



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO
AMBIENTE



TESIS

**MODELO GEO ESTADÍSTICO DEL IMPACTO SEDIMENTARIO POR
METALES PESADOS EN LAGOS GLACIARES DE LOS ANDES DEL
PERÚ: RINCONADA Y SIBINACOCHA**

PRESENTADA POR:

DANTE SALAS MERCADO

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

PUNO, PERÚ

2022



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

ESCUELA DE POSGRADO

DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

TESIS

MODELO GEO ESTADÍSTICO DEL IMPACTO SEDIMENTARIO POR METALES PESADOS EN LAGOS GLACIARES DE LOS ANDES DEL PERÚ: RINCONADA Y SIBINACOCHA



PRESENTADA POR:

DANTE SALAS MERCADO

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

PRESIDENTE

.....
Dr. WENCESLAO TEDDY MEDINA ESPINOZA

PRIMER MIEMBRO

.....
Dr. JUAN WALTER TUDELA MAMANI

SEGUNDO MIEMBRO

.....
Dr. HEBER NEHEMIAS CHUI BETANCUR

ASESOR DE TESIS

.....
Dr. GERMAN BELIZARIO QUISPE

Puno, 01 de julio del 2022

ÁREA: Ambiental

TEMA: Contaminación de Lagos Glaciales.

LÍNEA: Sedimentos.



DEDICATORIA

Para mis padres, Dante Salas Ávila e Yliana Mercado Quiroz quienes siempre serán el motor de mi vida.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo financiero del Proyecto Concytec – Banco Mundial "Mejoramiento y Ampliación de los Servicios del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica" 8682-PE, a través de su unidad ejecutora ProCiencia (contrato número 01-2018-FONDECYT/BM-Programas de Doctorados en Áreas Estratégicas y Generales); PEGASUS: Producing Energy And Preventing Hazards From Surface Water Storage In Perú (contrato número 009-2019 FONDECYT); y Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno por el apoyo brindado para ejecutar este proyecto.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco teórico	3
1.1.1 Lagos glaciares	3
1.1.2 Formación de lagunas glaciales	4
1.1.3 Contaminación	4
1.1.4 Metales en sedimentos	8
1.1.5 Textura en sedimentos	8
1.1.6 Ambiente y política públicas	9
1.1.7 Técnicas SIG	10
1.1.8 Técnicas de Muestreo	10
1.1.9 Equipos de muestreo	12
1.1.10 Técnicas de análisis	12
1.1.11 Modelamiento	15
1.2 Antecedentes	17



CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1	Identificación del problema	20
2.2	Enunciados del problema	21
2.3	Justificación	22
2.4	Objetivos	22
2.4.1	Objetivo general	22
2.4.2	Objetivos específicos	22
2.5	Hipótesis	23
2.5.1	Hipótesis general	23
2.5.2	Hipótesis específicas	23

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	Lugar de estudios	24
3.2	Población	25
3.3	Muestra	25
3.4	Método de investigación	26
3.5	Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	26

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Propiedades y características de los lagos glaciales	33
4.2	Concentración y calidad de sedimentos con metales pesados	37
4.3	Identificación de fuentes de contaminación de los sedimentos con metales pesados	40
	CONCLUSIONES	46
	RECOMENDACIONES	47



BIBLIOGRAFÍA	48
ANEXOS	74



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Tasa de erosión de las litologías contenidas en las microcuencas de los lagos glaciales.	36
2. Diferencias de los elementos con relación a los lagos glaciales.	39
3. Comparación de las concentraciones promedio de los metales pesados de este estudio y otras investigaciones.	40
4. Pruebas de confianza para ambos lagos glaciales.	43
5. Varianza explicada del ACP para ambos lagos glaciales.	44
6. Cargas por elemento para cada PC.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Área de estudio y puntos de muestreo para los lagos glaciales (1) Sibinacocha y (2) Rinconada.	26
2. Mapa de profundidad de los lagos glaciales (a) Rinconada y (b) Sibinacocha.	34
3. Mapa de erosión hídrica de la microcuenca de los lagos glaciales (a) Rinconada y (b) Sibinacocha.	35
4. Distribución de la composición del tamaño de grano, el tamaño de grano medio y materia orgánica de los sedimentos de los lagos glaciales (a) Rinconada y (b) Sibinacocha.	37
5. Estadísticos descriptivos de las concentraciones de los metales pesados en sedimentos de los lagos glaciales Rinconada y Sibinacocha.	39
6. Distribución espacial del As (a), Cu (b), Hg (c), Pb (d) y Zn (e) de los sedimentos superficiales del lago Rinconada.	41
7. Distribución espacial del As (a), Cu (b), Hg (c), Pb (d) y Zn (e) de los sedimentos superficiales del lago Sibinacocha.	42
8. Plano de correlaciones con las cargas de dos componentes principales de los metales pesados y el índice de erosión de los lagos glaciales (a) Rinconada y (b) Sibinacocha.	45



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1. Informe de resultados de metales en sedimentos del lago Rinconada.	74
2. Informe de resultados de metales pesados en sedimentos del lago Sibinacocha.	75



RESUMEN

Los lagos glaciales son importantes fuentes debido a que se ubican en las cabeceras de cuencas y dan origen o contribuyen a ríos importantes, beneficiando a numerosas poblaciones aguas abajo. Sin embargo, estos lagos se ven amenazados por la contaminación metálica a causa del retroceso glaciar y de las actividades humanas. Por ello, el objetivo de este estudio fue determinar las diferencias entre una contaminación natural y una antropogénica en lagos glaciales de los andes del sur del Perú. Para ello se realizó muestreos de sedimento superficial del fondo de los lagos Rinconada y Sibinacocha por el método por transectos, donde se determinó las propiedades y características de los lagos como profundidades, tasa de erosión, granulometría y las concentraciones de ocho metales tóxicos e identificar la procedencia de los metales, utilizando métodos multivariados y un proxy geoquímico. Los valores de los metales pesados encontrados en los lagos de los andes del Perú, revelan que existe elevadas concentraciones de Arsénico y Cobre en ambas lagunas superando la normativa internacional, lo que implica una contaminación natural. Sin embargo, las concentraciones de los metales presentes en el lago Rinconada se incrementarían por el desarrollo de las actividades mineras principalmente en Arsénico, Mercurio y Plomo.

Palabras clave: Lagos glaciales, lago Rinconada, lago Sibinacocha, metales pesados, sedimentos



ABSTRACT

Glacial lakes are important sources as they are located at the headwaters of watersheds and give rise to or contribute to important rivers, which benefit numerous downstream populations. Nevertheless, these lakes are under threat from metal pollution due to glacial retreat and human activities. For this reason, the purpose of this study was to determine the differences between natural and anthropogenic pollution in glacial lakes in the southern Peruvian Andes. For this purpose, surface sediment samples were taken from the bottom of lakes Rinconada and Sibinacocha using the transect method, where the properties and characteristics of the lakes, such as depth, erosion rate, granulometry and the concentrations of eight toxic metals were determined and the origin of the metals was identified, using multivariate methods and a geochemical proxy. The values of heavy metals found in the Peruvian Andean lakes reveal that there are high concentrations of arsenic and copper in both lakes, exceeding international standards, which implies natural pollution. Nevertheless, the concentrations of metals present in Rinconada lake would increase due to the development of mining activities, mainly Arsenic, Mercury and Lead.

Keywords: Glacial lakes, heavy metals, lake Rinconada, lake Sibinacocha, sediments.

INTRODUCCIÓN

Los lagos glaciales se forman a causa del derretimiento de los glaciares (Iturrizaga, 2018), y en los últimos años están incrementan su tamaño descontroladamente (Mark *et al.*, 2017), convirtiéndose en los reservorios más importantes de agua dulce después de los glaciares (Bórquez *et al.*, 2006). Por su ubicación en zonas muy elevadas e inaccesibles (Tumialan de la Cruz, 2003), estas fuentes son importantes ya que, comúnmente son cabeceras de cuencas que dan origen o contribuyen a importantes ríos (Wangchuk y Bolch, 2020), que benefician a las poblaciones aguas abajo, para ser utilizados en diferentes actividades como: en la producción de energía (Ehrbar *et al.*, 2018), consumo humano y el desarrollo de sus económico de las poblaciones cercanas.

Las principales actividades desarrolladas en zonas con influencia glaciar es la ganadería (Ehrbar *et al.*, 2018), el turismo vivencial (Arroyo *et al.*, 2012) y la minería (Schoolmeester *et al.*, 2018). Siendo, la minería subterránea la actividad que se desarrolla generalmente al pie de los glaciares (Aquafondo, s.f.) y es uno de los principales sectores económicos en los países sudamericanos y en el mundo (Lagos y Peters, 2010). Sin embargo, en Sudamérica, principalmente en países que poseen cordilleras glaciares denominados como “los Andes”, se han formado grupos importantes de minería artesanal, que generan impactos económicos beneficiando a las poblaciones cercanas; pero a la vez, causan efectos negativos al medio ambiente (Toledo y Veiga, 2018). Es decir, la minería artesanal después de sus procesos de recuperación de oro, no tiene un debido manejo de los residuos producto de la actividad (INGEMMET, 2009), los que son depositados a la intemperie sin contemplar una posible liberación de contaminantes (Rahim *et al.*, 2019) como son los metales pesados y metaloides (Salas-Mercado *et al.*, 2020).

Por otra parte, los metales pesados también se encuentran en la litología de los andes, cubiertos por la masa glaciar (Huggel *et al.*, 2020), que al derretirse dejan al descubierto una amplia gama de formas geológicas (Iturrizaga, 2018), discurre por estas formaciones geológicas y adopta las propiedades químicas de la zona (agua-roca) (Eddy *et al.*, 2017), con la posible presencia de metales tóxicos que pueden causar daños ecosistémicos futuros de los lagos glaciales (Egiebor y Oni, 2009).

Los metales pesados tienen una corta duración en la columna de agua; por lo que, tienden a depositarse y adherirse al sedimento de fondo (Konhauser *et al.*, 1997), haciendo que se acumule y aumente las concentraciones (Liang *et al.*, 2020). Estos elementos pueden

volver al agua a través, de los procesos dinámicos como la resuspensión (Schoolmeester *et al.*, 2018), afectando la conservación natural de los organismos acuáticos y la salud de las poblaciones beneficiadas de la fuente (Ezemonye *et al.*, 2019). Generando preocupación en las poblaciones aledañas y aguas abajo, ya que, puede ingresar a la cadena trófica (Paul, 2017), bioacumulándose en el organismo y generando enfermedades congénitas como: formaciones de tumores (Buxton *et al.*, 2019), trastornos gastrointestinales, musculares (Genthe *et al.*, 2018), reproductivos y neurológicos (Wang *et al.*, 2019).

Son pocos los estudios realizados con la intención de evaluar las concentraciones de metales pesados en sedimentos de fuentes hídricas de origen glaciar de los andes peruanos, pero según Mark *et al.* (2005), en los próximos años será de importancia la continua evaluación de estas fuentes, debido al acelerado retroceso glaciar. Sin embargo, estos estudios se centran casi siempre en los andes del centro, ya que, posee gran cantidad de glaciares y a su vez, es la más extensa. López-Moreno *et al.* (2017), analizo las concentraciones de elementos químicos en la lago Yanamarey dentro de la cordillera Blanca, determinando que existe elevadas concentraciones de As (320 mg kg^{-1}) en los sedimentos, en comparación con otros elementos de estudio, además este metal provendría de los minerales de la pérdida de la masa glaciar, lo que, coincide con Grande *et al.* (2019), quién menciona que la contaminación por metales pesados de las fuentes hídricas es producto del drenaje ácido de roca, producto de la desglaciación que sufren las zonas cercanas a los glaciares de la cordillera blanca quien dejo grandes cantidades de depósitos sulfurados y no por el desarrollo de la actividad minera.

El objetivo de este estudio es determinar las diferencias entre una contaminación natural y la antropogénica, ya que creemos que falta aclarar cuáles son los metales tóxicos presentes en los sedimentos de los lagos glaciales de los andes peruanos.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco teórico

1.1.1 Lagos glaciares

El derretimiento acelerado de los glaciares (Luo *et al.*, 2020), forman lagos de montaña a causa del cambio climático (Petrov *et al.*, 2017), que son denominados como lagos glaciares (Wilson *et al.*, 2018) encontrándose en zonas muy alejadas y elevadas altitudes (Wangchuk y Bolch, 2020). Estos lagos son almacenes de agua natural que podría brindar beneficios como la generación de energía hidroeléctrica y agua para consumo, riego, entre otros (Ehrbar *et al.*, 2018), los cuales incrementaron su área superficial en un 35% en los años del 2001 al 2018 (Luo *et al.*, 2020).

El Perú, tiene la mayor cantidad de glaciares tropicales del continente (Schoolmeester *et al.*, 2018) y está compuesto por 19 cordilleras en todo el territorio nacional, subdivididos en 3 grandes grupos: los andes del norte, los andes del centro y los andes del Sur (ANA, 2014), teniendo una mayor importancia de conservación los andes del sur, debido al valor hídrico que genera los glaciares, ya que estas zonas poseen un clima semiárido y con poca capacidad de almacenamiento en sus cuencas, porque beneficia a las poblaciones con agua dulce en la estación climática seca (Schoolmeester *et al.*, 2018), este grupo, está integrado por seis cordilleras: Chila, La Raya, Vilcanota, Carabaya, Apolobamba y la Volcánica (ANA, 2011). En los últimos años los glaciares de los andes tropicales han sido afectados a causa del calentamiento global (Mark *et al.*, 2017; Petrov *et al.*, 2017), generando daños en la estructura de los glaciares como la fragmentación, el retroceso y su extinción, mediante el derretimiento de los glaciares (ANA, 2014).

1.1.2 Formación de lagunas glaciales

A causa del derretimiento de los glaciares se forman fuentes de agua, denominados lagunas glaciales (Iturrizaga, 2018), existen cuatro tipos de lagunas de formación glacial que se identifican con respecto a la distancia, como son: las lagunas supra glaciales, estos se encuentran represados por el glaciar, normalmente en la zona de acumulación y ablación. El lago supra glacial en un tiempo indeterminado se convierte en un lago pro glacial, el cual se ubica entre la masa glaciar y bloques desprendidos de hielo, este tipo de lagos aumenta el retroceso glaciar a través de la retroalimentación positiva que se genera agua - hielo (Wangchuk y Bolch, 2020) y forman lagos peri glaciales, estos no tienen ningún tipo de conexión con el glaciar, pero se encuentran en la cercanía. Las lagunas peri glaciales fluyen aguas abajo, encontrando una superficie adecuada y forman el ultimo tipo de lagos, que son las lagunas extra glaciales, estos se encuentra alejados de la masa glaciar de 2 km. a más (Petrov *et al.*, 2017).

Últimamente la formación de lagunas glaciales a causa del retroceso glaciar es un grave problema (Huggel *et al.*, 2020), por que, debido a la contribución de agua superficial y subterránea a las lagunas extra glaciales, estos están aumentando su superficie progresivamente (Mark *et al.*, 2017), convirtiéndose en la reserva liquida de los andes tropicales. Estas lagunas se ubican en zonas muy elevadas e inaccesibles (Wangchuk y Bolch, 2020), que pueden ser utilizados para la generación eléctrica, como también benefician de agua dulce a las actividades agropecuarias aguas abajo (Ehrbar *et al.*, 2018), así mismo, a las actividades antropogénicas como la minería (Schoolmeester *et al.*, 2018).

1.1.3 Contaminación

Estas fuentes son afectadas por diferentes tipos de contaminantes (Z. Zhang *et al.*, 2018), siendo los micro plásticos uno de los contaminantes más comunes (Vermaire *et al.*, 2017), como también se encuentran los hidrocarburos aromáticos que son transportados y entran a estas fuentes (Tang *et al.*, 2017), pero en particular los metales pesados debido a su toxicidad son los contaminantes más persistentes que se encuentran en los cuerpos (Ahmadee *et al.*, 2016).

Los metales pesados en lagos, elevan su presencia a causa de actividades antropogénica, como la ganadería, la agricultura por el uso de fertilizantes (Evangelou *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020), las áreas urbanas por los drenajes de aguas residuales (Zhang *et al.*, 2020) y sobre todo la actividad minera, la cual es considerada como la principal actividad contaminadora, generando elementos potencialmente tóxicos como el As, Cd, Cu y Zn (Del Rio-Salas *et al.*, 2019), sin embargo, también se puede generar de forma natural, es por ello que la evaluación geoquímica es importante para la conservación de los organismos acuáticos y también para salud de las poblaciones cercanas a la fuente (Ezemonye *et al.*, 2019), es por ello que se tiene que considerar tres aspectos para su identificación y posterior evaluación.

1.1.3.1 Aspectos físicos, químicos y biológicos

Las lagunas extra glaciales están influenciados por los procesos glacio-geomorfológicos (Muñoz *et al.*, 2020), que son compuestos por aspectos principales como la geología, la topografía y las condiciones climáticas (Blanca, 2012).

Los glaciares se encuentran entre 3600 a 6000 m.s.n.m. entre la zona Puna y la zona glaciario (Tumialan, 2003), la cual está compuesta por una geología que se inició en el mesozoico hasta ahora en el cenozoico del periodo cuaternario, época del Holoceno (MINEM, 2001), siendo: los depósitos Fluvioglaciares (Q-fgl) formados por la geodinámica del derretimiento glaciario, conformado por acumulaciones clásticas de matriz arcillosa (Ayala, 2020), el segundo son los depósitos coluviales (Q-co) que son formados por la gravedad, estos depósitos poseen una forma de cono comportándose como zona de acumulación porque no tiene mucho transporte, está compuesto gravas, arenas y arcillas (MINAM, 2018). El depósito aluvial (Q-alv) es formado por los ríos y se ubican en cauces de superficies amplias (Ayala, 2020) y por último se encuentran los depósitos glaciares o también llamados depósitos morrénicos el cual depende de la erosión de la superficie y la ayuda de la topografía, está compuesto por gravas, arenas, limos y arcillas (Tumial y Cruz, 2004).

La topografía, determina el encausamiento de las lagunas glaciales, en estas zonas se presentan diferentes morfologías dentro de ellas está: la vaguada, los

espolones truncados, los aretes, las morrenas de pequeña y gran dimensión (Iturrizaga, 2018), denominándose valles glaciares, los cuales se extienden desde el glaciar hasta el lago extra glacial, predominando las morrenas (ANA, 2011; Tumial y Cruz, 2004). Las morrenas son un conjunto de material glaciar no estratificado que son depositados y liberados en su retroceso (Huggel *et al.*, 2020), son estructuras inestables y se forman según la topografía de la zona. Las morrenas son fuentes de almacenamiento sedimentario (Iturrizaga, 2018) que asociado a la erosión de los suelos aledaños y con la ayuda de agentes climatológicos, producen flujos sedimentarios que se transfieren a las fuentes hídricas, siendo un peligro para las lagunas glaciares (Blanca, 2012).

Los sedimentos están considerados como contaminantes de ríos, lagos y embalses (MacDonald y Ingersoll, 2002), poseyendo, tres problemas principales el físico, el químico y el biológico (FAO, 2015).

- **Físico**

Existen tres tipos de problemas físicos, el primero es caracterizado por los sedimentos suspendidos, debido a que su gran concentración, generando turbidez al agua, el cual impide el ingreso de luz solar y en consecuencia no permite el crecimiento de algas acuáticas (Vuille *et al.*, 2018), el segundo son los sedimentos de fondo, que se depositan en el lecho de las fuentes hídricas alterando la correcta alimentación de los organismos más pequeños, generando la disminución de peces (MARC, 2017) y el ultimo es la reducción de las profundidades y la pérdida de capacidad de almacenamiento del agua proveniente del glaciar (Brunskill y Schindler, 1971).

- **Químico**

El problema químico sedimentario, empieza desde los glaciares, ya que los contaminantes atmosféricos se adhieren a las partículas que componen los glaciares (Wallis, 2016), estos al derretirse liberan sedimentos que son transportados hasta las fuentes, pero también se libera agua proveniente del deshielo, la cual adopta las propiedades químicas de la litología de la zona (agua-roca) (Eddy *et al.*, 2017) y llegan a las lagunas glaciales

generando preocupación por la toxicidad de los químicos debido a que se alojan en los depósitos sedimentarios y pueden alterar la calidad de agua (Schoolmeester *et al.*, 2018).

