mis hermanas y amigos,  
por su apoyo incondicional.





## INDICE

	<b>Página</b>
Resumen	xii
Abstract	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1-2
<b>Capítulo I</b>	
PROLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	3-5
1.1. Planteamiento y formulación del problema	3
1.2. Objetivos	3
1.3. Justificación	4
1.4. Delimitación	5
<b>Capítulo II</b>	
MARCO TEÓRICO .....	6-22
2.1. Antecedentes de investigación	6
2.2. Bases teóricas	9
2.2.1. Los glaciares y el cambio climático	9
2.2.2. Hidroecología de las cuencas glaciares	12
2.2.3. Riesgo de pérdida de la biodiversidad de macroinvertebrados ante el retroceso glaciar	19
2.3. Definición de términos	20
2.4. Hipótesis	21
2.5. Variables	22
<b>Capítulo III</b>	
METODOLOGÍA .....	23-32
3.2. Tipo de investigación	25
3.3. Diseño de la investigación	25
3.4. Selección y caracterización de puntos de muestreo	25
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	27
3.6. Plan de procesamiento y análisis estadístico de datos	30
<b>Capítulo IV</b>	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33-67
4.1. Presentación de resultados	33

4.2. Discusión	60
Conclusiones	68
Recomendaciones	70
Referencias Bibliográficas .....	71-80
Anexos	81



## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Características ambientales de los puntos de muestreo	24
<b>Tabla 2.</b> Características generales de los puntos de muestreo	26
<b>Tabla 3.</b> Métodos de análisis de laboratorio de los parámetros químicos del agua	29
<b>Tabla 4.</b> Área y porcentaje de cobertura glaciar por punto de muestreo	33
<b>Tabla 5.</b> Pruebas paramétricas para la comparación de parámetros fisicoquímicos transformados según época de muestreo y gradiente de cobertura glaciar	41
<b>Tabla 6.</b> Composición de taxas a nivel género de macroinvertebrados bentónicos en las dos temporadas de muestreo	47
<b>Tabla 7.</b> Estadísticos descriptivos de los indicadores de biodiversidad y comparación de datos agrupados por época de muestreo y GCG	49
<b>Tabla 8.</b> ANOSIM de dos vías para la abundancia relativa de macroinvertebrados según la época de muestreo y el gradiente de cobertura glaciar	51
<b>Tabla 9.</b> SIMPER de la abundancia relativa de macroinvertebrados según el gradiente de cobertura glaciar	52
<b>Tabla 10:</b> Coeficiente de determinación de las variables relacionadas significativamente con los indicadores de biodiversidad	57
<b>Tabla 11.</b> Ficha de evaluación de la estabilidad del cauce-índice de Pfankuch	85
<b>Tabla 12.</b> Resultados de mediciones de parámetros fisicoquímicos en las dos épocas de muestreo	87
<b>Tabla 13.</b> Reporte de laboratorio del análisis de aniones, cationes, nutrientes y carbono disuelto en época seca	89
<b>Tabla 14.</b> Reporte de laboratorio del análisis de aniones, cationes, nutrientes y carbono disuelto en época húmeda	90
<b>Tabla 15.</b> Reporte de laboratorio del análisis de turbiedad en época seca	91
<b>Tabla 16.</b> Reporte de laboratorio del análisis de turbiedad en época húmeda	91

<b>Tabla 17:</b> Estadísticos descriptivos de los parámetros fisicoquímicos del agua	93
<b>Tabla 18.</b> Abundancia de taxas de macroinvertebrados bentónicos en la época seca	95
<b>Tabla 19.</b> Abundancia de taxas de macroinvertebrados bentónicos en la época húmeda	96
<b>Tabla 20:</b> Índices de diversidad local en los once puntos de muestreo evaluados y las dos épocas de muestreo	99
<b>Tabla 21:</b> Correlaciones de Pearson entre los parámetros fisicoquímicos y los indicadores de biodiversidad	101
<b>Tabla 22:</b> Correlaciones de Pearson entre las variables ambientales complementarias y los indicadores de biodiversidad	102
<b>Tabla 23.</b> Resultados del Análisis de Componentes Principales (ACP) de los parámetros fisicoquímicos	104
<b>Tabla 23.</b> Resultados del Análisis de Redundancia (ARD) de todos los parámetros fisicoquímicos y las abundancias relativas transformadas	105
<b>Tabla 24.</b> Resultados del Análisis de Redundancia (ARD) de los parámetros fisicoquímicos seleccionados y las abundancias relativas transformadas	106

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Modelo conceptual simplificado de los efectos de las corrientes de agua glaciario en los organismos acuáticos 17
- Figura 2.** Imágenes del procedimiento en campo y laboratorio del estudio. A. Muestreo de macroinvertebrados con maya Surber. B. Depósito de muestra colectada en frascos de plástico. Separación de individuos en placa sectada. D. Observación de individuos a través de estereoscopio para su identificación. 30
- Figura 3.** Área y porcentaje de cobertura glaciario libre y cubierto de detrito asociada cada punto de muestreo 34
- Figura 4.** Área y porcentaje de retroceso glaciario asociado a cada punto de muestreo entre los años 2019-1962/1975 35
- Figura 5.** Parámetros fisicoquímicos del agua a lo largo de un gradiente de cobertura glaciario. A. Temperatura, B. Turbiedad, C. Conductividad eléctrica, D. Índice de Pfanckuch, E. Potencia de hidrógeno, F. Oxígeno disuelto 36
- Figura 6.** Concentración de carbono disuelto y nutrientes a lo largo de un gradiente de cobertura glaciario. A. Carbono orgánico disuelto, B. Carbono inorgánico disuelto, C. Nitrógeno total. D. Fósforo total 38
- Figura 7.** Concentración de aniones lo largo de un gradiente de cobertura glaciario. A. Sulfatos, B. Nitratos, C. Cloruros, D. Fluoruros 39
- Figura 8.** Concentración de cationes lo largo de un gradiente de cobertura glaciario. A. Calcio, B. Potasio, C. Magnesio, D. Sodio, E. Silicio, F. Zinc. 40
- Figura 9.** Comparación de parámetros fisicoquímicos con diferencias significativas en el GCG. A. Turbiedad, B. Temperatura, C. Oxígeno disuelto, D. Índice de Pfanckuch, Sodio, F. Silicio. Los valores representan la media en cada categoría, las letras representan los grupos de acuerdo a la prueba de comparaciones Tukey ( $p < 0.05$ ) 42
- Figura 10.** Análisis de componentes principales (ACP) de las variables fisicoquímicas del agua en once puntos de muestreo. 44

<b>Figura 11.</b> Composición de macroinvertebrados bentónicos a nivel familia analizadas de acuerdo a la época de muestreo	45
<b>Figura 12.</b> Composición de macroinvertebrados bentónicos a nivel familia analizadas de acuerdo al gradiente de cobertura glaciar	46
<b>Figura 13.</b> Comparación de los indicadores de diversidad Alpha en el GCG. A. densidad, B. riqueza específica, C. riqueza rarefactada, D. riqueza de Margalef, E. Índice de Shannon_H. F. Índice Alpha de Fisher. Los valores representan la media en cada categoría, las letras representan los grupos de acuerdo a la prueba de comparaciones Tukey ( $p < 0.05$ )	50
<b>Figura 14.</b> Análisis multidimensional no paramétrico de las estaciones de muestreo a partir de las abundancias relativas de macroinvertebrados	52
<b>Figura 15.</b> Modelos de regresión polinómica y correlaciones de Pearson entre la cobertura glaciar y los indicadores de biodiversidad	54
<b>Figura 16.</b> Modelos de regresión lineal y correlaciones de Pearson entre la diferencia de cobertura glaciar entre puntos y el índice de disimilitud de Bray-Curtis obtenida de las abundancias relativas promedio transformadas	55
<b>Figura 17:</b> Análisis de Redundancia de las abundancias relativas con respecto a las variables ambientales. A eje 1 vs eje 2. B eje 1 vs eje 3	59
<b>Figura 18.</b> Mapa de ubicación de puntos de muestreo	83
<b>Figura 19.</b> Fotografías de los puntos de muestreo evaluados	110
<b>Figura 20.</b> Fotografías de los macroinvertebrados identificados	112

## RESUMEN

El retroceso glaciar y sus efectos en los sistemas fluviales están poniendo en riesgo la biodiversidad regional de macroinvertebrados bentónicos debido a la posible extinción de especies especializadas y endémicas. En el Perú, son pocos los estudios relacionados al impacto del retroceso glaciar sobre los ecosistemas acuáticos, por ello, la presente investigación buscó relacionar el gradiente de cobertura glaciar y la biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos en la cordillera Blanca. Se colectaron muestras de macroinvertebrados y se analizaron parámetros fisicoquímicos de agua en dos temporadas del año, seca y húmeda, en once puntos distribuidos en las unidades hidrográficas Parón, Huaytapallana y Llanganuco; posteriormente, se calcularon los índices de diversidad Alpha y Beta. Se encontró menor riqueza y diversidad local en puntos asociados a una cobertura glaciar alta; sin embargo, las diferencias entre cobertura baja y media no fueron estadísticamente significativas. El gradiente de cobertura glaciar explicó el 74% de la variabilidad de la riqueza específica, 79% de la riqueza rarefactada, el 81% del índice de Margalef, el 62% de la diversidad de Shannon-Wiener y el 81% del de la diversidad Fisher-Alpha. Asimismo, las diferencias de cobertura glaciar entre puntos de muestreo explicó el 43% de la variabilidad del índice de disimilitud de Bray-Curtis. La temperatura y la estabilidad del cauce explicaron mejor la diversidad local. El análisis de redundancia mostró que las abundancias de *Anomalocosmoecus* sp., *Limonia* sp., *Paraheptagya* sp. y Orthocladinae sp1. se relacionaron con bajas temperaturas, altas concentraciones de carbono inorgánico y altos niveles de inestabilidad. Se concluye que la variación de la cobertura glaciar en las unidades hidrográficas estudiadas influye en la biodiversidad de macroinvertebrados, lo cual tiene implicancias importantes en acciones de conservación de ecosistemas de montaña en un contexto de cambio climático.

**Palabras clave:** Cobertura glaciar, macroinvertebrados bentónicos, biodiversidad, cordillera Blanca

## ABSTRACT

Glacial retreat and its effects on river systems are risking the regional benthic macroinvertebrates biodiversity due to possible extinction of specialized and endemic species. In Peru, there are few studies related to the impact of glacial retreat on aquatic ecosystems; therefore, the present research sought to relate the glacier cover gradient and the benthic macroinvertebrates biodiversity in the Cordillera Blanca. Macroinvertebrate samples were collected and water physicochemical parameters were analyzed in two seasons of the year, dry and wet, in eleven points distributed in the Parón, Huaytapallana and Llanganuco hydrographic units; subsequently, Alpha and Beta diversity were calculated. Lower local richness and diversity was found in points associated with high glacier cover; however, differences between low and medium cover were not statistically significant. Glacier cover gradient explained 74% of the variability of specific richness, 79% of rarefacted richness, 81% of the Margalef richness index, 62% of Shannon-Wiener diversity index and 81% of the Fisher-Alpha diversity index. Physicochemical variables that best explained the local diversity indices were temperature and channel stability. Redundancy analysis showed that the abundances of *Anomalocosmoecus* sp., *Limonia* sp., *Paraheptagya* sp. and Orthocladinae sp1. were related to low temperatures, high concentrations of inorganic carbon and high levels of instability, features associated with points with higher glacier cover. The research concluded that the variation of glacier cover in the hydrographic units studied influences on macroinvertebrates biodiversity, which has important implications for conservation actions in mountain ecosystems in a context of climate change.

**Key Words:** Glacier cover, benthic macroinvertebrates, biodiversity, Cordillera Blanc



## INTRODUCCIÓN

Uno de los indicadores y evidencia de cambio climático global es el retroceso acelerado de los glaciares en zonas tropicales (Burns & Nolin, 2014; Hanshaw & Bookhagen, 2014), el cual tiene efectos sobre el hombre y los ecosistemas debido al rol esencial de los glaciares en sistemas hidrológicos en cuencas andinas (Baraer et al., 2012). El inventario nacional de glaciares del año 2018, elaborado por Instituto Nacional de Investigación de Glaciares y Ecosistemas de Montaña (2018), menciona que la tasa de retroceso glaciar en la cordillera Blanca es de 4.97 km<sup>2</sup>/año; asimismo, un estudio reciente, muestra que entre los años 1930 y 2016 la cordillera Blanca ha perdido el 46% de su masa glaciar (Silverio & Jaquet, 2017). La desglaciación trae consigo, en primera instancia, un aumento de la escorrentía superficial y la formación de lagunas. Sin embargo, este comportamiento solo se mantiene hasta alcanzar el caudal pico, luego de ello, la escorrentía glaciar tenderá a disminuir (Mark & Mckenzie, 2007), ocasionando la disminución de la disponibilidad del recurso hídrico, el cual es muy importante en las actividades socioeconómicas de las zonas rurales y urbanas, y los procesos ecológicos de los ecosistemas de montaña (Hanshaw & Bookhagen, 2014). En referencia a lo anterior, varias investigaciones se han centrado en determinar el impacto del retroceso glaciar en la cordillera Blanca sobre la escorrentía superficial (Baraer et al., 2012; Carey et al., 2017; Mark et al., 2005; Mark & Seltzer, 2003). Sin embargo; son pocos los estudios que nos permiten conocer las consecuencias del retroceso glaciar sobre los ecosistemas acuáticos y terrestres.

Referente a ello, estudios realizados en los Alpes y el ártico muestran que a medida que un glaciar retrocede y su influencia a la escorrentía superficial disminuye, trae consigo la modificación geomorfológica de los causes, debido a la disminución de la erosión y reelaboración de sedimentos proglaciares (Fell et al., 2018). Asimismo, se modifican los parámetros fisicoquímicos del agua, como la temperatura, la turbiedad (L. E. Brown, Hannah

et al., 2007; George et al., 2015). Estos cambios afectan la composición, estructura y función de las comunidades de macroinvertebrados bentónicos debido a la disminución de filtros ambientales en los que sólo especies especializadas a un alto grado de estrés ambiental (bajas temperaturas, alta turbidez y poca estabilidad del cauce; Ibarra, 2016) pueden progresar.

## Capítulo I

### PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

#### 1.1. Planteamiento y formulación del problema

En la región tropical son pocos los estudios enfocados a predecir el impacto del retroceso glaciar sobre las comunidades acuáticas de macroinvertebrados bentónicos. Los estudios más rigurosos se están realizando en los glaciares de la Cordillera Ecuatorial de los Andes (Andino et al., 2015; Espinoza-Barrera, 2014; Jacobsen et al., 2010), siendo escaso el conocimiento del comportamiento espacio-temporal de comunidad de macroinvertebrados en las cordilleras glaciares del Perú. Es por ello, que la presente investigación buscó evidenciar la influencia del gradiente de cobertura glaciar (GCG) de las unidades hidrográficas de Parón, Huaytapallana y Llanganuco, ubicadas en la Cordillera Blanca, sobre la biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos que habitan corrientes de agua glaciares en estas zonas. La información generada a la postre permitirá la planificación de estrategias e instrumentos de monitoreo por parte de los centros de investigación y las comunidades campesinas aledañas al Parque Nacional Huascarán (PNH), con el propósito de detectar cambios del aporte glaciar a las corrientes de agua y de esta forma poder tomar acciones como parte de las medidas de adaptación frente al cambio climáticos que enfrenta nuestra región.

#### 1.2. Objetivos

##### General

Evidenciar la influencia del gradiente de cobertura glaciar en la cordillera Blanca en la biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos, 2019-2020

##### Específicos

- Determinar el gradiente de cobertura glaciar en cuencas glaciares seleccionadas para el estudio.

- Analizar los parámetros fisicoquímicos de corrientes de agua en un gradiente de cobertura glaciar.
- Analizar los indicadores de biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos en corrientes de agua en un gradiente de cobertura glaciar.
- Analizar la influencia del gradiente de cobertura glaciar y los parámetros fisicoquímicos sobre los indicadores de macroinvertebrados bentónicos.
- Analizar la influencia del gradiente de cobertura glaciar y los parámetros fisicoquímicos en los patrones de distribución de macroinvertebrados bentónicos.

### 1.3. Justificación

El retroceso de los glaciares conlleva cambios en los ecosistemas altoandinos, entre ellos, la comunidad de macroinvertebrados bentónicos, que son de gran importancia en procesos ecológicos, como el flujo de energía en la cadena trófica y el ciclo de nutrientes; por lo que la modificación de la composición de comunidades de macroinvertebrados bentónicos pueden traer consigo cambios en otros componentes del ecosistema (Covich, Palmer, & Crowl, 1999). Es por ello, que la presente investigación estudió la estructura de macroinvertebrados bentónicos en corrientes de agua directamente alimentados por glaciares y analizó el efecto de la gradiente de cobertura glaciar en la biodiversidad de estos organismos. Asimismo, es pertinente mencionar que la presente investigación se enmarca dentro de las políticas ambientales del Perú, específicamente en el eje de política 1 denominado “Conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y de la diversidad biológica”, donde se menciona que “el estado busca (a) Impulsar la conservación de la diversidad de ecosistemas, especies y recursos genéticos, y el mantenimiento de los procesos ecológicos esenciales de los que depende la supervivencia de las especies, (b) Impulsar el enfoque ecosistémico y la gestión sostenible de la diversidad biológica como elemento transversal en los planes integrados de

gestión de recursos naturales, de manejo de cuencas y de ordenamiento territorial” (Ministerio del Ambiente, 2009).

## **1.4. Delimitación**

### **1.4.1. Delimitación espacial**

La presente investigación se desarrolló en corrientes de agua de las unidades hidrográficas de Parón, Llanganuco y Huaytapallana.

### **1.4.2. Delimitación temporal**

El presente estudio se realizó en los años 2019-2020, tomando muestras en dos épocas del año: época de lluvia y época de estiaje

## Capítulo II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de investigación

Durante las dos últimas décadas los esfuerzos de conocer la respuesta de los sistemas acuáticos ante el retroceso glaciar se han centrado en los glaciares templados del norte. El primer modelo cualitativo de zoobentos en ríos glaciares fue propuesto por Milner & Petts (1994), en el que se explica la estructura macroinvertebrados bentónicos en función de la distancia a la lengua glaciar río abajo y el tiempo de desglaciación, los cuales están relacionados con cambios en la temperatura del agua y la estabilidad del cauce. Este modelo señala que a medida que decrece la influencia glaciar en una corriente de agua (mayor distancia al glaciar o tiempo de desglaciación) las condiciones ambientales se vuelven menos adversas (mayor temperatura y mayor estabilidad del cauce), en consecuencia, el número de taxas de macroinvertebrados y biomasa bentónica aumenta. Según el modelo planteado por Milner & Petts (1994), la composición de macroinvertebrados en ríos glaciares depende de la temperatura del agua. A temperaturas menores de 2°C, muy cerca de la lengua glaciar, la fauna bentónica está compuesta principalmente por quironómidos del género *Diamesa* los que se han adaptado morfológicamente a cambios constantes del cauce. Entre 2 y 4°C otros géneros de la subfamilia Diamesinae pueden aparecer, así como la subfamilia Orthoclaadiinae. Por último, a temperaturas mayores a 4°C se pueden encontrar a las primeras taxas de las clases Ephemeropteras (Beatidae) y Plecopteras (Chloroperlidae, Nemouridae) que aumentan en diversidad a medida que influencia glaciar disminuye junto con otros géneros de Tricóptera y Díptera. Sin embargo, el modelo aclara que los patrones propuestos pueden ser discontinuos a causa de otros factores ambientales como la hidrología, sedimentología (tamaño y carga de

sedimentos), geomorfología (cambios en pendientes y ancho del valle) y biogeografía (sucesión de la vegetación).

En las cuencas glaciares, las diferentes fuentes de agua (hielo, nieve, precipitación y agua subterránea) generan heterogeneidad de las condiciones fisicoquímicas de los ríos, lo que está fuertemente vinculado con la biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos. Es por ello, que se han realizado estudios con el fin de clasificar las corrientes de acuerdo al aporte principal de agua. Entre los primeros estudios encontramos a los realizados por Steffan (1971) y Ward (1994) que clasificaron cualitativamente a las corrientes Alpinas en kryal, rhithral y krenal, donde las corrientes Kryal están alimentadas por deshielo glaciar, los rhithral por deshielo de nieve y las krenal por aguas subterráneas. Sin embargo, debido a necesidad de contar con información de mayor resolución; Brown et al. (2009), propusieron una clasificación de ríos Alpinos denominada ARISE (*Alpine River and Stream Ecosystems*), basada en estudios en los años 2002 y 2003 en la cuenca Taillon-Gabietous ubicada en los Pirineos franceses, en la que se validó la clasificación ARISE de 9 categorías (basada en la proporción de fuente de agua), con datos cuantitativos de parámetros fisicoquímicos y de biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos. La clasificación ARISE mostró ser una herramienta importante de gestión para conservación de especies vulnerables a las actividades antropogénicas y los efectos del cambio climático.

En el caso de zonas tropicales, es poco lo que se conoce sobre la estructura de la comunidad de macroinvertebrados y su respuesta frente al retroceso glaciar (Ward, 1994). Los estudios se han centrado en los glaciares de trópicos internos, presentes en el estratovolcán Antisana ubicado en la Cordillera Real-Ecuador. Por ejemplo, Jacobsen et al., (2010) evaluó el ajuste del patrón longitudinal de macroinvertebrados de las corrientes del glaciar Crespo, con respecto al modelo observado en los glaciares templados; en las que la temperatura y la

estabilidad del cauce son factores determinantes. El estudio evidenció la dominancia de la familia Chironomidae en todos puntos de muestreo; sin embargo, la subfamilia Diamesinae se presentó de forma escasa o ausente cerca de la lengua glaciar, lo que es contrario al modelo de comparación. En cambio, en zonas proglaciares, se encontró a la sub familia Podomidae y en sitios con bajas temperaturas y alta inestabilidad predominó otro género de la subfamilia Diamesinae (probablemente *Paraheptagyia*). Al margen de las diferencias en la estructura de la comunidad de macroinvertebrados (la cual es explicada por la biogeografía neotropical) el patrón longitudinal se ajusta en gran parte al modelo desarrollado en los glaciares templados del norte.

En la Cordillera Blanca, los estudios de macroinvertebrados bentónicos se han enfocado en ecosistemas acuáticos contaminados por drenajes ácidos de roca (DAR), los que se originan por la oxidación de material sedimentario descubierto por el retroceso glaciar (George et al., 2015; Loayza-Muro et al., 2010. 2014). Por ejemplo, el estudio elaborado por George et al. (2015) evaluó la respuesta de la composición de macroinvertebrados a la especiación química de metales pesados en ríos afectados por DAR, logrando identificar taxas indicadoras y sensibles. Además, el estudio contribuyó con una línea base de macroinvertebrados bentónicos en 7 zonas de la Cordillera Blanca (Cojup, Ishinca, Llaca, Llanganuco, Parón, Quilcayhuanca y Ulta) encontrando 18 taxas de macroinvertebrados, siendo los insectos los más abundantes. Las órdenes reportadas por este estudio fueron Diptera (Chironomidae, Simuliidae, Tabanidae, Tipulidae, Ceratopogonidae, Blephariceridae y Dolichopodidae), Ephemeroptera (Baetidae y Heptageniidae), Plecoptera (Perlodidae), Trichoptera (Hydrobiosidae y Limnephilidae) y Coleoptera (Elmidae y Scirtidae). Además, el estudio registró taxas de las clases Oligochaeta, Hirudinea, y Amphipoda. Las familias Baetidae, Heptageniidae, Chironomidae y Elmidae fueron las taxas dominantes numéricamente en la mayoría de los sitios,



## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1. Los glaciares y el cambio climático

Los glaciares son masas de hielo o nieve perenne estables o que fluyen pendiente abajo en un lecho de roca y están rodeados por diferentes tipos de elementos topográficos como laderas y cumbres adyacentes. La permanencia de un glaciar está en función de las ganancias de nieve ocurridas en las partes altas (zona de acumulación) y las pérdidas debido a la fusión en la parte terminal del glaciar (zona de ablación; Rivera et al., 2018).

Los glaciares se encuentran en diferentes tipos de ecosistemas (océanos, valles, montañas) y estos pueden ser clasificados de acuerdo a su morfología en glaciares de valle, glaciares de pie de monte, glaciares de circo, glaciares de cráter, glaciares de montaña, glaciares en conos volcánicos activos, plataformas de hielo flotantes entre otros; asimismo, se pueden clasificar de acuerdo al tipo de cobertura glaciar en glaciares limpios, cubiertos y rocosos (Rivera et al., 2018).

En la Cordillera Blanca la mayor cantidad de glaciares son de tipo montaña que se localizan en las partes altas de las cordilleras y se caracterizan por tener una lengua glaciar pequeña y una zona de acumulación más ancha que larga y bien definida (Rivera et al., 2018), En menor cantidad se encuentran los glaciares cubiertos, los cuales se encuentran cubiertos total o parcialmente por una capa de detritos que lo aísla del medio exterior y que en algunos casos es originada de un glaciar limpio a través de un proceso de retroceso, adelgazamiento o recubrimiento creciente (Croce & Milana, 2002).

Los glaciares también se pueden clasificar según su régimen térmico en glaciares tropicales, templados y polares. En este estudio nos enfocaremos en los glaciares tropicales que se encuentran los que se encuentran entre el trópico de capricornio y de Cáncer ( $23^{\circ}26'13.3''$  N;  $23^{\circ}26'13.3''$  S) dentro de la zona de convergencia intertropical (ITCZ; Gordon

et al., 2015; Veettil & Kamp, 2019). El 99% de los glaciares tropicales se localiza en Sudamérica, siendo Perú el país con mayor cantidad de glaciares tropicales en todo el mundo (68.6 %), seguido de Bolivia (22.7 %) y Ecuador (5.3 %) (Veettil & Kamp, 2019). Los glaciares tropicales se pueden dividir a su vez en dos grandes grupos de acuerdo a las condiciones climáticas de la zona, glaciares de trópicos interiores y glaciares de trópicos exteriores (Kaser & Osmaston, 2002). Los glaciares de trópicos interiores son los que se encuentran en latitudes bajas (Ecuador, Venezuela y Colombia) y se caracterizan por no presentar estacionalidad marcada de las precipitaciones (Veettil et al., 2014), por ende, la ablación y la acumulación se produce en todo el año; en cambio, los glaciares de trópicos exteriores son los que se encuentran en latitudes medias (Perú, Bolivia y Chile) donde si existen una época seca y húmeda, produciéndose la mayor acumulación de nieve en la época húmeda (Veettil et al., 2016).

Los glaciares tropicales son uno de los componentes de la criósfera que más han sufrido el efecto del cambio climático en las últimas décadas (Francou, 2013), por lo que son considerados excelentes indicadores de cambio climático (Kaser & Osmaston, 2002). La gran sensibilidad a los cambios del clima se debe a las condiciones climáticas específicas de cada zona, las cuales generan las condiciones para la fusión de hielo en la zona de ablación durante todo el año, generando un cambio rápido en la posición de la zona terminal del glaciar como respuesta a los cambios de balance de masa, ocasionada a su vez por los cambios del clima (Rabatel et al., 2013). El cambio climático impacta de diferente manera a los glaciares tropicales dependiendo de la región geográfica y su clima, así como otros factores como la topografía (altitud, orientación y pendiente; Veettil & Kamp, 2019). Asimismo, muchos estudios remarcan la influencia de los El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y La Oscilación Decadal del Pacífico (DOP) en el retroceso glaciar en los Andes (Veettil et al., 2016; Veettil & Kamp, 2019).

La Cordillera Blanca es la cadena montañosa nevada más extensa de la zona tropical (180 km), en ella se encuentran 27 picos glaciares sobre los 6.000 m s.n.m. y 200 picos sobre los 5.000 m s.n.m. (Kaiser et al., 1995; Kaser & Osmaston, 2002). Varios estudios han reportado un acelerado retroceso en los glaciares de la Cordillera Blanca en las últimas décadas (Racoviteanu, Arnaud, Williams, & Ordoñez, 2008; Burns & Nolin, 2014; Silverio & Jaquet, 2005, 2017; Seehaus et al., 2019). Según el Inventario Nacional de Glaciares elaborado por el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (2018) para el año 2016 la Cordillera Blanca presentaba una superficie glaciar de 448.8 km<sup>2</sup> observando una reducción del 38.2 % con respecto al año 1962. Otro estudio desarrollado por Silverio & Jaquet (2017), menciona que entre los años 1930 y 2016 la Cordillera Blanca perdió el 46 % de cobertura glaciar, con una tasa de retroceso de 23 km<sup>2</sup> por año en el año 2016. Este retroceso tiene efectos directos sobre la escorrentía glaciar, donde en primera instancia del retroceso se ha observado el aumento de las descargas anuales, aumentando la disponibilidad de agua en las cuencas; sin embargo, este proceso no persistirá en el tiempo, ya que al alcanzar el punto crítico, el aporte glaciar disminuirá afectando la disponibilidad de agua (Pouyaud et al., 2005) especialmente en época seca, donde la escorrentía glaciar amortigua los efectos producidos por las bajas precipitaciones (Kaser et al., 2003). Según Baraer et al. (2012), siete cuencas ubicadas en la cordillera blanca ya han cruzado el punto crítico de retroceso para el año 2012.

La disminución de la escorrentía en la Cordillera Blanca genera preocupación ya que esta abastece a las comunidades que se ubican en la Zona de Amortiguamiento del PNH (Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado, 2011). Los cuales utilizan el agua para sus necesidades básicas y actividades económicas de sustento como la ganadería y agricultura (Racoviteanu et al., 2008), amenazando la seguridad alimenticia de la población (Carey et al., 2017). Asimismo, el agua proveniente de los glaciares es utilizada para la

producción de energía eléctrica en el Cañón del Pato y suministra agua para proyectos agrícolas e irrigación extensiva (Carey et al., 2017; Kaser et al., 2003).

Por otro lado, los ecosistemas de montaña también están siendo afectados por el retroceso glaciar de la cordillera blanca, es el caso de los bofedales, los cuales son muy sensibles a cambios en la escorrentía glaciar, por lo que están disminuyendo en su cobertura en algunas zonas (Polk et al., 2017). Es importante mencionar que todavía son muy escasas las investigaciones enfocadas a la respuesta de los ecosistemas al retroceso de la cordillera Blanca.