Los contaminantes presente en los andes son por metales pesados (Santos-Frances *et al.*, 2017), debido a que los glaciares dejan al descubierto un espectro de formas de suelos (Iturrizaga, 2018), de manera que con la interacción del oxígeno, la precipitación, minerales sulfurosos y metales (Nordstrom, 2009), generan el (DRA) drenaje ácido de roca (Rodbell *et al.*, 2014), el DRA poseen metales pesados tóxicos que fluyen hasta encontrar un sistema fluvial como son los ríos, riachuelos o arroyos, que son denominadas como aguas lóxicas por poseer una sola dirección de flujo (Egiebor y Oni, 2009). Estos ríos fluyen aguas abajo hasta llegar a fuentes de aguas quietas, estancadas. También llamadas lénticas como son los humedales, lagunas y lagos (Di Maggio *et al.*, 2015).

Los metales tienen una corta duración en la columna de agua por lo que tienden a depositarse en el fondo, para después adherirse al sedimento inferior (Konhauser *et al.*, 1997), acumulándose en el fondo de las fuentes lóxicas pero con más importancia en las lénticas (MacDonald y Ingersoll, 2002).

- **Biológico**

En altitudes por encima de 3600 m.s.n.m. el desarrollo de la flora es específica en la cual radica el Ichu y en algunos arbustos queñuales (MINAM, 2019) a diferencia de la flora, la fauna tiene mayor diversidad, encontrando vicuñas, llamas, alpacas, zorros, pumas, cóndores, águilas y gaviotas (Salas-Ávila *et al.*, 2021).

1.1.3.2 Aspectos meteorológicos

Las lagunas glaciares de los andes del sur, se encuentran dentro de las 8 regiones naturales del Perú (Vidal, 2014), los cuales se encuentran entre la región Puna y Janca con altitudes de 3800 a 6000 m.s.n.m (Britto, 2017), que el idioma de la zona quechua sería “mal que viene de la montaña” (Puna) y “blanco” por referirse al hielo a la región Janca (Correa *et al.*, 2016). La región

Puna tiene un clima frígido y húmedo, con temperaturas promedio anuales de 6° C y precipitaciones promedio de 700 mm al año (SENAMHI, 2020), mientras que en la región Janca a 4800 m.s.n.m, presenta temperaturas en todos los meses por debajo de 0 °C (MINAGRI, 2015).

1.1.3.3 Aspecto social

Las actividades económicas desarrolladas en la zona de los Andes son cuatro: La ganadería que es desarrollar la crianza y tenencia de camélidos, ovinos y algunos vacunos (Salas-Mercado *et al.*, 2022), la segunda es la agricultura la cual por encontrarse a una altitud mayor a 3600 m.s.n.m solo pueden desarrollar productos que soporten las bajas temperaturas como son la papa, el olluco y la maca (MINAGRI, 2015). La tercera Actividad es la del comercio, que consiste en vender insumos y materiales de necesidad para la población, como también para las actividades económicas (MINAGRI, 2016) y como última actividad económica, se encuentra la minería cuyo propósito es recuperar metales preciosos como oro, plata y cobre (Salas Mercado, 2017), pero si no existe esta última actividad económica, la mayoría de la población de la zona migra por asuntos laborales o crecimiento profesional (Meza-Duman *et al.*, 2022).

1.1.4 Metales en sedimentos

Los metales tienen una corta duración en la columna de agua por lo que tienden a depositarse y son absorbidos por el sedimento inferior (Konhauser *et al.*, 1997), dado que la composición de los sedimentos por su característica granular, los metales se encuentran ligados a las partículas fina (Gaur *et al.*, 2005). Por ello, es importante el estudio de los sedimentos por ser almacenes de contaminantes tóxicos (El-Amier *et al.*, 2017).

1.1.5 Textura en sedimentos

La textura son características físicas de las partículas de los sedimentos, de forma individual y agrupada como su tamaño, forma, porosidad y permeabilidad (Setiawan *et al.*, 2019), estas a su vez nos mencionan las modos de transporte y medios de deposición (K. Wu *et al.*, 2019), los cuales son medios de transporte de contaminantes (Roşca *et al.*, 2020).

1.1.6 Ambiente y política públicas

Las lagunas glaciales, elevan las concentraciones de metales pesados ya que en su cercanía se desarrollan actividades antropogénicas, como: la ganadería y la agricultura, debido al uso de fertilizantes y medicamentos (Evangelou *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020), otra factor son los poblados o áreas urbanas de tamaño considerable, que podrían generar drenajes de aguas residuales, como también los lixiviados producto de los residuos sólidos (Zhang *et al.*, 2020) y por último la actividad minera, la cual es considerada como la principal actividad contaminadora, generando elementos potencialmente tóxicos como el As, Cr, Cu, Hg y Zn (Del Rio-Salas *et al.*, 2019), estas actividades aumentarían el aporte sedimentario con concentraciones de metales, que naturalmente ya se generan y se depositan en el fondo de las lagunas (El-Amier *et al.*, 2017), debido a que los metales se encuentran asociados al tamaño del grano de los sedimentos, generalmente en las partículas más fina de la zona (Gaur *et al.*, 2005). El incremento de sedimentos con metales pesados pueden alterar la conservación natural de los organismos acuáticos y también para salud de las poblaciones beneficiadas de la fuente (Ezemonye *et al.*, 2019).

Por ello el estado peruano en su intención de monitorear la contaminación del medio ambiente, genero políticas medioambientales, mejorando normas y leyes desde 1984 hasta el 2005, año en el que se creó la ley general del ambiente (IGP, 2005). El estado a través del Ministerio del Ambiente, regula recursos como el agua, el aire, los residuos y el suelo (Solano *et al.*, 2017), estableciendo instrumentos ambientales como: los límites máximos permisibles (LMP), los cuales se miden en la salida del origen de la emisión y se tiene valores límites para cada actividad específica (ANA, 2016), después tenemos los estándares de calidad ambiental (ECA), establece un límite para las concentraciones de contaminantes presentes en los cuerpos de bien público.

Existen cinco tipos de ECAs, que son para monitorear y controlar de los recursos como: el aire por el Decreto Supremo en sus siglas (D.S.) N° 003-2017-MINAM, el ruido (D.S. N° 085-2003-PCM), las radiaciones no ionizantes (D.S. N° 010-2005-PCM), el agua (D.S. N° 004-2017-MINAM) y para el suelo (D.S. N° 011-2017-MINAM), siendo 55 instituciones del estado desde el ámbito nacional al ámbito local que están relacionadas con el medio ambiente y utilizan estos instrumentos para su

llevar un control de esos recursos (IGP, 2005). El ECA suelo, solo considera a tres tipos de suelos con presencia antropogénica: el suelo agrícola como su nombre lo dice para la producción alimenticia; el suelo residencial/ parques, que es un suelo ocupado por la población para la construcción de sus viviendas; el suelo comercial/industrial/extractivo, donde se realiza como actividad principal la extracción de recursos. Este estándar de calidad de suelos no considera a los sedimentos (ANA, 2015), por lo que se tiene que complementar las evaluaciones ambientales en sedimentos con normas extranjeras, como la norma de la Asociación de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA) y la Guía de Calidad de Sedimentos de Canadá (Salas-Mercado *et al.*, 2020).

1.1.7 Técnicas SIG

La identificación de metales pesados tiene que ser apoyados por monitoreos adecuados y técnicas SIG (El-Amier *et al.*, 2017), es decir, con la aplicación de mapeos predictivos generados de un análisis geo estadístico (Ji *et al.*, 2019; Karandish y Shahnazari, 2014), existiendo los modelos de interpolación Kriging, Co-Kriging y IDW (Boufekane y Saighi, 2019), siendo Kriging el modelo que permite conocer la distribución espacial de los metales y su posible zona de procedencia (Maanan *et al.*, 2004). Con la visualización de la distribución de contaminantes y su posible identificación de las fuentes se podría establecer o tomar acciones (El-Amier *et al.*, 2017), con políticas de control y orientación para la conservación de fuentes de agua (Chen *et al.*, 2019). Por ello es importante Identificar, diferenciar y cuantificar la contaminación natural de la antropogénica para posteriormente predecir los efectos en lagunas no impactadas.

1.1.8 Técnicas de Muestreo

1.1.8.1 Muestreo normativo

La Autoridad Nacional del Agua (2016), establece dos criterios para determinar los puntos de muestreo en cuerpos de agua lóticos y lénticos; para ríos se establece un punto de muestreo a 50 metros, antes del ingreso de la confluencia de dos ríos o ingreso a fuentes lénticas y 50 metros después de la confluencia de ríos. Mientras que para las lagunas y lagos se debe considerar una distancia de 200 metros del ingreso de los vertimientos o sistemas lóticos, existiendo dos

condiciones para determinar la cantidad de puntos necesarios para el muestreo, la primera condición, que en la fuente no se utiliza agua o no existen vertimientos de agua residual, en esta condición se establecerían 2 puntos de muestreo, ubicados en el ingreso y en la salida de la laguna, pero otra parte, si se utiliza el agua o existen vertimientos de aguas residuales se debe establecer como mínimo 4 puntos de control, ubicados en diferentes direcciones alrededor del cuerpo léntico.

1.1.8.2 Muestreo por conveniencia

Este tipo de muestreo establece a los puntos de control de acuerdo al criterio o experiencia del investigador (Casal y Mateu, 2003), tomando algunas consideraciones como: establecer puntos de muestreo en las entradas, salidas y zonas de ralentización del sistema acuático (González-Dávila *et al.*, 2019); estaciones que cubran proporcionalmente la zona de estudio (Wang *et al.*, 2015).

1.1.8.3 Muestreo sistemático

En el muestreo sistemático se elige una primera unidad de estudio aleatoriamente y las demás unidades se escogen agregándole una condición fija en base al primero (Casal y Mateu, 2003), el cual permite abarcar grandes extensiones, como también nos ayuda a disminuir el tiempo y los costos en el plan de campo (Etikan, 2017).

- **Muestreo por cuadrículas o grillas**

Son formas cuadrangulares que se posiciona imaginariamente sobre una superficie o la población de estudio (Chen *et al.*, 2019), en la que se dimensiona un cuadrante con una distancia fija en las dos direcciones X y Y (Rydberg *et al.*, 2012), donde se podría recolectar las muestras aleatoriamente o en todas las cuadrillas imaginarias (Bai *et al.*, 2011).

- **Muestreo por transectos**

Los transectos son líneas rectas perpendiculares al borde de las lagunas (Moreno-Brush *et al.*, 2016; Paramo *et al.*, 2012) o también podrían ser con patrones irregulares que poseen un intervalo en líneas, con el fin de

cubrir toda el área de estudio (Tendaupenyu *et al.*, 2018). Sobre las líneas se establecen de 2 a más puntos de muestreo.

1.1.9 Equipos de muestreo

En las lagunas o lagos, debido a la profundidad que presentan se deben utilizar equipos de muestreo para sedimentos con el objetivo de alcanzar el lecho, para ello, se tienen dos tipos de equipos: los superficiales (0 a 5 cm) y los profundos (mayores de 5cm).

- **Las dragas**

Son equipos para muestreo de sedimento superficial, cuya función es recolectar las muestras superficiales del lecho de las lagunas, estos equipos son ingresados lentamente a las profundidades con las mandíbulas de acero abiertas, hasta llegar al fondo e inmediatamente a ello, se deja caer el mensajero para el cierre de las mandíbulas. Existen dos tipos de dragas cuya diferencia radica en el tipo de muestra que se desea recolectar, las Ekman son dragas para sedimento blando libres de residuos o vegetación (Chen *et al.*, 2019; Ji *et al.*, 2019; Tendaupenyu *et al.*, 2018), mientras que las Van Veen, son dragas diseñadas para recolectar muestras de sedimentos de dureza blanda a media (Bai *et al.*, 2011; El-Amier *et al.*, 2017; Maanan *et al.*, 2004).

- **Los núcleos**

Los núcleos son utilizados con la finalidad de extraer un testigo del lecho de las lagunas sin alterar la superficie del fondo y obtener estratos limpios, estos equipos descienden a las profundidades, penetrando centímetros o metros según sea el tipo de núcleo. Tenemos los Uwitec y los HTH ambos son núcleos de gravedad los cuales ingresan mediante pesas (Moreno-Brush *et al.*, 2016; Rydberg *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2015) y por último, tenemos los núcleos universales, este equipo requiere de un sistema de poleas que brinda seguridad al equipo y reduce el trabajo del operador con el martillo, ya que cuando ingresa el equipo y llega al lecho inmediatamente se deja caer el martillo y repiten la acción con el fin de penetrar lo más posible (Wang *et al.*, 2014).

1.1.10 Técnicas de análisis

1.1.10.1 Tamaño de grano

El tamaño de grano es la característica física más importantes en los sedimentos (Setiawan *et al.*, 2019), debido a que nos ayuda a identificar al sedimento y los procesos que lo formaron (Wu *et al.*, 2019). La información del tamaño de grano del sedimento es importante ya que nos puede revelar el tipo de transporte que sufrió desde su depósito (Roşca *et al.*, 2020). Generalmente se expresa en milímetros (mm), para sedimentos gruesos y en micrómetros (μm) para sedimentos finos (Basile, 2018). Para su análisis tenemos las siguientes técnicas:

- **Análisis granulométrico de gruesos**

El procedimiento para este análisis puede ser aplicado para gravas hasta arenas (ASTM, 2002), la cual consiste en hacer pasar una determinada cantidad de muestra a través de una serie de tamices (GEE y OR, 2002).

- **Análisis granulométrico de finos**

Para determinar el tamaño de grano de las partículas finas se puede realizar por sedimentación, el primer método es el del hidrómetro, el cual consiste en hacer decantar una muestra en una solución y sean medidos en diferentes periodos de tiempo, para que así se pueda calcular el tamaño de grano (Basile, 2018). El segundo método es el de la pipeta, cuyo procedimiento es calcular el peso de los sólidos en 20 ml de una solución, que se extrae con una pipeta en tiempos calculados (Udden, 1914).

Como también se puede determinar el tamaño de grano con equipos que utilizan la técnica de difracción laser que nos brinda resultados confiables y facilita el ahorro del tiempo de trabajo para el análisis de finos estos equipos pueden ser el mastersizer 3000 y el lisst portable XR.

1.1.10.2 Concentración de metales pesados

Para medir la concentración de metales pesados se emplean diferentes tipos de técnicas de análisis:

- **Espectrometría de masas**

El ICP-MS, es un método de análisis multielemento que puede cuantificar elementos traza (Habte *et al.*, 2016), como la Ag, As, Be, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Ga, Ge, Hf, Ho, In, Ir, La, Li, Mo, Nb, Nd, Sc, Se, Sn, Ti, U, V y Zr, porque posee un excelente límite de detección (Mohammed *et al.*, 2016).

- **Espectroscopia de emisión óptica**

El ICP-OES, puede detectar 73 elementos y posee un límite de detección en partes por billón (ppb), es un método adecuado, como también es uno de los más recomendados para identificar y cuantificar los elementos traza presentes (Chand y Prasad, 2013; Hong *et al.*, 2019; Sharma, 2020).

- **Análisis y fluorescencia de rayos X de energía dispersiva**

El análisis por EDXRF es un método que poseen muchas ventajas, una de ellas es que puede analizar varios elementos y la principal es que se disminuye el tiempo y el trabajo en el análisis, ya que no necesita un pretratamiento como la disolución y la digestión, siendo más exacto que el ICP-MS (Mohammed *et al.*, 2016).

1.1.10.3 Materia Orgánica

Para estimar el porcentaje de materia orgánica, se aplica el método de pérdida de peso por ignición (Los son Ignition - LOI). Este método brinda información rápida y económica para la determinación de materia orgánica, siendo una herramienta para correlacionar testigos sedimentarios (Dabrio *et al.*, 2004). Existen dos tipos el LOI 550°C y el LOI 950°C, cuyas diferencias es el tiempo de permanencia en la mufla y la temperatura a la que se somete la muestra (Santisteban *et al.*, 2003). Se recomienda el LOI 550°C para lagos lacustres (Marín, 2011).

1.1.10.4 Batimétricos

Determinar las profundidades de una fuente lotica o léntica, se le denomina batimetría, la cual es realizar mediciones debajo del espejo de agua hasta el lecho superficial, dentro del área de estudio para obtener valores de profundidad. Con

el fin de encontrar la configuración topográficas (Quirós, 1988; Romero y Pineda, 2007). Para realizar estas mediciones tenemos:

- Manual
- Ecosonda o mono haz
- ADCP
- Multihaz

1.1.11 Modelamiento

Un modelo representa la conceptualización de la realidad, con la intención de describir algún evento o fenómeno real escenificado en términos matemáticos. Es normal que al modelamiento se le aplique matemática y tenga una semejanza incompleta ya que reflejan algunas o las principales propiedades de un objeto o evento modelado (Brito *et al.*, 2011). Estos modelos tienen que ser validados o contrastados, por su importancia en garantizar la calidad de los resultados de las simulaciones sometidas, otorgando la utilidad del desenlace del comportamiento de los eventos u objetos de la realidad con una o más variables, en forma independiente o en interacción según sea los criterios del análisis (Kishurim *et al.*, 2013).

Para realizar un modelo matemático se tiene que proceder a seguir tres etapas: Primero, conceptualizar el problema real en términos matemáticos es aquí donde se origina el modelo matemático. Segundo se analiza o agrupa los resultados del modelamiento y por último paso se interpreta los resultados del modelo con respecto a los datos del problema real (Thi *et al.*, 2019).

1.1.11.1 Modelos de predicción

Estos modelos son analíticos avanzados, que nos permiten a través de los datos, conocer por adelantado el comportamiento de variables en referencia al objeto de estudio (Kostka y Leśniak, 2020), con la intención de conocer que factores o parámetros influyen más en la predicción y que probabilidad tienen, de ser determinantes antes de ese suceso predicho (Fu *et al.*, 2020). Construyéndose mediante técnicas matemáticas, la cual nos permite inferir el futuro de una variable.

- **Geo estadística**

La geo estadística es una rama de la estadística, la cual se ocupa del estudio de variables distribuidas en el espacio temporal y multitemporales (Johnston *et al.*, 2001), cuyo fin es obtener la mejor estimación del valor de la variable en estudio en un punto del espacio no recolectado, en función de los datos recolectados, creando superficies de predicción (Journel y Huijbregts, 1978). La cual se mide mediante un variograma, cuya fórmula es:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i - h)]^2$$

Donde $\gamma(h)$ es el valor de la semi varianza, en h que es el intervalo de distancia, N(h) es el número de pares de muestra dentro de h, Z(x_i) y Z(x_{i+h}) son los valores de la muestra en dos puntos en una distancia h.

- **Métodos de interpolación**

- **Ponderación inversa de distancia (IDW)**

Es una interpolación determinista, con este método se calcula el valor de una variable en función del promedio de vecinos en un área determinada (Boufekane y Saighi, 2019). Por lo tanto, las distancias inversas desde un punto desconocido se consideran como el peso (Karandish y Shahnazari, 2014). Los valores observados en los puntos conocidos pueden afectar a la estimación de los valores asignados en los puntos desconocidos, la ecuación del método IDW es:

$$\lambda_i = \frac{D_i^{-a}}{\sum_{i=1}^n D_i^{-a}}$$

Donde λ_i es el peso en el punto i, D_i es la distancia del punto i a un punto desconocido y por último “a” es potencia diez de la ponderación.

- **Kriging**

Es un método de interpolación no determinista que inserta estimaciones lineales imparciales específicas (Boufekane y Saighi, 2019; Sluiter, 2012).

$$Z(x_p) = \sum_{i=1}^n \lambda_i * Z(x_i) \text{ con } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Donde λ_i es el peso de kriging, $Z(x_i)$ es un estimador de valor verdadero desconocido.

En los últimos años este método se considera como una técnica útil para el seguimiento, evaluación y gestión de los recursos de agua (Arslan, 2012), siendo el más preciso y de bajo sesgo entre los métodos de interpolación. En este método se encuentran el kriging simple, kriging universal, co-kriging, kriging residual pero el más usado es el kriging ordinario (Bhattacharjee *et al.*, 2019; Wu y Li, 2013).

- **Factores que afectan la interpolación**

Los factores que implican a error o una interpolación errónea, vendría a ser producto del procedimiento de la recolección o medición de los datos para su posterior análisis (Sluiter, 2012).

1.2 Antecedentes

El derretimiento acelerado de los glaciares (Luo *et al.*, 2020), forman lagos de montaña a causa del cambio climático (Petrov *et al.*, 2017), que son denominados como lagos glaciares (Wilson *et al.*, 2018) encontrándose en zonas muy alejadas y altas altitudes (Wangchuk y Bolch, 2020). Estos lagos son almacenes de agua natural que podría brindar benéficos como la generación de energía hidroeléctrica y agua para consumo, riego, entre otros (Ehrbar *et al.*, 2018), los cuales incrementaron su área superficial en un 35% en los años del 2001 al 2018 (Luo *et al.*, 2020).