## **2.2.2. Hidroecología de las cuencas glaciares**

### **2.2.2.1. Corrientes de agua Kryal**

#### **a. Condiciones ambientales**

Las corrientes Kryal son corrientes de agua glaciares que emergen directamente de la lengua glaciar y que se caracterizan por presentar los siguientes parámetros de calidad: bajas temperaturas ( $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), altas concentraciones de partículas suspendidas (turbidez  $> 30$  UNT) y bajos valores de conductividad ( $<10\ \mu\text{Scm}^{-1}$ ; Cauvy-Fraunié, 2014; Milner & Petts, 1994; Ward, 1994). La temperatura en las corrientes de agua glaciares disminuye a medida que se aleja del glaciar y pierde altitud, a causa de la exposición a las condiciones meteorológicas, la reducción de la influencia de la temperatura de la fuente inicial y la contribución de otras fuentes de agua (Ward, 1994; Wehren et al., 2010).

Las altas concentraciones de partículas suspendidas son causados por el arrastre de sedimentos finos generados por el flujo de agua subglaciar que erosionan la roca madre (Wehren et al., 2010). Asimismo, Wehren et al. (2010) menciona que esporádicamente, los sedimentos suspendidos pueden derivar de la reincorporación de sedimento acumulado transitoriamente a lo largo de los cauces, durante los meses de descargas y precipitaciones altas.

La conductividad eléctrica de las corrientes de deshielo glaciar generalmente es muy baja (Cauvy-Fraunié, 2014); sin embargo, esta puede aumentar debido a la acumulación de solutos sobre el glaciar, provenientes de la atmósfera (precipitación, niebla, nieve y deposición seca) como las partículas de aerosoles (p. ej. amonio, calcio, ion hidrógeno, nitratos, sulfatos, hollín, compuestos orgánicos, minerales insolubles, metales traza, sales de mar) y gases (p. ej. ácido clorhídrico, ácido nítrico, peróxido de hidrógeno; Cauvy-Fraunié, 2014; Wehren et al., 2010; Zobrist, 2010). Asimismo, la conductividad eléctrica depende de procesos de meteorización química del lecho de roca, que se produce en la zona subglaciar (flujo en la interfase hielo-roca; Brown, Milner, & Hannah, 2003).

Por otro lado, los cauces de las corrientes de agua Kryal son caracterizados por su baja estabilidad, debido principalmente a la acción combinada de la variabilidad hidrológica y la gran cantidad de sedimentos (detritos acumulados por la erosión glaciar) que se transportan y acumulan temporalmente en los cauces de los ríos (Gurnell et al., 2000). Asimismo, los eventos de descargas altas socavan y transportan los sedimentos acumulados en el lecho del río provocando su inestabilidad (Cauvy-Fraunié, 2014), Cabe mencionar que la presencia de lagunas proglaciares pueden amortiguar el efecto de las variaciones hidrológicas manteniendo la estabilidad de los cauces río abajo (Milner & Petts, 1994).

Los caudales de corrientes de origen glaciar (Kryal) se caracterizan por tener una variabilidad temporal muy alta, y esta es controlada principalmente por la variación del deshielo a una escala de tiempo interanual, estacional y diurna (Jacobsen, Andino, et al., 2014) A una escala de tiempo interanual (de pocos años a siglos), la variación total de la escorrentía de deshielo glaciar depende de la acumulación nieve, deshielo y liberación de agua, en otras palabras, depende de las fluctuaciones del balance de masa (Kaser, 2001) que a su vez está determinada por la variación de las condiciones climáticas (temperatura y regímenes de

precipitación), en este sentido las variaciones interanuales guardan una estrecha relación con las tendencias climáticas globales como el cambio climático y las fluctuaciones climáticas regionales (los fenómenos ENSO; Stahl et al., 2008). En una escala estacional, la escorrentía glaciar en zona templadas presenta caudales pico en verano a causa de una mayor fusión del glaciar y caudales mínimos en invierno donde existe menos fusión y el glaciar acumula la mayor cantidad de precipitaciones en fase sólida (Hannah et al., 1999; Milner et al., 2009). Sin embargo, la variabilidad puede ser interrumpida por eventos de precipitación episódica produciendo una mayor variación del régimen de descargas (Cauvy-Fraunié, 2014). En la zona tropical la dinámica estacional de la escorrentía glaciar es distinta a los glaciares templados y a su vez existente diferencias entre glaciares de trópicos externos e internos. En los glaciares de trópicos externos la fusión glaciar ocurre durante todo el año y la variabilidad es controlada principalmente por el régimen de precipitación, presentándose una época húmeda (verano en el hemisferio sur), donde se produce la mayor acumulación de nieve y a su vez la mayor fusión glaciar; y la época de seca (invierno en el hemisferio sur) o estiaje donde las precipitaciones son mínimas al igual que la fusión glaciar (Cauvy-Fraunié, 2014). Por otro lado, en los trópicos internos, no existen patrones de descarga estacional debido a que la ablación ocurre en todo el año y no se presenta estacionalidad de precipitación y temperatura (Favier et al., 2008). En la Cordillera Blanca la ablación glaciar en época húmeda es 33 % mayor que en época seca, debido principalmente a la gradiente vertical humedad presente en la superficie glaciar que altera el flujo de calor latente y provee mayor energía para la fusión glaciar (Mark & Seltzer, 2003).

En la escala diurna la escorrentía glaciar está controlada por los ciclos diurnos de temperatura (derretimiento diurno y el congelamiento nocturno; Hannah et al., 2000; Stream et al., 2014), produciéndose las descargas más altas durante la tarde (Jacobsen, Cauvy-fraunie, et

al., 2014). Episódicamente, entradas de magnitudes altas como la precipitación y desbordamientos de almacenamientos internos pueden dominar los flujos de corrientes de agua (Milner et al., 2009).

Es importante señalar que la alta variación de la escorrentía glaciar genera a su vez fluctuaciones temporales de las otras condiciones fisicoquímicas antes mencionadas, como el transporte de sedimentos, la temperatura del agua, la composición química y la estabilidad del cauce en múltiples escalas temporales (Cauvy-Fraunié, 2014).

Por lo mencionado anteriormente, se puede inferir que debido a las condiciones ambientales adversas por las que se caracteriza las corrientes Kryal (baja temperaturas y conductividad del agua, baja estabilidad del cauce y alta turbidez del agua) y la alta variabilidad temporal de los caudales de corrientes glaciares, la vida acuática va a ser determinada significativamente por estos factores.

#### **b. Condiciones fisicoquímicas limitantes y su carácter adverso para la vida acuática**

Debido a la dureza de las condiciones ambientales descritas en la sección anterior, las comunidades acuáticas que habitan las corrientes de agua alimentadas por glaciares (cerca de la lengua glaciar), presentan una riqueza local y diversidad muy baja para todos los grupos taxonómicos como los microorganismos, algas y macroinvertebrados (Cauvy-Fraunié, 2014). En los cauces de ríos glaciares es común encontrar en las superficies de las rocas desnudas una matriz orgánica compuesta de microorganismos heterotróficos (p. ej. bacterias, virus, protistas; Rott, Cantonati, Füreder, & Pfister, 2006) que generan su energía a partir de fuentes de carbono secundaria. Asimismo, en dicha matriz se encuentran algas (diatomeas), que junto a los microorganismos forman lo que se denomina *biofilm* bentónico (Milner et al., 2009), el cual cumple un rol importante en el reciclaje de nutrientes y es fuente de energía para la zoofauna bentónica de ecosistemas acuáticos fríos (Hodson et al., 2008), especialmente en corrientes

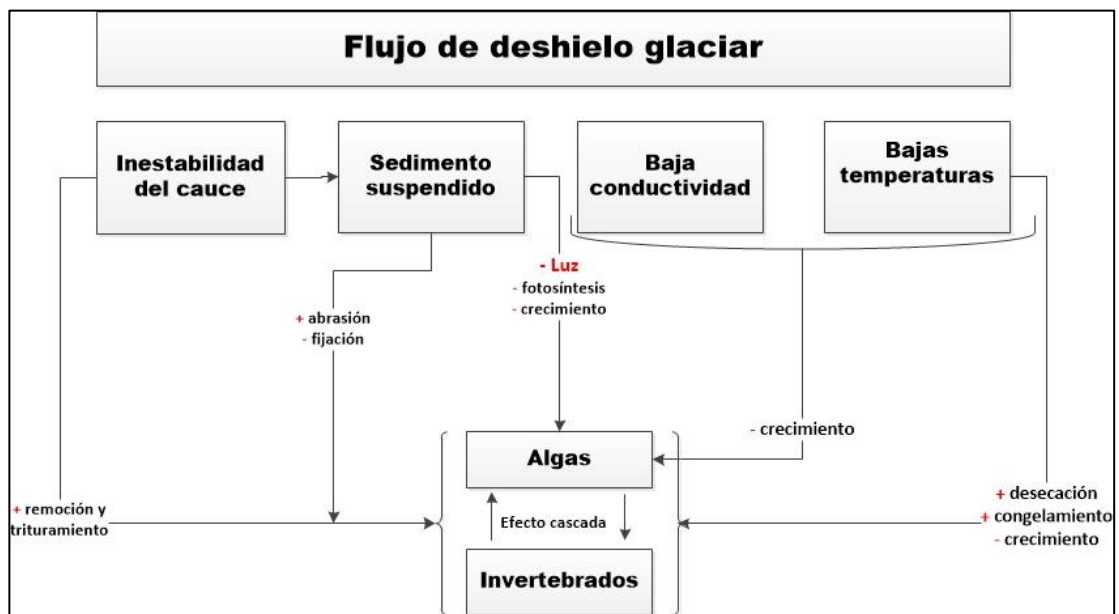
donde no existe sombreado por arboles (Rott et al., 2006) o donde la fuente de sedimentos orgánicos es escasa debido a la poca presencia de vegetación ribereña y en las partes altas (Cauvy-Fraunié, 2014; Milner & Petts, 1994).

Sin embargo, el progreso de estos ecosistemas acuáticos puede ser limitados por varios factores abióticos como la cantidad de sedimento suspendido que limita la incidencia de luz solar inhibiendo la fotosíntesis y el crecimiento de algas (Rott et al., 2006). Asimismo, Milner et al. (2009) y Cauvy-Fraunié (2014), mencionan que el sedimento suspendido incrementa la abrasión de organismos pequeños afectando la capacidad de fijación al sustrato de macroinvertebrados y algas, así como restringiendo a los organismos filtradores. Otro factor limitante es la temperatura del agua (Brown et al., 2005), las cuales se caracterizan por tener valores bajos (temperatura máxima  $<2^{\circ}$  C), lo que afecta la velocidad de la tasa de crecimiento de productores primarios (Uehlinger et al., 2010), disminuye la actividad microbiana y afecta la tasa de descomposición, por ende tiene una gran implicancia en la generación de alimentos para los macroinvertebrados bentónicos (Rott et al., 2006), teniendo implicancias en la abundancia y riqueza de especies (Uehlinger et al., 2010).

La conductividad eléctrica también cumple un papel importante como limitante, debido a que los organismos necesitan concentraciones de iones mínimas para su desarrollo y su baja concentración puede restringir el progreso de la flora y fauna en términos de riqueza; sin embargo, no todos los iones disueltos presentes en el agua afectan de igual manera a los organismos acuáticos, por ejemplo, el silicio es usado por las diatomeas para la formación de su pared celular, y el calcio es usado por los moluscos para la formación de su caparazón, por lo que la ausencia de estos compuestos puede limitar su presencia. Además, existen elementos importantes como el fósforo inorgánico y nitrógeno que como nutrientes primarios limitan la producción de microorganismos y plantas (Allan & Castillo, 2007). Por último, los eventos de



flujo de agua en las corrientes tienen muchos efectos sobre los organismos acuáticos de forma directa como indirecta (Lamouroux et al., 2004). Entre ellos se encuentra la modificación de hábitats, específicamente la generación de la inestabilidad de los cauces, en los que el volumen y velocidad del agua producen un alto esfuerzo cortante en el lecho del arroyo, desgastando, arrastrando y depositando los sustratos, alterando la forma del cauce (Lake, 2000). Todo ello conlleva, especialmente en casos de eventos de flujos altos, al arrastre y aplastamiento de la fauna bentónica y algas, generando su desaparición; asimismo, los organismos acuáticos pueden ser afectados tras el arrastre de sedimentos, los cuales son su fuente de alimento degradando o destruyendo los hábitats (Milner et al., 2013).



**Figura 1:** Modelo conceptual simplificado de los efectos de las corrientes de agua glaciar en los organismos acuáticos. El símbolo + significa "induce" o "incrementa" (p. ej. la estabilidad del cauce induce la remoción de algas). El símbolo - significa "reduce" o "disminuye" (p. ej. el sedimento suspendido reduce la fijación de macroinvertebrados).

**Fuente:** Cauvy-Fraunié (2014)

### 2.2.2.2. Unidades hidrográficas glaciariadas

#### a. Condiciones ambientales heterogéneas a una escala de cuenca

En los sistemas de cuencas glaciares no solo se encuentran las corrientes kryal descritas anteriormente, sino que las diferentes fuentes relacionadas con el ciclo del agua pueden generar corrientes del tipo rhithral (alimentado por nieve estacional o lluvias) y krenal (alimentado por agua subterránea o manantiales), que pueden generar corrientes combinadas a medida que el orden del río aumenta (Cauvy-Fraunié, 2014).

Cercano al glaciar, la influencia glaciar es máxima y decrece progresivamente con el incremento de la distancia a la lengua glaciar y abruptamente después de una confluencia con tributarios no glaciares dependiendo de su descarga (Brown et al. 2007). Además, como las corrientes rhithral y kryal presentan condiciones fisicoquímicas e hidrológicas distintas comparadas con las corrientes glaciares (Ward, 1994), los segmentos de las corrientes muestran condiciones ambientales distintas ligado a la contribución relativa de cada fuente de agua y así también, relacionada a su influencia glaciar.

Entre los tipos de corrientes mencionadas, las corrientes rhithral son las que presentan el mayor rango de temperatura, con máximos de 5° a 10°C (Ward, 1994). A comparación de las corrientes kryal, corrientes alimentadas por deshielo de nieve, por lo general presentan aguas muy claras y con poco arrastre de sedimento; sin embargo, los eventos de flujos altos pueden resuspender los sedimentos finos del lecho aumentando la turbiedad (Milner & Petts, 1994). Los picos de concentración de solutos en las corrientes rhithral se produce en tiempo de deshielo, debido a la elución de iones procedentes de las capas de nieve (Brown et al., 2003a). Entre los solutos que caracterizan estas corrientes encontramos al nitrógeno en forma de nitratos en mayor proporción; asimismo, se encuentran concentraciones altas de Ca y HCO<sub>3</sub>, los que se comportan de forma variable a través del año, encontrándose más diluido en época de mayor escorrentía de deshielo (invierno en el hemisferio norte; Malard et al., 1999).

Las corrientes denominadas krenal, se caracterizan por tener temperaturas relacionadas a la temperatura del aire, que normalmente varían anualmente entre 1° a 2 °C y que al contrario de las corrientes kryal y rhithral, no exhiben fluctuaciones de flujo estacionales (Ward, 1994). Sin embargo, en sistemas de calizas Kársticas, el agua subterránea puede responder rápidamente a eventos precipitaciones extremas debido al corto tiempo de resistencia en los acuíferos (Ford, 1993 citado por Brown et al., 2003). Así, las corrientes de agua subterránea pueden no tener un flujo predecible. Las corrientes krenal tienen mayor concentración de iones y conductividad en comparación a las corrientes del tipo kryal o rhithral (Milner & Petts, 1994; Ward, 1994), donde se puede destacar las altas concentraciones de silicio (Ward, 1994). La variabilidad de la composición química de estas corrientes tiene poca variabilidad anual; sin embargo, estas puede variar espacialmente dependiendo de la geología de la cuenca y el tiempo de residencia del agua subterránea (Cauvy-Fraunié, 2014).

### **2.2.3. Riesgo de pérdida de la biodiversidad de macroinvertebrados ante el retroceso glaciar**

El cambio climático global viene modificando el balance de masa en los glaciares en todo el mundo. Un inminente retroceso afectaría directamente sobre el aporte de agua de deshielo a las corrientes de cuencas glaciares (Huss, 2011), lo que generaría cambios en las condiciones ambientales tanto en escalas temporales como espaciales.

Según Brighenti et al. (2019), los cambios fisicoquímicos que se espera son el aumento de la temperatura de las corrientes, lo que ocasionaría una alteración de los hábitats fríos a lo largo de los ríos. Asimismo, se modificará físicamente la geomorfología de los cauces a medida que los picos de descarga de hielo derretido diurnos y estacionales se atenúen, reduciendo la erosión y la reelaboración de sedimentos proglaciales; además, se puede formar nuevas lagunas en áreas recientemente descubiertas por glaciares, con un incremento de la probabilidad de inundaciones y riesgos relacionados. En relación con el contenido de nutrientes, el retroceso

del glaciar suministrará carbono antiguo a las corrientes de agua, trayendo como consecuencia efectos ecológicos por la mejora la actividad microbiana, con posibles efectos tróficos ascendentes.

Aunque existen pocos estudios acerca de los efectos del retroceso glaciar en la diversidad acuáticas a escalas de periodos largos, trabajos previos acerca el efecto de la contribución glaciar a las corrientes glaciares en la comunidad acuática sugiere que la disminución en las contribuciones de agua de deshielo dentro de las cuencas glaciares ocasionará la pérdida de especies y un cambio de la composición de la comunidad acuática a una escala de cuenca (Jacobsen & Dangles, 2011).

### 2.3. Definición de términos

**Glaciar:** es un cuerpo constituido de hielo y nieve ubicado en las cabeceras de cuenca que tiene un movimiento por efecto de la gravedad, cuya superficie tiende a disminuir por efectos de la fusión de su masa debido a las altas temperaturas (Morales, 2013 citado por INAIGEM, 2018).

**Cuenca glaciar:** es un espacio geográfico que encierra la superficie donde se encuentra un glaciar o no que fue formado por la erosión del cuerpo glaciar y concentra todas las aguas que drenan de ella (Morales B. , 2013 citado por INAIGEM, 2018).

**Unidad hidrográfica (UH):** es un área que no recibe drenaje de ninguna otra área, pero si contribuye con flujo a otra unidad de drenaje a través del curso del río, considerado como principal. al cual confluye (Autoridad Nacional del Agua, 2012).

**Macroinvertebrados bentónicos:** colección de organismos que se compone de cualquier invertebrado, que habita el fondo de los ríos o lagunas, lo suficientemente grande para ser observado sin ningún instrumento de magnificación (George et al., 2015).

**Biodiversidad:** se define como la variación de las formas de vida que ocupan un lugar determinado abarcando la diversidad de especies de plantas, animales, hongos y microorganismos, su variabilidad genética, los ecosistemas de los que hacen parte, los paisajes o las regiones en donde se ubican los ecosistemas e incluyen los procesos ecológicos y evolutivos que se dan a nivel de genes, especies, ecosistemas y paisajes (Dominguez & Fernández, 2009).

## 2.4. Hipótesis

### General

El cambio de cobertura glaciaria genera un gradiente de parámetros fisicoquímicos ambientales, por lo tanto, la biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos en corrientes glaciares de las unidades hidrográficas de Parón, Huaytapallana y Llanganuco, varía en función del GCG.

### Específicas

- La biodiversidad de macroinvertebrados varía en cada uno de los puntos de muestreo evaluados.
- La biodiversidad de macroinvertebrados es menor en corrientes de agua con mayor gradiente de cobertura glaciaria y aumenta al disminuir el gradiente.
- La temperatura del agua, la estabilidad del cauce, la turbidez y concentración de nutrientes son los parámetros ambientales que tienen mayor influencia sobre la biodiversidad y ensamblaje de macroinvertebrados bentónicos en la zona de estudio.

## 2.5. Variables

	VARIABLES	PARÁMETROS /INDICADORES	UNIDADES	MÉTODO
<b>VARIABLES INDEPENDIENTES</b>	<b>Gradiente de cobertura glaciar</b>	Cobertura glaciar	%	Análisis de imágenes satelitales Sentinel 2 y GIS
		Estabilidad del cauce	-	Índice de Pfankuch
		Temperatura	°C	
	<b>Parámetros fisicoquímicos</b>	pH	Unidad de pH	Multiparámetro de campo
		Oxígeno disuelto	mg/l	
		Conductividad eléctrica	μS/cm	
		Turbidez	NTU	
		Nutrientes (NPK)	mg/l	
		Iones metálicos	mg/l	
	<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>	<b>Índices de biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos</b>	Diversidad Alpha y Beta	-
Número de taxas (riqueza)			-	
Abundancia y densidad			%	

## Capítulo III

### METODOLOGÍA

#### 3.1. Zona de estudio

La Cordillera Blanca se ubica en la zona norte de la Cordillera Occidental de los Andes peruanos, en la región tropical interna de Sudamérica. Es la cordillera con mayor superficie glaciar entre las 18 cordillera nevadas ubicadas en el Perú (448.81 km<sup>2</sup>; INAIGEM, 2018), con una extensión de 180 km (8°30'–10°10'S y 77°-78°W; Iturrizaga, 2018), siendo considerada la cadena de glaciares tropicales más extensa del mundo (ANA, 2010). Casi la totalidad de su extensión se encuentra dentro del PNH, el cual es reconocido por poseer diversos ecosistemas altoandinos y brindar servicios ecosistémicos a las comunidades asentadas a su entorno, principalmente el recurso hídrico (Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado, 2011).

Las UH de Parón, Huaytapallana y Llanganuco se ubican en el flanco occidental de los nevados Huandoy y Huascarán en la cordillera Blanca. Sus límites abarcan los sistemas glaciares de Santa Cruz y Huascarán, los que están conformados principalmente por glaciares de montaña (ANA, 2010) y en menor cantidad por glaciares de valle, que en su mayoría presentan lenguas glaciares cubiertas de escombros y rodeados por morrenas gruesas (p. ej. glaciar Kinzli; Iturrizaga, 2018). La topografía de estas UH es típica de los valles transversales de la cordillera Blanca, con áreas de captación muy elevadas, fondos de valles ligeramente inclinados y flancos muy escarpados con pendientes de hasta 50° en el área de ladera media (Iturrizaga, 2018). En relación al clima, se presenta una época seca durante el invierno austral (mayo a setiembre) y una época húmeda durante el verano austral (octubre a abril) (Schauwecker et al., 2017). Por otro lado, la temperatura ambiental oscila ligeramente entre las estaciones, pero presenta altas oscilaciones diurnas. La isothermalidad determina los procesos

de ablación glacial durante todo el año con valores máximos durante la temporada húmeda (Kaser y Osmaston, 2002). Con respecto a la geología, las UH de estudio están compuestas por rocas sedimentarias del Jurásico Superior que afloran en zonas puntuales de la UH Llanganuco; asimismo, se encuentran rocas ígneas plutónicas de la edad del Neógeno, los cuales componen el basamento rocoso. En el área de estudio se han identificado depósitos cuaternarios principalmente de origen glaciárico, fluvio-glaciario, lacustrino, fluvial y coluvial. La cobertura vegetal está conformada principalmente por bosques de Quenuales, arbustos, matorrales y pastos, los que están presentes en mayor abundancia en los valles y los conos de detritos de los flancos, conformando la vegetación ribereña de ríos y quebradas. En la tabla 1 se muestran las principales características geomorfológicas, geológicas, topográficas y vegetaciones asociadas a los puntos de muestreo.

**Tabla 1.** Características ambientales de los puntos de muestreo

<b>Punto de muestreo</b>	<b>Geomorfología asociada</b>	<b>Geología</b>	<b>Pendiente</b>	<b>Vegetación ribereña</b>
<b>P01</b>	Cono de detritos	Deposito fluvio-glaciario	Empinado	Arbustos, pastos, matorrales y Quenuales
<b>P02</b>	Morrena	Deposito glaciario	Plano	Arbustos, pastos, matorrales y Quenuales
<b>P03</b>	Cono aluvional	Depósitos aluvionales	Moderadamente empinado	Arbustos y pastos
<b>P04</b>	Cono aluvional	Depósitos aluvionales	Extremadamente empinado	Arbustos y pastos
<b>P05</b>	Cono de detritos	Deposito fluvio-glaciario	Empinado	Pastos
<b>P06</b>	Cono de detritos	Deposito fluvio-glaciario	Extremadamente empinado	Arbustos, arboles de Quenuales y pastos
<b>P07</b>	Cono de detritos	Deposito fluvio-glaciario	Extremadamente empinado	Arbustos y pastos
<b>P08</b>	Cono de detritos	Depósitos coluviales	Extremadamente empinado	Arbustos, pastos y algunos Quenuales
<b>P09</b>	Cono de detritos	Depósitos coluviales	Extremadamente empinado	Quenuales, arbustos, matorrales y pastos
<b>P10</b>	Cono de detritos	Deposito fluvio-glaciario	Ligeramente inclinado	Arbustos, matorrales y Quenuales
<b>P11</b>	Cono aluvional	Depósitos aluvionales	Empinado	Arbustos y pastos



### **3.2. Tipo de investigación**

**Según su orientación:** Básica orientada

**Según su nivel o alcance:** Explicativo, descriptivo

### **3.3. Diseño de la investigación**

La presente investigación fue de diseño no experimental debido a que se basó en la observación directa de relaciones causa efecto entre las variables fisicoquímicas ambientales y la diversidad de macroinvertebrados bentónicos de corrientes glaciares (sin manipulación de variables). Asimismo, consistió en un estudio transversal e inductivo, donde se sustituyó el tiempo por el espacio con el propósito de modelar los posibles impactos del retroceso glaciar y el cambio climático sobre la biodiversidad de macroinvertebrados en la cordillera Blanca; sin embargo, debido a fuertes variaciones estacionales de flujo de deshielo en glaciares tropicales externos, se consideró el registro de datos en dos épocas de muestreo para mejorar la representatividad de los resultados. Por último, la investigación fue prospectiva ya que relacionó variables a través de obtención de datos información biológica y fisicoquímica del año 2019 y 2020, sin incluir registros pasados.

### **3.4. Selección y caracterización de puntos de muestreo**

Se seleccionaron 11 puntos de muestreo en las unidades hidrográficas de Parón, Huaytapallana y Llanganuco, a lo largo de un GCG. Los puntos de muestreo fueron seleccionados según los siguientes criterios:

- Las corrientes deberían ser flujos directos de deshielo glaciar evitando las zonas con influencia de lagunas o humedales que puedan cambiar las condiciones fisicoquímicas y los patrones de flujo.
- En lo posible la geología asociada a los puntos de muestreo debía ser homogénea, evitando zonas con producción potencial de drenajes ácidos de roca que pudiera estar afectando las

condiciones fisicoquímicas y por ende la estructura y biodiversidad de organismos acuáticos.

- Debido al tiempo requerido para los trabajos en campo, los puntos de muestreo deberían estar lo más cercano a la carretera y así evitar grandes variaciones en la hora de muestreo y toma de parámetros fisicoquímicos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se establecieron 2 puntos de muestreo en corrientes de deshielo que descienden del lado noroeste del Huandoy, 2 del lado suroeste y 4 en el sur (2 de ellos alimentados solo por fuente pluvial); 3 puntos se ubicaron en corrientes de deshielo del Huascarán, 2 puntos en el noroeste y 1 al norte (ver mapa en el Anexo 1); en un rango de altitud de 3,701 a 4,218 m s.n.m., abarcando los diferentes tipos de hábitats acuáticos determinados por la dinámica glaciar. Los muestreos fueron realizados a finales de la época seca (octubre del 2019) y durante la época húmeda (marzo del 2020). En la Tabla 2 se muestran las principales características de los puntos de muestreo.

**Tabla 2.** Características generales de los puntos de muestreo

Unidad Hidrográfica	Punto de muestreo	Glaciar asociado	Coordenadas UTM (m)		Altitud (m s.n.m.)
			x	y	
Parón	P01	Huandoy noroeste	204666	9003150	4,218
	P02	Huandoy este	202613	9002334	3,899
Huaytapallana	P03	Huandoy sureste	204875	8996524	3,897
	P04	Huandoy sureste	203913	8995779	3,701
	P05	Huascarán noreste	208713	8995000	3,900
	P06	Huandoy sur	209477	8996454	3,908
Llanganuco	P07	Huandoy sur	209328	8996416	3,890
	P08	Huandoy sur	207915	8995081	3,805
	P09	Huandoy sur	208071	8995224	3,793
	P10	Huascarán noreste	207562	8994352	3,666
	P11	Huascarán norte-Kinzl	214202	8997683	4,198

### **3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

#### **3.5.1. Gradiente de cobertura glaciar (GCG)**

Para la obtención del GCG, primero se delimitó manualmente el área de drenaje asociada a cada punto de muestreo; para ello se utilizó curvas de nivel obtenidas del Modelo de Elevación Digital (MED) de 12.5 m de resolución Alos Palsar e imágenes satelitales disponibles de Google Earth. Posteriormente; para la obtención del área glaciar libre de detritos en cada área de drenaje se aplicó el Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI) y el Índice Diferencial Normalizado de Agua (NDWI). Asimismo, la delimitación de glaciares cubiertos por detritos se realizó a través de la interpretación visual de imágenes satelitales. En ambos casos se utilizó la imagen Sentinel2 de 10 m de resolución de setiembre del 2019. Los resultados de delimitación pasaron por una etapa de corrección manual, teniendo como referencia la cobertura glaciar obtenido por el último Inventario Nacional de Glaciares del año 2016 (INAIGEM 2018). Los procesamientos se realizaron con el software QGIS 3.6.0.

El porcentaje de cobertura asociado a cada punto de muestreo se determinó a través de la división del área de cobertura glaciar total (glaciar limpio y cubierto) y el área de drenaje (unidad hidrográfica). Los resultados de cobertura glaciar obtenidos se compararon con los datos de cobertura glaciar generados por el inventario nacional de glaciares del año 2016 (INAIGEM, 2018) y el inventario de la compañía eléctrica HIDRANDINA S.A. en el año 1962/1975; posteriormente se calculó el área de retroceso en cada unidad hidrográfica estudiada.

#### **3.5.2. Parámetros fisicoquímicos ambientales**

En cada punto de muestreo, se caracterizó los parámetros ambientales a través del registro de mediciones en campo del tipo fisicoquímicos del agua, estabilidad del cauce y topográficos. Los parámetros fisicoquímicos fueron: temperatura, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto y turbiedad, los cuales se registrados mediante un multiparámetro Multi 3630

IDS (cada 5 segundos y promediada sobre 5 minutos) excepto la turbiedad la cual fue medida en laboratorio; además, se determinó la concentración de nutrientes: fósforo total, nitrógeno total, carbono orgánico disuelto y carbono inorgánico disuelto; y iones metálicos, para lo cual se colectaron muestras de agua para su posterior análisis de laboratorio. Se colectó 10 ml de agua filtrada (papel filtro de celulosa de 0.45  $\mu\text{m}$ ) para el análisis de turbiedad y 50 ml de agua sin filtrar para el análisis para el resto de los parámetros. En la Tabla 3 se muestra el método de análisis utilizado para cada analito, los cuales fueron llevados a cabo en el laboratorio de la Facultad de Medio Ambiente de la universidad de Leeds-Inglaterra.

Para caracterizar la estabilidad del cauce, se usó el índice de Pfankuch (aplicado para cuantificar la estabilidad física del sustrato de los cauces) el cual considera seis componentes del fondo del cauce: la angulosidad del sustrato, el brillo de las roca, el tamaño y compactación de las partículas del sedimento, el lavado y deposición, el porcentaje del cauce estable y la vegetación (Pfankuch, 1975). La evaluación se realizó a través de la observación en campo y posterior puntuación de criterios utilizando la ficha de evaluación adjuntada en el Anexo 2.

Entre los parámetros topográficos se determinó la pendiente en cada punto de muestreo a través del procesamiento del Modelo de Elevación Digital (MED) de 12.5 m de resolución Alos Palsar. Asimismo, se calculó la distancia de cada punto de muestreo la parte del glaciar más próxima, siguiendo el cauce del río para ello, se utilizó una imagen Sentinel2 de 10 m de resolución.

**Tabla 3.** Métodos de análisis de laboratorio de los parámetros químicos del agua

Parámetro químico	Método
Iones metálicos: Al, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Se, Si, Sr, Te, Ti, Zn	Espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado inductivo (ICP-OES)
Nitrógeno total, fósforo total	Analizador automático de química húmeda Skalar Sans++
Aniones: F, Cl, SO <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub>	Cromatografía líquida de alta eficacia HPLC-IC - Dionex ICS3000
Carbono orgánico disuelto, Carbono inorgánico disuelto	Analizador micro elemental Analytik Jena Multi NC2100

### 3.5.3. Macroinvertebrados bentónicos

Con propósitos de comparación de la biodiversidad y composición de macroinvertebrados, se realizó un muestreo cuantitativo, estandarizando el área de muestreo en cada corriente de agua evaluada, para ello se procedió según Brown, Hannah, et al. (2007) con modificaciones. En cada punto de muestreo se definió un tramo de 15 metros y se colectó aleatoriamente 6 muestras compuestas en micro habitas de remanso, rápidos y orillas. Cada muestra compuesta se conformó de 5 submuestras obtenidas con maya Surber de 250  $\mu\text{m}$  y un área de muestreo de 0.09  $\text{m}^2$ . El muestreo se realizó colocando la malla a contracorriente y removiendo el sustrato aguas arriba de la manga (Roldán, 1996) por aproximadamente un minuto por submuestra. El sustrato recolectado fue depositado en frascos de plásticos de boca ancha o bolsas herméticas que luego fueron conservados con alcohol etílico al 96%.

La identificación se realizó utilizando el manual taxonómico de Dominguez & Fernández (2009) y Roldán (1996), llegando a identificar a nivel género las taxas de Tricópteras, Ephemeropteras y Plecópteras. La taxas de Chironomidae en su mayoría solo se pudieron identificar a nivel sub familia, para ello se utilizó la guía para el reconocimiento para larvas de Chironomidae (Diptera) a través de morfotipos de los ríos altoandinos de Ecuador y

Perú (Prat et al., 2011). Para el conteo se consideró el total de larvas, ninfas y pupas. En caso de las Coleópteras se incluyó también a la fase adulta.



**Figura 2.** Imágenes del procedimiento en campo y laboratorio del estudio. A. Muestreo de macroinvertebrados con maya Surber. B. Depósito de muestra colectada en frascos de plástico. Separación de individuos en placa sectada. D. Observación de individuos a través de estereoscopio para su identificación.

### 3.6. Procesamiento y análisis estadístico de datos

Para realizar el análisis estadístico de resultados se agrupó los datos fisicoquímicos de la siguiente manera: estación de muestreo (seca y húmeda) y GCG (alta, media y baja o sin presencia). Ya que los datos no se distribuyeron normalmente ni cumplieron con el supuesto de homogeneidad de varianzas, para verificar las diferencias en cada grupo mencionado, previamente los datos fueron convertidos a través de la función  $\text{Log}(x+1)$ . Se utilizó la prueba ANOVA para comparar varios grupos independientes y t de student para comparar dos grupos independientes, para tal fin se utilizó el programa IBM SPSS 22. Para describir la variabilidad de los puntos de muestreo y su correlación con los parámetros fisicoquímicos, se usó el Análisis

de Componentes Principales (ACP) basado en la matriz de correlaciones, utilizando el programa estadístico CANOCO 4.5 (ter Braak & Smilauer, 2002).

Se calcularon 6 indicadores de biodiversidad local (Alpha): la abundancia, la densidad, la riqueza específica, la riqueza rarefactada a  $n=111$ , el índice de Margalef, el índice de Shannon\_H y el índice Alpha de Fisher. Estos indicadores fueron obtenidos con el programa PAST 4.03 (Hammer et al., 2001). Para revelar diferencias significativas ( $p<0.05$ ) de los indicadores de biodiversidad de acuerdo a la época de muestreo y el GCG, se utilizó la prueba t de student y el Análisis de la Varianza (ANOVA) respectivamente, excepto para la densidad, donde se utilizó pruebas no paramétricas. Las pruebas fueron realizadas en el programa estadístico IBM SPSS 22. Para observar las diferencias significativas de las abundancias relativas de macroinvertebrados entre los grupos de acuerdo a la época de muestreo y GCG, se utilizó el Análisis de Similitud (ANOSIM) de dos vías, utilizando el programa PAST 4.03 (Hammer et al., 2001), para ello se utilizó el índice de similitud de Bray-Curtis generado a partir de las abundancias relativas transformadas ( $\log x+1$ ). Por último, un Análisis Multidimensional no paramétrico (MNDS) fue generado para observar patrones de distribución espacial de los puntos de muestreo según la época de muestreo, utilizando las abundancias relativas de macroinvertebrados.

La relación entre el GCG y los indicadores de biodiversidad fueron analizadas mediante el coeficiente de correlación de Pearson y el estadístico T. Asimismo; para evaluar la influencia del GCG sobre los indicadores de biodiversidad se utilizó el modelo de regresión polinómico. El Análisis de Redundancias (ARD) fue empleado para examinar el efecto de las variables ambientales en el ensamblaje de macroinvertebrados bentónicos de todos los puntos de muestreo. Antes del ARD, se realizó el Análisis de Correspondencias sin Tendencia (ACD) de las abundancias relativas transformadas ( $\log x+1$ ), obteniendo una longitud del gradiente menor

a 3, lo que señaló que la estructura de la comunidad estudiada fue poco heterogénea, siendo el modelo lineal (ARD) el más adecuado (Lepš & Šmilauer, 2003). Las significancias de los ejes canónicos y los parámetros ambientales fueron evaluados a través del test de permutaciones múltiples de Monte-Carlo ( $p < 0,05$ ). Solo las variables significativas fueron incluidas en el modelo final del ARD.



## Capítulo IV

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 4.1. Presentación de resultados

##### 4.1.1. Gradiente de cobertura glaciar

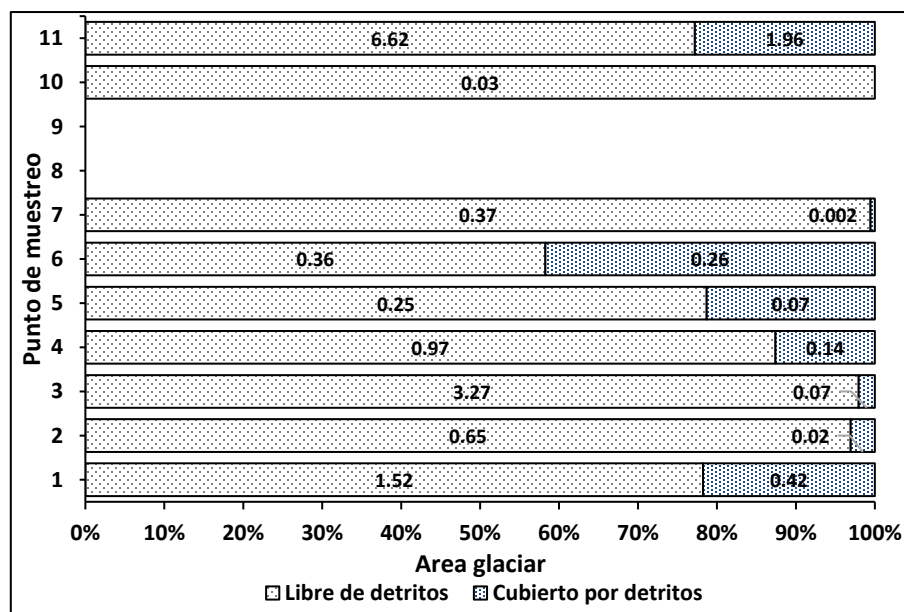
Se delimitó un total de 16.95 km<sup>2</sup> de cobertura glaciar (Tabla 4), registrándose mayor cobertura en la UH Llanganuco (7 puntos de muestreo) con 9.9 km<sup>2</sup>, en la que el 86.6 % se encontró asociado al punto P11 (Glaciar Kinzl). En la UH Llanganuco también se encontraron cuencas sin/escasa cobertura glaciar (P08, P09 y P10), las que presentaron áreas de drenaje más pequeñas. Los puntos asociados a glaciares con mayor superficie, registraron los mayores porcentajes de cobertura glaciar (P11, P03 y P01), cabe mencionar el punto P11 se asoció a un glaciar de tipo valle (Kinzl) mientras que los demás puntos a glaciares de tipo montaña. De acuerdo a los resultados se realizó una categorización de los puntos de muestreo, obteniendo 3 puntos de la categoría bajo, 4 puntos de la categoría medio y 4 puntos de la categoría alto GCG, según detalla la Tabla 4.

**Tabla 4.** Área y porcentaje de cobertura glaciar por punto de muestreo

Unidad hidrográfica	Punto de muestreo	Área glaciar total (km <sup>2</sup> )	Área de drenaje (km <sup>2</sup> )	Cobertura Glaciar (%)	Categoría GCG
Parón	P01	1.94	3.94	49.27	Alto
	P02	0.67	2.9	23.02	Medio
Huaytapallana	P03	3.33	5.41	61.61	Alto
	P04	1.11	5.81	19.01	Medio
	P05	0.32	2.82	11.42	Medio
	P06	0.61	1.42	43.12	Alto
	P07	0.37	2.43	15.26	Medio
Llanganuco	P08	0	1.41	0	Bajo
	P09	0	0.48	0	Bajo
	P10	0.03	1.38	1.83	Bajo
	P11	8.57	12.95	66.19	Alto

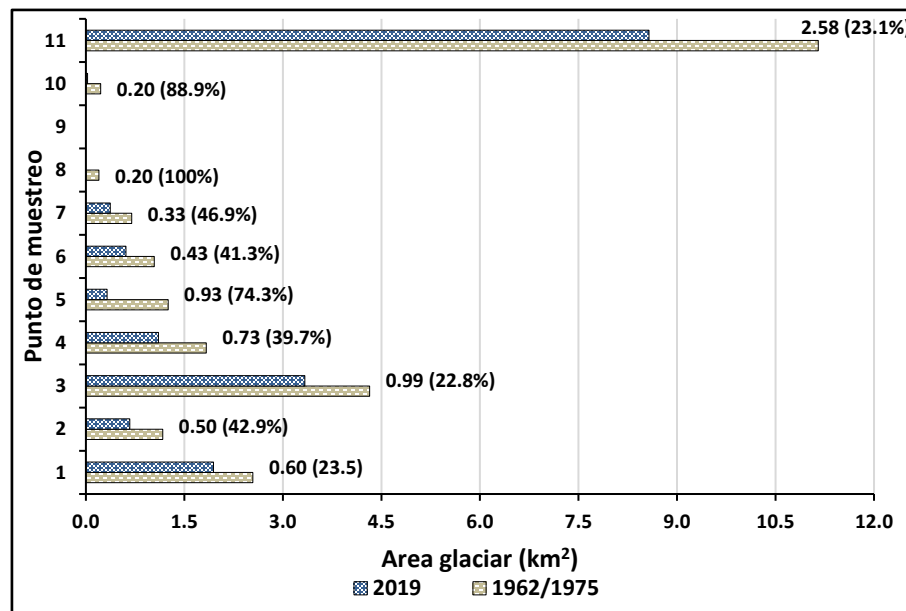
Se encontró que la mayoría de los glaciares delimitados presentaron en su composición glaciares cubiertos por detritos (excepto P10; Figura 3). Se registró un total de 2.93 km<sup>2</sup> de

glaciar cubierto (17.3% del área glaciar total), el cual 1.96 km<sup>2</sup> se asoció al punto P11. Los puntos con mayor porcentaje de glaciar cubierto fueron P06, P11, P01 y P04 con 41.74, 22.80, 21.77 y 12.60% respectivamente.



**Figura 3.** Área y porcentaje de cobertura glaciar libre y cubierto de detrito asociada cada punto de muestreo

En la Figura 4 se muestran el área de retroceso glaciar asociada a cada punto de muestreo entre los años 1962/1975 al 2019, observando que el glaciar Kinztl (punto P11) fue el que perdió mayor superficie glaciar (2.58 km<sup>2</sup>). Los demás glaciares retrocedieron en un rango de 0.20 a 0.99 km<sup>2</sup>. En términos de porcentaje, los glaciares asociados a los puntos P08, P10 y P04 fueron los que sufrieron mayor pérdida glaciar en comparación a los registros de 1962/1975, con 100, 88.9 y 74.3% respectivamente.



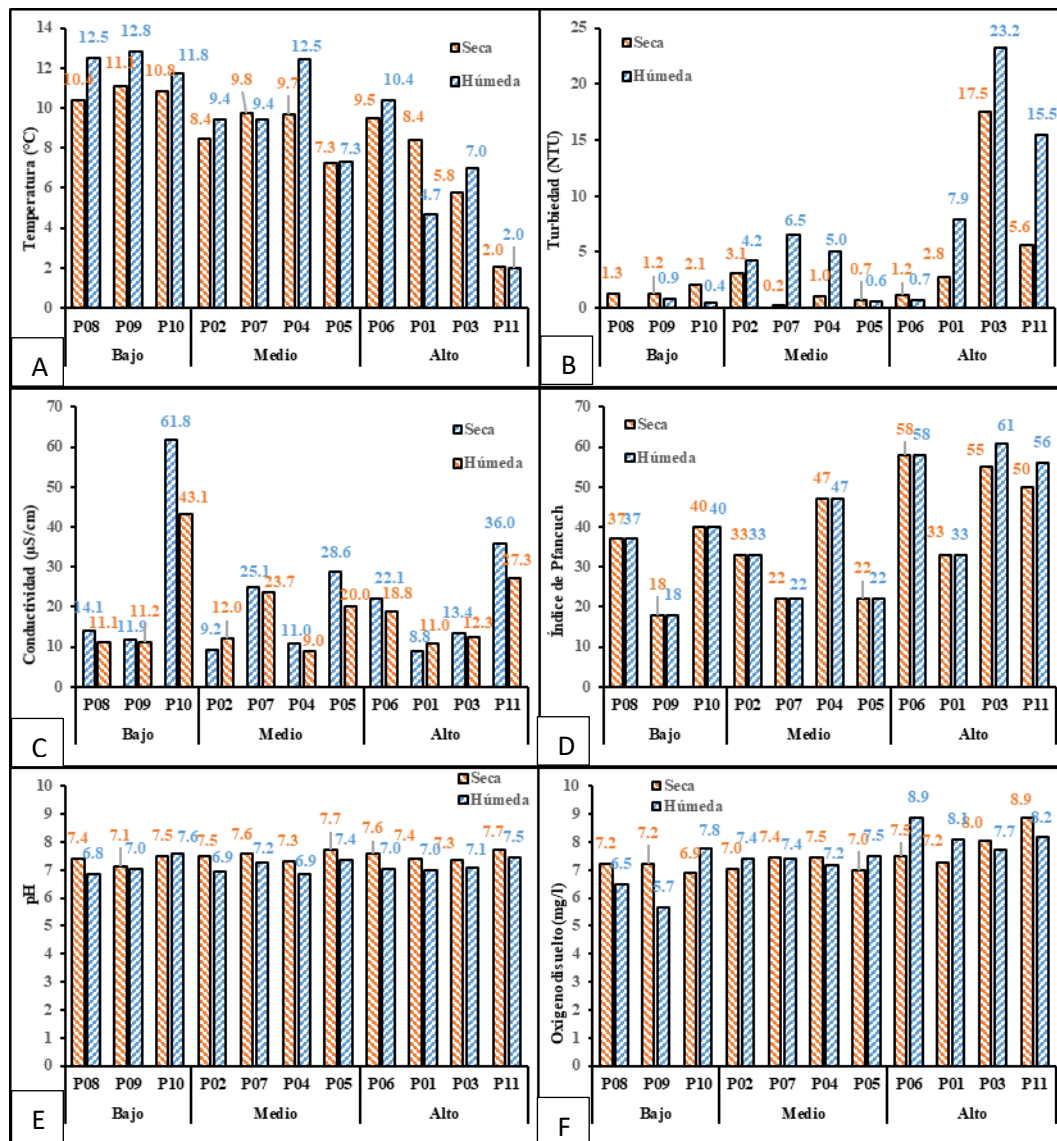
**Figura 4.** Área y porcentaje de retroceso glaciar asociado a cada punto de muestreo entre los años 2019-1962/1975

#### 4.1.2. Parámetros ambientales fisicoquímicos

La temperatura de las once corrientes de agua evaluadas fluctuó entre 2.02° a 12.8°C (Figura 5A), con una media ligeramente mayor en la época húmeda (los estadísticos descriptivos se muestran en el Anexo 5). Los valores de temperatura más bajos se registraron en el punto P11 (66.19 % CG), mientras que los valores más altos, se registraron en el punto P09 (sin presencia de glaciar). Los datos muestran una tendencia negativa de la temperatura a medida que el porcentaje glaciar aumenta; sin embargo, el punto P04 (19.01 % CG) registró, en época húmeda, valores similares a los puntos con baja/sin cobertura glaciar.

Con respecto a la turbiedad, los valores fluctuaron entre 0.09 a 23.20 NTU, con un promedio mayor en época húmeda (Figura 5B). Los valores de turbiedad más altos se presentaron en los puntos P03, P011 y P01 (puntos con mayor influencia glaciar). En los demás puntos, los datos no mostraron tendencias con respecto al GCG y su comportamiento fue

irregular; por ejemplo, en el punto P06 (43.12% CG) se registró valores bajos de turbiedad, cercanos a los observados en los puntos asociados a baja/nula cobertura glaciar.



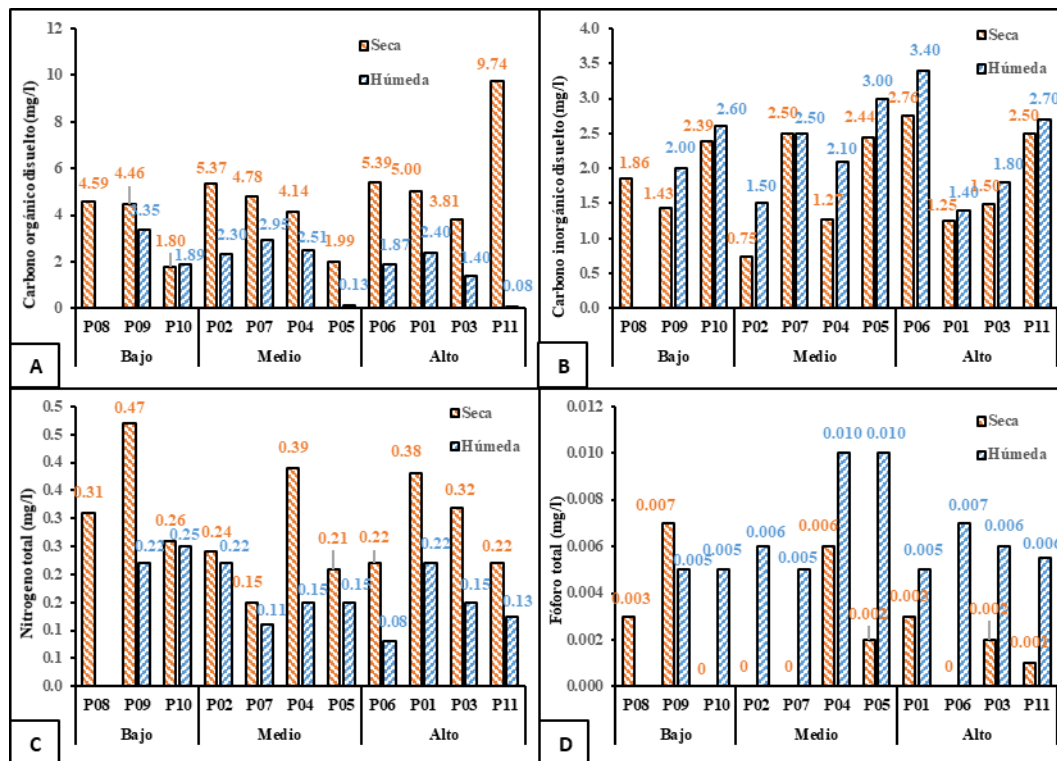
**Figura 5.** Parámetros fisicoquímicos del agua a lo largo de un gradiente de cobertura glaciar. A. Temperatura, B. Turbiedad, C. Conductividad eléctrica, D. Índice de Pfanckuch, E. Potencia de hidrógeno, F. Oxígeno disuelto

La conductividad estuvo en un rango de 8.83 a 61.84  $\mu\text{S}/\text{m}$  (Figura 5C), con una alta variabilidad entre puntos de muestreo y una media más alta en época seca. Los valores más altos de conductividad se registraron en el punto P10 (1.83 % CG). Sin embargo, los puntos P08 y P09, los cuales no presentan cobertura glaciar, registraron valores bajos en las dos épocas

de muestreo. Los resultados de conductividad no mostraron una tendencia relacionada con el GCG. El índice de Pfanckuch (IP) fue variable a lo largo de los puntos de muestreo, con una fluctuación entre 18 a 61 (Figura 5D); sin embargo, no se observó variación estacional; excepto en los puntos P03 y P11 donde la estabilidad fue menor en época húmeda. Los mayores valores de IP (menor estabilidad) se registraron en los puntos P03, P06 y P11 (cobertura glaciaria alta), mientras que el menor valor se registró en el punto P09 (sin cobertura glaciaria), a pesar de ello, no observó un comportamiento irregular del IP, sin tendencias en relación al GCG. El oxígeno disuelto se presentó en un rango de 5.68 a 8.87 mg/l (Figura 5F); con mayor variabilidad en época húmeda y con mayores valores en el punto P11 (época seca) y P06 (época húmeda). El pH fue poco variable, con valores entre 6.85 a 7.74 y una media menor en época de húmeda (Figura 5E).

El carbono disuelto (CD) conformado por el carbono orgánico disuelto (COD) y el carbono inorgánico disuelto (CID), se encontró en un rango de 2.77 a 12.24 mg/l con alta variabilidad entre puntos y con una media mayor en la época seca. El punto con mayor concentración de CD fue P11 en época seca; sin embargo, la concentración disminuyó en un 77.3% en época de húmeda, siendo este punto en el que se registró la menor concentración de CD en esta época de muestreo. El COD presentó una mayor media comparada con el CID en época seca; sin embargo, la concentración de CID aumentó en la mayoría de los puntos en la época húmeda (Figura 6A, 6B). El CD, COD y CID tuvieron comportamientos heterogéneos y sin tendencia con respecto al GCG. El nitrógeno también registró una media menor en época húmeda. Este fluctuó entre 0.17 a 0.47 mg/l, con una baja variabilidad entre puntos y la mayor concentración en el punto P09 (sin cobertura glaciaria; Figura 6C). Las concentraciones de fósforo fueron muy bajas en todos los puntos de muestreo, siendo el valor más alto de 0.01

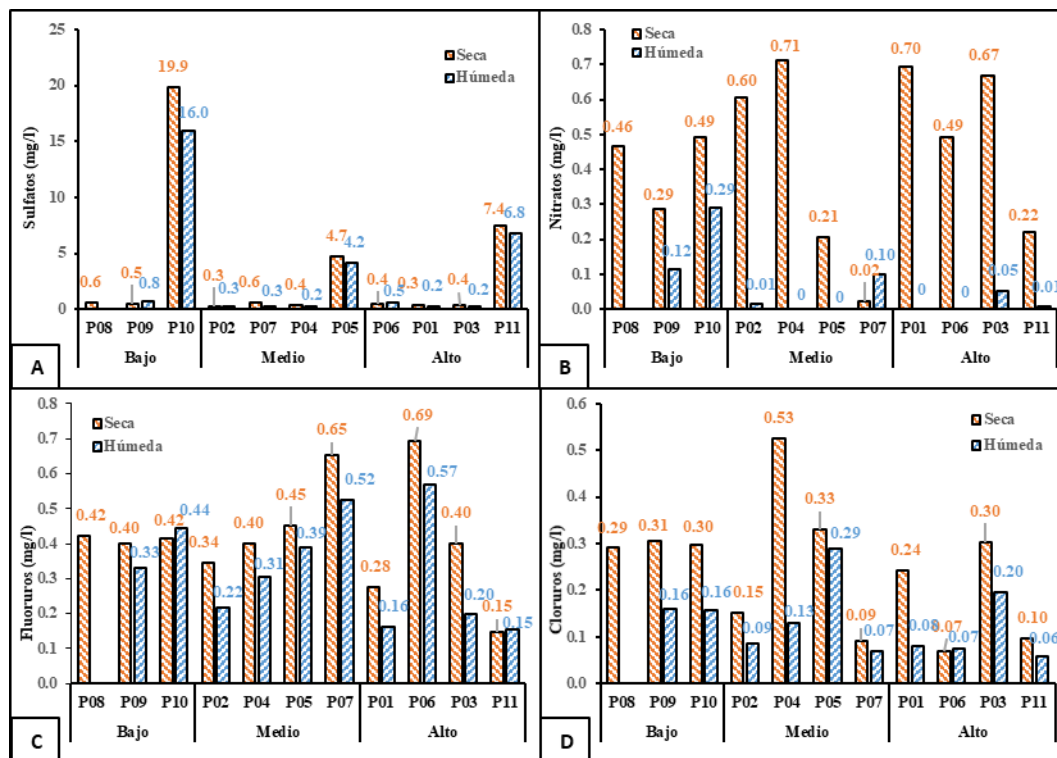
mg/l en los puntos P04 y P05, en época húmeda (Figura 6D). No se observaron tendencias del fósforo relacionada al GCG.



**Figura 6.** Concentración de carbono disuelto y nutrientes a lo largo de un gradiente de cobertura glaciar. A. Carbono orgánico disuelto, B. Carbono inorgánico disuelto, C. Nitrógeno total. D. Fósforo total

Con respecto a los aniones, estos se encontraron en mayor concentración en la época seca. Los sulfatos tuvieron una alta variabilidad entre puntos de muestreo, fluctuando entre 0.23 a 19.57 mg/l (Figura 7A). Los valores máximos se registraron en el punto P10 (baja cobertura glaciar) en ambas épocas de muestreo. Asimismo, se encontró concentraciones altas de sulfatos en los puntos P05 y P11 comparadas con los demás puntos donde las concentraciones no superaron 0.61 mg/l. Se registraron concentraciones de nitratos entre 0 a 0.71 mg/l con valores mayores en época seca en casi todos los puntos de muestreo, excepto en P07 (Figura 7B). En la época húmeda la concentración de nitratos disminuyó drásticamente, observando descensos de hasta 100% en los puntos P01, P04, P05 y P06. El ion fluoruro

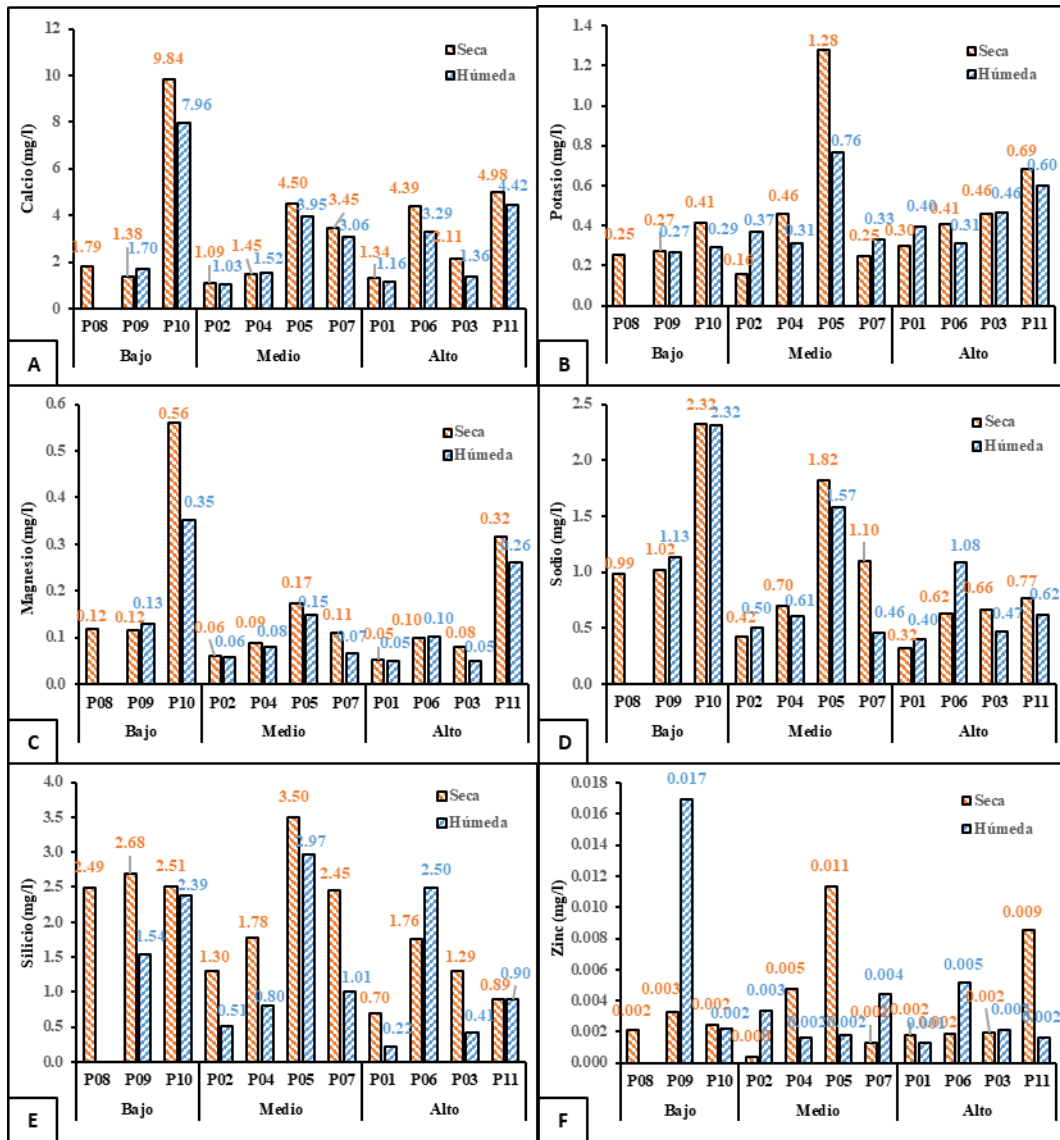
presento una baja variación entre puntos de muestreo y estación de muestreo (Figura 7C), registrando los mayores valores en los puntos P07 y P06 en ambas épocas de muestreo. Los cloruros tuvieron mayor variabilidad estacional, registrando el mayor valor en el punto P04 (Figura 7C) en la época húmeda. Los aniones no mostraron tendencias con respecto al GCG.