Estas fuentes son afectadas por diferentes tipos de contaminantes (Zhang *et al.*, 2018), siendo los micro plásticos uno de los contaminantes más comunes (Vermaire *et al.*, 2017), como también se encuentran los hidrocarburos aromáticos que son transportados y entran a estas fuentes (Tang *et al.*, 2017), pero en particular los metales pesados debido a su

toxicidad son los contaminantes más persistentes que se encuentran en los cuerpos (Ahmadee *et al.*, 2016).

Los metales pesados en lagos, elevan su presencia a causa de actividades antropogénica, como la ganadería, la agricultura por el uso de fertilizantes (Evangelou *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020), las áreas urbanas por los drenajes de aguas residuales (Zhang *et al.*, 2020) y sobre todo la actividad minera, la cual es considerada como la principal actividad contaminadora, generando elementos potencialmente tóxicos como el As, Cd, Cu y Zn (Del Rio-Salas *et al.*, 2019), sin embargo, también se puede generar de forma natural, es por ello que la evaluación geoquímica es importante para la conservación de los organismos acuáticos y también para salud de las poblaciones cercanas a la fuente (Ezemonye *et al.*, 2019).

Los metales tienen una corta duración en la columna de agua por lo que tienden a depositarse y son absorbidos por el sedimento inferior (Konhauser *et al.*, 1997), dado que la composición de los sedimentos por su característica granular, los metales se encuentran ligados a las partículas fina (Gaur *et al.*, 2005). Por ello, es importante el estudio de los sedimentos por ser almacenes de contaminantes tóxicos (El-Amier *et al.*, 2017).

La textura son características físicas de las partículas de los sedimentos, de forma individual y agrupada como su tamaño, forma, porosidad y permeabilidad (Setiawan *et al.*, 2019), estas a su vez nos mencionan los modos de transporte y medios de deposición (Wu *et al.*, 2019), los cuales son medios de transporte de contaminantes (Roşca *et al.*, 2020).

La identificación de metales pesados tiene que ser apoyados por monitoreos adecuados y técnicas SIG (El-Amier *et al.*, 2017), es decir, con la aplicación de mapeos predictivos generados de un análisis geo estadístico (Ji *et al.*, 2019; Karandish y Shahnazari, 2014), existiendo los modelos de interpolación Kriging, Co-kriging y IDW (Boufekane y Saighi, 2019), siendo Kriging el modelo que permite conocer la distribución espacial de los metales y su posible zona de procedencia (Maanan *et al.*, 2004).

Con la visualización de la distribución de contaminantes y su posible identificación de las fuentes se podría establecer o tomar acciones (El-Amier *et al.*, 2017), con políticas de control y orientación para la conservación de fuentes de agua (Chen *et al.*, 2019).



Por ellos es importante identificar, diferenciar y cuantificar la contaminación natural de la antropogénica para posteriormente predecir los efectos en lagunas no impactadas.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Identificación del problema

Los lagos glaciares son fuentes naturales producto de la recesión de los glaciares, estos lagos aumentaron su volumen en las últimas décadas a causa de ello, convirtiéndose en fuentes de almacén de agua potable. Las zonas donde se encuentran estos lagos están expuesto a desarrollar contaminación antropogénica principalmente actividades como la minería y la ganadería. Algunos lagos glaciares se encuentran protegidos por las comunidades, gobiernos locales y regionales, para con el motivo de conservar su paisaje y el gran volumen de agua que almacena, aportando al desarrollo de sus regiones, tal es el caso de la laguna Sibinacocha. Esta laguna, además de ser una fuente natural también es una represa que ayuda a mantener el caudal del río Vilcanota en épocas de estiaje y brindar energía a otras provincias.

Por otro lado, en la región Puno, se encuentra la laguna Rinconada que también es un lago glaciar cuya existencia es el inicio de la cuenca del río Ramis, siendo, uno de los afluentes más importantes que desemboca al lago Titicaca. Encontrándose, afectado por los residuos de la actividad minera y consecuentemente la presencia de metales pesados. Según la OMS, (2006) los metales pesados son persistentes en el ambiente, no se degradan y al ser liberados se mantiene en circulación, siendo soluble al agua e impregnándose en las partículas del suelo.

La actividad minera para extraer minerales como plata (Ag), plomo (Pb), cobre (Cu), zinc (Zn) y oro (Au), genera como subproducto otros metales tóxicos como el arsénico (As), cadmio (Cd), níquel (Ni), entre otros. Los cuales son transportados por los ríos y al ser

consumidos por el ser humano se bioacumula en los riñones, el hígado, los órganos reproductores y en los pulmones.

En el Perú, 15 cuencas entre ellas la cuenca del río Ramis son las más contaminadas, ya que tienen presencia de metales pesados (Pb, As, Cd), generando malestares a las poblaciones ubicadas aguas abajo de las corrientes de estos ríos (ANA, 2015). La Dirección General de Salud Ambiental de Puno señala que la cuenca del río Ramis se encuentra contaminada por As, Cu, Cd, Pb y Zn, en concentraciones que exceden los estándares de calidad ambiental, debido al incremento de la actividad informal en la cabecera de cuenca (DIGESA, 2010). La laguna Rinconada se encuentra en la cabecera de la cuenca del río Ramis, donde se desarrolla la actividad minera artesanal intensiva, sus afluentes de la laguna discurren aguas abajo afectando a poblaciones aledañas que utilizan el agua para consumo humano y para actividades agropecuarias.

Salas (2017) determinó que la concentración de metales pesados en el sedimento del río Ramis en el tramo Crucero – San Antón, siendo el tramo más cercado a la salida de afluentes de la laguna Rinconada. Estuvieron, sobrepasando los límites establecidos en la legislación nacional (ECA, 2017) y también la extranjera (CCME, 1998).

Por otro lado, hay que tener en cuenta que las características de los sedimentos son importantes ya que pueden alterar la morfología de los lagos impactando negativamente disminuyendo la profundidad a causa de las actividades aledañas.

2.2 Enunciados del problema

Por todo lo señalado se plantean las siguientes preguntas de investigación:

2.2.1 Pregunta General:

¿El modelo geo estadístico revelará el impacto sedimentario y las fuentes de contaminación de los lagos glaciares del sur peruano: Rinconada y Sibinacocha?

2.2.2 Preguntas Específicas:

- a. ¿Cuáles son las propiedades y características de los lagos glaciares del sur peruano: Rinconada y Sibinacocha?
- b. ¿Cuál es la concentración y la calidad de los sedimentos con metales pesados en los lagos glaciares del sur peruano: Rinconada y Sibinacocha?

- c. ¿Cuál es la fuente de contaminación de los sedimentos con metales pesados en los lagos glaciales del sur peruano: Rinconada y Sibinacocha?

2.3 Justificación

Ante la contaminación de la cuenca del río Ramis por metales pesados, reportada por instituciones como el ANA y DIGESA y la preocupación de la población expresada en los medios de comunicación sobre la cantidad de la concentración de estos metales en las diferentes zonas de su cauce. Es importante conocer la concentración de metales pesados en la laguna Rinconada, ya que se encuentra en la cabecera de cuenca de este río, como también es de importancia el volumen de agua que almacena, por su cercanía a la zona minera, y a partir de ahí, adoptar las medidas necesarias para su control.

El presente estudio se origina por la preocupación de la presencia de metales pesados en la laguna Rinconada, la cual es el inicio de la cuenca del río Ramis, desembocando gran cantidad de agua con alta concentración de metales pesados, hacia los poblados ubicados aguas abajo, por su uso en consumo humano y actividad agropecuaria ingresando de este modo a la cadena trófica.

La importancia de esta investigación radica en que el establecimiento de un modelo geo estadístico que revele la presencia de metales pesados en las lagunas por concentración, permitiendo la identificación de zonas de riesgo donde se acumulan estos sedimentos y cambio morfológico que sufre la laguna por causa de las actividades antropogénicas, ayudando a establecer el grado de contaminación y las medidas a aportar para reducir este grave problema ambiental.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo general

Predecir las fuentes de contaminación de sedimentos con metales pesados y el grado de contaminación de lagos glaciares del sur peruano: Rinconada y Sibinacocha.

2.4.2 Objetivos específicos

- a. Determinar las propiedades y características de los lagos glaciales del sur peruano: Rinconada y Sibinacocha.

- b. Determinar las concentraciones y la calidad de los sedimentos con metales pesados en los lagos glaciales del sur peruano: Rinconada y Sibinacocha.
- c. Determinar la fuente de contaminación de los sedimentos con metales pesados en los lagos glaciales del sur peruano: Rinconada y Sibinacocha.

2.5 Hipótesis

2.5.1 Hipótesis general

La calidad de los sedimentos con metales pesados en el lago Sibinacocha evidencian una contaminación natural, pero en menor proporción a la del lago Rinconada a causa de la minería realizada en la zona.

2.5.2 Hipótesis específicas

- a. La actividad minera aluvial posee mayor porcentaje de sedimento fino en la laguna Rinconada mientras que el porcentaje es significativamente menor en la laguna Sibinacocha.
- b. Los sedimentos de la laguna Sibinacocha presentan una contaminación moderada en los elementos As, Cu y Hg, mientras que la laguna Rinconada el nivel de contaminación es alto
- c. El mapa producido del modelamiento geo estadístico revela que en la laguna Rinconada existe mayores concentraciones de metales pesados tóxicos en comparación a la laguna Sibinacocha.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de estudios

El lago Rinconada ($14^{\circ}39'S - 69^{\circ}29'O$), es una de los principales lagos del departamento de Puno, por ser cabecera de cuenca del río Ramis (RR) que vierte sus aguas al lago Titicaca (ANA, 2014). Tiene una extensión de 516 has y se encuentra a una altitud de 4650 msnm (Loza and Ccancapa, 2019), posee temperaturas atmosféricas que van desde $-4.6^{\circ}C$ hasta $12.8^{\circ}C$, en todo el año y su precipitación acumulada anual promedio es de 707 mm (SENAMHI, 2020). Este lago durante décadas, ha recibido aguas industriales producto de la actividad minera y de los procesos metalúrgicos (Regal, 1946), realizados de forma artesanal e informal (PCM, 2012). Afectando directamente a la actividad agrícola y pecuaria (Giraldo-Malca, 2017), causando que el ganado de las poblaciones beneficiadas a esta fuente mueran (Defensoría del Pueblo, 2013), por lo que, desestabiliza la economía de las familias y genera conflictos socio ambientales (CGRP, 2011).

El lago Sibinacocha ($13^{\circ}50'S - 71^{\circ}2'O$) tiene una extensión de 2810 has. Está ubicada políticamente en el departamento del Cusco a una altitud de 4886 msnm. La lago Sibinacocha vierte sus aguas al río Vilcanota (RV) (Vuille *et al.*, 2018), que es un río importante, debido a que sus aguas discurren por diferentes departamentos del Perú (Drenkhan *et al.*, 2019). Además este lago se encuentra represada ya que brinda energía eléctrica a diferentes poblaciones de Cusco (Kronenberg *et al.*, 2016). También se encuentra dentro de un área de conservación regional llamada Ausangate (MINAM, 2019), donde está restringido el desarrollo de actividades antropogénicas como la minería. Por otra parte, ambas lagos se encuentran dentro de la franja metalogénica número XIX (Acosta *et al.*, 2009), esto quiere decir que presentan similar presencia

geoquímica de las rocas en su litología e influenciaría en las concentraciones de los metales (Santos-Francés *et al.*, 2017).

3.2 Población

El Perú tiene la mayor cantidad de glaciares tropicales de Sudamérica (Carrión *et al.*, 2017), agrupados en tres: los andes del norte, del centro y del sur (ANA, 2014) de los cuales, el grupo que posee mayor importancia, son los andes del sur por su valor hídrico, debido a que presentan un clima semiárido con baja capacidad de almacenamiento en sus cuencas (Schoolmeester *et al.*, 2018), lo que significaría que su fuente principal de abastecimiento de agua dulce, en temporada seca, es procedente de los glaciares (Petrov *et al.*, 2017) y está compuesta por seis cordilleras, de las cuales, la cordillera del Vilcanota seguida por la de Apolobamba, son las que poseen mayor cantidad de lagos glaciales (ANA, 2014). Se procedió a la selección de las lagos bajo los criterios de: origen glacial; andes del sur; franja metalogenética del Perú (Acosta *et al.*, 2009); ser cabecera de cuenca de ríos importantes; encontrarse en una zona protegida (sin desarrollo antropogénico) y en una zona con desarrollo minero informal. Siendo, seleccionadas el lago Rinconada y el lago Sibinacocha, las cuales tienen 518.7 ha y 2810.5 ha, respectivamente.

3.3 Muestra

En esta investigación se tuvo como criterio, el muestreo por sistemático por transecto, considerando de dos a tres puntos de muestreo por transecto (punto medio del transecto y puntos a 250 m del borde del lago; Figura 1.

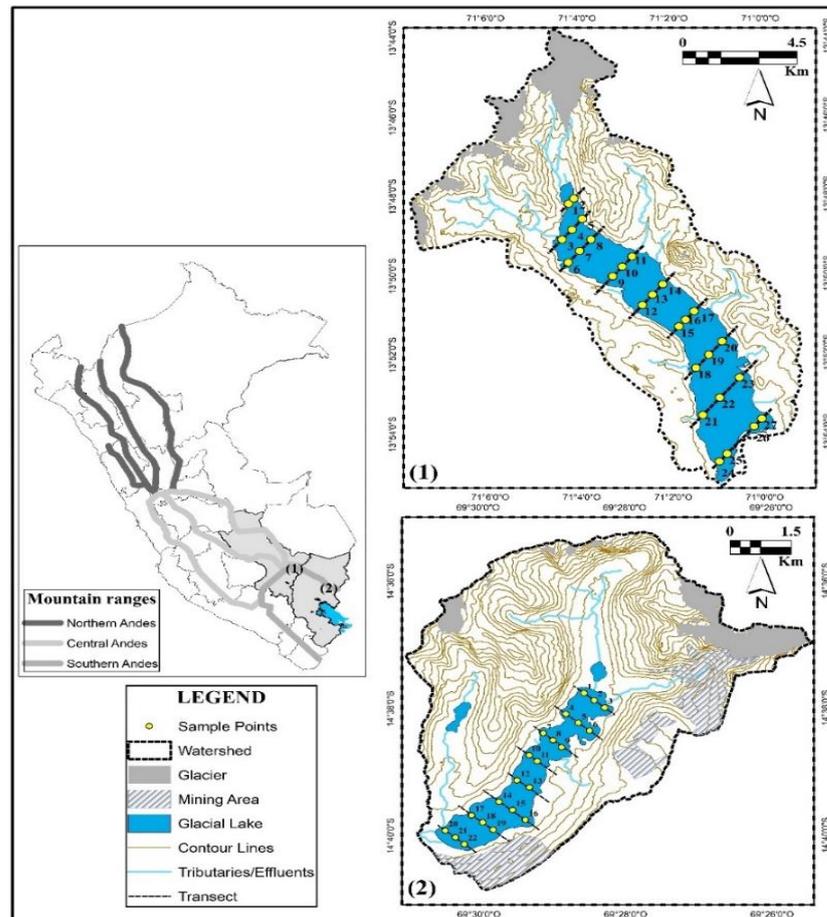


Figura 1. Área de estudio y puntos de muestreo para los lagos glaciales (1) Sibinacocha y (2) Rinconada.

3.4 Método de investigación

La presente investigación es de tipo descriptivo – explicativo, ya que los dos primeros objetivos se realiza una evaluación y según los resultados se procedió a realizar la predicción de las fuentes y las zonas de acumulación de ambas lagunas.

3.5 Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

3.5.1 Determinar las propiedades y características de los lagos glaciales de los andes del Perú: Rinconada y Sibinacocha.

a) Descripción de variables analizadas en los objetivos específicos.

Para determinar las propiedades y características se recolectó las muestras dentro de los meses diciembre del 2020 al febrero del 2021.

- Variable:

Propiedades Físico-Químicas (VD): Esta variable es de tipo continua ya que se utilizaron instrumentos para determinar cada propiedad, no es controlada ya que se encuentra naturalmente.

Lagos glaciales (VI): Esta variable es discreta ya que no se utilizaron instrumentos para su obtención y también es controlada por que se asignaron parámetros.

- b) Descripción detallada del uso de materiales, equipos, instrumentos, insumos, entre otros.

Para el desarrollo de este objetivo se dividió en las siguientes partes.

- Se recolectaron sedimentos de fondo de las lagos utilizando una draga Ekman y siguiendo el protocolo sugerido por la Autoridad Nacional del Agua del Perú (ANA, 2016); es decir, por transecto, considerando tres puntos de muestreo por transecto (punto medio del transecto y puntos a 250 m del borde de la lago).
- En cada punto se recolecto 500 g de sedimento de los primeros 5 cm de la superficie del fondo de los lagos, para el análisis físico. Las muestras para el análisis físico se conservaron en bolsas Ziploc y a temperatura ambiente, y posteriormente todas las muestras fueron transportadas a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno. En laboratorio se procedió a eliminar las impurezas orgánicas como raíces, ramas, etc. de forma manual, para después ser secadas en una estufa a 115°C durante 24 horas, hasta obtener peso constante. Por otra parte, se estableció el intervalo de la abertura de tamiz, uno de otro, en unidades de phi (ϕ) (Setiawan *et al.*, 2019), bajo la escala de grado Udden - Wentworth (Udden, 1914; Wentworth, 1922) usado comúnmente para diferenciar el tamaño de grano. Se procedió con el análisis de tamizado donde se dispuso de siete tamices (< 2 mm, 2-1 mm, 1-0.5 mm, 0.5-0.25 mm, 0.25-0.125 mm, 0.125-0.063 mm y cacerola y, por último se calculó el tamaño de grano medio (Mz), siguiendo lo establecido por Folk and Ward (1957). Por otra parte, la estimación del contenido de materia orgánica de las muestras se realizó aplicando el método de pérdida por ignición (LOI550) (Heiri *et*

al., 2001), es decir se secó 2 g de muestra a 105°C durante 12 h, para posteriormente someterlas a 550 °C en una muffle, durante 4 h (Santisteban *et al.*, 2004).

- Las mediciones de la profundidad de los lagos se realizaron con un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), sujetado de un bote, recorriendo en forma transversal y longitudinal (El-Amier *et al.*, 2017), en intervalos variables debido a la diferencia de extensión de los lagos y las condiciones climatológicas presentes en la zona (Muñoz *et al.*, 2020). Los datos fueron sometidos a un método de interpolación espacial como lo sugiere D. Li *et al.* (2021), siendo procesados utilizando ArcGIS V 10.8.1, bajo la licencia personal (1585448458). Este software puede importar puntos y triangular la superficie sin perder información de relevancia.
- Para estimar el rango de intensidad de erosión, se utilizó la revisión de la ecuación universal de pérdida de suelo por sus siglas RUSLE (Renard *et al.*, 1977), cuya función es estimar las pérdidas de suelo anuales. Haciendo uso de la siguiente ecuación (Eq. 1):

$$A = R \times k \times LS \times C \times P \quad (1)$$

Donde, A es el promedio espacio-temporal de la pérdida de suelo por área (ton ha-1 año-1); R es el factor de erosividad (MJ mm ha-1 h-1 año-1) de lluvia, para ello se utilizó la precipitación mensual obtenida de la interpolación peruana de las observaciones climatológicas e hidrológica en sus siglas PISCO (Aybar *et al.*, 2017); K es factor de erodabilidad (ton ha h ha-1 MJ-1 mm-1) del suelo, siendo la tasa de pérdida de suelo por unidad del índice de erosión para un suelo determinado, y para determinarlo se utilizó la información brindada por SoilGrids (SoilGrid, 2020); L es el factor de longitud de pendiente y S es el factor de la pendiente del área, los cuales fueron estimados haciendo uso de una imagen Alos Palsar 12.5 m (ASF, 2020); C es el factor de cobertura vegetal y P es el factor de prácticas de conservación o prácticas de apoyo de la pérdida de suelo, donde se consideró el valor de uno para determinar la erosión hídrica potencial, como lo propone (Renard *et al.*, 1977), para ello se utilizó el software ArcGis V 10.8.1, bajo la licencia personal (1585448458).

c) Aplicación de prueba estadística inferencial.

La estadística tiene un enfoque comparativo, es por ello se aplicó un análisis descriptivo determinando las diferencias de las propiedades entre lagunas, para ello se hizo uso del software R Studio.

3.5.2 Determinar las concentraciones y la calidad de los sedimentos con metales pesados en los lagos glaciales de los andes del Perú: Rinconada y Sibinacocha.

a) Descripción de variables analizadas en los objetivos específicos.

Los muestreos de sedimentos se realizaron dentro los meses diciembre del 2020 al febrero del 2021.

- Variable:

Concentración de metales pesados (VD): Esta variable es de tipo continua ya que se utilizaron instrumentos para su medición, es controlada ya que se asignó puntos de control para la investigación, la unidad de medida está en mg/kg.

Lagos glaciales (VI): Esta variable es discreta ya que no se utilizaron instrumentos para su obtención y también es controlada por que se asignaron parámetros.

b) Descripción detallada del uso de materiales, equipos, instrumentos, insumos, entre otros.

Para el desarrollo de este objetivo se dividió en las siguientes partes.

- En cada punto se recolecto 250 g de sedimento de los primeros 5 cm de la superficie del fondo de los lagos, para los análisis químicos. Las muestras para análisis se conservaron en bolsas Whirl-Pak, en oscuridad y a 4°C en un cooler hasta su arribo al laboratorio. Todas las muestras fueron transportadas a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, para luego ser conservadas a -80°C en ultra congeladores hasta su análisis.

- El análisis de metales pesados se realizó mediante espectrometría de emisión óptica de plasma acoplada inductivamente ICP-OES en un laboratorio certificado de la ciudad de Arequipa. La determinación del As, Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn se hizo por el método USEPA 7471B (METHOD 7471B, 2000), mientras que la determinación de Hg se realizó por el método USEPA 6010D (METHOD 6010D, 2018). Con el fin de determinar los metales pesados de origen litógeno, se utilizó el índice geoquímico de erosión Aluminio – Titanio (Al/Ti) establecido por Sahoo *et al.* (2015), considerando al Aluminio (Al) y al Titanio (Ti) como elementos litógenos, elementos que no son afectados por los procesos de diagénesis (Duzgoren-Aydin *et al.*, 2002). Por último, se evaluó las concentraciones obtenidas haciendo uso de la guía de calidad de sedimentos de Canadá (CCME, 1995).
- Para evaluar la calidad de los sedimentos con metales pesados se procedió a comparar las concentraciones de cada metal con la guía canadiense de calidad de sedimentos como lo sugiere Salas-Mercado *et al.* (2020), debido a que, el Perú no posee con una normativa de evaluación ambiental de sedimentos y se apoya con normas internacionales

c) Aplicación de prueba estadística inferencial.

La estadística tiene un enfoque comparativo por lo que se aplicó estadística descriptiva siguiendo la metodología establecida por Helsel (2005), el cual sugiere que si las concentraciones de los metales en estudio se encuentran por debajo del 50% de observaciones menores al límite de cuantificación (<LOQ) se debe considerar un método no paramétrico, siendo este el método de Kaplan-Meier, el cual incorpora la proporción de los datos <LOQ y se determina la mediana y los percentiles. Por otra parte, si ninguno de los resultados es <LOQ se procede a determinar normalmente los parámetros descriptivos.

Para la verificación de la normalidad de los datos de cada lago se aplicará la prueba de Shapiro-Wilk, siempre y cuando las concentraciones sean >LOQ (Helsel, 2005), para posteriormente aplicar un análisis de varianza (ANOVA),

con el fin de determinar las diferencias entre las concentraciones de metales pesados en los sedimentos de ambas lagunas.

3.5.3 Determinar la fuente de contaminación de los sedimentos con metales pesados en los lagos glaciales de los andes del Perú: Rinconada y Sibinacocha.

a) Descripción de variables analizadas en los objetivos específicos.

Los muestreos de sedimentos se realizaron dentro los meses diciembre del 2020 al febrero del 2021.

- Variable:

Concentración de metales (VD): esta variable es continua ya que se utilizó instrumentos de medición, no es controlada ya que se presenta naturalmente, tiene como unidad de medida el metro cuadrado (mg/kg).

Distribución espacial (VI): Esta variable no es de tipo continua ya que no se utilizó instrumentos para su medición, es controlada ya que se asignó una distancia temporal en grupos para la investigación, la unidad de medida es en metros (m).

b) Descripción detallada del uso de materiales, equipos, instrumentos, insumos, entre otros.

Para determinar la procedencia de los metales pesados y su distribución espacial se utilizó el método de interpolación Kriging Ordinario (Bhattacharjee *et al.*, 2019; Wu y Li, 2013), donde las concentraciones de los metales pesados se importaron con sus respectivas coordenadas, este y norte, en el software ArcGis V 10.8.1 bajo la licencia personal (1585448458). Posteriormente, se normalizaron los datos y se verificó las tendencias para obtener mejores resultados de interpolación (Bai *et al.*, 2011). Finalmente, se realizó la zonificación de las concentraciones mediante el método de búsqueda octante, el cual interpola los puntos de muestreo con los datos observados (Wang *et al.*, 2014).

c) Aplicación de prueba estadística inferencial.

Para validar estos resultados se procedió de la siguiente forma:

- Se verificó la normalidad de los datos de cada lago, aplicándose la prueba de Shapiro-Wilk, siempre y cuando las concentraciones sean $>LOQ$ (Helsel, 2005), para después estandarizar los datos con la escala Z con el fin de no perder datos y evitar el sesgo (Alonso *et al.*, 2020; Salas-Mercado *et al.*, 2022).
- Se determino las relaciones entre variables de ambos lagos aplicándose el índice de correlación de Kendall como lo sugiere (Helsel, 2005).
- Posteriormente se aplicó el análisis de componentes principales (PCA) con el fin de reducir el conjunto de variables, y encontrar nuevos factores que agrupen las variables antes reducidas e identificar la procedencia de las variables de estudio para cada lago, bajo el criterio que las variables que se agrupen en cada componente, provienen de una misma fuente (Li *et al.*, 2020). Previamente los datos se sometieron a la prueba de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y al test de esfericidad de Bartlett, para determinar la confiabilidad de aplicar el PCA (Varol and Şen, 2009). Todos los análisis estadísticos fueron realizados utilizando el software R (versión 4.0.2) (Team, 2020).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Propiedades y características de los lagos glaciales

4.1.1 Profundidad

Las mediciones de las profundidades permitieron representar el lecho del fondo de ambos lagos (Figura 2), donde se determinó las ubicaciones de las profundidades máximas. El lago Rinconada presenta una terraza con profundidades entre 6 m y 9 m, formando dos zonas de empozamiento (Figura 2a). La primera zona se ubica en la parte superior del lago, siendo esta zona la que recibe los afluentes que provienen de la actividad minera artesanal y esta poza podría estar conteniendo a gran parte de los sedimentos contaminados (Rodbell *et al.*, 2014b), mientras que, la segunda zona se encuentra ubicada en la parte inferior cercana al inicio del río Ramis, además que, es la zona más profunda con 30 m. Por otra parte, la profundidad máxima del lago Sibinacocha es de 85.5 m (Figura 2b), la cual se encuentra en la parte superior del lago cercano a la zona glaciaria. Este lago también se encuentra dividida por una terraza con rango de profundidades entre 8.5 m y 17 m, la cual forma el empozamiento de la parte superior e inferior, siendo esta última la zona cercana al RV y al represamiento hidroeléctrico. Según West and Plug (2008), los lagos Rinconada y Sibinacocha son considerados profundos, ya que, sus profundidades máximas son mayores a 13 m y al poseer mayor profundidad poseen mayor volumen de almacenamiento de agua dulce (Muñoz *et al.*, 2020), confirmando que los lagos glaciales son fuentes lenticas importantes (Bórquez *et al.*, 2006). Además, la batimetría de Sibinacocha concordaría con Li *et al.* (2021), el cual menciona que la ubicación de las zonas más profundas de los lagos

glaciales, son cercanas a los glaciares y que poseen pendientes muy pronunciadas. Esto último solo se cumpliría para Rinconada, lo que podría indicar que las profundidades de la parte superior del lago Rinconada está disminuyendo y siendo alterado por las actividades antropogénicas (Thakuri *et al.*, 2021).

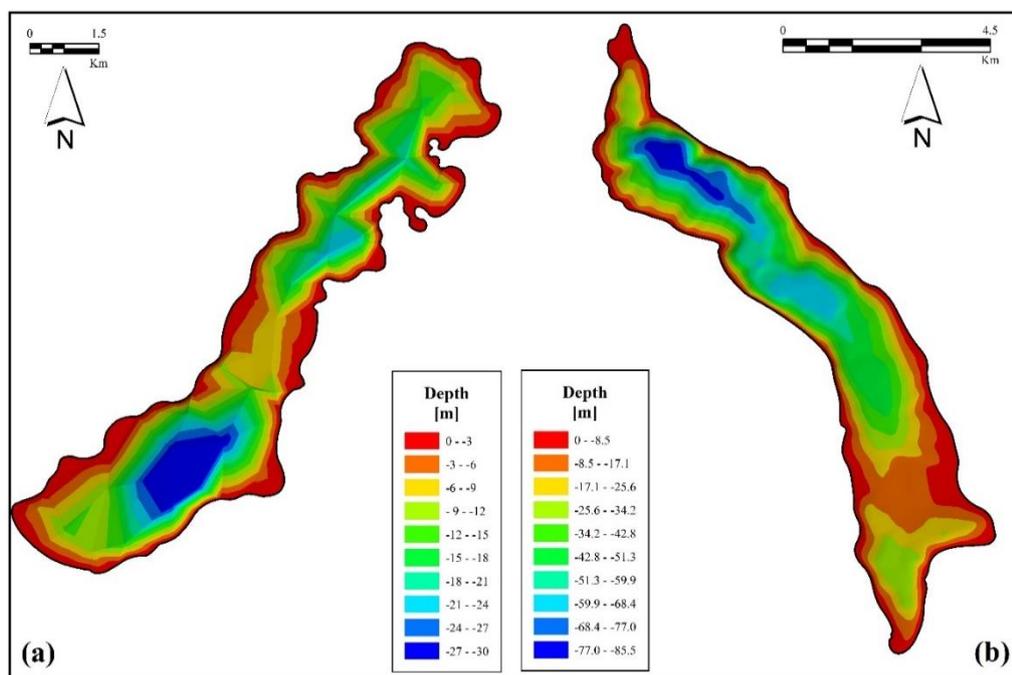


Figura 2. Mapa de profundidad de los lagos glaciales (a) Rinconada y (b) Sibinacocha.

4.1.2 Erosión

En la Figura 3 se muestra el rango de la intensidad de erosión de cada una de las microcuencas, las cuales contienen al lago Rinconada (Figura 3a) y al lago Sibinacocha (Figura 3b). Siendo la microcuenca del lago Rinconada, la que presenta mayor intensidad de erosión con $64000 \text{ Tn año}^{-1}$, del cual, el 58% proviene del rango de intensidad de erosión alto y esto podría deberse a las grandes pendientes que posee, lo que concordaría con Zeng *et al.* (2017), que menciona que las zonas con pendientes pronunciadas presentan mayor erosión, como también, una parte lo produce el cambio geomorfológico que ocasiona las actividades mineras (Guo and Shao, 2019), debido a la formación de desmontes abandonados al intemperie en zonas con pendiente, con el propósito de establecer plataformas artificiales y desarrollar sus actividades encima de ellas (Karbassi *et al.*, 2016). Mientras que el principal rango de erosión de la microcuenca del lago Sibinacocha es moderada, el cual contribuye con el 45% de la tasa de erosión de la microcuenca

que fue de aproximadamente 55000 Tn año⁻¹. Esto podría deberse a que no se realizan actividades humanas, siendo la única causa que los glaciares retrocedan y dejen áreas con pendientes elevadas, el cambio climático (Guo and Shao, 2019), Además, la microcuenca de Sibinacocha presenta mayor porcentaje de vegetación lo cual contribuiría a la baja tasa erosiva (Thomas *et al.*, 2018). Sin embargo, estos resultados revelarían que existe una contribución de metales pesados de forma natural a los lagos (Liu *et al.*, 2015) y convirtiéndose en una preocupación futura para las poblaciones de Sibinacocha, ya que, los científicos internacionales reconocen que la erosión hídrica en los suelos de la cordillera de los andes son un grave problema ambiental por las amplias gamas litológicas presentes (Correa *et al.*, 2016).

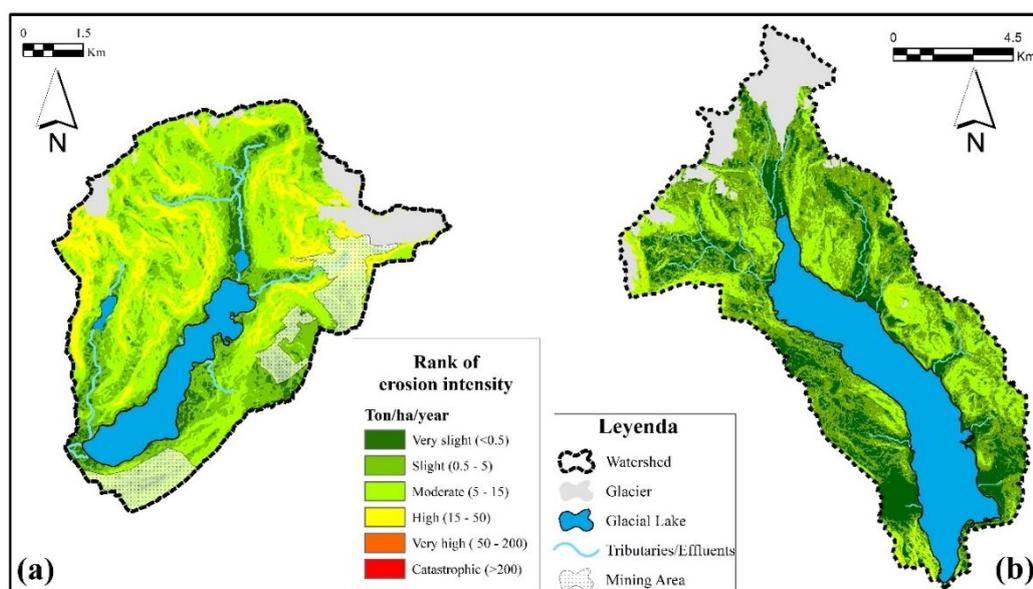


Figura 3. Mapa de erosión hídrica de la microcuenca de los lagos glaciales (a) Rinconada y (b) Sibinacocha.

Además, en la Tabla 1 se muestra la tasa de erosión de cada unidad litológica que compone las microcuencas de ambos lagos. El lago Rinconada presenta las mayores contribuciones de la litología de la zona por parte de la formación Sandía y formación Ananea. Mientras que, en el lago Sibinacocha, las mayores contribuciones son de los depósitos morrenicos, grupo Cabanillas y las rocas intrusivas.

Tabla 1

Tasa de erosión de las litologías contenidas en las microcuencas de los lagos glaciales.

	Minerales	Elementos	Lago	Tasa de erosión [Tn/año-1]
F. Sandia (Os-s)	Pirrotita (FeS), Pirita (FeS ₂), Arseno pirita (FeAsS)	Fe, As, Cu, Ni	Rinconada	3.07E+04
F. Ananea (SD-a)	Cobre gris (CuFe), Arseno pirita (FeAsS), Lutita	Cu, As, Fe, Cr, Hg	Rinconada Sibinacocha	2.45E+04 7.09 E+03
D. Morrenicos (Qpl-mo)	Proviene de la erosión de la formación litológica del área	Cr, As	Rinconada Sibinacocha	7.74E+03 2.06E+04
F. Arco Aja (NP-ar)	Esfalerita (ZnS), Galena (PbS), Calcopirita (CuFeS ₂)	Zn, Pb, Cu, Fe	Rinconada	1.06E+03
G. Cabanillas (D-ca)	Pirita (FeS ₂), Arseno pirita (FeAsS), Lutita Biotita	As, Fe, Hg, Co, Cu, K, Mn	Sibinacocha	1.32E+04
Intrusivo	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂ , Muscovita KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂ Lutita	K, Mg, Fe, Al, Si, Hg, Cu	Sibinacocha	1.09E+04
G. Mítu (PsT-mi)	Pirita (FeS ₂), Arseno pirita (FeAsS), Lutita	As, Fe, Hg, Co, Cu, K, Mn	Sibinacocha	1.87E+03
G. Copacabana (CsPi-tc)	Calcita (CaCO ₃), Dolomita (CaMg(CO ₃) ₂)	Ca, Mg	Sibinacocha	9.74E+02
F. Quenamari – M. Sapanuta (Nm-sa)	Feldespatos XAlSiO ₈ , Dolomita (CaMg(CO ₃) ₂)	Al, Si, Ca, Na, Ba	Sibinacocha	2.73E+02
G. Tarma, Copacabana (CP-ta,co)	Calcita (CaCO ₃), Dolomita (CaMg(CO ₃) ₂), Feldespatos XAlSiO ₈	Ca, Mg, Al, Si, Ca, Na, Ba	Sibinacocha	5.10E+01

Fuente: Información basada en (GRP, 2015; INGEMMET, 1980; MINAM, 2018; Mulholland et al., 2012; Quispe-Zuniga et al., 2019); F.: Formación; G.: Grupos; D.: Depósitos.

4.1.3 Distribución del tamaño de grano y materia orgánica

La distribución del tamaño medio de grano (Mz), la composición del tamaño de grano y la materia orgánica se muestran en la Figura 4. Donde los valores de Mz en las zonas de empozamiento del lago Rinconada se encontraban en el rango de 2.6φ (Arenas finas) y 3.6φ (Limo – Arcillas). Mientras que los valores de LOI₅₅₀ estuvieron en el rango de 2.5% y 38%, registrando los menores valores en la cercanía de las actividades mineras y los mayores valores a las zonas sin actividad (Figura 4a). Por otra parte, en el lago Sibinacocha no se logró recolectar en todos

los puntos de muestreo, debido a la abundante presencia de algas. Sin embargo, la información de un lago en una región como la cordillera Vilcanota, es útil (Figura 4b). Los valores de Mz del lago Sibinacocha, se encontraban influenciados por las zonas de empozamiento y por los afluentes de procedencia glaciar, encontrándose entre 1.7ϕ (Arenas Finas) y 2.8ϕ (Arenas muy finas). No obstante, en la zona más profunda y en la cercanía a la represa hidroeléctrica sus valores de Mz fueron mayores se encontraban entre 3.2ϕ y 3.5ϕ (Limo – Arcilla). Además, los valores de LOI_{550} estuvieron en el rango de 5 – 37%. Los valores más bajos se encontraron en las zonas con influencia glaciar, mientras que los más altos se presentaron en las zonas menos profundas y/o con presencia de algas. Estos resultados demuestran la diferencia de aportes sedimentarios entre los lagos, ya que el lago Sibinacocha, presenta sus fracción de grano más gruesa en comparación de Rinconada y esto podría deberse a la liberación de los sedimentos atrapados en los glaciares (Wallis, 2016), por causa de la desglaciación, como también del socavamiento de las morrenas (Correa *et al.*, 2016). Mientras la presencia de las fracciones más finas en Rinconada, puede deberse a las operaciones mineras, debido al desarrollo de los procesos metalúrgicos, ya que, utilizan diferentes equipos como chancadoras, molinos, quimbaletes, trapiches para reducir el tamaño de la roca y recuperar el material aurífero (Loza y Ccancapa, 2019), que posteriormente son dejados en relaveras y/o en desmontes inapropiados aledaños a los afluentes del lago Rinconada (Goyzueta y Trigos, 2009).

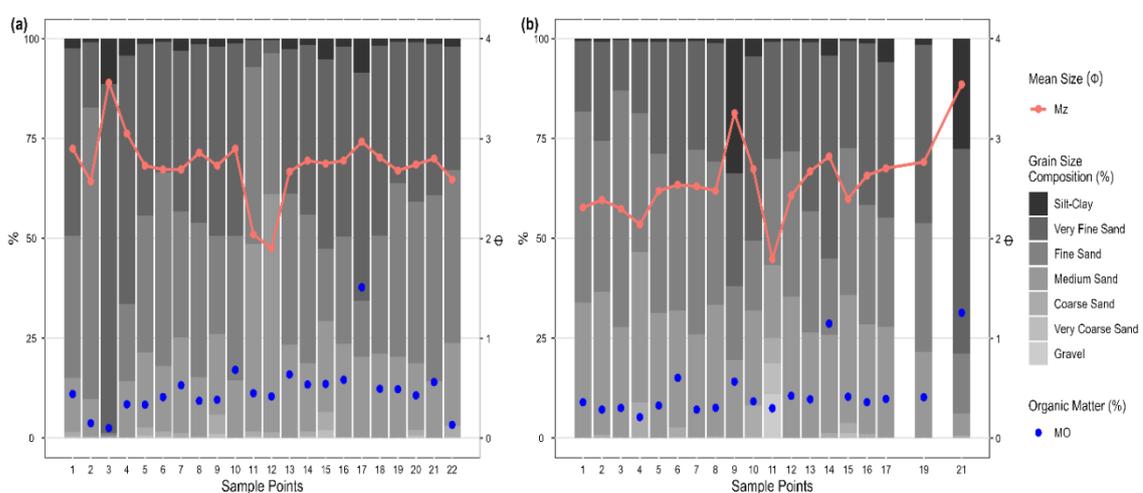


Figura 4. Distribución de la composición del tamaño de grano, el tamaño de grano medio y materia orgánica de los sedimentos de los lagos glaciales (a) Rinconada y (b) Sibinacocha.