**Figura 7.** Concentración de aniones lo largo de un gradiente de cobertura glaciar. A. Sulfatos, B. Nitratos, C. Cloruros, D. Fluoruros

Con respecto a los cationes, el calcio presentó alta variabilidad entre puntos y baja variabilidad entre las épocas de muestreo, con una media ligeramente mayor en la época seca (Figura 8A). El calcio fluctuó entre 1.03 a 9.84 mg/l, registrando la mayor concentración en el punto P10 (baja cobertura glaciar). Con respecto al potasio, magnesio y sodio estos fueron poco variables temporal y espacialmente, fluctuando entre 0.27 a 1.28 mg/l y 0.05 a 0.56 mg/l, 0.32 a 2.31 mg/l respectivamente (Figura 8B, 8C Y 8E). El potasio se registró en mayor concentración en el punto P05, mientras que el magnesio y sodio fueron mayores en el punto

P10. Los oligoelementos que presentaron mayores concentraciones fueron el silicio y el zinc fluctuando entre 0.22 a 3.50 mg/l y 0.001 a 0.017 mg/l, registrando la mayor concentración en el punto P10 en caso del silicio y el punto P09 en caso del zinc. El bario, berilio, cadmio, plomo, cobre, cobre, cromo, litio, hierro, manganeso, níquel, selenio, teluro y titanio, se encontraron en muy bajas concentraciones en ambas épocas de muestreo (<0.007 mg/l; ver Anexo 4).



**Figura 8.** Concentración de cationes lo largo de un gradiente de cobertura glaciar. A. Calcio, B. Potasio, C. Magnesio, D. Sodio, E. Silicio, F. Zinc.



En la Tabla 5 se muestran los resultados de las pruebas estadísticas paramétricas donde se comparan los registros fisicoquímicos según la época de muestro y el GCG (alto, bajo y escaso o sin presencia glaciario). La comparación entre la época de muestro mostró diferencias significativas en pH, nitrógeno total, fósforo total, carbono disuelto, carbono orgánico disuelto, cloruros, nitratos y boro. Mientras que en los datos agrupados por la GCG se evidenciaron diferencias significativas en la temperatura del agua, turbiedad, oxígeno disuelto, el Índice de Pfankuch, aluminio, sodio y silicio.

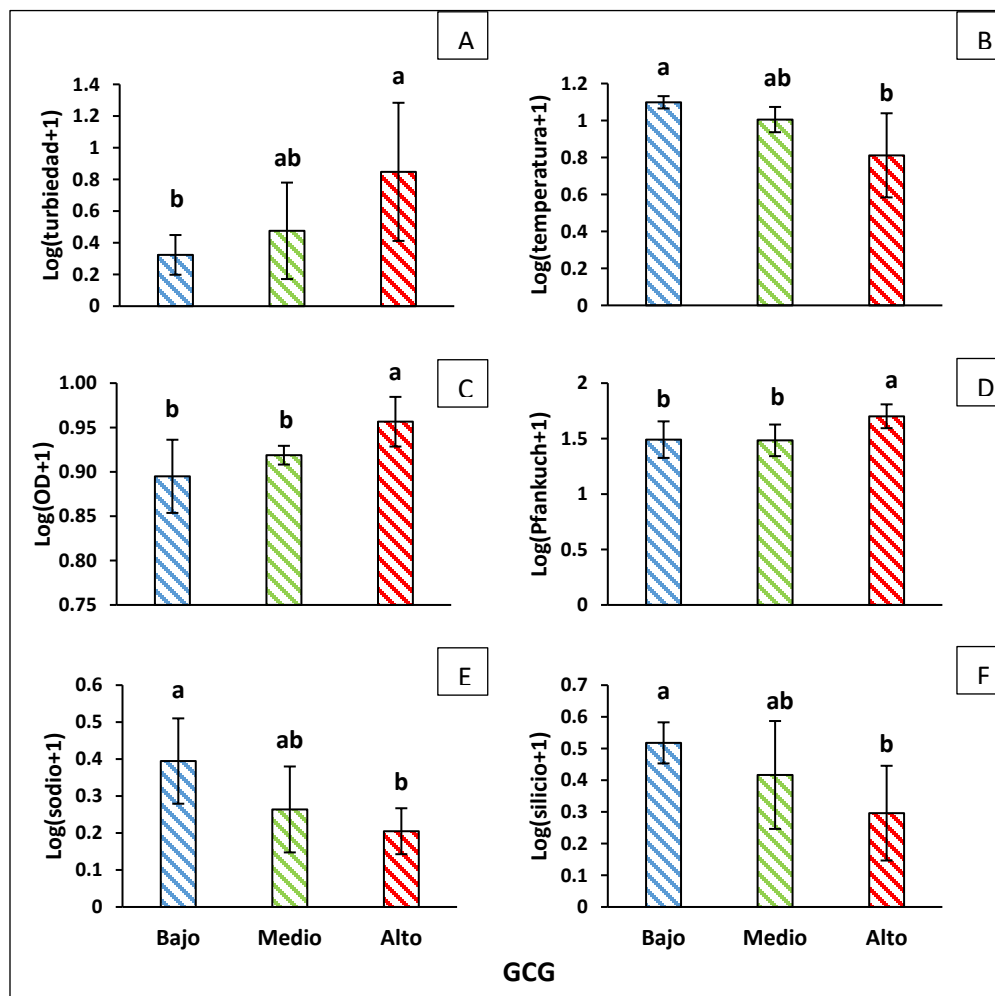
**Tabla 5.** Pruebas paramétricas para la comparación de parámetros fisicoquímicos transformados según época de muestro y gradiente de cobertura glaciario

Parámetro	Época de muestro		Gradiente glaciario	
	T student	p-valor	F	p-valor
Temperatura	-0.204	0.840	7.285	0.004**
Turbiedad	-1.091	0.289	4.360	0.029**
Conductividad	0.509	0.617	0.261	0.773
pH	3.783	0.001**	0.176	0.840
Oxígeno Disuelto	-0.005	0.996	8.780	0.002**
Ind. Pfankuch	-0.115	0.910	6.199	0.008**
Nitrógeno total	3.543	0.002**	1.914	0.176
Fósforo total	-4.375	0.000**	0.288	0.753
COD	3.736	0.001**	0.060	0.942
CID	-1.479	0.155	0.110	0.896
CD	3.527	0.002**	0.117	0.890
Fluoruros	1.366	0.188	0.923	0.415
Cloruros	2.412	0.026**	1.330	0.289
Sulfatos	0.064	0.950	1.362	0.281
Nitratos	5.148	0.000**	0.459	0.639
Aluminio	0.319	0.754	5.176	0.017**
Boro	7.943	0.000**	0.942	0.408
Calcio	0.293	0.773	0.587	0.566
Potasio	0.224	0.825	1.052	0.370
Magnesio	0.542	0.594	2.974	0.077
Sodio	0.283	0.781	5.758	0.012**
Silicio	1.729	0.100	3.769	0.043**
Zinc	-0.254	0.802	0.525	0.600

Prueba t student (\*p<0.05); Prueba ANOVA (\*\*p<0.05)

La Figura 9 muestra la comparación de los parámetros fisicoquímicos (valores promedio convertidos con la función  $\log(x+1)$ ) que presentaron diferencias significativas en el GCG. La

turbiedad fue más alta en GCG bajo y más baja en GCG alto, observando valores compartidos en la categoría media. La temperatura presentó un comportamiento inverso, se registraron mayores valores en GCG bajo y menores valores en GCG alto. El OD y la inestabilidad del cauce fueron mayores en GCG alta, no presentando diferencias en la categoría baja y media. Por otro, lado el sodio, aluminio y el silicio fueron mayores en GCG bajo y menores en GCG alto, compartiendo valores en GCG medio.

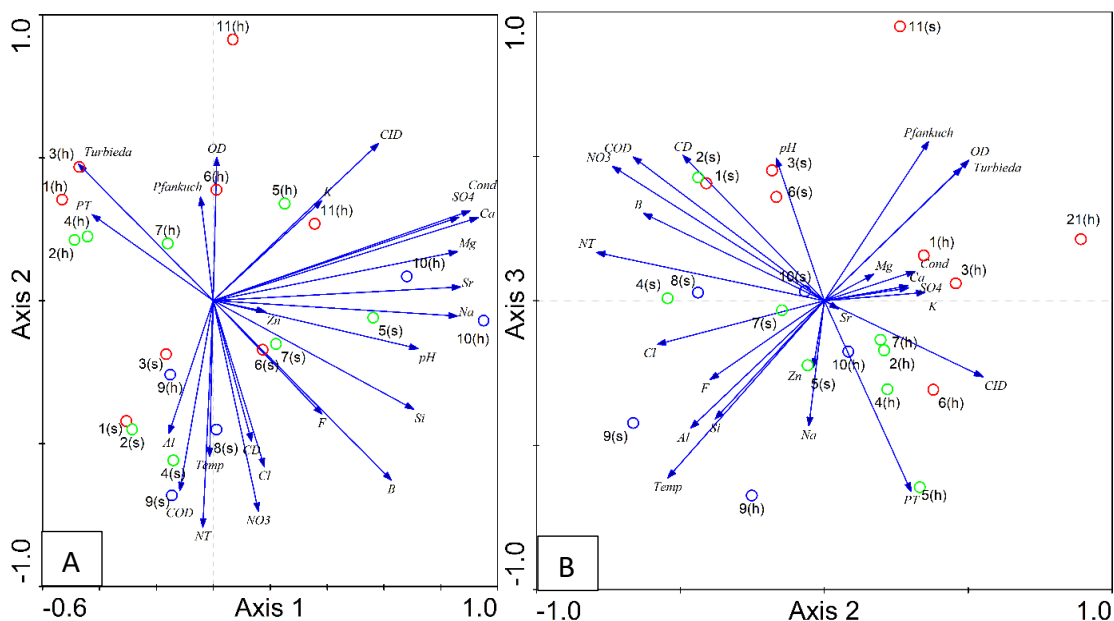


**Figura 9.** Comparación de parámetros fisicoquímicos con diferencias significativas en el GCG. A. Turbiedad, B. Temperatura, C. Oxígeno disuelto, D. Índice de Pfankuch, Sodio, F. Silicio. Los valores representan la media en cada categoría, las letras representan los grupos de acuerdo a la prueba de comparaciones Tukey ( $p < 0.05$ ).

#### 4.1.2.1. Análisis de Componentes Principales (ACP)

Los resultados del ACP muestran que los tres primeros componentes explican el 65.82 % de la variabilidad de los parámetros fisicoquímicos. El primer componente explica el 30.21% y se correlaciona en mayor magnitud con el calcio, sodio, magnesio, estroncio, silicio, boro, sulfatos, conductividad eléctrica, carbono inorgánico disuelto y pH. El segundo componente explicó el 20.27% y se correlacionó con el oxígeno disuelto, nitrógeno total, nitratos, carbono orgánico disuelto y cloro. Por último, el tercer componente explicó el 14.34 % y se correlacionó con la temperatura, índice de Pfanckuch, turbiedad, fósforo total y carbono disuelto.

La Figura 10A muestra la representación *biplot* de las dos primeras componentes principales del ACP (50.48% de la variabilidad). Se observa que el ordenamiento de puntos no muestra un patrón de agrupamiento relacionado al GCG (alto, medio y bajo/sin presencia). Asimismo, el gráfico no agrupa los datos de un mismo punto registrados en la época seca y húmeda. En la Figura 10B se presenta el gráfico *biplot* entre la segunda y tercera componente (34.61%), que incluye los componentes correlacionados con la temperatura, Índice Pfanckuch y carbono disuelto. Se observa un agrupamiento de puntos categorizados como baja y alta cobertura glaciar; en el cual el PC2 refleja mejor las características fisicoquímicas de puntos asociados con baja cobertura glaciar (temperaturas más elevadas con menores valores de oxígeno disuelto e índices de Pfanckuch) y el PC3 explica mejor las condiciones de ambientes con alta cobertura glaciar (temperaturas bajas y mayores valores de oxígeno disuelto, Índice Pfanckuch y turbiedad).

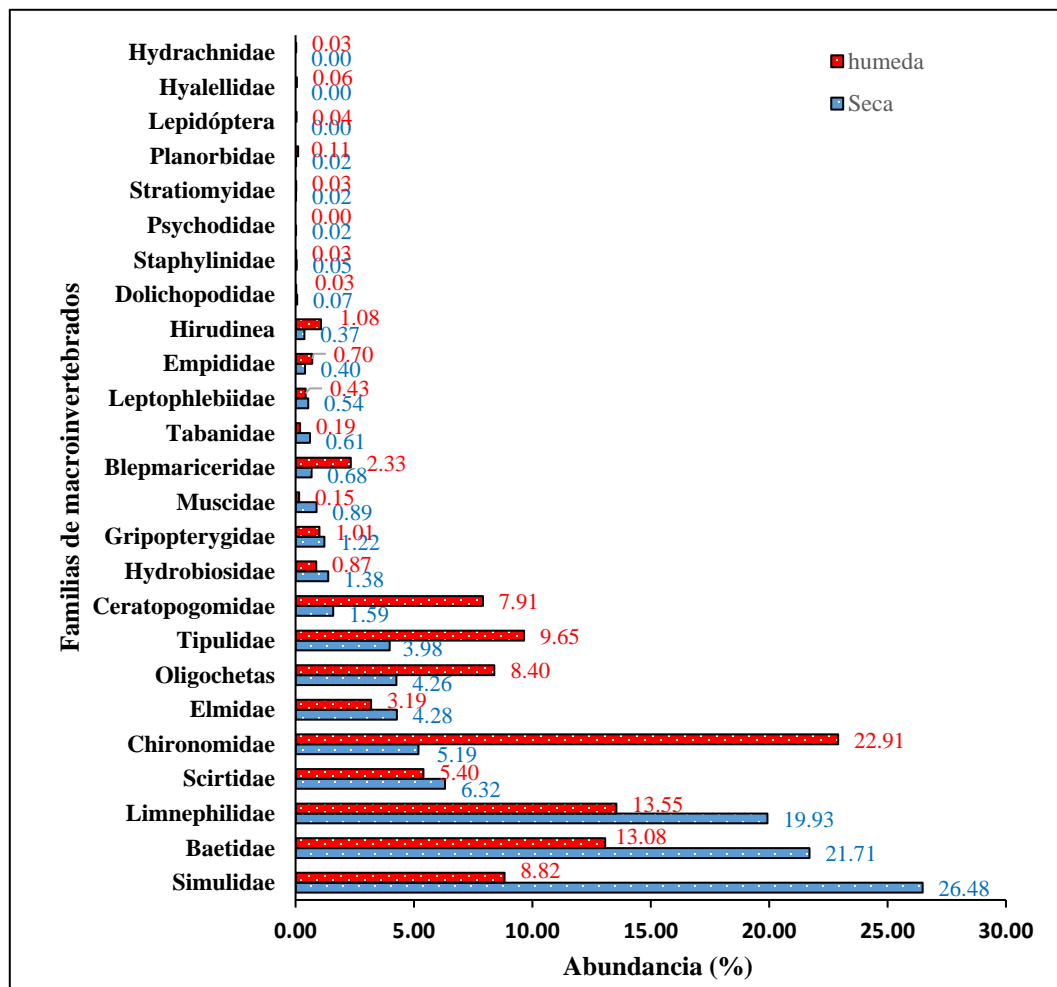


**Figura 10.** Análisis de componentes principales (ACP) de las variables fisicoquímicas del agua en once puntos de muestreo. Las etiquetas de las variables fisicoquímicas son: Temp, temperatura; Cond, conductividad; OD, oxígeno disuelto; Pfanckuch, índice de Pfanckuch; NT, nitrógeno total; PT, fósforo total; COD, carbono orgánico disuelto; CID, carbono inorgánico disuelto; CD, carbono disuelto; F, fluoruros, Cl, cloruros, SO<sub>4</sub>, sulfatos; NO<sub>3</sub>, nitratos. Las etiquetas de los puntos de muestreo son: s, temporada seca; h, temporada húmeda. El GCG se muestra en los colores: azul, baja; verde, media; rojo, alta.

### 4.1.3. Biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos

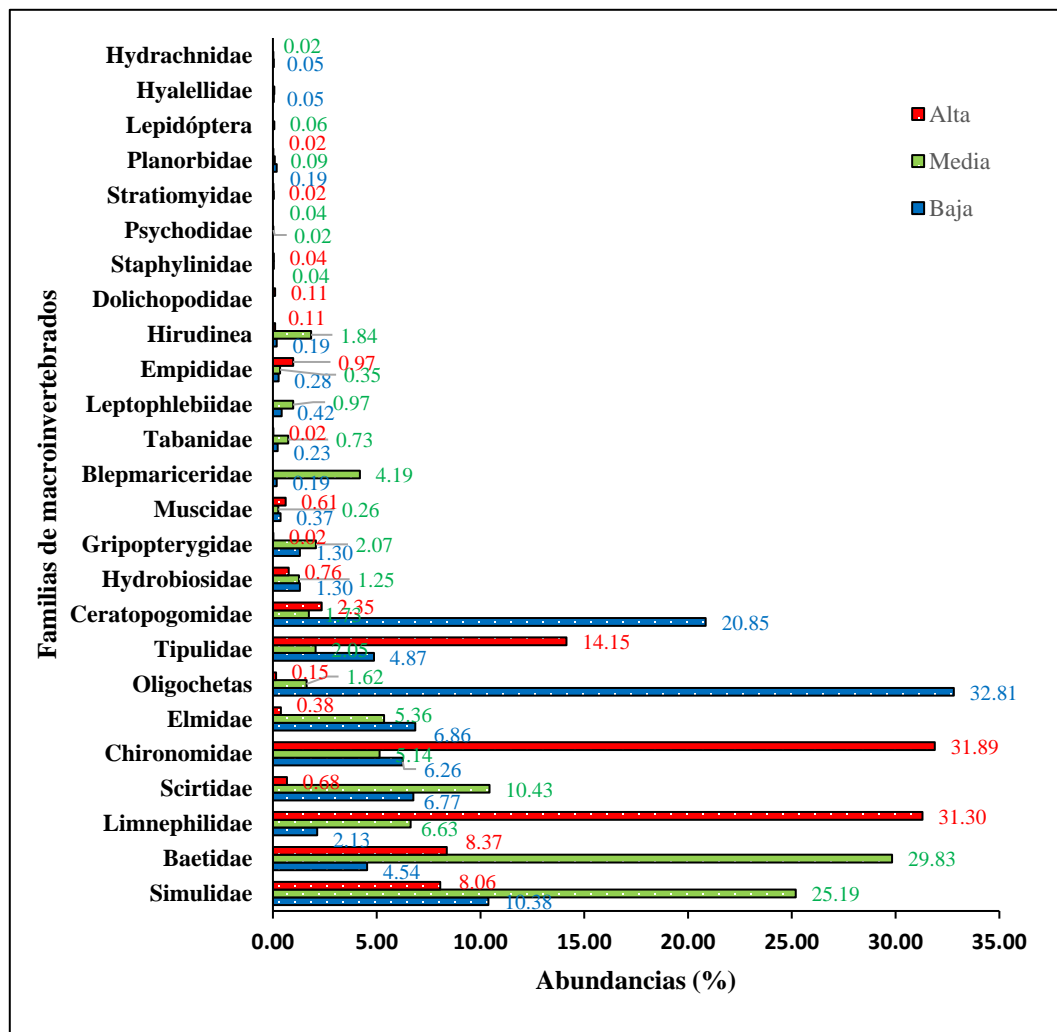
#### 4.1.3.1. Composición de macroinvertebrados bentónicos

Se colectaron un total de 11516 individuos pertenecientes a 41 taxas de los cuales el 92.25% pertenecieron a la clase Insecta (Tabla 6). Se encontraron 4275 individuos en época seca con 36 taxas y 7241 en época húmeda con 39 taxas. Los resultados mostraron diferencias en la composición de macroinvertebrados en época seca y húmeda (Figura 11). Las familias Simuliidae, Beatidae y Limniphilidae fueron las más representativas en la época seca con 68.12% de la abundancia total; sin embargo, en la época húmeda el porcentaje de las familias mencionadas disminuyó a 35.45%, siendo la familia Chironomidae la más abundante.



**Figura 11.** Composición de macroinvertebrados bentónicos a nivel familia analizadas de acuerdo a la época de muestreo

Se observa que en la época húmeda aumentó la proporción de las familias Tipulidae, Ceratopogomidae y Oligochetas pasando de 9.82% a 25.96%. Asimismo, las familias Scirtidae y Elmidae descendieron en época húmeda pasando de 10.60% a 8.59%. Las familias más abundantes en un GCG bajo fueron Ceratopogomidae, Simulidae y las de la clase Oligocheta que representaron el 64.04%; en un GCG medio fueron Simulidae, Baetidae y Scirtidae que representaron el 65.46%; y en un GCG alto fueron Chironomidae, Limniphilidae y Tipulidae que representaron el 77.33% (Figura 12).



**Figura 12.** Composición de macroinvertebrados bentónicos a nivel familia analizadas de acuerdo al gradiente de cobertura glaciar

Las taxas con mayor abundancia del total recolectado fueron *Beatidae Andesiops* sp., *Limnephilidae Anomalocosmoecus* sp., *Simulidae Gigantodax* sp., *Simulidae Simullium* sp., *Tipulidae Limonia* sp., *Chironomidae Orthocladiinae* sp. *Chironomidae Diamesinae Paraheptagya* sp., *Scirtidae* sp., *Elmidae Austrelmis* sp., *Ceratopogonidae Ceratopogoninae* sp. y *Oligocheta* sp.; las cuales representaron el 91.70% y 88.44% de la abundancia en época seca y húmeda respectivamente. El orden Díptera fue la que presentó mayor diversidad con 24 y 23 taxas en época seca y húmeda respectivamente, seguido de las ordenes Tricoptera y Coleoptera con 3 taxas cada una, en ambas épocas de muestreo.

**Tabla 6.** Composición de taxas a nivel género de macroinvertebrados bentónicos en las dos temporadas de muestreo

Clase	Orden	Familia/subfamilia	Género	Seca (%)	Húmeda (%)
Insecta	Ephemeroptera	Baetidae	<i>Andesiops</i>	21.71	13.08
		Leptophlebiidae	<i>Meridialaris</i>	0.54	0.43
	Plecóptera	Gripopterygidae	<i>Claudioperla</i>	1.22	1.01
	Trichoptera	Limnephilidae	<i>Anomalocosmoecus</i>	19.93	13.55
			<i>Atopsyche</i>	0.80	0.46
		Hydrobiosidae	<i>Cailloma</i>	0.58	0.41
			<i>Gigantodax</i>	24.49	5.90
		Simulidae	<i>Simulium</i>	1.99	2.93
			<i>Molophilus</i>	0.56	0.72
			<i>Tipula</i>	0.30	0.70
		Tipulidae	<i>Limonia</i>	3.11	8.23
			<i>Tabanus</i>	0.61	0.19
		Díptera	Chironomidae /Orthocladiinae	Orthocladiinae-sp1 <sup>1</sup>	1.75
	Orthocladiinae-sp 2 <sup>1</sup>			0.37	0.98
	Orthocladiinae-sp 3 <sup>1</sup>			0.00	0.07
	Orthocladiinae-sp 4 <sup>1</sup>			0.02	0.97
	Chironomidae /Podonominae		<i>Podonomus</i>	0.51	0.00
			<i>Parochlus</i>	0.02	0.15
	Chironomidae/Diamesinae		<i>Paraheptagya</i>	2.27	9.93
	Chironomidae/Tanypodinae		Tanypodinae-sp <sup>1</sup>	0.09	0.59
	Chironomidae /Chironominae		Chironominae -sp 1 <sup>1</sup>	0.00	0.08
			Chironominae -sp 2 <sup>1</sup>	0.02	0.01
			Chironominae -sp 3 <sup>1</sup>	0.07	0.18
			Chironominae -sp 4 <sup>1</sup>	0.05	0.01
	Empididae	<i>Neoplasta</i>	0.40	0.70	
	Blephariceridae	<i>Limnicola</i>	0.68	2.33	
	Ceratopogonidae /Ceratopogoninae	Ceratopogoninae -1 <sup>1</sup>	1.59	7.91	
	Muscidae	<i>Limnophora</i>	0.89	0.15	

Identificados hasta <sup>1</sup>subfamilia, <sup>2</sup> familia, <sup>3</sup> orden, <sup>4</sup> clase

**Tabla 6.** Composición de taxas a nivel género de macroinvertebrados bentónicos en las dos temporadas de muestreo (continuación)

Clase	Orden	Familia/subfamilia	Género	Seca (%)	Húmeda (%)
Insecta	Díptera	Dolichopodidae	Dolichopodidae -sp <sup>2</sup>	0.07	0.03
		Psychodidae	<i>Maruina</i>	0.02	0.00
		Stratiomyidae	Stratiomyidae -sp <sup>2</sup>	0.02	0.03
	Coleoptera	Scirtidae	Scirtidae -sp <sup>2</sup>	6.32	5.40
		Elmidae	<i>Austrelmis</i>	4.28	3.19
		Staphylinidae	Staphylinidae-sp <sup>2</sup>	0.05	0.03
	Lepidóptera		Lepidóptera-sp <sup>1</sup> <sup>3</sup>	0.00	0.04
<b>Malacostraca</b>	Amphipoda	Hyalellidae	Hyalellidae -sp <sup>1</sup> <sup>2</sup>	0.00	0.06
<b>Arachnida</b>	Trombidiforme	Hydrachnidae	Hydrachnidae -sp <sup>1</sup> <sup>2</sup>	0.00	0.03
<b>Oligochetas</b>			Oligochetas -sp <sup>1</sup> <sup>4</sup>	4.26	8.40
<b>Hirudinea</b>			Hirudinea -sp <sup>1</sup> <sup>4</sup>	0.05	0.04
			Hirudinea -sp <sup>2</sup> <sup>4</sup>	0.33	1.04
<b>Gastropoda</b>	Basommatophora	Planorbidae	Planorbidae -sp <sup>1</sup> <sup>2</sup>	0.02	0.11

Identificados hasta <sup>1</sup>subfamilia, <sup>2</sup> familia, <sup>3</sup> orden, <sup>4</sup> clase

#### 4.1.3.2. Indicadores de biodiversidad Alpha

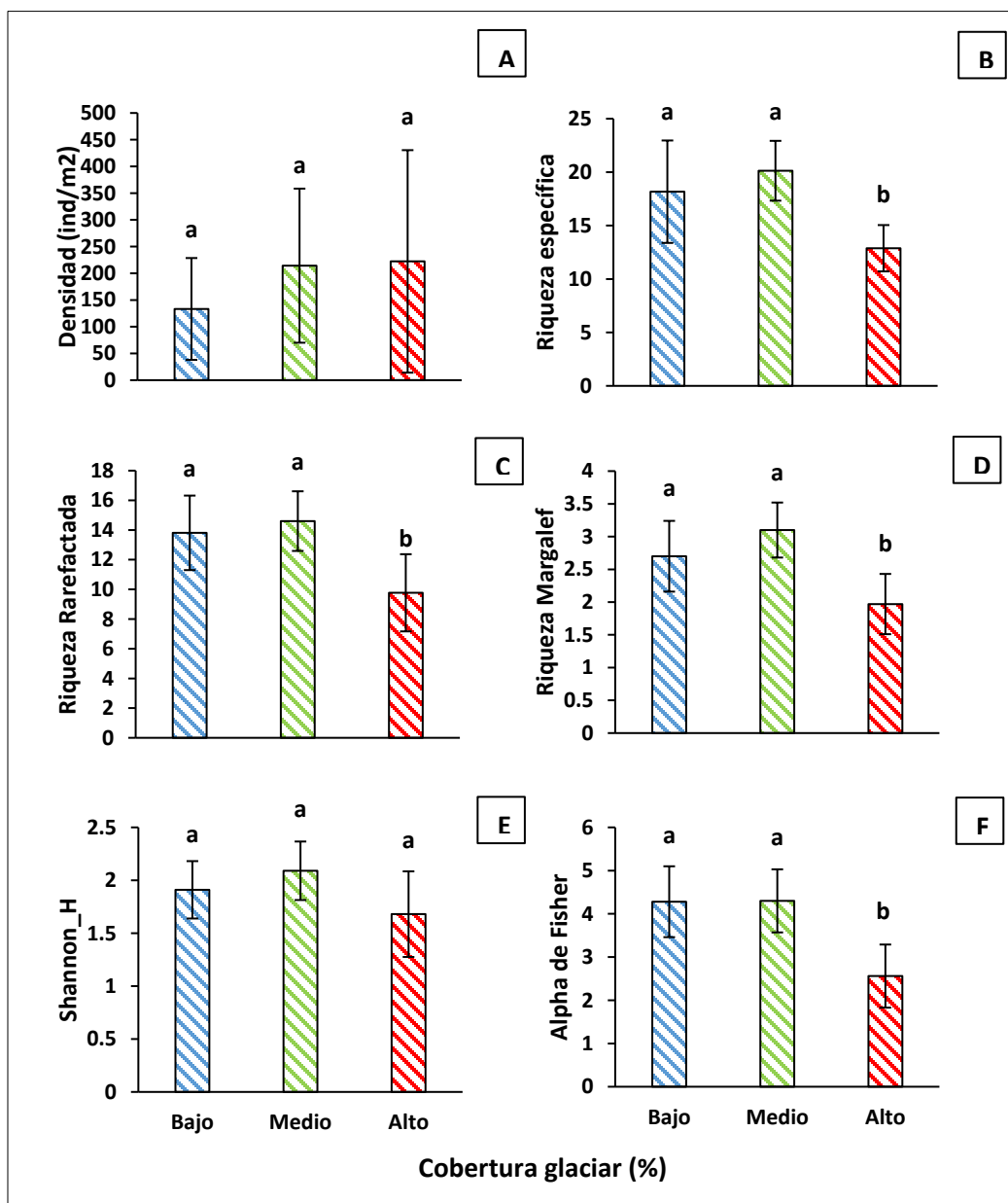
Los resultados descriptivos de los indicadores de biodiversidad local y las pruebas paramétricas de los datos agrupados por época de muestreo y GCG se muestran en la Tabla 7. Con respecto a la época de muestreo, solo se observan diferencias significativas en la densidad, que también tuvo la mayor variabilidad entre puntos de muestreo en ambas épocas de muestreo. Con respecto al GCG, la riqueza de especies (específica y rarefactada) y los índices de Margalef y Alpha de Fisher presentaron diferencias significativas, observando que los índices mencionados fueron menores en la categoría de alto GCG y las categorías bajo y medio no presentaron diferencias significativas (Figura 13). Asimismo, los resultados muestran que la variabilidad de la riqueza específica y rarefactadas fueron más alta comparada con los demás índices, especialmente en la categoría de GCG bajo. La densidad no presentó diferencias significativas de acuerdo a las categorías del GCG.