4.2 Concentración y calidad de sedimentos con metales pesados

Las concentraciones de los metales pesados en sedimentos de ambos lagos se observan en la Figura 5. Todas las concentraciones de los elementos tóxicos presentes en los sedimentos del lago Rinconada son >LOQ, por lo que se determinó los estadísticos descriptivos de forma tradicional (Helsel, 2005), y la tendencia de las concentraciones promedio para esta fuente, en orden descendente, es de As> Zn> Ni> Co> Cu> Pb> Ba> Cr> Hg. Siendo, el As, Hg y Zn, los metales que superan el nivel PEL y, el Cu y Pb, superan el nivel ISQG de la guía de calidad de sedimentos de Canadá, lo cual concuerda con Brousett-Minaya *et al.* (2021), quien menciona que Rinconada supera la normativa canadiense y está provocando problemas en el ámbito ambiental y la salud pública, principalmente por el As y Hg.

Mientras que, el 26% de las concentraciones de los metales pesados presentes en los sedimentos del lago Sibinacocha se encontraban <LOQ, por lo que se determinó las estadísticas descriptivas por el método no paramétrico de Kaplan-Meier, y las tendencias promedio de estos metales en Sibinacocha en orden descendente es de: Ba> Zn> Cu> As> Ni> Pb> Cr> Co> Hg, estas concentraciones en comparación con los resultados de Fuentes-Gandara *et al.* (2021), quien evaluó las concentraciones de metales pesados en sedimentos en una laguna dentro de un área protegida y sin desarrollo antropogénico, Sibinacocha posee valores normales a excepción, del As y Ba, los cuales podría sugerir que proviene de los suelos expuestos, al retroceder el glaciar, liberando Arsénico debido a la presencia de Arsenopirita en la geología de la zona (Iturrizaga, 2018; Tumialan, 2003).

Así como también las concentraciones del Ba, provendrían de las partículas de la combustión incompleta del carbón (Ccanccapa-Cartagena *et al.*, 2021; Herndon y Whiteside, 2021), las cuales se alojan en la superficie del glaciar reduciendo el nivel de reflectancia y produciendo el derretimiento del glaciar (Vuille *et al.*, 2008), disolviéndose en el agua del deshielo y aumentando las concentraciones del Ba. Este lago excede el nivel ISQG de la normativa internacional con el As y el Cu, lo que podría generar preocupación para las poblaciones beneficiadas. Por otra parte, la relación entre las concentraciones promedio de cada metal pesado en este estudio, del lago Rinconada y Sibinacocha, es de: As (29 veces); Co (5); Cr (1.1); Cu (1.9); Hg (116); Ni (4.9); Pb (2); Zn (7.4). Sin embargo, las concentraciones promedio del Ba presentes en el lago Sibinacocha exceden 7 veces a las de Rinconada.

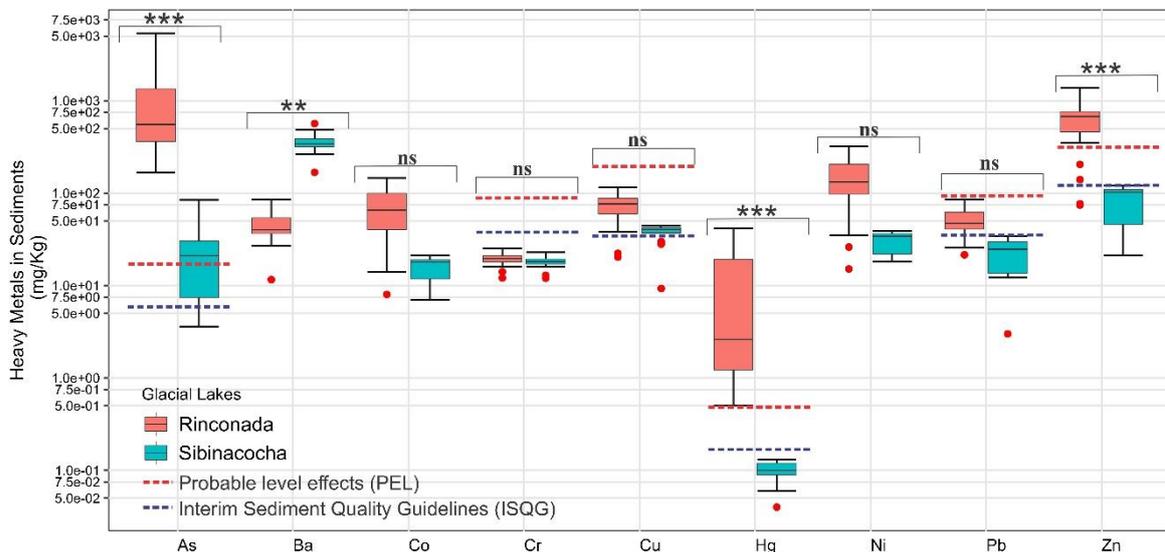


Figura 5. Estadísticos descriptivos de las concentraciones de los metales pesados en sedimentos de los lagos glaciales Rinconada y Sibinacocha.

Además, se realizó un análisis de varianza mediante la prueba de kruskal-Wallis debido a que las concentraciones de los metales no eran normales (p valor $< 2.2E-16$) y homogéneos (p valor $< 1.97E-18$). Este análisis se utilizó con el fin de determinar las diferencias de los lagos respecto a las concentraciones de los metales en sedimentos de este estudio, los cuales se muestran en la Tabla 2 y en la Figura 5. Donde se observa que el lago Sibinacocha tiene diferencias significativas con el lago Rinconada en relación a los metales As (p valor < 0.01), Ba (p valor < 0.01), Hg (p valor < 0.01) y Zn (p valor < 0.05), Mientras que los demás elementos no presentan diferencias.

Tabla 2

Diferencias de los elementos con relación a los lagos glaciales.

Elemento	Lago 1	Lago 2	df	Estadística	p valor	Significancia
As	Rinconada	Sibinacocha	351	10.6768	3.13E-23	***
Ba	Rinconada	Sibinacocha	351	-3.1309	1.89E-03	**
Co	Rinconada	Sibinacocha	351	0.5833	5.60E-01	ns
Cr	Rinconada	Sibinacocha	351	0.014	9.88E-01	ns
Cu	Rinconada	Sibinacocha	351	0.359	7.20E-01	ns
Hg	Rinconada	Sibinacocha	351	5.1451	3.08E-11	***
Ni	Rinconada	Sibinacocha	351	1.1987	2.31E-01	ns
Pb	Rinconada	Sibinacocha	351	0.2782	7.81E-01	ns
Zn	Rinconada	Sibinacocha	351	5.4437	9.82E-08	***

En la Tabla 3 se muestran las concentraciones de los metales pesados de este estudio, comparados con los hallazgos en otras investigaciones realizadas en zonas con influencia minera y natural en el mundo.

Tabla 3

Comparación de las concentraciones promedio de los metales pesados de este estudio y otras investigaciones.

Lagos	As	Ba	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Referencias
Tai	14.2	---	---	59.0	28.4	0.1	31.2	25.8	94.3	(Chen <i>et al.</i> , 2019)
Badovci	24.2	144	13	276	61.2	---	305	167	122	(Malsiu <i>et al.</i> , 2020)
Stor-Strömsjön	64	1210	---	228	12	---	23	23	123	(Rydberg <i>et al.</i> , 2012)
Edku	---	---	28.6	109.2	56.8	---	56.8	---	770	(El-Said <i>et al.</i> , 2014)
Mallorquin	---	---	---	---	30.4	0.16	---	1.55	65.5	(Fuentes-Gandara <i>et al.</i> , 2021)
Rinconada	1091.2	46.2	73.7	19.2	72.8	11.6	149.8	49.3	626.0	Este estudio
Sibinacocha	30.9	357.9	15.8	17.8	37.1	0.1	30.6	22.7	83.7	Este estudio

4.3 Identificación de fuentes de contaminación de los sedimentos con metales pesados

4.3.1 Modelo geoestadístico de metales pesados en sedimentos

En la Figura 6 se muestra la distribución espacial del As, Cu, Hg, Pb, Zn de los sedimentos del lago Rinconada. Donde se observa que las mayores concentraciones del As, Hg y Pb se ubican en la parte superior del lago, este resultado revelaría que existe una gran acumulación de los metales proveniente de la minería en comparación con la parte inferior. Mientras que, las mayores concentraciones del Cu y Zn se distribuyen en la parte central del lago, esto se debería a las pendientes pronunciadas que encausan al lago (Vilca *et al.*, 2021), confirmando que la contribución de estos metales es de procedencia natural por la erosión de la litología presente en la zona (GRP, 2015).

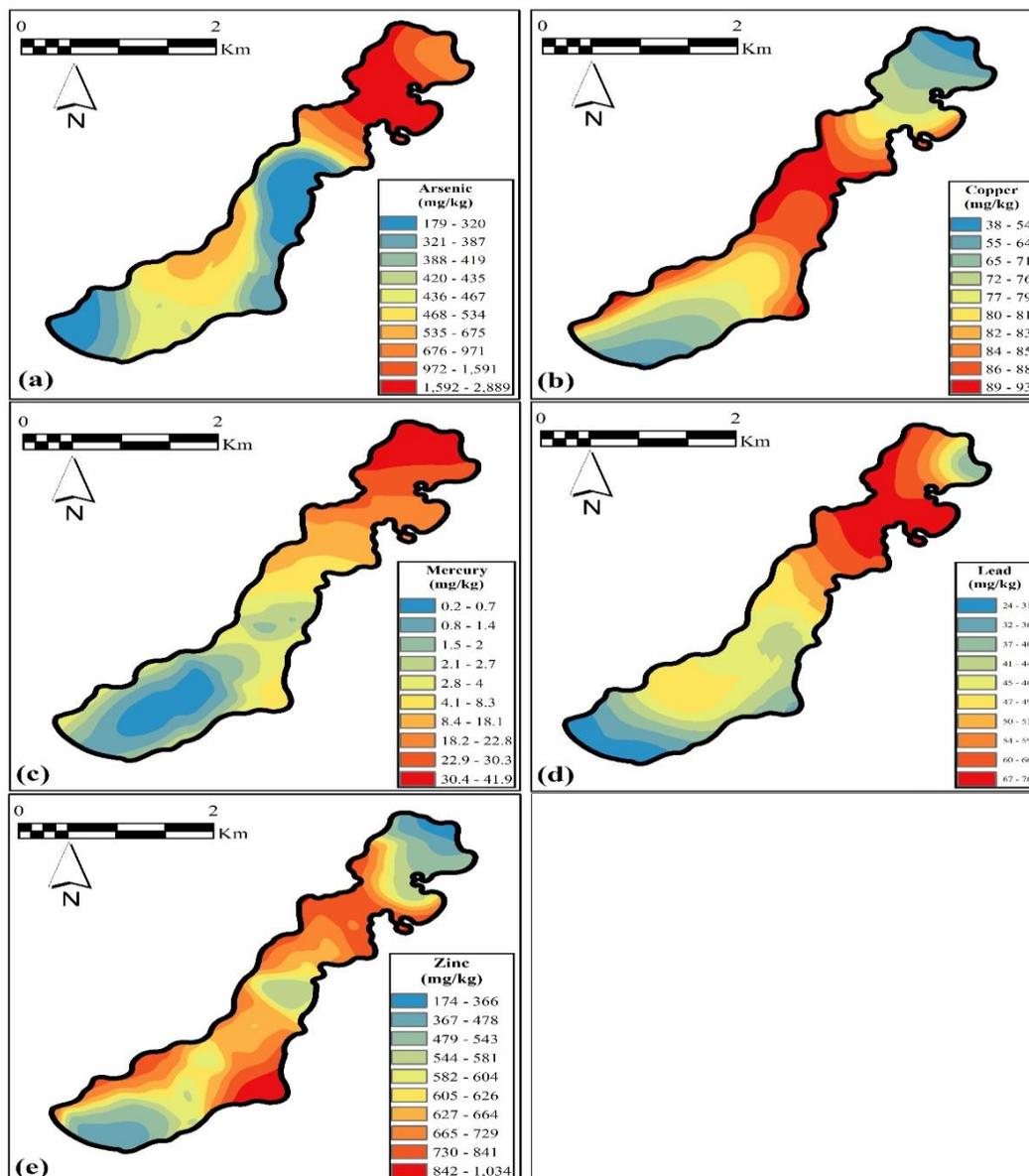


Figura 6. Distribución espacial del As (a), Cu (b), Hg (c), Pb (d) y Zn (e) de los sedimentos superficiales del lago Rinconada.

En la Figura 7 se muestra la distribución espacial del As, Cu, Hg, Pb y Zn de los sedimentos del lago Sibinacocha. Donde se observa que las mayores concentraciones del As, Cu, Pb y Zn se ubican en la parte central del lago, este resultado revelaría que existe una gran acumulación de los metales proveniente de la erosión en comparación con la parte superior e inferior. Mientras que, las mayores concentraciones de Hg se distribuyen en la parte inferior del lago, lo que podría deberse a la presencia de la biomasa de las algas, ya que son el principal medio por donde se introduce el mercurio a la cadena trófica (Beldowska *et al.*, 2015).

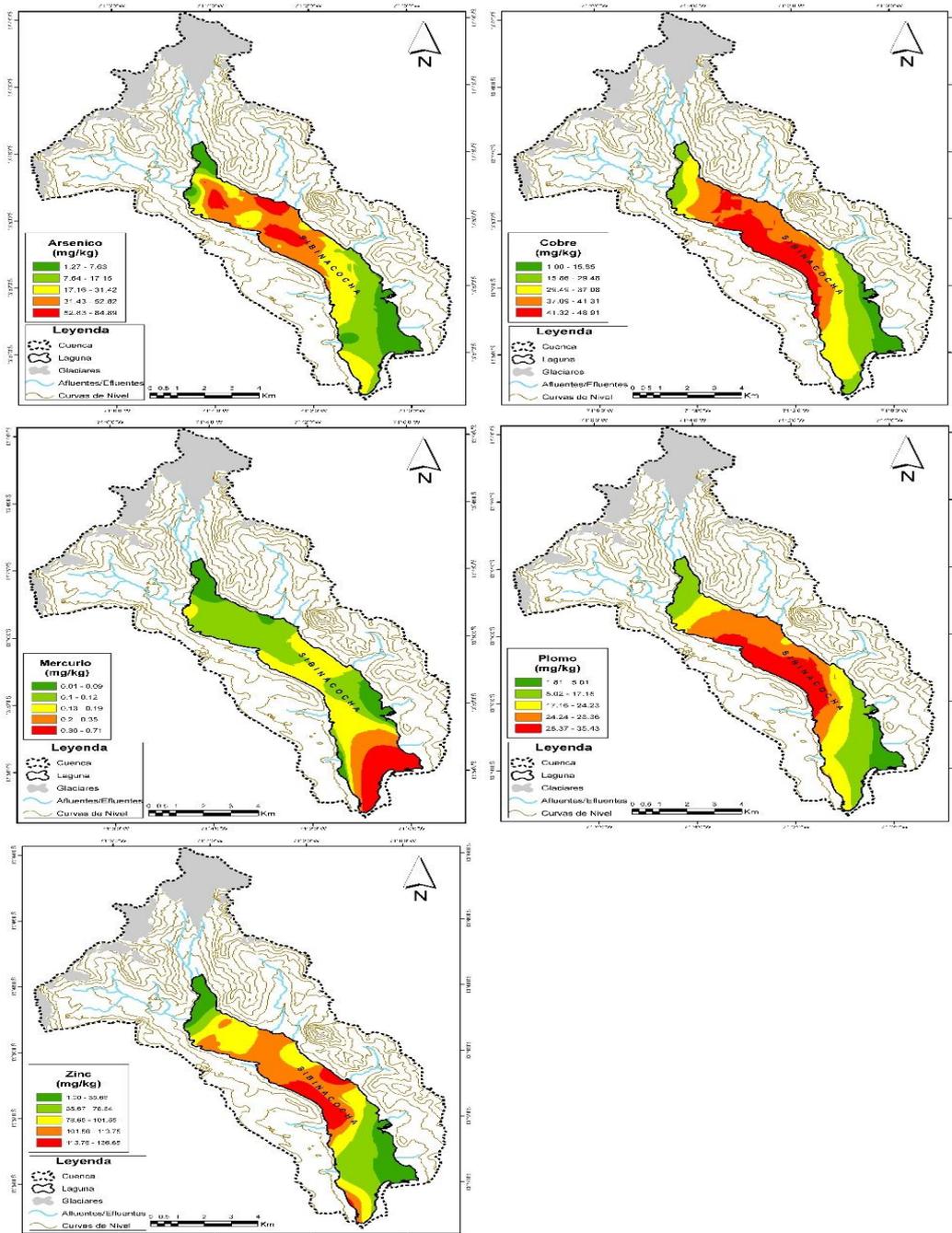


Figura 7. Distribución espacial del As (a), Cu (b), Hg (c), Pb (d) y Zn (e) de los sedimentos superficiales del lago Sibinacocha.

4.3.2 Métodos multivariados

El análisis de correlación de Kendall entre las variables físicas y químicas revelaron que existe una fuerte asociación entre el Mz y las arenas muy finas ($r=0.70 - 0.77$, p -valor < 0.01) para ambos lagos. Además, las fuertes asociaciones entre los metales pesados para el lago Rinconada con un nivel de significancia a 1% son: Co con Ni ($r=0.84$); Cu con Zn ($r=0.67$). Así mismo, las asociaciones de los metales presentes

en Sibinacocha son: Cu con Ni, Pb, Zn y el índice geoquímico de erosión (Al/Ti) ($r= 0.67-0.77$); Ni con Pb ($r=0.70$); Pb con Zn ($r=0.74$); Zn con Al/Ti ($r=0.68$).

Por otra parte, en la Tabla 4 se muestran los resultados de las pruebas de confianza para la aplicación del análisis de componentes principales (PCA), de los datos en cada lago fueron: Rinconada (KMO=0.57; Bartlett's el p -valor<0.001) y Sibinacocha (KMO=0.75; Bartlett's el p -valor<0.001), indicando que es aceptable la aplicación del PCA para ambos lagos.

Tabla. 4

Pruebas de confianza para ambos lagos glaciales.

Factor de adecuación Kaiser – Meyer- Olkin									
Lago Rinconada									
MSA=									0.57
MSA para cada variable=									
As	Ba	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Al/Ti
0.24	0.65	0.60	0.63	0.62	0.48	0.70	0.47	0.72	0.50
Test Bartlett=					p-valor <2.2e-16				
Lago Sibinacocha									
MSA=									0.75
MSA para cada variable=									
As	Ba	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Al/Ti
0.65	0.50	0.84	0.67	0.81	0.70	0.91	0.68	0.74	0.89
Test Bartlett=					p-valor <2.2e-16				

En la Tabla 5 se muestra la varianza explicada para ambos lagos, donde el ACP del lago Rinconada, para 10 variables formaron dos componentes principales, los que explicaron el 72.84% de la varianza total. El primer componente (PC1) con mayor varianza, explico 48.91% y presento cargas positivas altas (>0.7), en Ba, Co, Cr, Cu, Ni y Al/Ti. El PC2 explico 23.94% de la varianza total, teniendo cargas altas y positivas (>0.7), en los metales como el As, Hg y Pb. Mientras que, el ACP del lago Sibinacocha formo dos componentes principales, que explico el 83.78% de la varianza total. El PC1 de Sibinacocha explico el 69.80% con cargas positivas (>0.7), en Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn y Al/Ti; Además de cargas moderadas (>0.5), en el As y Ba. El PC2 de Sibinacocha explico el 13.98% de la varianza total, con cargas positivas y moderadas (>0.5) en Ba y Cr.

Tabla 5

Varianza explicada del ACP para ambos lagos glaciales.

Componentes	Lago Rinconada		Lago Sibinacocha	
	% de Varianza	% de Varianza acumulada	% de Varianza	% de Varianza acumulada
PC1	48.91	48.91	69.81	69.81
PC2	23.94	72.84	13.98	83.78
PC3	11.63	84.47	7.39	91.17
PC4	8.54	93.01	4.75	95.92
PC5	3.21	96.22	1.90	97.82
PC6	1.76	97.97	0.99	98.81
PC7	1.06	99.03	0.61	99.41
PC8	0.46	99.49	0.35	99.76
PC9	0.37	99.86	0.15	99.92
PC10	0.14	100.00	0.08	100.00

Tabla 6

Cargas por elemento para cada PC.

Componentes Variables	Lago Rinconada		Lago Sibinacocha	
	PC1	PC2	PC1	PC2
As	0.09	0.8	0.57	0.36
Ba	0.68	-0.38	0.62	0.65
Co	0.92	-0.13	0.97	0.01
Cr	0.69	0.41	0.73	0.61
Cu	0.80	0.12	0.9	0.14
Hg	-0.30	0.78	0.7	-0.41
Ni	0.89	-0.13	0.96	-0.15
Pb	0.50	0.79	0.91	-0.24
Zn	0.81	0.18	0.9	-0.37
Al/Ti	0.79	-0.31	0.92	-0.21

Entonces los principales metales provenientes del cinturón metalogenético XIX son Zn y Cu (Acosta *et al.*, 2009) y estaría confirmado por el grado de asociación antes mencionado para ambos lagos, lo que indicaría que los elementos asociados a ellos provendrían de la litología de la zona y la roca madre (Santos-Francés *et al.*, 2017) y complementaria al índice de erosión determinado. Por ello, intuimos que el aumento de la concentración de los metales podría provenir de las condiciones erosivas de la cuenca, sugiriendo que las variables que componen al PC1 de ambas lagunas son de origen litogénico. Mientras que, el PC2 presenta agrupaciones diferidas en los lagos, ya que, Rinconada presenta una fuerte carga en los metales

As, Hg y Pb sugiriendo que estos elementos provienen del desarrollo de la minería artesanal subterránea, debido a que el mineral predominante es la arseno piritita (Acosta y Rodríguez, 2011) y al formar desmontes con rocas extraídas del interior de las bocaminas, produciéndose un drenaje ácido de roca liberando principalmente As. Mientras que, el Hg se produce por el uso de este metal en el proceso metalúrgico de amalgamación (Gammons *et al.*, 2006) y estaría siendo inadecuadamente manejado y llegaría al lago Rinconada. Por último el Pb, quien podría sugerir que existe una contribución de aguas residuales domésticas (Ponce, 2018) y presencia de minerales como la galena (GRP, 2015). Las variables del PC2 de la laguna Sibinacocha son el Ba y Cr, y podría deberse a la contribución de material suspendido proveniente de la desglaciación (Fernández *et al.*, 2013), producto de la dilución de las partículas de carbono quienes generan elementos como el Ba, Cr, Al y Sr (Ccanccapa-Cartagena *et al.*, 2021; Herndon y Whiteside, 2021; Kutuzov *et al.*, 2021), indicando que estas variables para ambas lagunas, por su propias características de la zona, provienen de fuentes antropogénicas tal como se puede observar en la Figura 8.

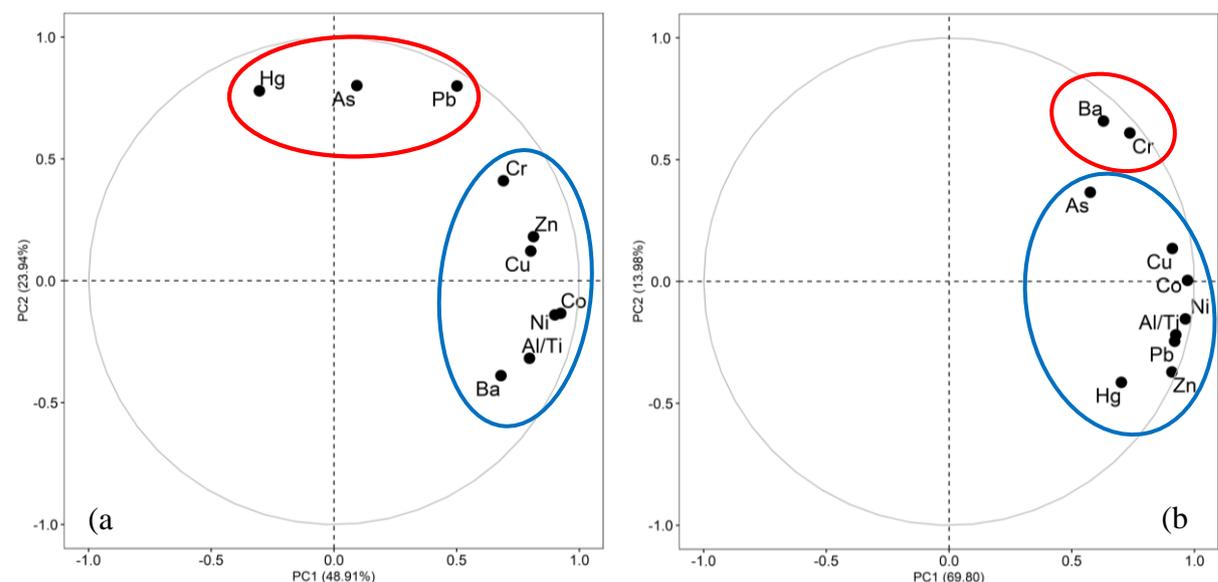


Figura 8. Plano de correlaciones con las cargas de dos componentes principales de los metales pesados y el índice de erosión de los lagos glaciales (a) Rinconada y (b) Sibinacocha.

CONCLUSIONES

En este estudio se logró evaluar los sedimentos contaminados de dos importantes lagos glaciales del Perú.

- De la determinación de las propiedades y características se evidenció que el lago Rinconada está recibiendo grandes aportes sedimentarios de forma natural por el cambio climático, y así como también de los residuos industriales (botaderos y relaveras) de la actividad minera subterránea las que están provocando la disminución de las profundidades y alteraciones granulométricas del sedimento, lo que provocaría en un periodo de tiempo la extinción del mismo. Mientras que la laguna Sibinacocha por su topografía recibe moderado aporte sedimentario de forma natural sin embargo el cambio climático provocaría una disminución de la calidad del agua de esta fuente.
- Los valores de los metales pesados encontrados en los sedimentos de ambos lagos revelan que existe una contaminación natural por parte del As y Cu, lo que indicaría que son los metales predominantes en los andes del sur peruano. Sin embargo, las actividades industriales como la minería aumentarían potencialmente las concentraciones de estos y otros metales, lo que significaría que si se desarrollan actividades extractivas cerca de una cabecera de cuenca la calidad del agua y sedimentos disminuiría drásticamente por lo que, se requiere de atención política y social.
- Mediante el modelo geo estadístico se predijo y se identificó las fuentes y zonas de acumulación de metales pesados en sedimentos potencialmente tóxicos confirmando que la minería subterránea es la que genera mayor riesgo ambiental en las fuentes hídricas cercanas a ellas, y así como también, la mala combustión de los hidrocarburos de las actividades humanas alejadas o cercanas a la zona glaciar, pueden provocar una aceleración de la masa glaciar aumentando las concentraciones de metales pesados derivados de los nuevos suelos.



RECOMENDACIONES

Finalmente, considerando que en el Perú no cuenta con estándares de calidad ambiental que permitan la evaluación de concentraciones de elementos químicos en sedimentos, el estudio se constituye en un referente necesario como línea base para el monitoreo y evaluación de los impactos antropogénicos en comparación de los naturales en la calidad del sedimentos y agua por la presencia de elementos potencialmente tóxicos en las cabeceras de cuenca.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, J., Rivera, R., Valencia, M., Chirif, H., Huanacuni, D., Rodriguez, I., Villarreal, E., Paico, D., y Santisteban, A. (2009). *Memoria mapa metalogenético del Perú. INGEMMET*. <https://docplayer.es/47269331-Memoria-mapa-metalogenetico-del-peru-2009.html>
- Ahmadee, M., Nasab, S. B., Naseri, A. A., y Kardani, A. (2016). Assessment of heavy metals in Zohreh River, Iran [Evaluación de metales pesados en el río Zohreh, Iran]. *Soil and Environment*, 35(2), 161–170.
- Alonso, D. L., Pérez, R., Okio, C. K. Y. A., y Castillo, E. (2020). Assessment of mining activity on arsenic contamination in surface water and sediments in southwestern area of Santurbán paramo, Colombia [Evaluación de la actividad minera sobre la contaminación por arsénico en aguas superficiales y sedimentos en la zona suroeste del páramo de Santurbán, Colombia]. *Journal of Environmental Management*, 264(December), 2-10. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110478>
- American Society for Testing and Materials. (2002). Standard practice for dry preparation of soil Samples for particle-size analysis and determination of soil constants (Vol. 85, Issue 10).
- Aquafondo. (s.f.). Las cuencas de Lurín, Rímac y Chillón, fuentes de agua para Lima y Callao. *Aquafondo*. <https://aquafondo.org.pe/>
- Arroyo, J., Schulz, N., y Gurmendi, P. (2012). Impactos de las actividades antrópicas en el nevado Huaytapallana. *Apunte Ciencias Sociales*, 02(01), 3–14. <https://doi.org/10.18259/acs.2012002>
- Arslan, H. (2012). Spatial and temporal mapping of groundwater salinity using ordinary kriging and indicator kriging: The case of Bafra Plain, Turkey [Cartografía espacial y temporal de la salinidad de las aguas subterráneas mediante el kriging ordinario y el kriging indicador: el caso de la llanura de Bafra, Turquía]. *Agricultural Water Management*, 113, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.06.015>
- Alaska Satellite Facility (ASF), (2020). Alos Palsar.

<https://search.asf.alaska.edu/#/?dataset=ALOS>

Autoridad Nacional Del Agua (ANA). (2014). *Inventario nacional de glaciares y lagunas: Lagunas*. Ministerio de Agricultura y Riego. (p. 21).
<https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/199/ANA0000015.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Autoridad Nacional Del Agua (ANA). (2011). *Impactos del Cambio Climático y procesos geodinámicos en glaciares tropicales*. Ministerio de Agricultura y Riego. (p. 56).
http://www.uss.edu.pe/uss/descargas/1006/radar/CC_y_Glaciares_Ing._Nelson_Santillan_ANA_PERU.pdf

Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2015). *Informe técnico N° 21-2015-ANA-DGCRH-GOCRH*. Ministerio de Agricultura y Riego.
<http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/2673>

Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2016). *Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales*. Ministerio de Agricultura y Riego. (p. 92).
https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/protocolo_nacional_para_el_monitoreo_de_la_calidad_de_los_recursos_hidricos_superficiales.pdf

Ayala, L. (2020, 15 de agosto). Clasificación de depósitos sedimentarios. Explorock.
<https://www.explorock.com/clasificacion-de-los-depositos-sedimentarios/>

Aybar Camacho, C., Lavado Casimiro, W., Huerta Julca, A., Fernández Palomino, C., Vega Jacome, F., Sabino Rojas, E., y Felipe-Obando, O. G. (2017). *Uso del producto grillado PISCO de precipitaciones en estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico*. Senamhi.
<https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/260>

Bai, J., Cui, B., Chen, B., Zhang, K., Deng, W., Gao, H., y Xiao, R. (2011). Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from a typical plateau lake wetland, China [Distribución espacial y evaluación del riesgo ecológico de metales pesados en sedimentos superficiales de un humedal típico de lago de meseta, China]. *Ecological Modelling*, 222(2), 301–306.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.12.002>

- Basile, P. A. (2018). *Transporte de Sedimentos y Morfodinámica de ríos Aluviales*. Editora UNR.
- Beldowska, M., Jedruch, A., Slupkowska, J., Saniewska, D., y Saniewski, M. (2015). Macrophyta as a vector of contemporary and historical mercury from the marine environment to the trophic web [Macrophyta como vector de mercurio contemporáneo e histórico del medio marino a la red trófica]. *Environ Sci Pollut Res*, 22(5228–5240), 13. <https://doi.org/DOI 10.1007/s11356-014-4003-4>
- Bhattacharjee, S., Ghosh, S. K., y Chen, J. (2019). *Semantic Kriging for Spatio-temporal Prediction*. Springer. <https://doi.org/doi.org/10.1007/978-981-13-8664-0>
- Blanca, C. (2012). Geomorphology and natural hazards of the selected glacial valleys, cordillera blanca, Perú [Geomorfología y peligros naturales de los valles glaciares seleccionados, cordillera blanca, Perú]. *AUC Geographica*, 2, 25–31.
- Bórquez, R., Larraín, S., Polanco, R., y Urquidi, J. C. (2006). *Glaciares Chilenos Reservas Estratégicas de Agua Dulce para la sociedad, los ecosistemas y la economía*. Ediciones LOM.
- Boufekane, A., y Saighi, O. (2019). Assessing groundwater quality for irrigation using geostatistical method – Case of wadi Nil Plain (North-East Algeria) [Evaluación de la calidad de las aguas subterráneas para el riego utilizando el método geoestadístico – Caso de la llanura de wadi Nil (noreste de Argelia)]. *Groundwater for Sustainable Development*, 8(March), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.11.003>
- Brito Vallina, M. L., Alemán Romero, I., Fraga Guerra, E., Para García, J. L., y Arias de Tapia, R. I. (2011). Papel de la modelación matemática en la formación de los ingenieros. *Ingeniería e Investigación*, 14(51), 129–139.
- Britto, B. (2017). Actualización de las Ecorregiones Terrestres de Perú propuestas en el Libro Rojo de Plantas Endémicas del Perú. *Gayana. Botánica*, 74(1), 15-29. <https://doi.org/10.4067/s0717-66432017005000318>
- Brousett-Minaya, M. A., Rondan-Sanabria, G. G., Chirinos-Marroquín, M., y Biamont-Rojas, I. (2021). Impacto de la Minería en Aguas Superficiales de la Región Puno – Perú. *Fides Et Ratio* 21, 187–207.

- Brunskill, G. J., y Schindler, D. W. (1971). Geography and Bathymetry of Selected Lake Basins, Experimental Lakes Area, Northwestern Ontario [Geografía y batimetría de cuencas lacustres seleccionadas, área de lagos experimentales, noroeste de Ontario]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 28(2), 139–155. <https://doi.org/10.1139/f71-028>
- Buxton, S., Garman, E., Heim, K. E., Lyons-Darden, T., Schlekot, C. E., Taylor, M. D., y Oller, A. R. (2019). Concise Review of Nickel Human Health Toxicology and Ecotoxicology [Revisión concisa de la toxicología y ecotoxicología de la salud humana del níquel]. *Inorganics*, 7(7), 89. <https://doi.org/10.3390/inorganics7070089>
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (1998). *Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*. pp. 4.
- Carrión, C. S., José, J., Negron, Z., Ancoco, J. P., Mendoza, J., Cabrera, M. J. I., y Liceras, A. N. (2017). Glacial retreat, satellite Landsat images , glacier surface, Multi-temporary analysis, temperature, Normalized Snow Difference Index [Retocesos glacial, imágenes satelitales Landsat, superficie glaciaria, análisis multitemporáneo, temperatura, Índice de diferencia de nieve normalizada]. *JSDEWES*, 10(1), 1080380. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d8.0380>
- Casal, J., y Mateu, E. (2003). Tipos de muestreo. *Revista Epidemiologica Medica*, 1(3–7), 7.
- Ccancapa-Cartagena, A., Paredes, B., Vera, C., Chavez-Gonzales, F. D., Olson, E. J., Welp, L. R., Zyaykina, N. N., Filley, T. R., Warsinger, D. M., y Jafvert, C. T. (2021). Occurrence and probabilistic health risk assessment (PRA) of dissolved metals in surface water sources in Southern Peru [Ocurrencia y evaluación probabilística de riesgos para la salud (PRA) de metales disueltos en fuentes de agua superficial en el sur del Perú]. *Environmental Advances*, 5(September), 100102. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100102>
- Chand, V., y Prasad, S. (2013). ICP-OES assessment of heavy metal contamination in tropical marine sediments: A comparative study of two digestion techniques [Evaluación ICP-OES de la contaminación por metales pesados en sedimentos marinos tropicales: un estudio comparativo de dos técnicas de digestión].

Microchemical Journal, 111, 53–61.
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2012.11.007>

- Chen, R., Chen, H., Song, L., Yao, Z., Meng, F., y Teng, Y. (2019). Characterization and source apportionment of heavy metals in the sediments of Lake Tai (China) and its surrounding soils [Caracterización y prorrateo de fuentes de metales pesados en los sedimentos del lago Tai (China) y sus suelos circundantes]. *Science of the Total Environment*, 694, 133819. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133819>
- Congreso General de la Republica del Perú (CGRP). (2011). Problemática de contaminación de la Cuenca del Río Ramís. *Congreso General de la Republica del Perú*. <https://www4.congreso.gob.pe/congresista/2006/msucari/gestiones/rio-ramis.htm>
- Correa, S. W., Mello, C. R., Chou, S. C., Curi, N., y Norton, L. D. (2016). Soil erosion risk associated with climate change at Mantaro River basin, Peruvian Andes [Riesgo de erosión del suelo asociado con el cambio climático en la cuenca del río Mantaro, Andes peruanos]. *Catena*, 147, 110–124. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.003>
- Dabrio, C. J., Santisteban, J. I., Mediavilla, R., Lo, E., Castan, S., Zapata, M. B. R., y Jose, M. (2004). Loss on ignition: a qualitative or quantitative method for organic matter and carbonate mineral content in sediments? [Pérdida por ignición: ¿un método cualitativo o cuantitativo para la materia orgánica y el contenido mineral de carbonato en sedimentos?]. *Journal of Paleolimnology*, 32, 287–299.
- Defensoría del Pueblo. (2013). Supervisión a la implementación de los Decretos Legislativos promulgados al amparo de la Ley N° 29815.
- Del Rio-Salas, R., Ayala-Ramírez, Y., Loredó-Portales, R., Romero, F., Molina-Freaner, F., Minjarez-Osorio, C., Pi-Puig, T., Ochoa-Landín, L., y Moreno-Rodríguez, V. (2019). Mineralogy and Geochemistry of Rural Road Dust and Nearby Mine Tailings: A Case of Ignored Pollution Hazard from an Abandoned Mining Site in Semi-arid Zone [Mineralogía y geoquímica del polvo de caminos rurales y relaves mineros cercanos: un caso de peligro de contaminación ignorado de un sitio minero abandonado en una zona semiárida]. *Natural Resources Research*, 28(4), 1485–1503. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09472-x>

- Di Maggio, J., Estrada, V., y Diaz, M. S. (2015). Water Resources Management with Dynamic Optimization Strategies and Integrated Models of Lakes and Artificial Wetlands [Gestión de Recursos Hídricos con Estrategias dinámicas de optimización y modelos integrados de lagos y humedales artificiales]. *Computer Aided Chemical Engineering* 37(June). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63576-1.50118-7>
- Dirección General de Salud (DIGESA), (2010). Informe N° 3070-2010/DEPA-APHL/DIGESA. [http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/rios/2010/RIO RAMIS SEGUNDO MONITOREO MAYO 2010.pdf](http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/rios/2010/RIO_RAMIS_SEGUNDO_MONITOREO_MAYO_2010.pdf)
- Drenkhan, F., Huggel, C., Guardamino, L., y Haeberli, W. (2019). Managing risks and future options from new lakes in the deglaciating Andes of Peru: The example of the Vilcanota-Urubamba basin [Gestión de riesgos y opciones futuras de nuevos lagos en los Andes desglaciados de Perú: El ejemplo de la cuenca Vilcanota-Urubamba]. *Science of the Total Environment*, 665, 465–483. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.070>
- Duzgoren-Aydin, N. S., Aydin, A., y Malpas, J. (2002). Re-assessment of chemical weathering indices: Case study on pyroclastic rocks of Hong Kong [Reevaluación de los índices de meteorización química: estudio de caso sobre rocas piroclásticas de Hong Kong]. *Engineering Geology*, 63(1–2), 99–119. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00073-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00073-4)
- Eddy, A. M., Mark, B. G., Baraër, M., Mckenzie, J., Fernández, A., Welch, S., y Fortner, S. (2017). Exploring Patterns and Controls on the Hydrochemistry of Proglacial Streams in the Upper Santa River, Peru [Explorando Patrones y Controles sobre la Hidroquímica de arroyos proglaciales en el Alto Río Santa, Perú]. *Revista Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 3, 41–57.
- Egiebor, N. O., y Oni, B. (2009). Acid rock drainage formation and treatment: a review. *Technology* [Formación y tratamiento de drenaje ácido de rocas: una revisión. Tecnología], 17, 743–753. <https://doi.org/10.1002/apj>
- Ehrbar, D., Schmocker, L., Vetsch, D. F., y Boes, R. M. (2018). Hydropower potential in the periglacial environment of Switzerland under climate change [Potencial hidroeléctrico en el entorno periglacial de Suiza bajo el cambio climático].