**Tabla 7.** Estadísticos descriptivos de los indicadores de biodiversidad y comparación de datos agrupados por época de muestreo y GCG

Índice de biodiversidad	Categoría	N	Media (min-max)	Desviación Estándar	P-valor
<b>Época de muestreo</b>					
Abundancia	Seca	11	388.64 (127-1314)	336.54	0.04
	Húmeda	11	658.27 (275-1939)	481.90	
Densidad (ind/m <sup>2</sup> )	Seca	11	146.30 (47-487)	124.67	0.05
	Húmeda	11	243.80 (102-718)	178.48	
Riqueza específica	Seca	11	15.55 (10-20)	2.88	0.14
	Húmeda	11	18.36 (10-27)	5.46	
Riqueza rarefactada (111)	Seca	11	11.9 (5.87-15.41)	2.74	0.29
	Húmeda	11	13.36 (7.86-17.76)	3.54	
Riqueza Margalef	Seca	11	2.56 (1.43-3.16)	0.50	0.50
	Húmeda	11	2.77 (1.45-3.93)	0.87	
Div. Shannon_H	Seca	11	1.8 (0.86-2.26)	0.40	0.23
	Húmeda	11	1.98 (1.46-2.46)	0.31	
Div. Alpha de Fisher	Seca	11	3.56 (1.74-4.85)	0.87	0.68
	Húmeda	11	3.76 (1.71-5.72)	1.36	
<b>Gradiente de cobertura glacial</b>					
Abundancia	Bajo	6	359.66 (127-798)	257.36	0.4
	Medio	8	578.62 (215-1314)	389.15	
	Alto	8	591.12 (192-1939)	565.86	
Densidad (ind/m <sup>2</sup> )	Bajo	6	133.21 (47-296)	95.32	0.41
	Medio	8	214.26 (79-487)	144.18	
	Alto	8	222.24 (71-718)	208.22	
Riqueza específica	Bajo	6	18.17 (14-27)	4.79	0.01*
	Medio	8	20.13 (16-25)	2.80	
	Alto	8	12.88 (10-16)	2.17	
Riqueza rarefactada (111)	Bajo	6	13.81 (9.63-16.64)	2.51	0.02*
	Medio	8	14.60 (12.19-17.78)	2.01	
	Alto	8	9.77 (8.58-14.51)	2.60	
Riqueza Margalef	Bajo	6	2.70 (2.41-3.90)	0.54	0.00*
	Medio	8	3.10 (2.65-3.93)	0.42	
	Alto	8	1.97 (1.43-2.67)	0.46	
Div. Shannon_H	Bajo	6	1.91 (1.46-2.15)	0.27	0.065
	Medio	8	2.09 (1.61-2.46)	0.28	
	Alto	8	1.68 (0.86-2.16)	0.40	
Div. Alpha de Fisher	Bajo	6	4.28 (3.14-5.40)	0.82	0.00*
	Medio	8	4.30 (3.35-5.72)	0.73	
	Alto	8	2.56 (1.71-3.70)	0.73	

Prueba ANOVA (\*p<0.05)



**Figura 13.** Comparación de los indicadores de diversidad Alpha en el GCG. A. densidad, B. riqueza específica, C. riqueza rarefactada, D. riqueza de Margalef, E. Índice de Shannon\_H. F. Índice Alpha de Fisher. Los valores representan la media en cada categoría, las letras representan los grupos de acuerdo a la prueba de comparaciones Tukey ( $p < 0.05$ ).

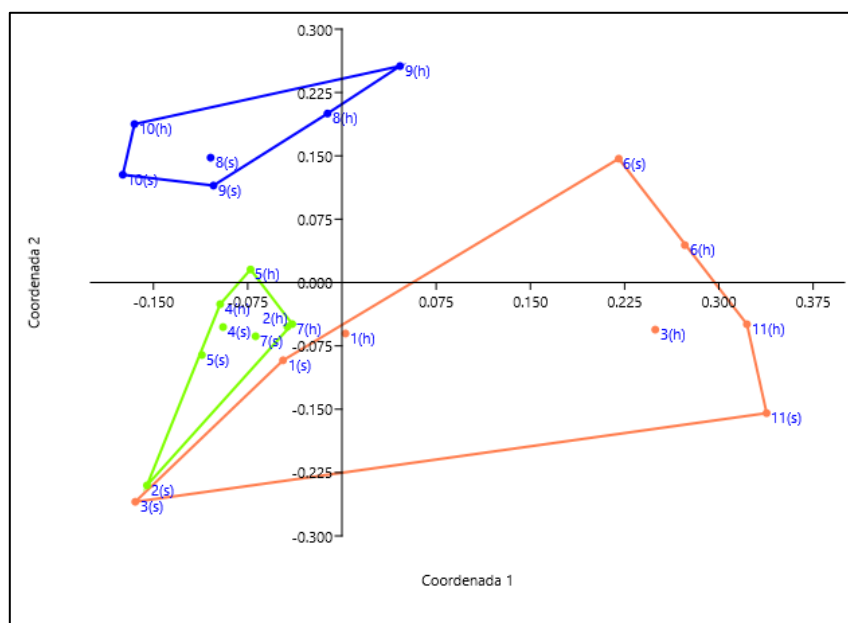
#### 4.1.3.3. Análisis de similitud de la composición de macroinvertebrados bentónicos

En la Tabla 8 se muestra los resultados del Análisis de Similitud (ANOSIM) que representa las diferencias en la composición de macroinvertebrados bentónicos según las categorías estudiadas: época de muestreo y GCG. En caso de la comparación entre épocas de

muestreo las disimilitudes fueron mayores dentro de los grupos que entre los grupos ( $R$  cercano a 0). En caso de los datos analizados según la GCG, si se observan disimilitudes entre los grupos tanto a nivel global como entre categorías ( $R > 0.3$ ). Las mayores similitudes fueron entre las categorías GCG medio y bajo, mientras las categorías alto y medio presentaron menor similitud. Lo mencionado también se puede apreciar en el diagrama de ordenación resultante del Análisis Multidimensional no Paramétrico (NMDS; Figura 14). El diagrama muestra una mayor dispersión de los puntos de la categoría GCG alto y la composición de macroinvertebrados en los puntos P01 (época seca y húmeda) y P07 (época húmeda) presentan similitud con los puntos de la categoría GCG medio.

**Tabla 8.** ANOSIM de dos vías para la abundancia relativa de macroinvertebrados según la época de muestreo y el gradiente de cobertura glaciar

<b>Criterio de análisis</b>	<b>R</b>	<b>Sig,</b>
<b>Época de muestreo</b>	<b>0.12</b>	<b>0.184</b>
<b>Gradiente glaciar de cobertura glaciar</b>	<b>0.50</b>	<b>0.000</b>
Alto- Medio	0.38	0.003
Alto-Bajo	0.58	0.001
Medio-Bajo	0.74	0.000



**Figura 14.** Análisis multidimensional no paramétrico de las estaciones de muestreo a partir de las abundancias relativas de macroinvertebrados

Se realizó en análisis SIMPER para reconocer a las taxas que generaron el recambio de cada par de categoría GCG. Se encontró mayor disimilitud entre las categorías alto y bajo (Tabla 9). Las taxas responsables el recambio entre la categoría baja y media fueron *Ceratopogominae* sp., *Adesiops* sp., *Gigantodax* sp. y *Oligochaeta* sp. Entre la categoría media y alta fueron *Adesiops* sp., *Anomalocosmoecus* sp., *Gigantodax* sp. y *Limonia* sp. Por último, entre la categoría baja y alta fueron *Oligochaeta* sp., *Ceratopogominae* sp., *Adesiops* sp. y *Anomalocosmoecus* sp.

**Tabla 9.** SIMPER de la abundancia relativa de macroinvertebrados según el gradiente de cobertura glaciar

Categorías de GCG	SIMPER			
	Disimilitud promedio general	Taxas	Contribución (%)	Acumulado (%)
Bajo vs Medio	68.97	<i>Oligochaeta</i> sp.	21.81	21.81
		<i>Adesiops</i> sp.	20.07	41.87
		<i>Ceratopogoninae</i> sp.	13.15	55.03
		<i>Gigantodax</i> sp.	10.86	65.88
		<i>Scirtidae</i> sp.	5.903	71.79
		<i>Austrelmis</i> sp.	5.854	77.64

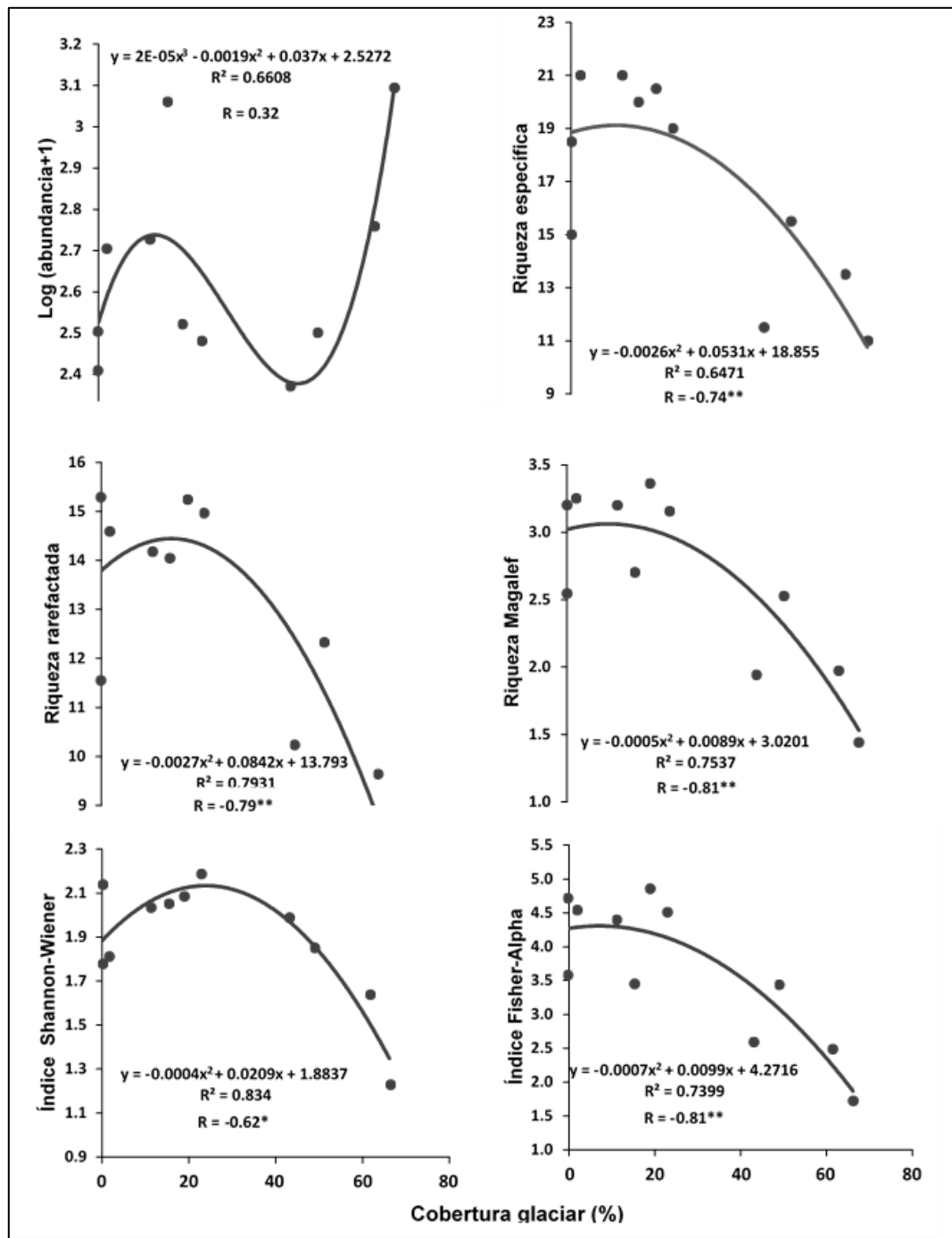
**Tabla 9.** SIMPER de la abundancia relativa de macroinvertebrados según el gradiente de cobertura glaciar (continuación)

Categorías de GCG	SIMPER			
	Disimilitud promedio general	Taxas	Contribución (%)	Acumulado (%)
<b>Medio vs Alto</b>	71.51	<i>Andesiops</i> sp.	17.99	17.99
		<i>Anomalocosmoecus</i> sp.	13.68	31.67
		<i>Gigantodax</i> sp.	11.48	43.15
		<i>Limonia</i> sp.	8.715	51.86
		Orthocladinae sp1.	7.892	59.75
		Scirtidae sp.	7.273	67.03
		<i>Paraheptagya</i> sp.	6.612	73.64
<b>Bajo vs Alto</b>	83.97	Oligochaeta sp.	19.01	19.01
		Ceratopogoninae sp.	11.40	30.42
		<i>Anomalocosmoecus</i> sp.	11.03	41.45
		<i>Andesiops</i> sp.	9.116	50.57
		<i>Limonia</i> sp.	6.647	57.21
		<i>Gigantodax</i> sp.	6.328	63.54
		Orthocladinae sp1.	6.276	69.82
		<i>Austrelmis</i> sp.	5.886	75.7
		<i>Paraheptagya</i> sp.	5.401	81.1
		Scirtidae sp.	5.27	86.37

#### 4.1.4. Influencia del gradiente de cobertura glaciar y los parámetros fisicoquímicos sobre los indicadores de biodiversidad

##### 4.1.4.1. Influencia del gradiente de cobertura glaciar en la diversidad Alpha

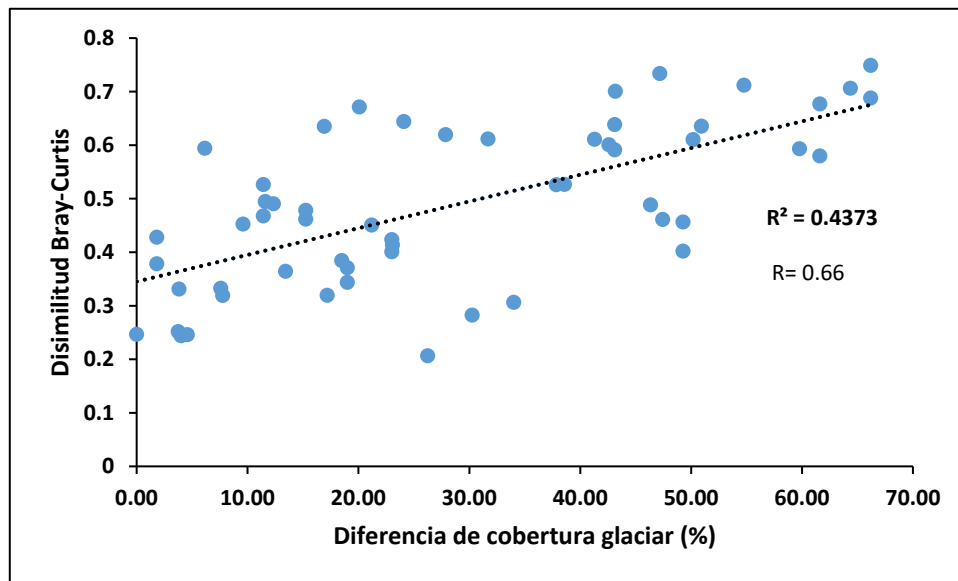
Los resultados muestran que el porcentaje de cobertura glaciar se relacionó significativamente con la riqueza específica ( $p < 0.01$ ), la riqueza rarefactada ( $p < 0.01$ ), el índice de Margalef ( $p < 0.01$ ), el índice de Sahnnon\_H ( $p < 0.05$ ) y el índice Fisher Alpha ( $p < 0.01$ ) (Figura 15). En caso de la abundancia y la densidad se observó una ligera correlación positiva; sin embargo, esta no fue significativa. Los datos se ajustaron mejor a un modelo polinómico de potencia 2, donde la cobertura glaciar explicó mejor la variación de la riqueza rarefactada ( $R^2 = 0.79$ ), el índice de Margalef ( $R^2 = 0.75$ ), el índice de diversidad de Shannon ( $R^2 = 0.83$ ) y el índice Fisher Alpha ( $R^2 = 0.73$ ; Figura 15).



**Figura 15.** Modelos de regresión polinómica y correlaciones de Pearson entre la cobertura glaciár y los indicadores de biodiversidad. \* Correlación significativa  $p < 0.05$ ; \*\* correlación significativa  $p < 0.01$ .  $N = 11$ , en caso de los índices de biodiversidad son los promedios de la época seca y húmeda.

#### 4.1.4.2. Influencia del gradiente de cobertura glaciar en la diversidad Beta

Con respecto a la diversidad beta, existió una correlación positiva significativa ( $p > 0.05$ ) entre diferencia de cobertura glaciar entre puntos y el índice de disimilitud de Bray Curtis, encontrando mayores disimilitudes a medida que la diferencia entre coberturas entre puntos aumenta.



**Figura 16.** Modelos de regresión lineal y correlaciones de Pearson entre la diferencia de cobertura glaciar entre puntos y el índice de disimilitud de Bray-Curtis obtenida de las abundancias relativas promedio transformadas,  $N = 55$ .

#### 4.1.4.3. Influencia de los parámetros fisicoquímicos sobre los indicadores de biodiversidad

Los resultados de las correlaciones muestran que la abundancia y la densidad tuvieron una correlación negativa y significativa con el nitrógeno total ( $p < 0.01$ ) y los nitratos ( $p < 0.05$ ) (la tabla de correlaciones se muestra en Anexo 06). La temperatura fue el parámetro fisicoquímico que se correlacionó significativamente con más indicadores de biodiversidad, relacionándose positivamente con la riqueza específica ( $p < 0.05$ ), riqueza rarefactada ( $p < 0.01$ ), índice de Shannon\_Wiener ( $p < 0.05$ ), índice de Margalef ( $p < 0.01$ ) y índice Fisher Alpha ( $p < 0.01$ ). La turbiedad solo se correlacionó con el índice Fisher Alpha ( $p < 0.05$ ), siendo esta

negativa. Mayores valores de oxígeno disuelto se relacionó significativamente con menor riqueza rarefactada ( $p < 0.01$ ), índices de Margalef y Fisher Alpha ( $p < 0.05$ ). Por último, los puntos con mayor estabilidad del cauce se relacionaron con mayores valores de riqueza específica ( $p < 0.05$ ), riqueza rarefactada ( $p < 0.05$ ), índices de Margalef y Fisher Alpha ( $p < 0.05$ ). Las demás variables fisicoquímicas no se correlacionaron significativamente con índices de biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos.

Adicional a los parámetros fisicoquímicos, se evaluó la relación de los índices de biodiversidad con el área de drenaje, pendiente, altitud y distancia al glaciar. Los resultados evidenciaron que la distancia al glaciar y la altitud presentaron correlaciones significativas con los indicadores de biodiversidad, observando que a mayor distancia del punto de muestreo los índices la riqueza específica ( $p < 0.01$ ), la riqueza rarefactada ( $p < 0.01$ ), el índice de Shannon-Wiener ( $p < 0.05$ ), el índice Margalef ( $p < 0.01$ ) y el índice Alpha Fisher ( $p < 0.01$ ) tendieron a ser mayores; asimismo, a mayor altitud del punto de muestreo se encontró menor riqueza rarefactada ( $p < 0.05$ ), índice de Margalef ( $p < 0.05$ ) y Alpha de Fisher ( $p < 0.05$ ).

Los resultados de los coeficientes de determinación muestran que, si bien se han encontrado relaciones significativas entre los parámetros fisicoquímicos mencionados anteriormente y los índices de biodiversidad, el porcentaje de varianza explicado por las variables independientes (parámetros fisicoquímicos) son bajos, siendo los máximo valores de 0.45 (oxígeno disuelto y riqueza rarefactada) y 0.36 (temperatura e índice de Margalef/Fisher\_alpha). La distancia del punto de muestreo al glaciar explicó mejor la variabilidad de los indicadores de biodiversidad con valores de 0.71, 0.79, 0.56, 0.74 y 0.72 de  $R^2$  en el caso de la riqueza específica, la riqueza rarefactada, el índice de Shannon-Wiener, el índice de Margalef y el índice Fisher Alpha respectivamente (Tabla 10).



**Tabla 10:** Coeficiente de determinación de las variables relacionadas significativamente con los indicadores de biodiversidad

Parámetro	Abundancia	Densidad	Riqueza Especifica	Riqueza Raref.	Shannon Wiener	Margalef	Fisher_alpha
Temperatura	0.13	0.13	0.23*	0.30**	0.21*	0.36**	0.36**
Turbiedad	0.09	0.09	0.11	0.05	0.05	0.18	0.18*
Oxígeno disuelto	0.03	0.03	0.16	0.45**	0.08	0.25*	0.25*
Índice de Pfanckuch	0.00	0.00	0.21*	0.18*	0.07	0.22*	0.19*
Nitrógeno T	0.37**	0.35**	0.01	0.00	0.00	0.03	0.06
Nitratos	0.24*	0.23*	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01
Zn	0.00	0.00	0.03	0.15	0.28*	0.04	0.04
Altitud	0.09	0.11	0.35	0.37	0.24	0.42*	0.42*
Distancia al Glaciar	0.07	0.08	0.71**	0.79**	0.56*	0.74**	0.72**

\* Correlación significativa  $p < 0.05$ ; \*\*correlación significativa  $p < 0.01$ .

#### 4.1.5. Influencia del gradiente glaciar y los parámetros fisicoquímicos en los patrones de distribución de macroinvertebrados bentónicos

Los resultados del Análisis de Redundancia (ARD) de las abundancias relativas de macroinvertebrados transformadas y los parámetros fisicoquímicos muestran que los tres primeros ejes explicaron el 56.5% de la variabilidad. El primer eje explicó el 31% de variabilidad y estuvo correlacionada con la temperatura, índice de Pfanckuch, cloruros y oxígeno disuelto; mientras que, el segundo eje explicó el 14 % de la variabilidad y se correlacionó con el magnesio, sodio, pH y potasio; por último, el tercer eje explicó el 12% de la variabilidad y estuvo correlacionado con el carbono orgánico disuelto, nitratos, nitrógeno total y carbono orgánico disuelto. Las variables ambientales que explicaron de manera significativa (test de permutaciones múltiples de Monte Carlo,  $p$ -valor $<0.05$ ) la abundancia de taxas de macroinvertebrados fueron el carbono inorgánico disuelto, la temperatura, el índice de Pfanckuch, el calcio y magnesio.

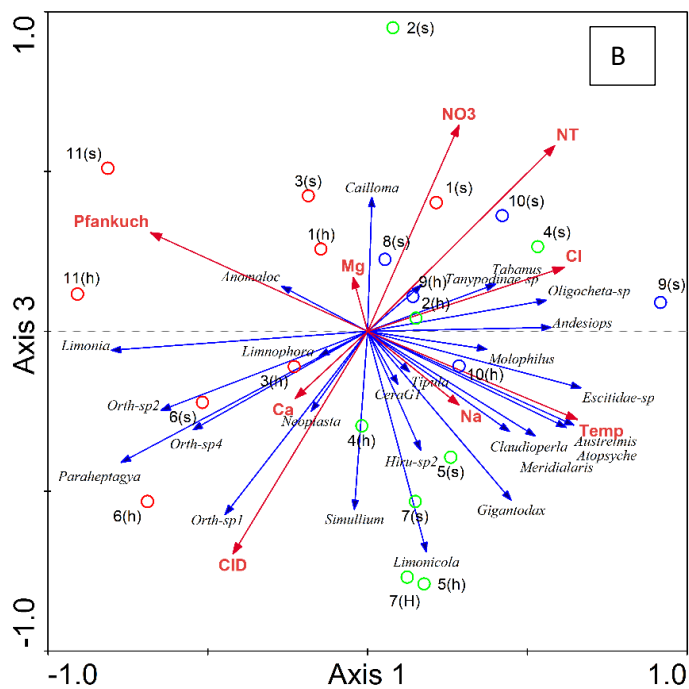
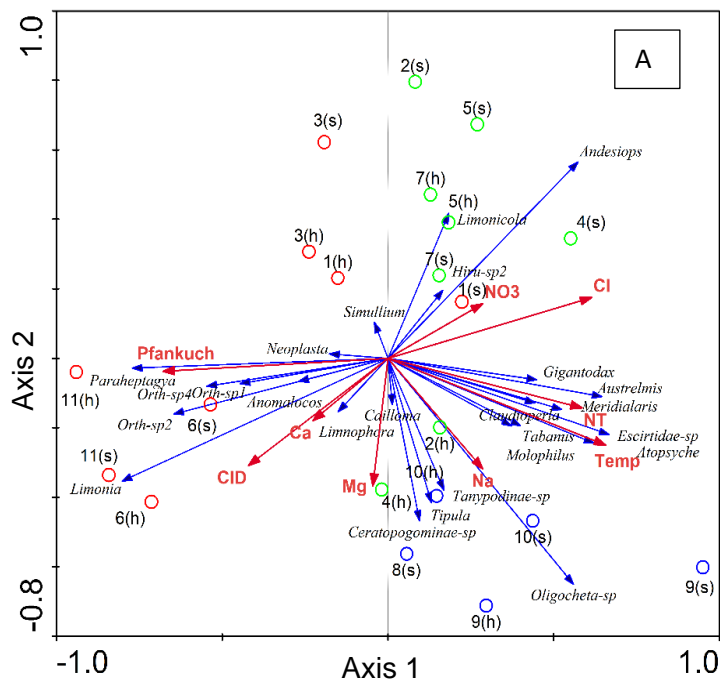
El diagrama de ordenación *triplot* del Análisis de Redundancia (RDA) de las variables ambientales y las abundancias relativas de taxas transformadas se presentan en la **Figura 17A**.

Se observa en la zona izquierda del diagrama un grupo de corrientes de agua pertenecientes a la categoría GCG alta (puntos rojos) con características fisicoquímicas comunes como menor inestabilidad del cauce, bajas temperaturas y mayor concentración de carbono inorgánico disuelto (excepto P01 en época seca el cual presentó temperaturas más altas). Las taxas de macroinvertebrados que presentaron mayores abundancias en esta zona fueron *Anomalocosmoecus* sp., *Limonia* sp., *Paraheptagya* sp. y la sub familia Orthocladinae.

En la zona superior derecha del diagrama (Figura 17A) se agruparon puntos de la categoría GCG baja (puntos azules) los que presentaron mayores temperaturas y concentraciones de calcio y sodio. Adicionalmente, el diagrama de ordenación que representa los ejes 1 y 3 (Figura 17B), muestra en la parte inferior izquierda que en estos puntos de muestreo también se presentaron las mayores concentraciones de nitrógeno total, nitratos y carbono orgánico disuelto; sin embargo, estas condiciones también se observaron en algunos puntos de la categoría GCG medio (P02 y P04). En esta zona se registraron las mayores abundancias de Oligochetas sp., Ceratopogoninae sp., *Tipula* sp. y Tanyponinae sp..

Un tercer agrupamiento perteneció a la categoría GCG medio, ubicándose en la parte inferior izquierda del diagrama. En esta zona, se registraron valores medios de temperatura y estabilidad de cauce. Asimismo, se caracterizó por sus bajas concentraciones de CID y concentraciones medias a bajas de COD, nitratos y nitrógeno total (excepto del punto P02 y P04 donde se presentaron niveles altos de nutrientes). Las taxas con mayores abundancias en esta zona fueron *Limonicola* sp. y Hirudinea-sp2.

Las taxas de macroinvertebrados *Claudioperla* sp., Scirtidae sp., *Atopsyche* sp., *Austrelmis* sp., *Meridialaris* sp., *Tabanus* sp. *Molophilus* sp. se presentaron de forma más homogénea entre las categorías GCG medio y bajo.



**Figura 17:** Análisis de Redundancia de las abundancias relativas con respecto a las variables ambientales. A eje 1 vs eje 2. B eje 1 vs eje 3 Las etiquetas de las variables fisicoquímicas son: Temp, temperatura; Cond, conductividad; Pfankuch, índice de Pfankuch; NT, nitrógeno total; COD, carbono orgánico disuelto; CID, carbono inorgánico disuelto; Cl, Cloruros. Las etiquetas de los puntos de muestreo son: s, temporada seca; h, temporada húmeda. El GCG se muestra en los colores: azul, baja; verde, media; rojo, alta

## 4.2. Discusiones

### 4.2.1. Gradiente de cobertura glaciar

Se determinó a través de técnicas de teledetección el porcentaje de cobertura glaciar asociada a 11 arroyos de agua de las unidades hidrográficas de Parón, Huaytapallana y Llanganuno ubicadas en la cordillera Blanca. Esta metodología ya ha sido utilizado en otras investigaciones para modelar los posibles impactos del retroceso glaciar en la diversidad acuática de ríos (L. Füreder et al., 2002; Jacobsen et al., 2012) ante la dificultad de realizar estudios temporales. En este trabajo generó un GCG en un intervalo de 0 a 66.19% a través de una imagen satelital sentinel2 del año 2019, insumo importante en la búsqueda de relaciones y modelos de los impactos del retroceso glaciar sobre los ecosistemas acuáticos en la cordillera Blanca. Sin embargo, es importante señalar que hubo diferencias en las áreas de drenaje asociados a los puntos de muestreo y estando este parámetro relacionado con la captación de precipitación y esorrentía de deshielo y nieve, los resultados del presente estudio deben corroborarse teniendo en cuenta la cuantificación espacio temporal de los aportes en una cuenca glaciar, tal como lo señalan los estudios de clasificación realizados en base a los registros fisicoquímicos de ríos glaciares de los Pirineos franceses (L. Brown et al., 2003, 2009).