Sustainability (Switzerland), 10(8), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su10082794>

- El-Amier, Y. A., Elnaggar, A. A., y El-Alfy, M. A. (2017). Evaluation and mapping spatial distribution of bottom sediment heavy metal contamination in Burullus Lake, Egypt [Evaluación y mapeo de la distribución espacial de la contaminación por metales pesados de sedimentos del fondo en el lago Burullus, Egipto]. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(1), 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.ejbas.2016.09.005>
- El-Said, G. F., Draz, S. E. O., El-Sadaawy, M. M., y Moneer, A. A. (2014). Sedimentology, geochemistry, pollution status and ecological risk assessment of some heavy metals in surficial sediments of an Egyptian lagoon connecting to the Mediterranean Sea [Sedimentología, geoquímica, estado de contaminación y evaluación del riesgo ecológico de algunos metales pesados en sedimentos superficiales de una laguna egipcia que conecta con el mar Mediterráneo]. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 49(9), 1029–1044. <https://doi.org/10.1080/10934529.2014.894853>
- El Peruano (2019). Decreto Supremo que establece el Área de Conservación Regional Ausangate. <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/decreto-legislativo-que-aprueba-el-codigo-de-responsabilidad-decreto-legislativo-n-1348-1471548-8/>
- Estándares de Calidad Ambiental para Suelo (ECA), El Peruano (2017). http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/12/DS_011-2017-MINAM.pdf
- Etikan, I. (2017). Sampling and Sampling Methods [Muestreo y métodos de muestreo]. *Biometrics y Biostatistics International Journal*, 5(6), 215–217. <https://doi.org/10.15406/bbij.2017.05.00149>
- Evangelou, E., Tsadilas, C., Tziouvalekas, M., y Nikoli, T. (2019). Municipal Sewage Sludge application on cotton cultivations. Effect on yields soil chemical properties and heavy metal concentrations [Aplicación de lodos de depuradora municipal en cultivos de algodón. Efecto sobre los rendimientos de las propiedades químicas del suelo y las concentraciones de metales pesados]. *Global NEST: The*

International Journal, 21(4), 466–470. <https://doi.org/10.30955/gnj.002665>

- Ezemonye, L. I., Adebayo, P. O., Enuneku, A. A., Tongo, I., y Ogbomida, E. (2019). Potential health risk consequences of heavy metal concentrations in surface water, shrimp (*Macrobrachium macrobrachion*) and fish (*Brycinus longipinnis*) from Benin River, Nigeria [Consecuencias potenciales de riesgo para la salud de las concentraciones de metales pesados en aguas superficiales, camarones (*Macrobrachium macrobrachion*) y peces (*Brycinus longipinnis*) del río Benin, Nigeria]. *Toxicology Reports*, 6(January), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2018.11.010>
- FAO. (2015). Contaminación Provocada por los Sedimentos. *Water collaborating centre*. <http://www.fao.org/3/w2598s/w2598s04.htm>
- Fernández, M., Björck, S., Wohlfarth, B., Maidana, N. I., Unkel, I., y Van der Putten, N. (2013). Diatom assemblage changes in lacustrine sediments from Isla de los Estados, southernmost South America, in response to shifts in the southwesterly wind belt during the last deglaciation [Cambios en el ensamblaje de diatomeas en sedimentos lacustres de la Isla de los Estados, el más meridional de América del Sur, en respuesta a los cambios en el cinturón de viento del suroeste durante la última deglaciación]. *Journal of Paleolimnology*, 50(4), 433–446. <https://doi.org/10.1007/s10933-013-9736-4>
- Flores Ponce, G. L. (2018). Evaluación físico - química de metales tóxicos en el río grande, Ananea - Crucero Puno. *Revista de Investigaciones*, 7(2), 548–561. <https://doi.org/10.26788/riepg.2018.2.79>
- Folk, R. L., y Ward, W. C. (1957). Brazos river: a study in the significance of grain size parameters[Río Brazos: un estudio sobre la importancia de los parámetros de tamaño de grano]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27(1), 24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Fu, C., Wang, P., Zhao, L., y Wang, X. (2020). A distance correlation-based Kriging modeling method for high-dimensional problems [Un método de modelado de Kriging basado en correlación de distancia para problemas de alta dimensión]. *Knowledge-Based Systems*, 206, 106356.

<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.106356>

- Fuentes-Gandara, F., Pinedo-Hernández, J., Gutiérrez, E., Marrugo-Negrete, J., y Díez, S. (2021). Heavy metal pollution and toxicity assessment in Mallorquin swamp: A natural protected heritage in the Caribbean Sea, Colombia [Evaluación de la contaminación y toxicidad por metales pesados en el pantano mallorquín: un patrimonio natural protegido en el Mar Caribe, Colombia]. *Marine Pollution Bulletin*, 167(March). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112271>
- Gammons, C. H., Slotton, D. G., Gerbrandt, B., Weight, W., Young, C. A., McNearny, R. L., Cámac, E., Calderón, R., y Tapia, H. (2006). Mercury concentrations of fish, river water, and sediment in the Río Ramis-Lake Titicaca watershed, Peru [Concentraciones de mercurio de peces, agua de río y sedimentos en la cuenca del Río Ramis-Lago Titicaca, Perú]. *Science of The Total Environment*, 368(2–3), 637–648. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2005.09.076>
- Gaur, V. K., Gupta, S. K., Pandey, S. D., Gopal, K., y Misra, V. (2005). Distribution of heavy metals in sediment and water of river Gomti [distribución de metales pesados en sedimentos y aguas del río Gomti]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 102(1–3), 419–433. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-6395-6>
- Genthe, B., Kapwata, T., Le Roux, W., Chamier, J., y Wright, C. Y. (2018). The reach of human health risks associated with metals/metalloids in water and vegetables along a contaminated river catchment: South Africa and Mozambique [El alcance de los riesgos para la salud humana asociados con los metales/metaloides en el agua y las hortalizas a lo largo de una cuenca fluvial contaminada: Sudáfrica y Mozambique]. *Chemosphere*, 199, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.160>
- Giraldo-Malca, U. F. (2017). *Minería informal en la cuenca alta del Ramis : impactos en el paisaje y evolución del conflicto socio ambiental* [Tesis de maestría, Pontificia universidad católica del Perú]. <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/9613>
- Gobierno Regional de Puno (GRP). (2015). Informe final del área de geología región Puno. <http://siar.minam.gob.pe/puno/documentos/informe-final-area-geologia-region-puno>

- González-Dávila, R. P., Ventura-Houle, R., De-la-Garza-Requena, F. R., y Heyer-Rodríguez, L. (2019). Caracterización fisicoquímica del agua de la laguna La Vega Escondida, Tampico, Tamaulipas-México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 10(1), 01–29. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-01-01>
- Goyzueta, G., y Trigos, C. (2009). Riesgos de la salud pública en el centro poblado minero artesanal la rinconada (5200 msnm) en Puno, Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica.*, 26(1), 41–44. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttextpid=S1726-46342009000100008&lng=es&tying=es
- Grande, J. A., Loayza-Muro, R., Alonso-Chaves, F. M., Fortes, J. C., Willems, B., Sarmiento, A. M., Santisteban, M., Dávila, J. M., de la Torre, M. L., Durães, N., Diaz-Curiel, J., y Luís, A. T. (2019). The Negro River (Ancash-Peru): A unique case of water pollution, three environmental scenarios and an unresolved issue [El río Negro (Ancash-Perú): Un caso único de contaminación del agua, tres escenarios ambientales y un tema sin resolver]. *Science of the Total Environment*, 648, 398–407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.068>
- Guo, X., y Shao, Q. (2019). Spatial pattern of soil erosion drivers and the contribution rate of human activities on the Loess Plateau from 2000 to 2015: A boundary line from Northeast to Southwest [Patrón espacial de los impulsores de la erosión del suelo y la tasa de contribución de las actividades humanas en la meseta de Loess de 2000 a 2015: una línea fronteriza del noreste al suroeste]. *Remote Sensing*, 11(2429), 1-20. <https://doi.org/10.3390/rs11202429>
- Habte, G., Hwang, I. M., Kim, J. S., Hong, J. H., Hong, Y. S., Choi, J. Y., Nho, E. Y., Jamila, N., Khan, N., y Kim, K. S. (2016). Elemental profiling and geographical differentiation of Ethiopian coffee samples through inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy (ICP-OES), ICP-mass spectrometry (ICP-MS) and direct mercury analyzer (DMA) [Perfilado elemental y diferenciación geográfica de muestras de café etíopes a través de espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplada inductivamente (ICP-OES), espectrometría de masas ICP (ICP-MS) y analizador directo de mercurio (DMA)]. *Food Chemistry*, 212, 512–520. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.178>

- Heiri, O., Lotter, A. F., y Lemcke, G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results [Pérdida por ignición como método para estimar el contenido orgánico y de carbonato en sedimentos: reproducibilidad y comparabilidad de los resultados]. *Journal of Paleolimnology*, 25(1–4), 101–110. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90140-E](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90140-E)
- Helsel, D. R. (2005). *Statistics for Censored Environmental Data Using Minitab and R*. (2a. ed.), Computing summary statistics and totals (pp. 81-118). Wiley
- Herndon, J. M., y Whiteside, M. (2021). Intentional Destruction of Life on Earth [Destrucción intencional de la vida en la Tierra]. *Advances in Social Sciences Research Journal*, 8(7), 295–309. <https://doi.org/10.14738/assrj.87.10597>
- Hong, Y. S., Choi, J. Y., Nho, E. Y., Hwang, I. M., Khan, N., Jamila, N., y Kim, K. S. (2019). Determination of macro, micro and trace elements in citrus fruits by inductively coupled plasma–optical emission spectrometry (ICP-OES), ICP–mass spectrometry and direct mercury analyzer [Determinación de macro, micro y oligoelementos en cítricos mediante espectrometría de emisión óptica de plasma acoplada inductivamente (ICP-OES), espectrometría de masas ICP y analizador directo de mercurio]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(4), 1870–1879. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9382>
- Huggel, C., Cochachin, A., Drenkhan, F., Fluixá-sanmartín, J., Frey, H., Hernández, J. G., Jurt, C., Muñoz, R., y Price, K. (2020). El lago glaciar 513 (Perú). Lecciones para el desarrollo de un servicio de alerta temprana. *Boletín de La OMM*, 69(1), 45–52.
- Instituto Geofísico del Perú (IGP), (2005). Diagnóstico de la Cuenca del Mantaro bajo la visión del cambio climático: Volumen II. *Repositorio institucional - IGP: Vol. II*. <http://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/715>
- Instituto Geologico, Metalurgico (INGEMMET), (1980). Informe Tecnico “Proyecto Oro”.
- Instituto Geologico, Metalurgico (INGEMMET), (2009). *Inventario y situación legal de las operaciones y concesiones mineras ubicadas en la cuenca del río suches (Perú)*

- *Bolivia*. INGEMMET.
<https://www.ingemmet.gob.pe/documents/73138/177527/Asistencia+técnica+a+la+minería+de+pequeña+escala/fb786ea6-b8e2-484e-aeb2-cb0f28c05864>
- Iturrizaga, L. (2018). Glacial landform assemblages and pedestal moraines in the Cordillera Blanca (Perú) [Conjuntos de accidentes geográficos glaciares y morrenas de pedestal en la Cordillera Blanca (Perú)]. *Geomorphology*, 318, 283–302. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.06.012>
- J. Acosta, I. Rodrigues, A. F. (2011). Memoria sobre la geología económica de la región puno. *Dirección De Recursos Minerales Y Energéticos Programa De Metalogenia Proyecto Ge 33*.
https://www.ingemmet.gob.pe/documents/73138/468768/2011_GE33_Memoria_Geologia_Economica_Cusco.pdf/d22a2f42-0b5b-42e5-8fe5-9fb6e737d8f2
- Ji, Z., Zhang, H., Zhang, Y., Chen, T., Long, Z., Li, M., y Pei, Y. (2019). Distribution, ecological risk and source identification of heavy metals in sediments from the Baiyangdian Lake, Northern China [Distribución, riesgo ecológico e identificación de fuentes de metales pesados en sedimentos del lago Baiyangdian, norte de China]. *Chemosphere*, 237, 124425. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124425>
- Johnston, K., Hoef, J. M. Ver, Krivoruchko, K., y Lucas, N. (2001). *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. (p 306). ESRI
- Journel, A. G., y Huijbregts, C. J. (1978). Mining Geo-statistics. In *London: Academic*. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/5214736>
- Karandish, F., y Shahnazari, A. (2014). Appraisal of the geostatistical methods to estimate Mazandaran coastal ground water quality [Evaluación de los métodos geoestadísticos para estimar la calidad de las aguas subterráneas costeras de Mazandaran]. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 12(1), 129–146.
- Karbassi, S., Nasrabadi, T., y Shahriari, T. (2016). Metallic pollution of soil in the vicinity of National Iranian Lead and Zinc (NILZ) Company [Contaminación metálica del suelo en las cercanías de la Compañía Nacional Iraní de Plomo y Zinc (NILZ)]. *Environmental Earth Sciences*, 75(22). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6244->

- Kishurim, Tecnice, Tecnimat, Griduc, Gidsaw, y Cognitek. (2013). El modelamiento matemático en la formación del ingeniero (L. F. Maldonado Granados (ed.); 1st ed.). Ediciones Fundación Universidad Granados.
- Konhauser, K. O., Powell, M. A., Fyfe, W. S., Longstaffe, F. J., y Tripathy, S. (1997). Trace element geochemistry of river sediment, Orissa State, India [Geoquímica de oligoelementos de sedimentos fluviales, estado de Orissa, India]. *Journal of Hydrology*, 193(1–4), 258–269. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03146-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03146-0)
- Kostka, A., y Leśniak, A. (2020). Spatial and geochemical aspects of heavy metal distribution in lacustrine sediments, using the example of Lake Wigry (Poland) [Spatial and geochemical aspects of heavy metal distribution in lacustrine sediments, using the example of Lake Wigry (Poland)]. *Chemosphere*, 240, 1 - 12. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124879>
- Kronenberg, M., Schauwecker, S., Huggel, C., Salzmann, N., Drenkhan, F., Frey, H., Giraáldez, C., Gurgiser, W., Kaser, G., Juen, I., Suarez, W., Hernández, J. G., Sanmartín, J. F., Ayros, E., Perry, B., y Rohrer, M. (2016). The Projected Precipitation Reduction over the Central Andes may Severely Affect Peruvian Glaciers and Hydropower Production [La reducción proyectada de las precipitaciones sobre los Andes Centrales puede afectar gravemente a los glaciares peruanos y a la producción hidroeléctrica]. *Energy Procedia*, 97, 270–277. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.072>
- Kutuzov, S., Shahgedanova, M., Krupskaya, V., y Goryachkin, S. (2021). Optical, geochemical and mineralogical characteristics of light- absorbing impurities deposited on djankuat glacier in the caucasus mountains [Características ópticas, geoquímicas y mineralógicas de las impurezas que absorben la luz depositadas en el glaciar djankuat en las montañas del Cáucaso]. *Water*, 13(21), 1-14. <https://doi.org/10.3390/w13212993>
- Lagos, G., y Peters, D. (2010). El sector minero en sudamérica. http://www.plataformademocratica.org/Archivos/El_sector_minero_en_Sudamerica.pdf

- Le Thi, H. A., Le Minh, H., Pham Dinh, T., y Thanh Nguyen, N. (2019). Advances in Intelligent Systems and Computing 358 Advanced Computational Methods for Knowledge Engineering.
- Li, D., Shanguan, D., Wang, X., Ding, Y., Su, P., Liu, R., y Wang, M. (2021). Expansion and hazard risk assessment of glacial lake Jialong Co in the central Himalayas by using an unmanned surface vessel and remote sensing [Expansión y evaluación del riesgo de peligro del lago glaciar Jialong Co en el Himalaya central mediante el uso de un buque de superficie no tripulado y teledetección]. *Science of the Total Environment*, 784, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147249>
- Li, H., Yang, Z., Dai, M., Diao, X., Dai, S., Fang, T., y Dong, X. (2020). Input of Cd from agriculture phosphate fertilizer application in China during 2006–2016 [Aporte de Cd de la aplicación de fertilizantes de fosfato agrícola en China durante 2006-2016]. *Science of the Total Environment*, 698, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134149>
- Li, M., Zhang, Q., Sun, X., Karki, K., Zeng, C., Pandey, A., Rawat, B., y Zhang, F. (2020). Heavy metals in surface sediments in the trans-Himalayan Koshi River catchment: Distribution, source identification and pollution assessment [Metales pesados en sedimentos superficiales en la cuenca trans-himalaya del río Koshi: distribución, identificación de fuentes y evaluación de la contaminación]. *Chemosphere*, 244, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125410>
- Liang, B., Han, G., Zeng, J., Qu, R., Liu, M., y Liu, J. (2020). Spatial variation and source of dissolved heavy metals in the Lancangjiang river, Southwest China [variación espacial y fuente de metales pesados disueltos en el río Lancangjiang, suroeste de China]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 1-15 . <https://doi.org/10.3390/ijerph17030732>
- Liu, X., Qi, S., Huang, Y., Chen, Y., y Du, P. (2015). Predictive modeling in sediment transportation across multiple spatial scales in the Jialing River Basin of China [Modelado predictivo en el transporte de sedimentos a través de múltiples escalas espaciales en la cuenca del río Jialing de China]. *International Journal of Sediment Research*, 30(3), 250–255. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.03.013>
- López-Moreno, J. I., Valero-Garcés, B., Mark, B., Condom, T., Revuelto, J., Azorín-Molina,

- C., Bazo, J., Frugone, M., Vicente-Serrano, S. M., y Alejo-Cochachin, J. (2017). Hydrological and depositional processes associated with recent glacier recession in Yanamarey catchment, Cordillera Blanca (Peru) [Procesos hidrológicos y deposicionales asociados a la reciente recesión glaciaria en la cuenca de Yanamarey, Cordillera Blanca (Perú)]. *Science of the Total Environment*, 579, 272–282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.107>
- Loza Del Carpio, A. L., y Ccancapa Salcedo, Y. (2019). Mercurio en un arroyo altoandino con alto impacto por minería aurífera artesanal (la rinconada, puno, Perú). *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 36(1), 33–44. <https://doi.org/10.20937/RICA.2020.36.53317>
- Luo, W., Zhang, G., Chen, W., y Xu, F. (2020). Response of glacial lakes to glacier and climate changes in the western Nyainqentanglha range [Respuesta de los lagos glaciares a los cambios glaciares y climáticos en la cordillera occidental de Nyainqentanglha]. *Science of the Total Environment*, 735, 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139607>
- Maanan, M., Zourarah, B., Carruesco, C., Aajjane, A., y Naud, J. (2004). The distribution of heavy metals in the Sidi Moussa lagoon sediments (Atlantic Moroccan Coast) [La distribución de metales pesados en los sedimentos de la laguna de Sidi Moussa (costa atlántica marroquí)]. *Journal of African Earth Sciences*, 39(3–5), 473–483. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2004.07.017>
- MacDonald, D. D., y Ingersoll, C. G. (2002). A Guidance Manual to Support the Assessment of Contaminated Sediments in Freshwater Ecosystems. *Environmental Protection Agency (EPA)*, 1, 126. <http://www.cerc.usgs.gov/pubs/sedtox/VolumeI.pdf>
- Malsiu, A., Shehu, I., Stafilov, T., y Faiku, F. (2020). Assessment of Heavy Metal Concentrations with Fractionation Method in Sediments and Waters of the Badovci Lake (Kosovo) [Evaluación de las concentraciones de metales pesados con método de fraccionamiento en sedimentos y aguas del lago Badovci (Kosovo)]. *Journal of Environmental and Public Health*, 2020, 1 - 14. <https://doi.org/10.1155/2020/3098594>
- Marín Luque, J. A. (2011). Aproximación paleolimnológica II: ‘Loss on ignition’ en el sedimento del Lago de Sanabria: *Vol. España* (p. 22).

- Mark, B. G., French, A., Baraer, M., Carey, M., Bury, J., Young, K. R., Polk, M. H., Wigmore, O., Lagos, P., Crumley, R., McKenzie, J. M., y Lautz, L. (2017). Glacier loss and hydro-social risks in the Peruvian Andes [Pérdida de glaciares y riesgos hidrosociales en los Andes peruanos]. *Global and Planetary Change*, 159(October), 61–76. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.10.003>
- Mark, B. G., McKenzie, J. M., y Gómez, J. (2005). Hydrochemical evaluation of changing glacier meltwater contribution to stream discharge: Callejon de Huaylas, Peru [Hydrochemical evaluation of changing glacier meltwater contribution to stream discharge: Callejon de Huaylas, Peru]. *Hydrological Sciences Journal*, 50(6), 975-987. <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.975>
- Meza-Duman, R., Hermoza-Gutierrez, M., Maldonado, I., y Salas-Mercado, D. (2022). Percepción Social de la Calidad del Agua y la Expansión Territorial de la Minería en Ollachea, Puno, Perú. *Comuni@cción*, 13, 16–28. <https://doi.org/10.33595/2226-1478.13.1.580>
- Mid-American Regional Council(MARC). (2017, 2 de agosto). *Que es la contaminacion por sedimentos*, MID-America regional council. <https://www.marc.org/environment/water>
- Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), (2016, 18 de marzo). *Politica Nacional Agraria*. MIDIS. <https://www.midagri.gob.pe/portal/noticias-antteriores/notas-2016/15062-se-aprueba-la-politica-nacional-agraria>
- Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), (2015, 15 de junio). *Clasificación de climas*. MIDIS <https://www.minagri.gob.pe/portal/datero/53-sector-agrario/el-clima/367-clasificacion-de-climas>
- Ministerio de Energía y Minas (MINEM), (2001). Atlas de Minería y Energía en el Perú. *MINEM*. p1
- Ministerio del Ambiente (MINAM), (2019). Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú - Memoria Descriptiva. Ministerio Del Ambiente, 1–119. <https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-nacional-ecosistemas-peru>
- Ministerio del Ambiente (MINAM), (2018). Investigación para elaboración del mapa de peligros, reducción del riesgo y la adaptación al cambio climático en ambientes de

subcuencas glaciares del Perú. In *Ministerio Del Ambiente del Perú*.