En los resultados resalta la presencia de glaciares cubiertos por detritos asociados a la mayoría corrientes de agua estudiados. Los glaciares cubiertos pueden alterar el régimen de deshielo comparado con un glaciar libre de ellos, ya que actúa como aislante y retarda la respuesta de deshielo a las condiciones meteorológicas; por consiguiente, se genera un retraso en los caudales pico. Asimismo, las condiciones fisicoquímicas de la esorrentía pro glaciar asociado a glaciares cubiertos también pueden tener comportamiento distinto en términos de conductividad y concentración de iones de sulfatos y bicarbonatos debido al contacto prolongado del agua con detritos de las zonas supraglaciares y subglaciares (Fyffe et al., 2019).

Es de esperar que los patrones de las condiciones fisicoquímicas ambientales y la comunidad de macroinvertebrados de los arroyos estudiados presentes diferencias con respecto a los modelos generados en los glaciares templados del norte.

Por otro lado, el análisis temporal del área glaciar (1962-1975 al 2019) evidenció el gran retroceso que está sufriendo esta zona de la cordillera Blanca lo que sustenta la importancia del estudio de la respuesta de la biodiversidad acuática ante la inminente desaparición de los glaciares.

#### **4.2.2. Parámetros fisicoquímicos ambientales**

Se registraron parámetros fisicoquímicos del agua de 11 asociado a un GCG. Los resultados evidencian que en los puntos de muestreo donde el gradiente de cobertura glaciar fue alto, se encontraron menores temperaturas, mayor turbiedad y menor estabilidad del cauce lo que concuerda con el modelo de ríos glaciares generado por Milner & Petts (1994). Sin embargo, se esperaba que los puntos con mayor influencia glaciar (P01, P03 y P11) se encontraran características fisicoquímicas similares a las corrientes Kryal donde la temperatura máxima es menor a 2°C y la turbiedad es mayor a 30 NTU. Según autor Milner et al. (2001), el comportamiento de la temperatura de los corrientes glaciares, también está determinada por la distancia del punto de muestreo a la lengua glaciar, lo que genera mayor interacción con otras fuentes de agua y una gradiente de variables meteorológicas relacionadas con la altitud. En nuestro caso los puntos de muestreo estuvieron a una distancia distinta de la lengua glaciar (Ver Anexo 3, Tabla 12) por lo que es necesario complementar los resultados con estudios fisicoquímicos a lo largo de los corrientes alimentados por glaciares en la cordillera Blanca.

La turbiedad está relacionada con la reelaboración y transporte de sedimentos, según los estudios realizados por Iturrizaga (2018) la geomorfología glaciar asociada los puntos P01 y P06 corresponde a morrenas inactivas que no son transportadas debido al bajo flujo de deshielo

glaciar lo que explica los niveles bajos de turbiedad. Por otro lado, la presencia de glaciares cubiertos en los puntos P01, P03 y P06 pueden tener alguna relación con la carga de sedimentos debido a sus efectos sobre los patrones de deshielo e hidrología (Fyffe, 2012; Fyffe et al., 2019); sin embargo, aún no se han realizado estudios que confirmen lo mencionado.

En las corrientes con alto GCG también se encontraron los mayores índices de Pfanckuch (mayor inestabilidad del cauce). Sin embargo, en el P01 (49.27% GCG) se encontró niveles de estabilidad mayores inclusive a los puntos categorizados en GCG medio, este comportamiento puede estar relacionado con la inactividad de morrenas y la formación de una nueva laguna la cual puede estar amortiguando la carga de sedimentos. Con respecto a la conductividad Milner & Petts (1994) mencionan que las corrientes Kryal no sobrepasan el valor de  $10\mu\text{S}/\text{cm}$ . En el presente estudio se encontraron valores de conductividad máxima de 36 y  $22.1\mu\text{S}/\text{cm}$  en el P11 y P06 (ambos asociados a glaciares cubiertos), relacionado principalmente a mayores concentraciones de sulfatos, calcio y carbono inorgánico disuelto, en caso del P11 y carbono inorgánico disuelto, calcio, sodio y silicio, en caso del punto P06. Fyffe et al. (2019) encontró valores aún más altos de conductividad en ríos proglaciares del glaciar cubierto Miage-Francia ( $47.2$  a  $70.2\mu\text{S}/\text{cm}$ ) relacionados a la presencia de sulfatos y bicarbonatos. El estudio menciona que la causa principal del enriquecimiento con sulfatos es la mayor interacción agua-sedimentos del lecho rocoso que genera la oxidación de los sulfuros.

El carbono orgánico disueltos, en puntos con GCG alto, no presentó diferencias significativas con las categorías media y baja, inclusive se registró el mayor valor en el punto con mayor influencia glaciar (P11) en época seca. Según estudios realizados en 26 glaciares en Austria, el glaciar puede almacenar carbono orgánico a través de deposiciones atmosféricas (plantas, aerosoles y suelos) o el metabolismo microbiano y después es emitido a la corriente principalmente en la primera etapa del retroceso glaciar (Singer et al., 2012).

Con respecto al nitrógeno total, en GCG alto se encontró concentraciones de hasta 0.38 mg/l en el punto P01, siendo este valor mayor que los registros de los puntos asociados a menor cobertura glaciar (P07, P05, P10 y P02) lo que nos indica similitud de condiciones referidos a fuente de nutrientes. La presencia de nitrógeno en ríos glaciares puede estar relacionado a deposiciones atmosféricas originadas por la urbanización, agricultura y procesos biológicos (Brighenti et al., 2019).

En corrientes asociada a GCG bajo las condiciones fueron más favorables, se encontraron temperaturas altas y menores valores de turbiedad. Sin embargo, se registró en los puntos P08 y P10 inestabilidades del cauce altas en comparación al P09, debido a factores topográficos y pendientes altas. La conductividad solo fue alta en el P10 donde también se encontró concentraciones altas de sulfatos, carbono inorgánico disuelto, calcio, magnesio, sodio y silicio. Mientras que en los P09 y P08 solo se registraron valores altos de silicio. La presencia de aniones y cationes en estas las corrientes mencionadas puede indicarnos mayor tiempo de interacción roca-agua que se asemejan a las características fisicoquímicas de corrientes alimentados por deshielo de nieve o precipitación (Malard et al., 1999).

La evaluación de temporal (época de muestreo) de los parámetros fisicoquímicas evidencia que la precipitación líquida en la zona de estudio aumentó la temperatura, turbiedad y el carbono inorgánico disuelto en el agua. Sin embargo, la dilución disminuyó significativamente la concentración de carbono orgánico disuelto, nitrógeno total, nitratos, fluoruros, cloruros y boro. Este comportamiento se corrobora en el análisis de componentes principales donde los registros temporales no se muestran contiguos en los diagramas.

### 4.2.3. Biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos

Se encontró menor diversidad local en corrientes asociadas a GCG alto lo que concuerda con el modelo propuesto por Milner & Petts (1994). Se registró valores de riqueza entre 10 a 16 con valores mínimos en el punto P11 (61.61%). Los resultados se asemejan a los reportes de Espinoza-Barrera (2014) en el glaciar Antisana del Ecuador, quien encontró en corrientes Kryal, riquezas de macroinvertebrados en un rango de 8 a 16, en porcentajes de cobertura glaciar entre 39.38 a 64.61%. Este estudio nos muestra además que la riqueza puede disminuir hasta 2 cuando el GCG alcanza el 93.24%, por lo que es necesario ampliar el rango de GCG en futuros estudios. La diversidad y riqueza en la categoría media y baja no presentaron diferencias significativas; sin embargo, se observa que estos parámetros fueron ligeramente mayores en la categoría GCG medio lo que puede ser explicado por la teoría de la perturbación intermedia que predice picos de diversidad y riqueza bajo condiciones de estrés intermedio (Leopold Füreder, 2012)

El ANOSIM encontró diferencias en la composición de macroinvertebrados bentónicos en las 3 categorías de GCG. Lo que indica que corrientes asociados a una misma categoría de GCG presentaron similar composición de taxas y a su vez la composición entre categorías presentó diferencias significativas. Sin embargo, el punto P01 (época seca y húmeda) presentó diferencias en su composición con respecto a los demás puntos de la categoría GCG alto, esta corriente registró mayor abundancia de *Andesiops* sp., no hubo presencia de *Paraheptagya* sp. y se encontraron taxas de las coleópteras Scirtidae y Elmidae ausentes en puntos con mayor GCG. Las diferencias en composición pueden ser explicadas por los mayores niveles de estabilidad y baja turbiedad registrados en este punto en las dos épocas de muestreo.

En GCG alto se encontró mayor abundancia de *Anomalocosmoecus* sp., *Limonia* sp, *Paraheptagya* sp., y Othocladinae sp. Los resultados evidencian que los puntos categorizados



como GCG alto presentaron influencia glaciaria moderada, ya que en otros estudios de glaciares templados de Europa y glaciares tropicales internos del Ecuador, el filtro ambiental genera que solo taxas especializadas Quironómidos estén presentes en corrientes con alta influencia glaciaria (Brittain & Milner, 2001; Milner et al., 2009; Milner & Petts, 1994; Ward, 1994). Sin embargo, los resultados resaltan el aumento en abundancia de la díptera Chironomidae Deamesinae *Paraheptagya* sp. al aumentar del GCG, el cual ya ha sido reportada como macroinvertebrado especialista de corrientes glaciares del reserva Nacional Antisana (Jacobsen et al., 2010). Las altas abundancias de *Anomalocosmoecus* sp. y *Limonia* sp. en GCG alto (específicamente el P11; GCG: 66.19%) difiere del modelo propuesto por Milner et al. (2009) donde las taxas mencionadas aparecen a porcentajes de glaciación menores al 50%. Asimismo, se encontró *Gigantodax* sp. en todos los puntos de GCG alto siendo su rango de aparición menor del 45% de glaciación. A medida que el GCG disminuyó otras las taxas de Simuliidae y Beatidae fueron más abundantes. En GCG bajo las taxas de Oligochaeta, Ceratopogoninae sp., *Austrelmis* sp. y Scirtidae sp. fueron más abundantes, lo que concuerda con los trabajos de Milner et al. (2009) donde se encontraron coleópteras en porcentajes cercanos 0, Ceratopogonidae menor a 5% y oligochaeta menor a 25%. Sin embargo, las taxas mencionadas también fueron registradas en algunos puntos de gradiente cobertura glaciaria media y alta debido a las condiciones locales de vegetación riverense y geomorfología glaciaria. Los resultados evidencian un recambio de taxas generadas por el gradiente de cobertura glaciaria.

#### **4.2.4. Influencias del gradiente de cobertura glaciaria en la biodiversidad y ensamblaje de macroinvertebrados bentónicos**

Se encontraron coeficientes de ajuste a un modelo polinómico entre el GCG y los indicadores de biodiversidad de hasta 83% (Shannon-Wiener). Los resultados fueron similares a los reportados por Ibarra (2016) en la reserva ecológica Antisana, quien encontró un ajuste

ligeramente menor entre el índice glaciario y la riqueza de taxas ( $R^2 = 0.73$ ). Asimismo, los coeficientes de Pearson entre el GCG y la riqueza específica/rarefacta (0.74 y 0.79 respectivamente) fueron mayores a los reportados por Espinoza-Barrera (2014) quien reportó coeficientes de 0.57 y 0.59. Los resultados confirman la influencia negativa de GCG sobre la diversidad local de macroinvertebrados bentónicos. Con relación a la diversidad beta se encontró una relación positiva significativa entre las diferencias de cobertura glaciario asociado a los puntos de muestreo y el índice de similitud de Bray Curtis, con un coeficiente de determinación de 0.44, mayor al encontrado en el estudio de Brown, Hannah, et al. (2007) que correlacionó las diferencias del porcentaje de aporte de escorrentía glaciario y el índice de similitud de Bray Curtis ( $r = 0.46$ ).

La variable fisicoquímica que tuvo mayor influencia en la diversidad y ensamblaje de macroinvertebrados fue la temperatura, en este aspecto Brown et al. (2003b), menciona que la temperatura del agua es reconocida por su mayor contribución en la estructura y función de la comunidad debido a que controla el radio de crecimiento, los tiempos de ciclo de vida y los radios de producción primaria y secundaria. Asimismo, otros factores significativos como la estabilidad del cauce que estuvo directamente relacionada con la presencia de biofilm y briofitas que son fuente de alimento y hábitat para los zoobentos, Asimismo, los resultados corroboraron que la distancia del punto de muestreo al glaciario influye de manera significativa sobre la diversidad y riqueza tal como mencionan Milner & Petts (1994). En caso de GCG alto el análisis de redundancias evidenció la influencia de carbono inorgánico disuelto, que como se explicó en análisis previos está relacionada con la presencia de glaciares cubiertos por detritos. En GCG baja la estructuración de macroinvertebrados estuvo relacionada con la mayor cantidad de silicio y calcio elementos esenciales para las microalgas y macroinvertebrados (Allan & Castillo, 2007).

#### 4.2.5. Discusiones adicionales

La escasa información sobre los efectos del retroceso glaciar sobre los ríos altoandinos alimentados por glaciares tropicales externos (Perú Chile y Bolivia), no permite realizar comparaciones de los resultados; sin embargo, al ser esta la primera investigación enfocada en el estudio de la respuesta de organismos bentónicos ante los efectos del cambio climático en la cordillera Blanca, es de destacar su importancia para el inicio de una línea de investigación y generar información preliminar acerca de las tendencias y patrones que se observan en la biodiversidad acuática. La presente investigación reveló la falta de información en la identificación de taxas a niveles de género y especie. Asimismo, la ausencia de investigaciones sobre la clasificación de corrientes según sus principales fuentes de aporte (hielo, nieve, lluvia, agua subterránea). En tal sentido se abren puertas para futuras investigaciones que permitan llegar a propuestas claras en acciones de conservación y generación de instrumentos para los gestores de cuencas glaciares de esta manera detectar de manera temprana los efectos del cambio climático sobre la cordillera Blanca.

## CONCLUSIONES

- Se determinó el gradiente de cobertura glaciar en las unidades hidrográficas Parón, Huaytapallana y Llanganuco, en un rango de 0 a 66.9% abarcando un total de 16.95 km<sup>2</sup> de cobertura glaciar.
- Las condiciones fisicoquímicas fueron más hostiles en corrientes de agua asociadas a GCG alto las cuales se caracterizaron por ser más frías, menos estables y con mayor turbiedad. El estrés ambiental disminuyó en GCG medio y bajo debido el aumento de la temperatura, la disminución de la turbiedad y aumento de la concentración de silicio y calcio.
- Se encontró menores valores de riqueza específica, riqueza rarefactada, riqueza de Margalef e índice Alpha de Fisher de macroinvertebrados bentónicos en corrientes asociadas a GCG alto, no encontrando diferencias significativas en las categorías bajo y medio.
- El gradiente de cobertura glaciar se correlacionó de forma negativa y significativa con los indicadores de diversidad local, explicando el 74 % de la variabilidad de la riqueza específica, 79% de la riqueza rarefactada, 81 % de la riqueza de Margalef, 62% del índice Shannon y 81% del índice Alpha de Fisher. Asimismo, las diferencias entre porcentaje de cobertura glaciar asociada a cada punto se correlacionaron de forma positiva y significativa con la diversidad Beta, evidenciado un recambio de taxas a medida que la diferencia de cobertura glaciar aumenta. Se destaca el aumento de la abundancia de *Orthocladinae* sp1. y *Paraheptagya* sp., *Anomalocosmoecus* sp. y *Limonia* sp. a medida que el porcentaje de cobertura glaciar aumenta, sustituyendo a las taxas de Oligoquetas, *Ceratopogominae* sp., *Scirtidae* sp., *Austrelmis* sp. y *Claudioperla* sp.

- La temperatura del agua y la estabilidad del cauce fueron los parámetros ambientales que explicaron mejor el comportamiento de los indicadores de diversidad local de macroinvertebrados bentónicos. Asimismo, los factores globales como la altitud y distancia al glaciar mostraron alta influencia sobre los índices de biodiversidad local.
- Los parámetros fisicoquímicos que explicaron mejor los patrones de ensamblaje de macroinvertebrados fueron la temperatura del agua, el carbono inorgánico disuelto, el calcio, el magnesio y la estabilidad del cauce. El análisis de redundancia mostró que las abundancias de *Anomalocosmoecus* sp., *Limonina* sp., *Paraheptagya* sp. y la sub familia Orthocladinae se relacionaron con bajas temperaturas, altas concentraciones de carbono inorgánico y altos niveles de inestabilidad, características asociadas a puntos con mayor cobertura glaciar.

## RECOMENDACIONES

- Seguir con los trabajos de identificación de macroinvertebrados a mayor resolución taxonómica en la cordillera Blanca y otras cordilleras glaciares del Perú.
- Estudiar la biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos a gradientes de cobertura glaciar mayores a 69%.
- Implementar una red de monitoreo continuo de parámetros fisicoquímicos y la diversidad acuática que permita generar modelos en diferentes escalas temporales y espaciales.
- Realizar estudios de diversidad de macroinvertebrados en un gradiente longitudinal y altitudinal de ríos glaciares.
- Estudiar la influencia de cobertura glaciar sobre otros componentes del ecosistema acuático de ríos glaciares, como las macrófitas, microorganismos y microalgas.
- Realizar estudios en la cordillera Blanca sobre la clasificación de corrientes de agua según la proporción de aporte de hielo, nieve, lluvia y agua subterránea.
- Estudiar la influencia de glaciares de roca/cubiertos, drenajes ácidos de roca, lagunas y humedales en el comportamiento de la biodiversidad y composición de macroinvertebrados bentónicos de ríos glaciares de las diferentes cordilleras glaciares del Perú.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allan, J. D., & Castillo, M. M. (2007). Streamwater chemistry. In *Stream Ecology* (pp. 57–74). Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5583-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5583-6_4)
- Andino, P., Espinosa, R., Jacobsen, D., Dangles, O., & Cauvy-frauni, S. (2015). *Temporal scaling of high flow effects on benthic fauna: Insights from equatorial glacier-fed streams*. 2009, 1836–1847. <https://doi.org/10.1002/lno.10137>
- Autoridad Nacional del Agua. (2010). *Inventario de Glaciares Cordillera Blanca*.
- Autoridad Nacional del Agua. (2012). Delimitacion y codificacion de unidades hidrograficas del Perú(p.104).  
<https://www.google.com/search?q=delimitación+y+codificación+de+unidades+hidrográficas+del+perú&oq=delimitacion+y+codificacion+&aqs=chrome.2.69i57j0l3j69i60.760645j1j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8>
- Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Condom, T., Bury, J., Huh, K.-I., Portocarrero, C., Gómez, J., & Rathay, S. (2012). Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58(207), 134–150. <https://doi.org/10.3189/2012jog11j186>
- Brighenti, S., Tolotti, M., Cristina, M., Wharton, G., Pusch, M. T., & Bertoldi, W. (2019). Science of the Total Environment Ecosystem shifts in Alpine streams under glacier retreat and rock glacier thaw : A review [Elsevier B.V.]. In *Science of the Total Environment* (Vol. 675). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.221>
- Brittain, J. E., & Milner, A. M. (2001). Ecology of glacier-fed rivers: Current status and concepts. *Freshwater Biology*, 46(12), 1571–1578. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2001.00845.x>
- Brown, L. E., Hannah, D. M., & Milner, A. M. (2005). Spatial and temporal water column and streambed temperature dynamics within an alpine catchment: Implications for benthic communities. *Hydrological Processes*, 19(8), 1585–1610. <https://doi.org/10.1002/hyp.5590>
- Brown, L. E., Hannah, D. M., & Milner, A. M. (2007). Vulnerability of alpine stream

- biodiversity to shrinking glaciers and snowpacks. *Global Change Biology*, 13(5), 958–966. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01341.x>
- Brown, L. E., Milner, A. M., & Hannah, D. M. (2007). Hydroecology of Alpine Rivers. In P. J. Wood, D. M. Hannah, & J. P. Sadler (Eds.), *Hydroecology and Ecohydrology: Past, Present and Future* (pp. 339–360).
- Brown, L., Hannah, D., & Milner, A. (2003). Alpine Stream Habitat Classification: An Alternative Approach Incorporating the Role of Dynamic Water Source Contributions. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 35(3), 313–322. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2003\)035\[0313:ASHCAA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2003)035[0313:ASHCAA]2.0.CO;2)
- Brown, L., Hannah, D., & Milner, A. (2009). ARISE : a classification tool for Alpine RIVER and Stream Ecosystems. *Freshwater Biology*, 54, 1357–1369. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.02161.x>
- Burns, P., & Nolin, A. (2014). Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010. *Remote Sensing of Environment*, 140, 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.026>
- Carey, M., Molden, O. C., Rasmussen, M. B., Jackson, M., Nolin, A. W., & Mark, B. G. (2017). Impacts of Glacier Recession and Declining Meltwater on Mountain Societies. *Annals of the American Association of Geographers*, 107(2), 350–359. <https://doi.org/10.1080/24694452.2016.1243039>
- Cauvy-Fraunié, S. A. (2014). Hydroecology of invertebrate communities in equatorial glacier-fed streams.
- Croce, F. A., & Milana, J. P. (2002). Internal structure and behaviour of a rock glacier in the Arid Andes of Argentina. *Permafrost and Periglacial Processes*, 13(4), 289–299. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ppp.431>
- Dominguez, E., & Fernández, H. (2009). Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y biología. In Fundación Miguel Lillo (Primera ed). <https://doi.org/978-950-668-015-2>
- Espinoza-Barrera, R. (2014). Diversity patterns of aquatic macroinvertebrates across stream



- types and glacial influence in a tropical high-Andean catchment. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Favier, V., Coudrain, A., Cadier, E., Francou, B., Ayabaca, E., Maisincho, L., Praderio, E., Villacis, M., & Wagnon, P. (2008). Evidence of groundwater flow on Antizana ice-covered volcano, Ecuador. *Hydrological Sciences Journal*, 53(1), 278–291. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.1.278>
- Fell, S. C., Carrivick, J. L., Kelly, M. G., Füreder, L., & Brown, L. E. (2018). Declining glacier cover threatens the biodiversity of alpine river diatom assemblages. *Global Change Biology*, 24(12), 5828–5840. <https://doi.org/10.1111/gcb.14454>
- Francou, B. (2013). El rápido retroceso de los glaciares en los Andes tropicales : Un desafío para el estudio de la dinámica de los ecosistemas de alta montaña Rapid retreat of glaciers in the Tropical Andes : a challenge for studying the dynamics of high mountain ecosystems. 48(2), 69–71.
- Füreder, L., Vacha, C., Amprosi, K., Bühler, S., Hansen, C. M. E., & Moritz, C. (2002). Reference Conditions of Alpine Streams : Physical Habitat and Ecology. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 2(2), 275–294.
- Füreder, Leopold. (2012). Freshwater ecology: Melting biodiversity. *Nature Climate Change*, 2(5), 318–319. <https://doi.org/10.1038/nclimate1508>
- Fyffe, C. (2012). The hydrology of debris-covered glaciers. University of Dundee (tesis de doctorado).
- Fyffe, C., Brock, B., Kirkbride, M., Black, A., Smiraglia, C., & Diolaiuti, G. (2019). The impact of supraglacial debris on proglacial runoff and water chemistry. *Journal of Hydrology*, 576(June), 41–57. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.023>
- George, G. L., Burgess, L., & Burgess, G. L. (2015). Effects of Heavy Metals on Benthic Macroinvertebrates in the Cordillera Blanca , Peru. WWU Masters Thesis Collection.
- Gordon, R. P., Lautz, L. K., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Chavez, D., & Baraer, M. (2015). Sources and pathways of stream generation in tropical proglacial valleys of the Cordillera Blanca, Peru. *Journal of Hydrology*, 522, 628–644.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.013>

- Gurnell, A. M., Edwards, P. J., Petts, G. E., & Ward, J. V. (2000). A conceptual model for alpine proglacial river channel evolution under changing climatic conditions. *Catena*, 38(3), 223–242. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00069-7](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00069-7)
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 9.
- Hannah, D. M., Gurnell, A. M., & McGregor, G. R. (1999). A methodology for investigation of the seasonal evolution in proglacial hydrograph form. *Hydrological Processes*, 13(16 SPEC. ISS.), 2603–2621. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199911\)13:16<2603::AID-HYP936>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199911)13:16<2603::AID-HYP936>3.0.CO;2-5)
- Hannah, D. M., Gurnell, A. M., & McGregor, G. R. (2000). Spatio-temporal variation in microclimate, the surface energy balance and ablation over a cirque glacier. *International Journal of Climatology*, 20(7), 733–758. [https://doi.org/10.1002/1097-0088\(20000615\)20:7<733::AID-JOC490>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/1097-0088(20000615)20:7<733::AID-JOC490>3.0.CO;2-F)
- Hanshaw, M. N., & Bookhagen, B. (2014). Glacial areas, lake areas, and snow lines from 1975 to 2012: Status of the cordillera vilcanota, including the Quelccaya Ice Cap, northern central Andes, Peru. *Cryosphere*, 8(2), 359–376. <https://doi.org/10.5194/tc-8-359-2014>
- Huss, M. (2011). Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe. *Water Resources Research*, 47(7), 1–14. <https://doi.org/10.1029/2010WR010299>
- Ibarra, C. (2016). Influencia glacial sobre la diversidad funcional de comunidades de macroinvertebrados en ríos de altura tropicales. 41.
- Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. (2018). Inventario Nacional de Glaciares Las Cordilleras Glaciares del Perú (p. 354).
- Iturrizaga, L. (2018). Glacial landform assemblages and pedestal moraines in the Cordillera Blanca (Peru). *Geomorphology*, 318, 283–302. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.06.012>

- Jacobsen, D., Andino, P., Calvez, R., Cauvy-Fraunié, S., Espinosa, R., & Dangles, O. (2014). Temporal variability in discharge and benthic macroinvertebrate assemblages in a tropical glacier-fed stream. *Freshwater Science*, 33(1), 32–45. <https://doi.org/10.1086/674745>
- Jacobsen, D., Cauvy-fraunie, S., Andino, P., & Espinosa, R. (2014). Runoff and the longitudinal distribution of macroinvertebrates in a glacier-fed stream : implications for the effects of global warming. 2038–2050. <https://doi.org/10.1111/fwb.12405>
- Jacobsen, D., & Dangles, O. (2011). Environmental harshness and global richness patterns in glacier-fed streams. *Global Ecology and Biogeography*, 21(6), 1–10. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00699.x>
- Jacobsen, D., Dangles, O., Andino, P., Espinosa, R., Hamerlik, L., & Cadier, E. (2010). Longitudinal zonation of macroinvertebrates in an Ecuadorian glacier-fed stream : do tropical glacial systems fit the temperate model? *Freshwater Biology*, 55, 1234–1248. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02348.x>
- Jacobsen, D., Milner, A. M., Brown, L. E., & Dangles, O. (2012). Biodiversity under threat in glacier-fed river systems. *Nature Climate Change*, 2(5), 361–364. <https://doi.org/10.1038/nclimate1435>
- Kaiser, G., Georges, C., & Ames, A. (1995). Moder Glaciers Fluctuations in the Huascarán-Chopicalqui massif of Cordillera Blanca, Perú. *Agua, Glaciares y Cambio Climáticos En Los Andes Tropicales: Conferencias y Posters, January*, 291–292.
- Kaser, G. (2001). Glacier-climate interaction at low latitudes. *Journal of Glaciology*, 47, 157.
- Kaser, G., Juen, I., Georges, C., Gómez, J., & Tamayo, W. (2003). The impact of glaciers on the runoff and the reconstruction of mass balance history from hydrological data in the tropical Cordillera Bianca, Perú. *Journal of Hydrology*, 282(1–4), 130–144. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00259-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00259-2)
- Kaser, G., & Osmaston, H. (2002). *Tropical Glaciers*. Cambridge University Press.
- Lake, P. S. (2000). Disturbance, patchiness, and diversity in streams. *Journal of the North American Benthological Society*, 19(4), 573–592. <https://doi.org/10.2307/1468118>

- Lamouroux, N., Dolédec, S., & Gayraud, S. (2004). Biological traits of stream macroinvertebrate communities: Effects of microhabitat, reach, and basin filters. *Journal of the North American Benthological Society*, 23(3), 449–466. [https://doi.org/10.1899/0887-3593\(2004\)023<0449:BTOSMC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1899/0887-3593(2004)023<0449:BTOSMC>2.0.CO;2)
- Lepš, J., & Šmilauer, P. (2003). *Multivariate Analysis of Ecological Data using CANOCO*. Cambridge University Press.
- Loayza-Muro, R. A., Duivenvoorden, J. F., Kraak, M. H. S., & Admiraal, W. (2014). Metal leaching, acidity, and altitude confine benthic macroinvertebrate community composition in Andean streams. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 33(2), 404–411. <https://doi.org/10.1002/etc.2436>
- Loayza-Muro, R. A., Elías-Letts, R., Marticorena-Ruíz, J. K., Palomino, E. J., Duivenvoorden, J. F., Kraak, M. H. S., & Admiraal, W. (2010). Metal-induced shifts in benthic macroinvertebrate community composition in Andean high altitude streams. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29(12), 2761–2768. <https://doi.org/10.1002/etc.327>
- Malard, F., Tockner, K., & Ward, J. V. (1999). Shifting Dominance of Subcatchment Water Sources and Flow Paths in a Glacial Floodplain, Val Roseg, Switzerland. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 31(2), 135–150. <https://doi.org/10.1080/15230430.1999.12003291>
- Mark, B. G., & Mckenzie, J. M. (2007). Tracing increasing tropical Andean glacier melt with stable isotopes in water. *Environmental Science and Technology*, 41(20), 6955–6960. <https://doi.org/10.1021/es071099d>
- Mark, B. G., McKenzie, J. M., & Gómez, J. (2005). Hydrochemical evaluation of changing glacier meltwater contribution to stream discharge: Callejon de Huaylas, Peru. *Hydrological Sciences Journal*, 50(6), 975–988. <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.975>
- Mark, B. G., & Seltzer, G. O. (2003). Tropical glacier meltwater contribution to stream discharge: a case study in the Cordillera Blanca, Peru. *Journal of Glaciology*, 49(165), 271–281. <https://doi.org/10.3189/172756503781830746>

- Milner, A. M., Brittain, J. E., Castella, E., & Petts, G. E. (2001). Trends of macroinvertebrate community structure in glacier-fed rivers in relation to environmental conditions: A synthesis. *Freshwater Biology*, 46(12), 1833–1847. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2001.00861.x>
- Milner, A. M., Brown, L. E., & Hannah, D. M. (2009). Hydroecological response of river systems to shrinking glaciers. *Hydrological Processes*, 23, 62–77. <https://doi.org/10.1002/hyp.7197>
- Milner, A. M., & Petts, G. E. (1994). Glacial rivers: physical habitat and ecology. *Freshwater Biology*, 32(2), 295–307. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1994.tb01127.x>
- Milner, A. M., Robertson, A. L., McDermott, M. J., Klaar, M. J., & Brown, L. E. (2013). Major flood disturbance alters river ecosystem evolution. *Nature Climate Change*, 3(2), 137–141. <https://doi.org/10.1038/nclimate1665>
- Pfankuch, D. . (1975). *Stream reach inventory and channel stability evaluation*.
- Polk, M. H., Young, K. R., Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Bury, J., & Carey, M. (2017). Exploring hydrologic connections between tropical mountain wetlands and glacier recession in Peru's Cordillera Blanca. *Applied Geography*, 78, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.11.004>
- Pouyaud, B., Zapata, M., Yerren, J., Gomez, J., Rosas, G., Suarez, W., & Ribstein, P. (2005). On the future of the water resources from glacier melting in the Cordillera Blanca, Peru. *Hydrological Sciences Journal*, 50(6). <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.999>
- Prat, N., Acosta, R., Villamarín, C., & Rieradevall, M. (2011). Guía para el reconocimiento para larvas de Chironomidae (Diptera) de los ríos altoandinos de Ecuador y Perú. In *Clave para la determinación de los principales morfotipos larvarios* (p. 78). [http://www.ub.edu/riosandes/docs/CLAVE\\_LARVAS\\_PERU\\_ECUADORvfoto3\\_v7.pdf](http://www.ub.edu/riosandes/docs/CLAVE_LARVAS_PERU_ECUADORvfoto3_v7.pdf)
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J. E., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R., ... Wagnon, P. (2013).

- Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *Cryosphere*, 7(1), 81–102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
- Racoviteanu, A. E., Arnaud, Y., Williams, M. W., & Ordoñez, J. (2008). Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca, Peru, derived from remote sensing. *Journal of Glaciology*, 54(186), 499–510. <https://doi.org/10.3189/002214308785836922>
- Rivera, A., Bown, F., Napoleoni, F., Muñoz, C., & Vuille. (2018). *Manual Balance de masa glaciar* (Ediciones CECs (ed.)).
- Roldán, G. (1996). *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia*.
- Rott, E., Cantonati, M., Füreder, L., & Pfister, P. (2006). Benthic algae in high altitude streams of the Alps - A neglected component of the aquatic biota. *Hydrobiologia*, 562(1), 195–216. <https://doi.org/10.1007/s10750-005-1811-z>
- Schauwecker, S., Lorenzi, D., & Rohrer, M. (2017). (Meteodat G. (2017)). *Línea de Base Climática Cordillera Blanca (Ancash)*. 34.
- Seehaus, T., Malz, P., Sommer, C., Lippl, S., Cochachin, A., & Braun, M. (2019). Changes of the tropical glaciers throughout Peru between 2000 and 2016 &ndash; Mass balance and area fluctuations. *The Cryosphere Discussions, February*, 1–34. <https://doi.org/10.5194/tc-2018-289>
- Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado. (2011). *Parque Nacional Huascarán Plan Maestro 2010 - 2015* (p. 261).
- Silverio, W., & Jaquet, J. M. (2005). Glacial cover mapping (1987-1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 95(3), 342–350. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.012>
- Silverio, W., & Jaquet, J. M. (2017). Evaluating glacier fluctuations in Cordillera Blanca (Peru) by remote sensing between 1987 & 2016 in the context of ENSO. *Archives Des Sciences*, 69(2), 145–161.

- Singer, G. A., Fasching, C., Wilhelm, L., Niggemann, J., Steier, P., Dittmar, T., & Battin, T. J. (2012). Biogeochemically diverse organic matter in Alpine glaciers and its downstream fate. *Nature Geoscience*, 5(10), 710–714. <https://doi.org/10.1038/ngeo1581>
- Stahl, K., Moore, R. D., Shea, J. M., Hutchinson, D., & Cannon, A. J. (2008). Coupled modelling of glacier and streamflow response to future climate scenarios. *Water Resources Research*, 44(2), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2007WR005956>
- Stream, T. G., Jacobsen, D., Andino, P., Calvez, R., & Cauvy-fraunié, S. (2014). Temporal variability in discharge and benthic macroinvertebrate assemblages in a tropical glacier-fed stream. *Freshwater Science*, 33(1), 32–45. <https://doi.org/10.1086/674745>.
- ter Braak, C., & Šmilauer, P. (2002). *Ter Braak C.J.F., Šmilauer P. CANOCO Reference manual and CanoDraw for Windows User's guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5). Microcomputer Power.*
- Uehlinger, U., Robinson, C. T., Hieber, M., & Zah, R. (2010). The physico-chemical habitat template for periphyton in alpine glacial streams under a changing climate. *Hydrobiologia*, 657(1), 107–121. <https://doi.org/10.1007/s10750-009-9963-x>
- Veettil, B. K., & Kamp, U. (2019). Global disappearance of tropical mountain glaciers: Observations, Causes, and Challenges. *Geosciences (Switzerland)*, 9(5), 1–25. <https://doi.org/10.3390/geosciences9050196>
- Veettil, B. K., Leandro Bayer Maier, É., Bremer, U. F., & de Souza, S. F. (2014). Combined influence of PDO and ENSO on northern Andean glaciers: a case study on the Cotopaxi ice-covered volcano, Ecuador. *Climate Dynamics*, 43(12), 3439–3448. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2114-8>
- Veettil, B. K., Ruiz, S., Wang, S., Teixeira, P., Bica, A., Coromoto, A., & Rekowski, I. (2016). Un análisis comparativo del retroceso glaciar en los Andes Tropicales usando teledetección A comparative analysis of glacier retreat in the Tropical Andes using remote sensing. *Investigaciones Geográficas*, 36, 3–36.
- Ward, J. V. (1994). Ecology of alpine streams. *Freshwater Biology*, 32(2), 277–294. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1994.tb01126.x>

Wehren, B., Weingartner, R., Schädler, B., & Vivrioli, D. (2010). Alpine Waters. *Handbook of Environmental Chemistry*, 6(NOVEMBER 2009), 17–58. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88275-6>

Zobrist, J. (2010). Alpine Waters. *Handbook of Environmental Chemistry*, 6(NOVEMBER 2009), 17–58. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88275-6>



# ANEXOS



## Anexo 01

### Mapa de ubicación de puntos de muestreo

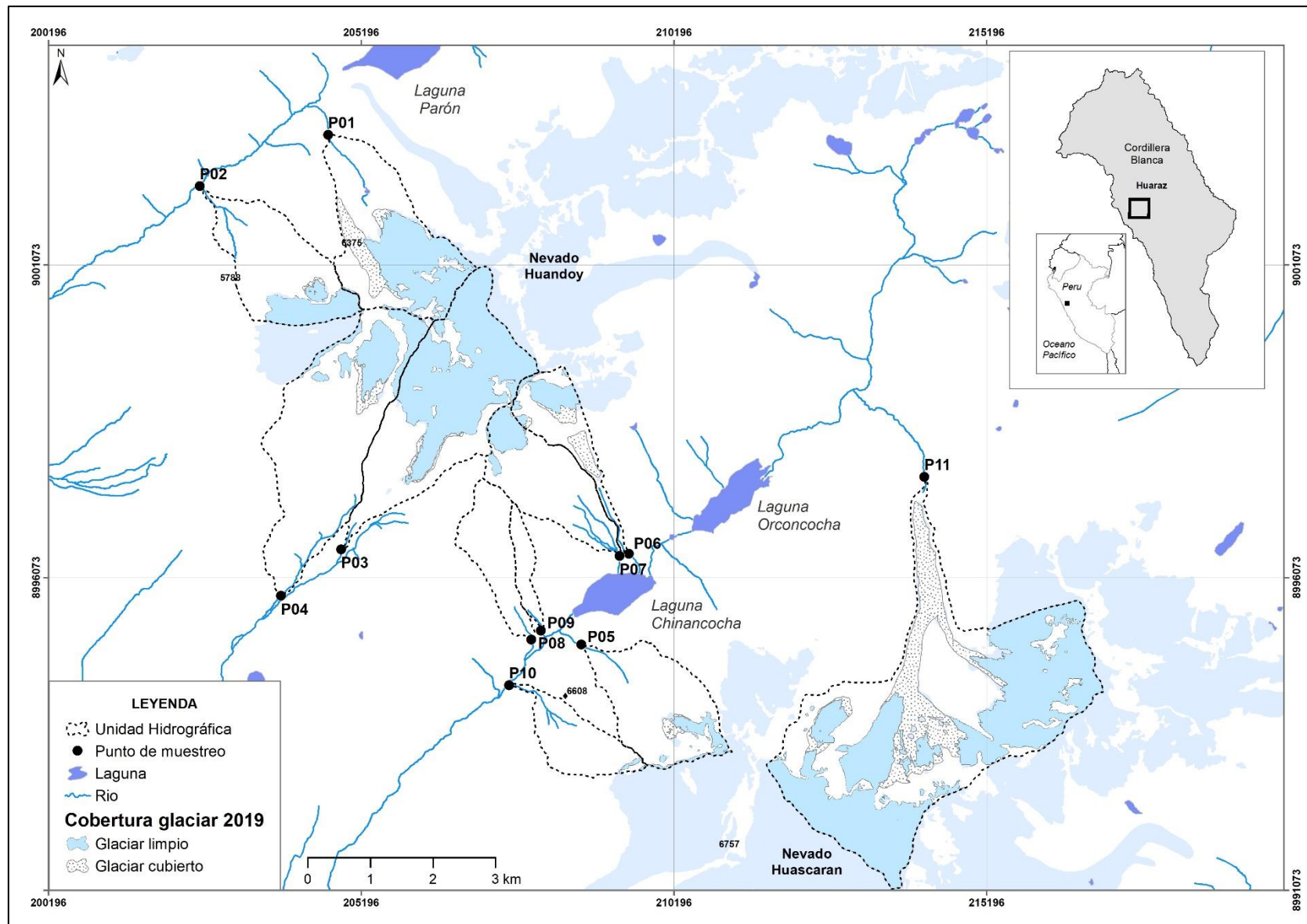


Figura 18. Mapa de ubicación de puntos de muestreo

## Anexo 02

### Ficha de evaluación de la estabilidad del cauce

**Tabla 11.** Ficha de evaluación de la estabilidad del cauce-índice de Pfankuch

Componente		P		P		P		P
1. Angularidad de las rocas	Bordes y esquinas afiladas, superficies planas rugosas	1	Bordes y esquinas redondeados Superficies lisas y planas	2	Esquinas y bordes bien redondeados en 2 dimensiones	3	Bien redondeadas en todas las dimensiones, Superficies lisas	4
2. Brillo	Superficie opaca, oscura, manchada por algas o minerales, Superficies brillantes <5% del área	1	Mayormente opaco, pero puede tener hasta un 35% de superficies brillantes, algunas zonas opacas en rocas más grandes	2	Mezcla 50-50% opaca y brillante ( $\pm 15\%$ )	3	Predominantemente brillante > 65%- Superficies expuestas o erosionadas	4
3. Consolidación y tamaño de partículas del sustrato	Tamaños surtidos compactados o superpuestos	2	Moderadamente compactado con algo de superposición	4	Principalmente surtido suelto sin superposición aparente	6	No hay compactación evidente, surtido suelto se mueve fácilmente	8
4. Porcentaje del cauce del río estable	80-100%	4	50-80%	8	20-50%	12	0-20%	16
5. Erosión y deposición	<5% de longitud de la canal afectada por la erosión y la deposición	6	5-30% afectado, Erosión en las constricciones y donde la pendiente es mayor, Algunos depósitos en aguas estancadas y pozos	12	30-50% afectados, Depósitos y erosión en las curvas (obstrucciones y constricciones) Algunos rellenando pozos	18	> 50% del fondo en un estado de flujo o cambio durante casi un año	24
6. Vegetación acuática aferrada (Musgos y algas)	Abundante, Crecimiento mayormente de musgos verdes oscuros durante todo el año, Presente en aguas rápidas	1	Común, Las algas se forman en áreas de baja velocidad y pozos, Musgos en aguas rápidas	2	Presente, pero de forma irregular, Principalmente en zonas de remanso, Las floraciones estacionales hacen que las rocas estén resbaladizas	3	Tipos perennes escasos o ausentes, Pueden presentarse floración a corto plazo de color verde amarillo	4

## Anexo 03

### Resultados de las mediciones de los parámetros fisicoquímicos de campo y topográficos

**Tabla 12.** Resultados de mediciones de parámetros fisicoquímicos en las dos épocas de muestreo

<b>Parámetro</b>	<b>Época</b>	<b>P01</b>	<b>P02</b>	<b>P03</b>	<b>P04</b>	<b>P05</b>	<b>P06</b>	<b>P07</b>	<b>P08</b>	<b>P09</b>	<b>P10</b>	<b>P11</b>
Temperatura (°C)	Seca	8.40	8.44	5.75	9.70	7.27	9.50	9.76	10.39	11.11	10.84	2.03
	Húmeda	4.66	9.42	6.97	12.45	7.33	10.38	9.44	12.53	12.83	11.75	2.00
Conductividad (μS/cm)	Seca	8.83	9.19	13.38	11.00	28.64	22.06	25.08	14.13	11.91	61.84	35.99
	Húmeda	11.00	12.00	12.34	9.00	20.00	18.84	23.72	11.07	11.16	43.09	27.34
pH	Seca	7.42	7.51	7.35	7.30	7.71	7.58	7.57	7.42	7.13	7.49	7.74
	Húmeda	7.00	6.93	7.10	6.87	7.35	7.04	7.24	6.85	7.03	7.57	7.46
Oxígeno disuelto (mg/l)	Seca	7.45	7.00	7.23	7.50	7.45	7.23	6.88	7.25	7.04	8.04	8.87
	Húmeda	7.15	7.49	6.49	8.87	7.39	5.68	7.77	8.08	7.41	7.74	8.16
Índice de Pfankuch	Seca	33	33	55	47	22	58	22	37	18	40	50
	Húmeda	33	33	61	47	22	58	22	37	18	40	56
Distancia al glaciar (m)	-	1618.92	2299.98	1573.37	3508.67	1970.87	1390.14	2602.20	-	-	2455.98	469.42
Pendiente (%)	-	41.01	3.16	22.36	65.6	32.25	61.27	78.79	82.38	110.79	11.31	29.02

## Anexo 04

### Resultados de los análisis de laboratorio





**Tabla 13.** Reporte de laboratorio del análisis de aniones, cationes, nutrientes y carbono disuelto en época seca

SoG sample ID	Sample ID	Approx MDL	SOG114600	SOG114601	SOG114602	SOG114603	SOG114604	SOG114605	SOG114606	SOG114607	SOG114608	SOG114609	SOG114610
			P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09	P10	P11
			Paron	Paron	Huaytapallana	Huaytapallana	Llanganuco	Llanganuco	Llanganuco	Llanganuco	Llanganuco	Llanganuco	Llanganuco
			10/10/2019	10/10/2019	21/10/2019	21/10/2019	30/10/2019	14/10/2019	14/10/2019	28/10/2019	28/11/2019	30/10/2019	13/10/2019
TN	mg/l	—	0.380	0.240	0.320	0.390	0.210	0.220	0.150	0.310	0.470	0.260	0.220
TP	—	—	0.003	0.000	0.002	0.006	0.002	0.000	0.000	0.003	0.007	0.000	0.001
DOC	mg/l	—	5.0	5.4	3.8	4.1	2.0	5.4	4.8	4.6	4.5	1.8	9.7
DIC	mg/l	—	1.3	0.7	1.5	1.3	2.4	2.8	2.5	1.9	1.4	2.4	2.5
DC	—	—	6.3	6.1	5.3	5.4	4.4	8.1	7.3	6.4	5.9	4.2	12.2
F	mg/l	—	0.277	0.345	0.399	0.400	0.452	0.694	0.652	0.422	0.401	0.416	0.147
Cl	mg/l	—	0.243	0.152	0.303	0.525	0.330	0.068	0.091	0.291	0.306	0.299	0.097
SO4	—	—	0.33	0.30	0.36	0.40	4.75	0.44	0.61	0.59	0.54	19.88	7.44
NO3	—	—	0.695	0.605	0.669	0.711	0.206	0.491	0.025	0.465	0.285	0.492	0.219
Al 167.079 (502) (Axial)	mg/l	0.03	0.090	0.002	0.016	0.023	0.002	0.000	0.000	0.021	0.069	0.006	0.000
B 249.773 (135) (Axial)	—	0.01	0.015	0.015	0.015	0.015	0.020	0.014	0.014	0.014	0.015	0.028	0.014
Ba 455.403 (74) (Axial)	—	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002
Be 313.042 (108) (Axial)	—	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Bi 223.061 (451) (Axial)	—	0.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ca 393.366 (86) (Radial)	mg/l	0.0002	1.339	1.087	2.111	1.455	4.501	4.389	3.449	1.793	1.382	9.836	4.983
Cd 228.802 (447) (Axial)	—	0.01	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Co 228.616 (447) (Axial)	—	0.01	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr 283.563 (119) (Axial)	—	0.02	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cu 324.754 (104) (Axial)	—	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001
Fe 259.940 (129) (Axial)	—	0.02	0.000	0.000	0.007	0.002	0.002	0.000	0.000	0.002	0.006	0.000	0.000
Ga 294.364 (114) (Axial)	—	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
K 766.490 (44) (Axial)	mg/l	0.2	0.253	0.156	0.342	0.359	0.959	0.329	0.202	0.214	0.245	0.508	0.546
K 766.490 (44) (Radial)	—	0.2	0.298	0.155	0.460	0.461	1.278	0.409	0.248	0.254	0.273	0.414	0.686
Li 670.784 (50) (Axial)	—	0.003	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.008	0.003
Mg 279.553 (120) (Radial)	—	0.001	0.053	0.062	0.079	0.089	0.173	0.099	0.111	0.119	0.117	0.561	0.317
Mn 257.610 (131) (Axial)	—	0.004	0.001	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001
Na 589.592 (57) (Radial)	—	0.03	0.323	0.419	0.657	0.701	1.818	0.624	1.100	0.987	1.020	2.315	0.765
Na 588.995 (57) (Radial)	—	0.03	0.132	0.309	0.438	0.566	1.582	0.438	0.903	0.817	0.859	2.315	0.574
Ni 221.647 (452) (Axial)	—	0.05	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000
Ni 231.604 (445) (Axial)	—	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pb 220.353 (453) (Axial)	—	0.1	0.001	0.001	0.002	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001
Se 196.090 (472) (Axial)	—	0.5	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001
Si 251.611 (134) (Axial)	—	0.04	0.695	1.296	1.292	1.785	3.497	1.760	2.446	2.494	2.684	2.509	0.895
Sr 407.771 (83) (Axial)	—	0.0006	0.004	0.005	0.006	0.007	0.016	0.012	0.012	0.011	0.009	0.058	0.017
Te 214.281 (457) (Axial)	—	0.1	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Tl 190.856 (476) (Axial)	—	—	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn 213.856 (457) (Axial)	—	0.01	0.002	0.000	0.002	0.005	0.011	0.002	0.001	0.002	0.003	0.002	0.009



Tabla 14. Reporte de laboratorio del análisis de aniones, cationes, nutrientes y carbono disuelto en época húmeda

SoG sample ID	Approx MDL	SOG119647	SOG119648	SOG119649	SOG119650	SOG119651	SOG119652	SOG119653	SOG119654	SOG119655	SOG119656	SOG119657
Sample ID on tube		P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09	P10	P11
Point/location		07/03/20	07/03/20	06/03/20	06/03/20	15/03/20	08/03/20	08/03/20	Not collected	16/03/20	15/03/20	16/03/20
General catchment		P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09	P10	P11	P12
Specific catchment		Q. Parón	Q. Parón	Q. Huaytapallana	Q. Huaytapallana	Q. Ulanganuco	Q. Ulanganuco	Q. Ulanganuco	Q. Ulanganuco	Q. Ulanganuco	Q. Ulanganuco	Q. Ulanganuco
TN	mg/l	0.220	0.220	0.150	0.150	0.150	0.080	0.110	0.220	0.250	0.125	
TP	mg/l	0.005	0.006	0.006	0.010	0.010	0.007	0.005	0.005	0.005	0.006	
DOC	mg/l	2.4	2.3	1.4	2.5	0.1	1.9	3.0	3.3	1.9	0.1	
DIC	mg/l	1.4	1.5	1.8	2.1	3.0	3.4	2.5	2.0	2.6	2.7	
DC	mg/l	3.8	3.8	3.2	4.7	3.1	5.3	5.5	5.3	4.5	2.8	
F	mg/l	0.163	0.218	0.198	0.306	0.388	0.570	0.525	0.331	0.445	0.154	
Cl	mg/l	0.081	0.086	0.197	0.129	0.290	0.075	0.070	0.159	0.157	0.060	
SO4	mg/l	0.24	0.28	0.22	0.24	4.18	0.55	0.30	0.77	15.96	6.80	
NO3	mg/l	0.000	0.014	0.053	0.000	0.000	0.000	0.098	0.116	0.290	0.007	
Al 167.079 (502) (Axial)	mg/l	0.03	0.005	0.010	0.004	0.008	0.009	0.004	0.009	0.030	0.012	0.010
B 249.773 (135) (Axial)	mg/l	0.01	0.001	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	0.012	0.001
Ba 455.403 (74) (Axial)	mg/l	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001
Be 313.042 (108) (Axial)	mg/l	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Bi 223.061 (451) (Axial)	mg/l	0.2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca 393.366 (86) (Radial)	mg/l	0.0002	1.162	1.032	1.359	1.524	3.950	3.293	3.055	1.703	7.957	4.420
Cd 228.802 (447) (Axial)	mg/l	0.01	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Co 228.616 (447) (Axial)	mg/l	0.01	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr 283.563 (119) (Axial)	mg/l	0.02	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000
Cu 324.754 (104) (Axial)	mg/l	0.004	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe 259.940 (129) (Axial)	mg/l	0.02	0.002	0.005	0.002	0.004	0.004	0.001	0.003	0.011	0.002	0.003
Ga 294.364 (114) (Axial)	mg/l	0.04	0.003	0.000	0.003	0.004	0.001	0.001	0.003	0.003	0.000	0.002
K 766.490 (44) (Axial)	mg/l	0.2	0.113	0.153	0.204	0.138	0.450	0.190	0.206	0.196	0.212	0.432
K 766.490 (44) (Radial)	mg/l	0.2	0.396	0.366	0.463	0.311	0.763	0.310	0.331	0.268	0.291	0.598
Li 670.784 (50) (Axial)	mg/l	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.001	0.004	0.002
Mg 279.553 (120) (Radial)	mg/l	0.001	0.050	0.058	0.049	0.080	0.150	0.103	0.065	0.129	0.352	0.261
Mn 257.610 (131) (Axial)	mg/l	0.004	0.001	0.001	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001
Na 589.592 (57) (Radial)	mg/l	0.03	0.397	0.498	0.469	0.605	1.575	1.084	0.457	1.133	2.315	0.622
Ni 221.647 (452) (Axial)	mg/l	0.05	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Ni 231.604 (445) (Axial)	mg/l	0.05	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pb 220.353 (453) (Axial)	mg/l	0.1	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000
Se 196.090 (472) (Axial)	mg/l	0.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Si 251.611 (134) (Axial)	mg/l	0.04	0.221	0.513	0.415	0.800	2.973	2.496	1.005	1.536	2.389	0.903
Sr 407.771 (83) (Axial)	mg/l	0.0006	0.003	0.004	0.004	0.006	0.013	0.011	0.007	0.010	0.045	0.014
Te 214.281 (457) (Axial)	mg/l	0.1	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001
Tl 190.856 (476) (Axial)	mg/l	0.3	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn 213.856 (457) (Axial)	mg/l	0.01	0.001	0.003	0.002	0.002	0.002	0.005	0.004	0.017	0.002	0.002



**Tabla 15.** Reporte de laboratorio del análisis de turbiedad en época seca

**GL3157**  
 Lee Brown  
 Peru Grow  
 2019 samples  
 Analysed Oct 2020  
 Meter: Oakton T-100

SoG sample ID	Sample ID on tube		General catchment	Specific catchment	Turbidity NTU
<b>Approx MDL</b>					0.039
SOG119741	P01	27/10/2019	Llullán	Q. Parón	2.80
SOG119742	P02	10/10/2019	Llullán	Q. Parón	3.06
SOG119752	P03	21/10/2019	Ancash	Q. Huaytapallana	17.53
SOG119744	P04	21/10/2019	Ancash	Q. Huaytapallana	1.03
SOG119745	P05	30/10/2019	Ranrahirca	Q. Llanganuco	0.71
SOG119746	P06	24/10/2019	Ranrahirca	Q. Llanganuco	1.16
SOG119747	P07	19/10/2019	Ranrahirca	Q. Llanganuco	0.19
SOG119748	P08	28/10/2019	Ranrahirca	Q. Llanganuco	1.27
SOG119749	P09	28/10/2019	Ranrahirca	Q. Llanganuco	1.22
SOG119750	P10	30/10/2019	Ranrahirca	Q. Llanganuco	2.12
SOG119751	P11	13/10/2019	Ranrahirca	Q. Llanganuco	5.64

**Tabla 16.** Reporte de laboratorio del análisis de turbiedad en época húmeda

**GL3154**  
 Lee Brown  
 Peru Grow  
 Analysed Nov 2019  
 Meter: Oakton T-100

SoG sample ID	Sample ID on tube		General catchment	Specific catchment	Turbidity NTU
<b>Approx MDL</b>					0.039
SOG119658	P01	07/03/2020	Llullán	Q. Parón	7.90
SOG119659	P02	07/03/2020	Llullán	Q. Parón	4.20
SOG119660	P03	06/03/2020	Ancash	Q. Huaytapallana	23.20
SOG119661	P04	06/03/2020	Ancash	Q. Huaytapallana	5.04
SOG119662	P05	15/03/2020	Ranrahirca	Q. Llanganuco	0.61
SOG119663	P06	08/03/2020	Ranrahirca	Q. Llanganuco	0.69
SOG119664	P07	08/03/2020	Ranrahirca	Q. Llanganuco	6.52
SOG119665	P08	Not collected	Ranrahirca	Q. Llanganuco	-
SOG119666	P09	16/03/2020	Ranrahirca	Q. Llanganuco	0.86
SOG119667	P10	15/03/2020	Ranrahirca	Q. Llanganuco	0.42
SOG119668	P11	16/03/2020	Ranrahirca	Q. Llanganuco	15.46

## Anexo 05

### Estadísticos descriptivos de los parámetros fisicoquímicos del agua



**Tabla 17:** Estadísticos descriptivos de los parámetros fisicoquímicos del agua

Parámetro	Época	N	Rango	Máx	Mín	Media	DS	Varianza
Temperatura (°C)	Seca	11	8.67	10.92	2.25	8.49	2.58	6.66
	Húmeda	11	10.51	12.53	2.02	8.91	3.29	10.81
Turbiedad (NTU)	Seca	11	17.34	17.53	0.19	3.34	4.94	24.42
	Húmeda	10	22.78	23.20	0.42	6.49	7.93	62.95
Conductividad (µS/cm)	Seca	11	53.00	61.84	8.83	22.00	15.91	253.26
	Húmeda	11	34.00	43.00	9.00	17.88	10.20	104.13
pH	Seca	11	0.61	7.74	7.13	7.47	0.18	0.03
	Húmeda	11	0.72	7.57	6.85	7.13	0.24	0.06
Oxígeno disuelto (mg/l)	Seca	11	1.99	8.87	6.88	7.45	0.57	0.32
	Húmeda	11	3.19	8.87	5.68	7.48	0.85	0.73
Índice de Pfanckuch	Seca	11	40.00	58.00	18.00	37.73	13.71	188.02
	Húmeda	11	43.00	61.00	18.00	38.82	15.14	229.36
Nitrógeno total (mg/l)	Seca	11	0.320	0.470	0.150	0.288	0.095	0.009
	Húmeda	10	0.170	0.250	0.080	0.168	0.057	0.003
Fósforo total (mg/l)	Seca	11	0.007	0.007	0.000	0.002	0.002	0.000
	Húmeda	10	0.005	0.010	0.005	0.006	0.002	0.000
Carbono orgánico disuelto (mg/l)	Seca	10	7.942	9.738	1.797	4.660	2.193	4.810
	Húmeda	10	3.268	3.347	0.079	1.887	1.089	1.187
Carbono inorgánico disuelto (mg/l)	Seca	11	2.011	2.759	0.748	1.877	0.672	0.452
	Húmeda	10	2.000	3.400	1.400	2.300	0.651	0.424
Carbono disuelto (mg/l)	Seca	10	8.055	12.243	4.187	6.581	2.326	5.411
	Húmeda	10	2.713	5.487	2.774	4.183	0.994	0.989
Fluoruros (mg/l)	Seca	11	0.547	0.694	0.147	0.419	0.152	0.023
	Húmeda	10	0.416	0.570	0.154	0.330	0.150	0.022
Cloruros (mg/l)	Seca	10	0.457	0.525	0.068	0.241	0.142	0.020
	Húmeda	10	0.230	0.290	0.060	0.130	0.073	0.005
Sulfatos (mg/l)	Seca	11	19.579	19.875	0.296	3.239	5.994	35.926
	Húmeda	10	15.734	15.959	0.225	2.954	5.081	25.814
Nitratos (mg/l)	Seca	11	0.686	0.711	0.025	0.442	0.229	0.052
	Húmeda	10	0.290	0.290	0.000	0.058	0.092	0.009
Aluminio (mg/l)	Seca	11	0.069	0.069	0.000	0.013	0.021	0.000
	Húmeda	10	0.026	0.030	0.004	0.010	0.008	0.000
Boro (mg/l)	Seca	11	0.014	0.028	0.014	0.016	0.004	0.000
	Húmeda	10	0.012	0.012	0.000	0.002	0.004	0.000
Calcio (mg/l)	Seca	11	8.750	9.836	1.087	3.302	2.602	6.772
	Húmeda	10	6.925	7.957	1.032	2.945	2.143	4.594
Potasio (mg/l)	Seca	11	1.122	1.278	0.155	0.449	0.311	0.096
	Húmeda	10	0.495	0.763	0.268	0.410	0.158	0.025
Magnesio (mg/l)	Seca	11	0.508	0.561	0.053	0.162	0.151	0.023
	Húmeda	10	0.302	0.352	0.049	0.130	0.101	0.010
Sodio (mg/l)	Seca	10	1.496	1.818	0.323	0.841	0.425	0.181
	Húmeda	10	1.918	2.315	0.397	0.916	0.624	0.389
Silicio (mg/l)	Seca	11	2.802	3.497	0.695	1.941	0.860	0.740
	Húmeda	10	2.752	2.973	0.221	1.325	0.973	0.948
Zinc (mg/l)	Seca	11	0.011	0.011	0.000	0.004	0.003	0.000
	Húmeda	10	0.016	0.017	0.001	0.004	0.005	0.000

## Anexo 06

### Abundancias de macroinvertebrados bentónicos

**Tabla 18.** Abundancia de taxas de macroinvertebrados bentónicos en la época seca

Phylum	Clase	Orden	Familia/subfamilia	Género	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Antropoda	Insecta	Ephemeroptera	Baetidae	<i>Andesiops</i> sp.	161	71	103	82	128	1	349	11	9	13	0	
			Leptophlebiidae	<i>Meridialaris</i> sp.	0	0	0	2	1	0	13	1	1	5	0	
		Plecóptera	Gripopterygidae	<i>Claudioperla</i> sp.	0	2	1	7	7	0	19	13	2	1	0	
			Trichoptera	Limnephilidae	<i>Anomalocosmoecus</i> sp.	46	26	213	17	7	2	116	3	7	8	40
		Hydrobiosidae		<i>Atopsyche</i> sp.	1	1	0	1	1	0	22	2	2	4	0	
			<i>Cailloma</i> sp.	7	2	4	2	1	0	1	1	0	3	4		
		Simulidae	<i>Gigantodax</i> sp.	91	36	131	24	160	16	493	6	18	65	7		
			<i>Simullium</i> sp.	0	0	0	0	7	38	40	0	0	0	0		
		Tipulidae	<i>Molophilus</i> sp.	0	7	0	1	1	0	4	1	10	0	0		
			<i>Tipula</i> sp.	0	0	1	0	0	5	2	0	1	3	1		
		Tabanidae	<i>Limonia</i> sp.	5	3	1	0	0	35	2	6	0	0	81		
			<i>Tabanus</i> sp.	1	19	0	3	0	0	0	2	1	0	0		
		Chironomidae /Orthocladiinae	<i>Orthocladiinae</i> sp1.	2	2	13	0	6	7	41	0	1	1	2		
			<i>Orthocladiinae</i> sp2.	0	0	14	0	0	2	0	0	0	0	0		
			<i>Orthocladiinae</i> sp3.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
			<i>Orthocladiinae</i> sp4.	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		
		Chironomidae /Podonominae	<i>Podonomus</i> sp.	0	0	3	0	0	18	0	0	0	0	1		
			<i>Parochlus</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
		Chironomidae /Diamesinae	<i>Paraheptagya</i> sp.	0	0	11	0	4	13	32	0	0	0	37		
		Chironomidae /Tanypodinae	<i>Tanypodinae</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0		
		Chironomidae /Chironominae	<i>Chironominae</i> sp2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		
			<i>Chironominae</i> sp3	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0		
			<i>Chironominae</i> sp4	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0		
		Empididae	<i>Neoplasta</i> sp.	1	2	11	0	1	1	0	1	0	0	0		
		Blepmariceridae	<i>Limonicola</i> sp.	0	0	0	0	9	0	20	0	0	0	0		
		Ceratopogonidae /Ceratopogoninae	<i>Ceratopogoninae</i> sp.	12	7	0	2	0	29	6	5	6	1	0		

**Tabla 18.** Abundancia de taxas de macroinvertebrados bentónicos en la época seca (continuación)

		Muscidae	<i>Limnophora</i> sp.	0	6	1	1	0	25	0	0	0	5	0
		Dolichopodidae	Dolichopodidae sp.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
		Psychodidae	<i>Maruina</i> sp.	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
		Stratiomyidae	Stratiomyidae sp.	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	Coleoptera	Scirtidae	Scirtidae sp.	17	48	0	42	3	0	98	33	12	17	0
		Elmidae	<i>Austrelmis</i> sp.	10	13	0	25	36	0	53	31	15	0	0
		Staphylinidae	Staphylinidae sp.	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	Oligochetas		Oligochetas sp.	0	13	0	4	0	0	1	38	42	84	0
Annelida	Hirudinea		Hirudinea sp1.	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			Hirudinea sp2.	1	6	0	0	7	0	0	0	0	0	0
Mollusca	Gastropoda	Basommatophora	Planorbidae	Planorbidae sp.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

**Tabla 19.** Abundancia de taxas de macroinvertebrados bentónicos en la época húmeda

Phylum	Clase	Orden	Familia/subfamilia	Género	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Ephemeroptera	Baetidae	<i>Andesiops</i> sp.	105	116	26	161	100	0	374	10	0	55	0
			Leptophlebiidae	<i>Meridalaris</i> sp.	0	1	0	9	8	0	11	0	0	2	0
		Plecóptera	Gripopterygidae	<i>Claudioperla</i> sp.	0	1	0	30	15	0	15	6	1	5	0
			Limnephilidae	<i>Anomalocosmoecus</i> sp.	20	35	149	8	2	2	96	1	3	24	641
		Trichoptera	Hydrobiosidae	<i>Atopsyche</i> sp.	0	0	0	3	10	0	9	2	1	8	0
				<i>Cailloma</i> sp.	2	1	2	2	0	0	2	0	0	5	16
Antropoda	Insecta	Simulidae		<i>Gigantodax</i> sp.	6	46	21	16	120	36	93	20	32	8	29
				<i>Simullium</i> sp.	6	0	0	28	56	0	47	7	0	68	0
				<i>Molophilus</i> sp.	16	0	0	16	0	0	13	0	0	7	0
		Tipulidae		<i>Tipula</i> sp.	0	0	0	5	7	0	0	5	2	32	0
				<i>Limonia</i> sp.	28	12	49	5	0	67	17	8	22	8	380
		Díptera	Tabanidae	<i>Tabanus</i> sp.	0	9	0	1	0	0	2	2	0	0	0
				Orthocladiinae sp1.	7	3	269	11	43	69	26	11	21	25	234
				Orthocladiinae sp2.	0	0	7	0	0	17	0	3	0	1	43
				Orthocladiinae sp3.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0
		Chironomidae	/Orthocladiinae	Orthocladiinae sp4.	0	0	14	1	3	15	0	0	0	0	37



**Tabla 19.** Abundancia de taxas de macroinvertebrados bentónicos en la época húmeda (continuación)

	Chironomidae /Podonominae	<i>Parochlus</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	2	0	7	2		
	Chironomidae /Diamesinae	<i>Paraheptagya</i> sp.	0	0	58	2	18	58	29	0	2	5	547		
	Chironomidae /Tanypodinae	Tanypodinae sp	0	0	0	0	1	0	0	18	0	24	0		
		Chironominae sp1.	0	0	0	0	3	0	0	2	0	1	0		
	Chironomidae /Chironominae	Chironominae sp2.	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		
		Chironominae sp3.	6	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
		Chironominae sp4.	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Empididae	<i>Neoplasta</i> sp.	3	3	28	3	7	2	0	1	1	3	0		
	Blephariceridae	<i>Limnicola</i> sp.	0	0	0	0	91	0	74	0	0	4	0		
	Ceratopogonidae /Ceratopogoninae	Ceratopogoninae sp.	41	16	13	13	2	9	34	132	299	7	7		
	Muscidae	<i>Limnophora</i> sp.	0	1	1	0	0	1	4	0	0	3	1		
	Dolichopodidae	Dolichopodidae sp.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2		
	Stratiomyidae	Stratiomyidae sp.	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Scirtidae	Scirtidae sp.	15	55	0	73	83	0	81	28	8	48	0		
	Coleoptera	Elmidae	8	11	0	26	44	0	40	48	52	2	0		
		Staphylinidae	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0		
	Lepidóptera	Lepidóptera sp.	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0		
	Malacostraca	Amphipoda	Hyaellidae	Hyaellidae sp.	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	
	Arachnida	Trombidiforme	Hydrachnidae	Hydrachnidae sp.	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	
	Oligochaeta	Oligochaeta	Oligochetas sp.	7	7	0	25	10	0	15	47	61	436	0	
	Annelida	Hirudinea	Hirudinea sp1.	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	
			Hirudinea sp2.	4	10	0	4	54	0	0	1	2	0	0	
	Mollusca	Gastropoda	Basommatophora	Planorbidae	Planorbidae sp.	0	0	0	0	4	0	0	0	4	0

## ANEXO 06

### INDICES DE DIVERSIDAD LOCAL DE MACROINVERTEBRADOS EN CADA PUNTO Y TEMPORADA DE MUESTREO



**Tabla 20:** Índices de diversidad local en los once puntos de muestreo evaluados y las dos épocas de muestreo

Punto de muestreo	Número de individuos	Densidad (ind/m <sup>2</sup> )	Riqueza específica	Riqueza rarefactada (111)	Índice de Shannon	Índice de Margalef	Índice Alpha de Fisher
<b>Época seca</b>							
P01	357	158.67	15	10.13	1.60	2.38	3.17
P02	266	98.52	18	15.41	2.26	3.05	4.36
P03	508	188.15	14	9.05	1.53	2.09	2.66
P04	215	79.26	16	12.71	1.88	2.79	4.00
P05	382	141.48	19	12.19	1.61	3.03	4.20
P06	192	71.11	13	11.79	2.16	2.28	3.15
P07	1314	486.67	20	12.44	1.89	2.65	3.35
P08	157	58.15	17	15.25	2.15	3.16	4.85
P09	127	47.04	14	13.47	2.09	2.68	4.02
P10	213	78.89	15	12.54	1.74	2.61	3.68
P11	544	201.48	10	5.87	0.86	1.43	1.74
<b>Época húmeda</b>							
P01	275	101.85	16	14.52	2.11	2.67	3.70
P02	337	124.81	20	14.52	2.11	3.27	4.66
P03	638	236.30	13	10.23	1.75	1.86	2.31
P04	448	165.93	25	17.78	2.29	3.93	5.72
P05	683	252.96	23	16.16	2.46	3.37	4.59
P06	276	102.22	10	8.68	1.82	1.60	2.03
P07	984	364.44	20	15.65	2.22	2.76	3.55
P08	354	131.11	20	15.33	2.13	3.24	4.59
P09	509	188.52	16	9.63	1.46	2.41	3.14
P10	798	295.56	27	16.65	1.88	3.89	5.40
P11	1939	718.15	12	7.86	1.60	1.45	1.71

## Anexo 07

### Correlaciones entre las variables ambientales y los indicadores de biodiversidad

**Tabla 21:** Correlaciones de Pearson entre los parámetros fisicoquímicos y los indicadores de biodiversidad

Parámetro		Abundancia	Densidad	Riqueza Específica	Riqueza Rarefact	Shannon_H	Margalef	Fisher_alpha
Temperatura	Correlación de Pearson	-0.36	-0.36	0.48*	0.55**	0.46*	0.60**	0.60**
	Sig.	0.10	0.10	0.03	0.01	0.03	0.00	0.00
Turbiedad	Correlación de Pearson	0.29	0.29	-0.33	-0.30	-0.23	-0.42	-0.43*
	Sig.	0.18	0.18	0.13	0.17	0.31	0.05	0.05
Conductividad	Correlación de Pearson	0.31	0.29	-0.01	-0.19	-0.33	-0.15	-0.19
	Sig.	0.16	0.18	0.95	0.40	0.14	0.49	0.39
Oxígeno disuelto	Correlación de Pearson	0.19	0.18	-0.40	-0.67**	-0.28	-0.50*	-0.50*
	Sig.	0.41	0.42	0.07	0.00	0.22	0.02	0.02
pH	Correlación de Pearson	0.16	0.17	-0.13	-0.29	-0.39	-0.20	-0.21
	Sig.	0.46	0.45	0.57	0.19	0.07	0.38	0.34
Índice de Pfankuch	Correlación de Pearson	0.02	0.01	-0.46*	-0.42*	-0.26	-0.47*	-0.44*
	Sig.	0.94	0.96	0.03	0.05	0.23	0.03	0.04
Nitrato total	Correlación de Pearson	-0.61**	-0.59**	-0.09	0.06	-0.05	0.16	0.24
	Sig.	0.00	0.00	0.70	0.80	0.81	0.47	0.28
Fósforo total	Correlación de Pearson	0.11	0.10	0.29	0.29	0.36	0.26	0.25
	Sig.	0.64	0.66	0.19	0.18	0.10	0.25	0.26
Carbono orgánico disuelto	Correlación de Pearson	-0.29	-0.28	-0.30	-0.26	-0.36	-0.20	-0.16
	Sig.	0.19	0.20	0.17	0.24	0.10	0.37	0.48
Carbono inorgánico disuelto	Correlación de Pearson	0.40	0.38	0.00	-0.18	-0.10	-0.19	-0.24
	Sig.	0.07	0.08	0.99	0.43	0.67	0.39	0.28
Carbono disuelto	Correlación de Pearson	-0.27	-0.26	-0.25	-0.23	-0.31	-0.17	-0.14
	Sig.	0.23	0.24	0.26	0.30	0.16	0.44	0.52
Flúor	Correlación de Pearson	-0.14	-0.15	0.16	0.21	0.33	0.17	0.15
	Sig.	0.54	0.52	0.48	0.35	0.14	0.45	0.50
Cloro	Correlación de Pearson	-0.42	-0.42	0.06	0.12	0.02	0.24	0.29
	Sig.	0.05	0.05	0.78	0.59	0.95	0.28	0.20
SO4	Correlación de Pearson	0.26	0.26	0.10	-0.13	-0.37	-0.01	-0.03
	Sig.	0.23	0.25	0.67	0.57	0.09	0.98	0.89
NO3	Correlación de Pearson	-0.49*	-0.48*	-0.15	-0.04	-0.11	0.04	0.10
	Sig.	0.02	0.03	0.50	0.87	0.63	0.85	0.67
Calcio	Correlación de Pearson	0.30	0.29	0.04	-0.16	-0.28	-0.10	-0.15
	Sig.	0.18	0.19	0.86	0.47	0.20	0.65	0.52
Potasio	Correlación de Pearson	0.20	0.19	-0.10	-0.29	-0.34	-0.18	-0.20
	Sig.	0.37	0.39	0.65	0.20	0.12	0.44	0.38

\*La correlación significativa  $p < 0.05$ ; \*\*La correlación significativa  $p < 0.01$ . N= 22

**Tabla 21:** Correlaciones de Pearson entre los parámetros fisicoquímicos y los indicadores de biodiversidad (Continuación)

Parámetro		Abundancia	Densidad	Riqueza Específica	Riqueza Rarefact	Shannon_H	Margalef	Fisher_alpha
Magnesio	Correlación de Pearson	0.12	0.11	-0.02	-0.39	-0.39	-0.06	-0.06
	Sig.	0.61	0.64	0.94	0.07	0.07	0.78	0.78
Sodio	Correlación de Pearson	0.00	-0.02	0.31	-0.08	-0.08	0.29	0.27
	Sig.	1.00	0.94	0.16	0.73	0.73	0.19	0.22
Silicio	Correlación de Pearson	-0.21	-0.22	0.21	0.15	0.15	0.28	0.29
	Sig.	0.35	0.32	0.35	0.50	0.50	0.21	0.19
Zinc	Correlación de Pearson	0.02	0.01	-0.17	-0.38	-0.53*	-0.19	-0.20
	Sig.	0.93	0.96	0.46	.011	0.01	0.39	0.36
Boro	Correlación de Pearson	-0.40	-0.39	-0.06	-0.19	-0.19	0.09	0.14
	Sig.	0.07	0.07	0.80	0.40	0.40	0.68	0.55
Aluminio	Correlación de Pearson	-0.36	-0.37	-0.02	0.14	0.14	0.14	0.21
	Sig.	0.10	0.09	0.93	0.54	0.54	0.53	0.36

\*La correlación significativa  $p < 0.05$ ; \*\*La correlación significativa  $p < 0.01$ . N= 22. Las variables que fueron convertidas por no presentar una distribución normal fueron abundancia, densidad, turbiedad, conductividad, CD, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, Ca, K, Mg, Na, Zn, B y Al.

**Tabla 22:** Correlaciones de Pearson entre las variables ambientales complementarias y los indicadores de biodiversidad

Parámetro		Abundancia	Densidad	Riqueza Específica	Riqueza Rarefact	Shannon_H	Margalef	Fisher_alpha
Área de drenaje	Correlación de Pearson	0.53	0.55	-0.27	-0.45	-0.53	-0.41	-0.43
	Sig.	0.09	0.08	0.42	0.17	0.10	0.21	0.19
Pendiente	Correlación de Pearson	-0.20	-0.21	-0.06	.074	0.19	0.02	0.05
	Sig.	0.56	0.54	0.86	0.83	0.57	0.95	0.88
Altitud	Correlación de Pearson	0.30	0.34	-0.59	-0.61*	-0.49	-0.65*	-0.65*
	Sig.	0.37	0.31	0.06	0.05	0.12	0.03	0.03
Distancia al glaciar	Correlación de Pearson	-0.27	-0.28	0.84**	0.89**	0.75*	0.86**	0.85**
	Sig.	0.49	0.46	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00

\*La correlación significativa  $p < 0.05$ ; \*\*La correlación significativa  $p < 0.01$ . N= 11 excepto distancia al glaciar don N= 9. Las variables que fueron convertidas por no presentar una distribución normal fueron abundancia, densidad, área de drenaje y altitud.

## Anexo 08

### Estadísticos del análisis de componentes principales y el análisis de redundancias



**Tabla 23.** Resultados del Análisis de Componentes Principales (ACP) de los parámetros fisicoquímicos

<b>Componente</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Eigenvalue	7.25	4.86	3.44	2.38
Varianza (%)	30.22	20.27	14.35	9.90
Varianza acumulada (%)	30.22	50.49	64.83	74.74
<b>Parámetro fisicoquímico</b>				
Temperatura	-0.01	0.54	-0.61	-0.26
Turbiedad	-0.47	-0.48	0.46	0.35
Conductividad	0.90	-0.31	0.10	-0.08
pH	0.72	0.17	0.49	-0.06
Oxígeno disuelto	0.01	-0.50	0.49	-0.05
Índice de Pfankuch	-0.05	-0.36	0.55	0.09
Nitrógeno total	-0.04	0.79	0.17	0.48
Fósforo total	-0.43	-0.30	-0.66	0.29
Carbono Orgánico Disuelto	-0.12	0.66	0.50	-0.37
Carbono inorgánico Disuelto	0.58	-0.55	-0.26	-0.38
Carbono disuelto	0.13	0.49	0.50	-0.53
Fluoruros	0.38	0.40	-0.27	-0.60
Cloruros	0.18	0.58	-0.15	0.62
Sulfatos	0.86	-0.29	0.04	0.31
Nitratos	0.16	0.74	0.47	0.24
Aluminio	-0.16	0.46	-0.44	0.33
Boro	0.63	0.63	0.30	0.20
Calcio	0.93	-0.29	0.05	-0.09
Potasio	0.38	-0.35	0.03	0.33
Magnesio	0.86	-0.17	0.09	0.25
Sodio	0.86	0.05	-0.43	0.11
Silicio	0.70	0.38	-0.41	-0.11
Zinc	0.18	0.04	-0.23	-0.11
Estroncio	0.87	-0.05	-0.03	0.18



**Tabla 24.** Resultados del Análisis de Redundancia (ARD) de todos los parámetros fisicoquímicos y las abundancias relativas transformadas

Ejes	1	2	3	4	Varianza total	
Valores propios	0.31	0.14	0.12	0.09	1	
<b>Porcentaje de la varianza acumulada explicada</b>						
Por taxa	30.8	45	56.5	65.5		
Por la relación taxa-variable ambiental	30.8	45	56.5	65.5		
Parámetro fisicoquímico	Correlación de Pearson				Test de Monte Carlo	
					F	p-valor
Temperatura	-0.54	0.42	0.25	0.39	3.38	0.006*
Carbono Inorgánico Disuelto	0.40	0.22	0.59	0.14	2.91	0.012*
Calcio	0.22	0.09	0.15	0.33	2.48	0.021*
Magnesio	0.06	0.25	-0.23	0.17	2.31	0.022*
Índice de Pfankuch	0.59	-0.13	-0.30	-0.03	2.33	0.037*
Nitratos	-0.27	-0.13	-0.58	0.28	1.7	0.106
Cloruros	-0.56	-0.07	-0.17	0.09	1.63	0.132
Nitrógeno total	-0.51	0.19	-0.53	-0.05	1.58	0.148
Sodio	-0.21	0.34	0.15	0.44	1.46	0.183
pH	0.09	-0.37	-0.14	0.14	1.13	0.353
Oxígeno disuelto	0.46	-0.36	-0.08	-0.22	0.63	0.646
Carbono Orgánico Disuelto	-0.14	-0.02	-0.44	-0.07	0.55	0.659
Potasio	0.13	-0.37	0.31	-0.06	0.67	0.662
Silicio	-0.27	0.18	0.25	0.50	0.64	0.674
Sulfatos	0.09	0.13	-0.10	0.19	0.38	0.705
Carbono Disuelto	0.06	-0.02	-0.26	-0.02	0.45	0.716
Conductividad	0.20	0.07	0.09	0.18	0.53	0.724
Fluoruros	-0.17	0.06	0.41	0.53	0.51	0.732
Turbiedad	0.37	-0.33	-0.35	-0.32	0.25	0.82

\* Parámetro significativo según el test de monte Carlo  $p < 0.05$

**Tabla 25.** Resultados del Análisis de Redundancia (ARD) de los parámetros fisicoquímicos seleccionados y las abundancias relativas transformadas

Ejes	1	2	3	4	Varianza total	
<b>Valores propios</b>	0.27	0.12	0.10	0.07	<b>1</b>	
<b>Porcentaje de la varianza acumulada explicada</b>						
Por taxa	27.1	39.2	49.4	56		
Por la relación taxa-variable ambiental	38.7	55.8	70.4	79.8		
Variables ambientales seleccionadas	Correlación de Pearson				Test de Monte Carlo	
					F	p-valor
Temperatura	0.58	-0.23	-0.26	0.23	3.38	0.006*
Carbono inorgánico disuelto	-0.37	-0.28	-0.66	0.36	2.91	0.009*
Calcio	-0.20	-0.17	-0.20	0.70	2.48	0.018*
Magnesio	-0.04	-0.34	0.16	0.57	2.31	0.03*
Índice de Pfankuch	-0.60	-0.03	0.29	0.13	2.33	0.029*
Nitratos	0.25	0.14	0.61	0.30	1.7	0.111
Cloruros	0.55	0.16	0.19	0.10	1.63	0.129
Nitrógeno total	0.52	-0.13	0.55	-0.08	1.58	0.139
Sodio	0.25	-0.29	-0.22	0.64	1.46	0.154

\* Parámetro significativo según el test de monte Carlo  $p < 0.05$

**Anexo 09**  
**Matriz de Consistencia**



“INFLUENCIA DEL GRADIENTE DE COBERTURA GLACIAR DE LA CORDILLERA BLANCA EN LA BIODIVERSIDAD DE MACROINVERTEBRADOS BENTÓNICOS, 2019-2020”

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES	INSTRUMENTOS	METODOLOGÍA
<b>Problema General:</b>	<b>Objetivo General:</b>	<b>Hipótesis General:</b>	<b>Variable Independiente:</b>	Porcentaje de glaciar limpio y cubierto	Análisis de imágenes satelitales Sentinel 2 (2019-2020)	<b>Diseño de la Investigación:</b>
¿Influye el gradiente de cobertura glaciar de la cordillera Blanca sobre la biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos?	Evidenciar la influencia del gradiente de cobertura glaciar en la cordillera blanca sobre la biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos, 2019-2020	El retroceso glaciar conlleva cambios en las condiciones ambientales de hábitats acuáticos, por lo tanto, la biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos de corrientes de agua con aporte glaciar, en las unidades hidrográficas Lullán, Ancash y Llanganuco, varía en función del gradiente de cobertura glaciar y los parámetros fisicoquímicos asociados.	Gradiente de cobertura Glaciar		Análisis del Modelo Digital de elevación 12.5 m	El presente trabajo de investigación tiene un diseño no experimental, correlacional, transversal
			<b>Variables Dependientes:</b>	Riqueza Abundancia Diversidad Diversidad Beta	Muestreo e identificación de macroinvertebrados	<b>Población:</b>
			Biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos		Tratamientos estadísticos de datos	Comunidades de macroinvertebrados bentónicos de todas las microcuencas glaciares de Parón y Llanganuco
			<b>Variables Intermedias</b>	Oxígeno disuelto CE pH Temperatura Turbiedad Nutrientes Cationes y aniones	Uso de Multiparámetro, análisis de laboratorio, Índice de Pfankuch	<b>Muestra:</b>
			Parámetros fisicoquímicos del agua			Comunidades de macroinvertebrados bentónicos de diez microcuencas glaciares de Parón y Llanganuco
						<b>Muestreo de macroinvertebrados:</b> Se realizó con la ayuda de una malla Surber de 250 µm. En cada punto de muestreo se evaluaron 6 sitios a lo largo de 15 metros.

**Anexo 10**  
**Panel fotográfico**



**Figura 19.** Fotografías de los puntos de muestreo evaluados



Punto 1: Parón



Punto 2: Parón



Punto 3: Huaytapallana



Punto 4: Huaytapallana



Punto 5: Llanganuco



Punto 5: Llanganuco



Punto 6: Llanganuco



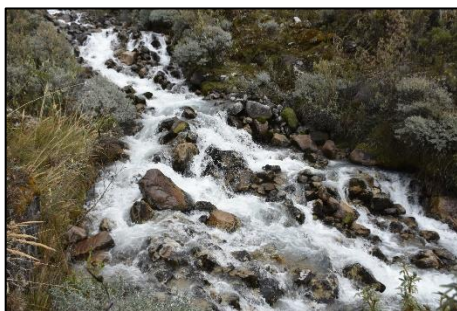
Punto 7: Llanganuco



Punto 8: Llanganuco



Punto 9: Llanganuco



Punto 11: Llanganuco



Punto 10: Llanganuco

**Figura 20.** Fotografías de los macroinvertebrados identificados



Beatidae *Andesiops*



Leptophlebiidae *Meridialaris*



Scirtidae



Staphylinidae



Elmidae *Austrelmis*



Elmidae *Austrelmis* (adulto)



Gripopterygidae *Claudioperla*

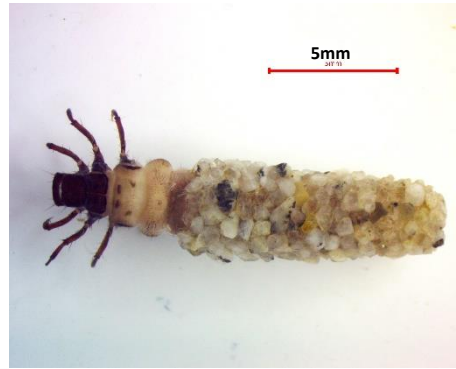


Hydrobiosidae *Atopsyche*





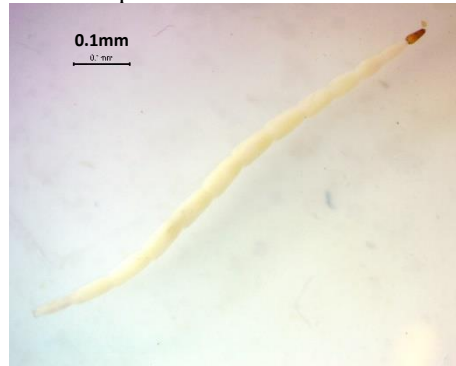
Hydrobiosidae *Cailloma*



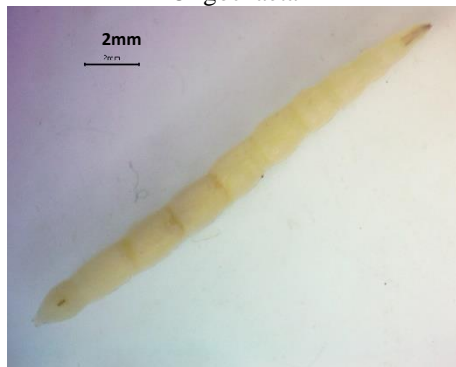
Limnephilidae *Anomalocosmoecus*



Oligochaeta



Ceratopogonidae



Dolichopididae



Muscidae *Limnophora*



Psychodidae *Maruina*



Empididae *Neoplasta*



Simulidae *Gigantodax*



Simulidae *Simulium*



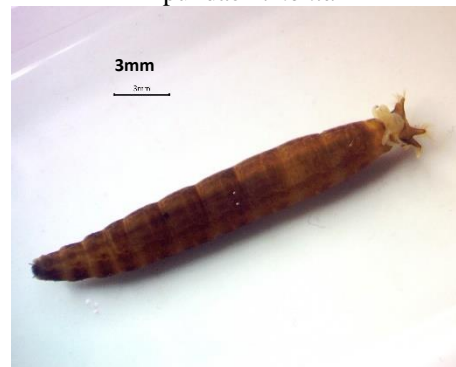
Tabanidae *Tabanus*



Tipulidae *Limonia*



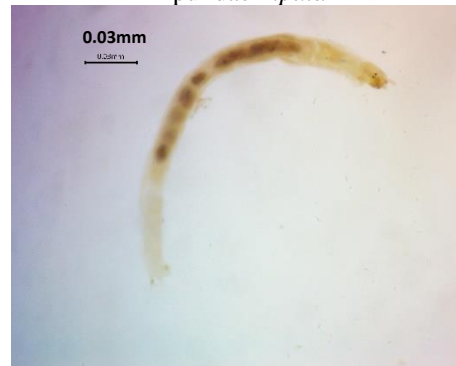
Tipulidae *Molophilus*



Tipulidae *Tipula*



Chironomidae Diamesinae *Paraheptagya*



Chironomidae sub Chironominae sp1



Chironomidae sub Chironominae sp2



Chironomidae sub Chironominae sp3



Chironomidae sub Chironominae sp4



Chironomidae sub Orthoclaadiinae sp1



Chironomidae sub Orthoclaadiinae sp2



Chironomidae sub Orthoclaadiinae sp3



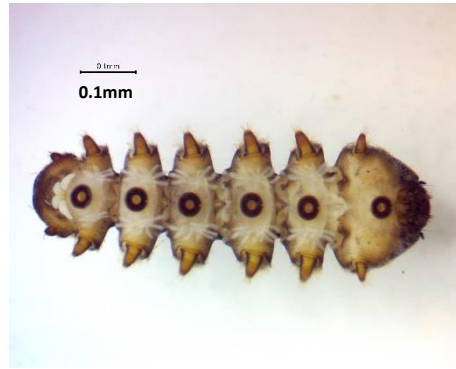
Chironomidae sub Podonomidae  
*Podonomus*



Chironomidae sub Podonominae  
*Parochlus*



Chironomidae sub Tanypodinae



Blephmariceridae *Limonicola*



Planorbidae



Hirudinea sp2