- Mohammed, H., Sadeek, S., Mahmoud, A. R., y Zaky, D. (2016). Comparison of AAS, EDXRF, ICP-MS and INAA performance for determination of selected heavy metals in HFO ashes [Comparación del rendimiento de AAS, EDXRF, ICP-MS e INAA para la determinación de metales pesados seleccionados en cenizas de HFO]. *Microchemical Journal*, 128, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2016.04.002>
- Moreno-Brush, M., Rydberg, J., Gamboa, N., Storch, I., y Biester, H. (2016). Is mercury from small-scale gold mining prevalent in the southeastern Peruvian Amazon? [¿Prevalece el mercurio de la minería de oro a pequeña escala en el sureste de la Amazonía peruana?]. *Environmental Pollution*, 218, 150–159. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.038>
- Mulholland, D. S., Boaventura, G. R., y Araújo, D. F. (2012). Geological and anthropogenic influences on sediment metal composition in the upper Paracatu River Basin, Brazil [Influencias geológicas y antropogénicas en la composición de metales sedimentarios en la cuenca alta del río Paracatu, Brasil]. *Environmental Earth Sciences*, 67(5), 1307–1317. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1574-6>
- Muñoz, R., Huggel, C., Frey, H., Cochachin, A., y Haerberli, W. (2020). Glacial lake depth and volume estimation based on a large bathymetric dataset from the Cordillera Blanca, Peru [Estimación de la profundidad y el volumen del lago glacial basado en un gran conjunto de datos batimétricos de la Cordillera Blanca, Perú]. In *Earth Surface Processes and Landforms*. 45(7), 1-49. <https://doi.org/10.1002/esp.4826>
- Nordstrom, D. K. (2009). Acid rock drainage and climate change [Drenaje ácido de rocas y cambio climático]. *Journal of Geochemical Exploration*, 100(2–3), 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2008.08.002>
- Organizacion Mundial de la Salud (OMS). (2006). *Preocupaciones en materia de salud y medio ambiente asociadas con los metales pesados: ¿Necesidad de una accion mundial ulterior?*, MINSAs https://www.who.int/ifcs/documents/forums/forum5/abstract_sp.pdf
- Paramo, J., Espinosa, L., Posada, B., Núñez, S., y Benavides, S. (2012). Distribución espacial de sedimentos en la región norte del caribe Colombiano. *Boletin de Investigaciones*

Marinas y Costeras, 41(1), 9–28.

- Paul, D. (2017). Research on heavy metal pollution of river Ganga: A review [Investigación sobre la contaminación por metales pesados del río Ganges: una revisión]. *Annals of Agrarian Science*, 15(2), 278–286. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2017.04.001>
- Petrov, M. A., Sabitov, T. Y., Tomashevskaya, I. G., Glazirin, G. E., Chernomorets, S. S., Savernyuk, E. A., Tutubalina, O. V., Petrakov, D. A., Sokolov, L. S., Dokukin, M. D., Mountrakis, G., Ruiz-Villanueva, V., y Stoffel, M. (2017). Glacial lake inventory and lake outburst potential in Uzbekistan [Glacial lake inventory and lake outburst potential in Uzbekistan]. *Science of the Total Environment*, 592, 228–242. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.068>
- Presidencia del Consejo de Ministros (PCM), (2012). Gobierno encara contaminacion de rios ramis en puno con ejecucion de obras y medidas de fiscalizacion. <http://www.pcm.gob.pe/Prensa/ActividadesPCM/2012/Julio/10-07-12-e.html>
- Quirós, R. (1988). Mapas Batimétricos y Paramétros Morfométricos de lagos patagónicos del Neuquén de río Negro y del Chubut . *Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo pesquero* (p. 51).
- Quispe-Zuniga, M. R., Santos, F., Callo-Concha, D., y Greve, K. (2019). Impact of heavy metals on community farming activities in the central peruvian andes [Impacto de los metales pesados en las actividades agrícolas comunitarias en los Andes peruanos centrales]. *Minerals*, 9(10), 14–17. <https://doi.org/10.3390/min9100647>
- Rahim, M. A. C. A., A/l Aproi, A., Shi, X., Liu, S., Ali, M. M., Yaacob, W. Z. W., y Mohamed, C. A. R. (2019). Distribution of chromium and gallium in the total suspended solid and surface sediments of sungai kelantan, kelantan, Malaysia [Distribución de cromo y galio en el total de sedimentos sólidos y superficiales suspendidos de sungai kelantan, kelantan, Malasia]. *Sains Malaysiana*, 48(11), 2343–2353. <https://doi.org/10.17576/jsm-2019-4811-06>
- Regal, A. (1946). *Las minas Incaicas*. El Diluvio (p. 43). https://arca.bnc.cat/arcabib_pro/ca/catalogo_imagenes/grupo.do?path=1408662yidImagen=13865649yidBusqueda=221yposicion=11ypresentacion=pagina
- Renard, K. G., Foster, G. ., Weesies, G. ., McCool, D. ., y Yoder, D. C. (1977). *Reised*

- Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. United States Department of Agriculture (USDA) (p. 407).
- Rodbell, D. T., Delman, E. M., Abbott, M. B., Besonen, M. T., y Tapia, P. M. (2014). The heavy metal contamination of lake Junín national reserve, Peru: An unintended consequence of the juxtaposition of hydroelectricity and mining [La contaminación por metales pesados de la Reserva Nacional Lago Junín, Perú: una consecuencia no deseada de la yuxtaposición de la hidroelectricidad y la minería]. *GSA Today*, 24(8), 4–10. <https://doi.org/10.1130/GSATG200A.1>
- Romero, F., y Pineda, N. M. (2007). Batimetría del Lago de Yojoa . *Revista Técnico-Científica Tatascan*, 19(2), 1-12.
- Roşca, O. M., Dippong, T., Marian, M., Mihali, C., Mihalescu, L., Hoaghia, M. A., y Jelea, M. (2020). Impact of anthropogenic activities on water quality parameters of glacial lakes from Rodnei mountains, Romania [Impacto de las actividades antropogénicas en los parámetros de calidad del agua de los lagos glaciares de las montañas Rodnei, Rumania]. *Environmental Research*, 182(September), 1-11 . <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109136>
- Rydberg, J., Rosén, P., Lambertsson, L., De Vleeschouwer, F., Tomasdóttir, S., y Bindler, R. (2012). Assessment of the spatial distributions of total-and methyl-mercury and their relationship to sediment geochemistry from a whole-lake perspective [Evaluación de las distribuciones espaciales del mercurio total y el metilmercurio y su relación con la geoquímica de sedimentos desde una perspectiva de lago entero]. *Journal of Geophysical Research G: Biogeosciences*, 117(4), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2012JG001992>
- Sahoo, P. K., Souza-Filho, P. W. M., Guimarães, J. T. F., da Silva, M. S., Costa, F. R., Manes, C. L. de O., Oti, D., Júnior, R. O. S., y Dall’Agnol, R. (2015). Use of multi-proxy approaches to determine the origin and depositional processes in modern lacustrine sediments: Carajás Plateau, Southeastern Amazon, Brazil [Uso de enfoques multi-proxy para determinar el origen y los procesos de deposición en sedimentos lacustres modernos: Meseta de Carajás, Sudeste de la Amazonía, Brasil]. *Applied Geochemistry*, 52, 130–146. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.11.010>
- Salas-Ávila, D., Chura, F. F. C., Quispe, G. B., Mamani, E. Q., Huanqui-Pérez, R., Coaquira,

- E. V., Bernedo-Colca, F., Salas-Mercado, D., y Hermoza-Gutiérrez, M. (2021). Evaluation of heavy metals and social behavior associated a the water quality in the Suches River, Puno-Peru [Evaluación de metales pesados y comportamiento social asociado a la calidad del agua en el río Suches, Puno-Perú]. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 12(6), 1-47. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-06-04>
- Salas-Mercado, D., Hermoza-Gutierrez, M., Belizario-Quispe, G., Chaiña, F., Quispe, E., y Salas-Ávila, D. (2022). Geochemical indices for the assessment of chemical contamination elements in sediments of the Suches river , Peru [Índices geoquímicos para la evaluación de elementos químicos de contaminación en sedimentos del río Suches, Perú]. *Pollution*, 8(2), 595–610. <https://doi.org/810.22059/POLL.2021.331806.1205>
- Salas-Mercado, D., Hermoza-Gutiérrez, M., y Salas-Ávila, D. (2020). Distribution of heavy metals and metalloids in surface waters and on sediments of the crucero river, Perú [Distribución de metales pesados y metaloides en aguas superficiales y en sedimentos del río Crucero, Perú]. *Revista Boliviana de Química*, 37(4), 185–193. <https://doi.org/10.34098/2078-3949.37.4.1>
- Salas Mercado, D. (2017). Evaluación de metales y metaloides en sedimentos en la sub cuenca del rio Azángaro y su modelamiento ambiental [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Altiplano]. Archivo digital. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/8348>
- Santisteban, Juan, mediavilla, rosa, lopez-pamo, E. (2003). *LOI* qualitative or quantitative method for organic matter and carbonate mineral content in sediments? [Método cualitativo o cuantitativo de LOI para el contenido de materia orgánica y mineral de carbonato en sedimentos?]. *Journal of Paleolimnology*, 32, 387-299.
- Santos-Francés, F., Martínez-Graña, A., Rojo, P. A., y Sánchez, A. G. (2017). Geochemical background and baseline values determination and spatial distribution of heavy metal pollution in soils of the andes mountain range (Cajamarca-Huancavelica, Peru) [Antecedentes geoquímicos y determinación de valores de referencia y distribución espacial de la contaminación por metales pesados en suelos de la cordillera de los Andes (Cajamarca-Huancavelica, Perú)]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(8), 1-22. <https://doi.org/10.3390/ijerph14080859>

- Schoolmeester, T., Johansen, K. S., Alfthan, B., Baker, E., Hesping, M., y Verbist, K. (2018). Atlas De Glaciares Y Aguas Andinos. El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos. *Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura* (p. 80)
- Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life, 4 (1998).
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), (2020a). Datos Hidrometeorológicos a nivel nacional. <https://www.senamhi.gob.pe/?yp=estaciones>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), (2020b). Mapa Climatico Nacional. <https://web2.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>
- Setiawan, B., Antonie, S., y Adhiperdana, B. G. (2019). Grain-size characteristics of aceh's coastal deposits [Características del tamaño de la lluvia de los depósitos costeros de Aceh]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 523(1), 1-8 . <https://doi.org/10.1088/1757-899X/523/1/012082>
- Sluiter, R. (2012). Interpolation Methods for the Climate Atlas. *Royal Netherlands Meteorological Institute* (p. 74).
- SoilGrid. (2020). SoildGrids. 1. <https://soilgrids.org/>
- Solano C., D., Cuba S., A., y Narciso Ch., J. (2017). ¿La política de regulación ambiental debe mantenerse en un país que busca sostener su crecimiento y desarrollo económico?.
- Tang, J., An, T., Xiong, J., y Li, G. (2017). The evolution of pollution profile and health risk assessment for three groups SVOCs pollutants along with Beijiang River, China [La evolución del perfil de contaminación y la evaluación de riesgos para la salud de tres grupos de contaminantes SVOC junto con el río Beijiang, China]. *Environmental Geochemistry and Health*, 39(6), 1487–1499. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9936-3>
- Team, R. C. (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>.
- Tendaupenyu, P., Matawa, F., y Magadza, C. H. D. (2018). Spatial distribution of surface sediment nutrients of a subtropical hypereutrophic lake: Lake Chivero, Zimbabwe

- [Distribución espacial de los nutrientes de los sedimentos superficiales de un lago hipereutrófico subtropical: Lago Chivero, Zimbabwe]. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 10(September), 399–408. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2018.09.006>
- Thakuri, S., Lama, F., Malla, R., Khadka, N., Ghimire, N. P., y Salerno, F. (2021). Lake Watershed Dynamics and Bathymetry Modeling of Rara and Begnas Lakes in Nepal [Lake Watershed Dynamics and Bathymetry Modeling of Rara and Begnas Lakes in Nepal]. *Earth*, 2(2), 272–286. <https://doi.org/10.3390/earth2020016>
- Thomas, J., Joseph, S., y Thrivikramji, K. P. (2018). Estimation of soil erosion in a rain shadow river basin in the southern Western Ghats, India using RUSLE and transport limited sediment delivery function [Estimación de la erosión del suelo en una cuenca fluvial de sombra de lluvia en el sur de los Ghats occidentales, India utilizando RUSLE y la función de suministro de sedimentos limitados de transporte]. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(2), 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.12.001>
- Toledo Orozco, Z., y Veiga, M. (2018). Locals' attitudes toward artisanal and large-scale mining—A case study of Tambogrande, Peru [Actitudes de los lugareños hacia la minería artesanal y a gran escala: un estudio de caso de Tambogrande, Perú]. *Extractive Industries and Society*, 5(2), 327–334. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.01.002>
- Tumial, P. H., y Cruz, D. La. (2004). La Geología En Relación Al Sistema Ecológico En El Perú [La Geología En Relación Al Sistema Ecológico En El Perú]. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalurgica y Geográfica*, 7(13), 9–15.
- Tumialan de la Cruz, P. H. (2003). Compendio De Yacimientos Minerales Del Peru. *INGEMMET* (p. 638).
- Udden, J. A. (1914). Mechanical Composition Of clastic Sediments. *Geological Society of America Bulletin*, 25(1), 655–744.
- METHOD 7471B Mercury In Solid Or Semisolid Waste (Manual Cold-Vapor Technique), EPA Methodology 1 (2000).

- METHOD 6010D Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry, 2 EPA Methodology 6 (2018). <http://ieeauthorcenter.ieee.org/wp-content/uploads/IEEE-Reference-Guide.pdf><http://wwwlib.murdoch.edu.au/find/citation/ieee.html><https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.07.022><https://github.com/ethereum/wiki/wiki/White-Paper><https://tore.tuhh.de/hand>
- Varol, M., y Şen, B. (2009). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of Behrimaz Stream, Turkey [Evaluación de la calidad de las aguas superficiales utilizando técnicas estadísticas multivariantes: un estudio de caso de Behrimaz Stream, Turquía]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 159(1–4), 543–553. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0650-6>
- Vermaire, J. C., Pomeroy, C., Herczegh, S. M., Haggart, O., y Murphy, M. (2017). Microplastic abundance and distribution in the open water and sediment of the Ottawa River, Canada, and its tributaries [Abundancia y distribución de microplásticos en aguas abiertas y sedimentos del río Ottawa, Canadá, y sus afluentes]. *Facets*, 2(1), 301–314. <https://doi.org/10.1139/facets-2016-0070>
- Vidal, J. P. (2014). Las ocho regiones naturales del Perú. *Terra Brasilis*, 3. <https://doi.org/10.4000/terrabrasilis.1027>
- Vilca, O., Mergili, M., Emmer, A., Frey, H., y Huggel, C. (2021). The 2020 glacial lake outburst flood process chain at Lake Salkantaycocha (Cordillera Vilcabamba, Peru) [La cadena de proceso de inundación del estallido del lago glaciar de 2020 en el lago Salkantaycocha (Cordillera Vilcabamba, Perú)]. *Landslides*, 18(6), 2211–2223. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01670-0>
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., Elison Timm, O., Condom, T., Salzmann, N., y Sicart, J. E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead [Rápida disminución de la nieve y el hielo en los Andes tropicales – Impactos, incertidumbres y desafíos por delante]. *Earth-Science Reviews*, 176, 195–213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G., y Bradley, R. S. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future [Cambio

- climático y glaciares andinos tropicales: pasado, presente y futuro]. *Earth-Science Reviews*, 89(3–4), 79–96. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.04.002>
- W. GEE, G., y OR, D. (2002). Methods of Soil Analysis [Métodos de análisis de suelos]. *Vadose Zone Journal*, 3(2), 255–293. <https://doi.org/10.2136/vzj2004.0722>
- Wallis, L. K. (2016). Spatial Variability of Snow Chemistry of High Altitude Glaciers in the Peruvian Andes [master's thesis, Western Washington University]. digital archive, <https://cedar.wvu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1555&context=wwuet>
- Wang, L. F., Yang, L. Y., Kong, L. H., Li, S., Zhu, J. R., y Wang, Y. Q. (2014). Spatial distribution, source identification and pollution assessment of metal content in the surface sediments of Nansi Lake, China [Distribución espacial, identificación de fuentes y evaluación de la contaminación del contenido de metales en los sedimentos superficiales del lago Nansi, China]. *Journal of Geochemical Exploration*, 140, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.02.008>
- Wang, Y., Yang, L., Kong, L., Liu, E., Wang, L., y Zhu, J. (2015). Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediments from Dongping Lake, Shandong, East China [Distribución espacial, evaluación de riesgos ecológicos e identificación de fuentes de metales pesados en sedimentos superficiales del lago Dongping, Shandong, Este de China]. *Catena*, 125, 200–205. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.023>
- Wang, Z., Qin, H., y Liu, X. (2019). Health risk assessment of heavy metals in the soil-water-rice system around the Xiazhuang uranium mine, China [Evaluación de riesgos para la salud de metales pesados en el sistema suelo-agua-arroz alrededor de la mina de uranio Xiazhuang, China]. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(6), 5904–5912. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3955-1>
- Wangchuk, S., y Bolch, T. (2020). Mapping of glacial lakes using Sentinel-1 and Sentinel-2 data and a random forest classifier: Strengths and challenges [Mapping of glacial lakes using Sentinel-1 and Sentinel-2 data and a random forest classifier: Strengths and challenges]. *Science of Remote Sensing*, 2(July), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100008>
- Wentworth, C. K. (1922). A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments [A Scale

- of Grade and Class Terms for Clastic Sediments]. *The Journal of Geology*, 30(5), 377–392. <https://doi.org/10.1086/622910>
- West, J. J., y Plug, L. J. (2008). Time-dependent morphology of thaw lakes and taliks in deep and shallow ground ice [Morfología dependiente del tiempo de lagos de deshielo y taliks en hielo terrestre profundo y poco profundo]. *Journal Of Geophysical Research*, 113, 1–14.
- Wilson, R., Glasser, N. F., Reynolds, J. M., Harrison, S., Anaconda, P. I., Schaefer, M., y Shannon, S. (2018). Glacial lakes of the Central and Patagonian Andesb [Lagos glaciares del Andesb Central y Patagónico]. *Global and Planetary Change*, 162(January), 275–291. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.01.004>
- Wu, K., Liu, S., Kandasamy, S., Jin, A., Lou, Z., Li, J., Wu, B., Wang, X., AbdRahim Mohamed, C., y Shi, X. (2019). Grain-size effect on rare earth elements in Pahang River and Kelantan River, Peninsular Malaysia: Implications for sediment provenance in the southern South China Sea [Efecto del tamaño del grano en elementos de tierras raras en el río Pahang y el río Kelantan, Malasia peninsular: Implicaciones para la procedencia de sedimentos en el sur del Mar del Sur de China]. *Continental Shelf Research*, 189(August), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.103977>
- Wu, T., y Li, Y. (2013). Spatial interpolation of temperature in the United States using residual kriging [Interpolación espacial de la temperatura en los Estados Unidos mediante kriging residual]. *Applied Geography*, 44, 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.07.012>
- Zeng, C., Wang, S., Bai, X., Li, Y., Tian, Y., Li, Y., Wu, L., y Luo, G. (2017). Soil erosion evolution and spatial correlation analysis in a typical karst geomorphology using RUSLE with GIS [Evolución de la erosión del suelo y análisis de correlación espacial en una geomorfología kárstica típica utilizando RUSLE con SIG]. *Solid Earth*, 8(4), 721–736. <https://doi.org/10.5194/se-8-721-2017>
- Zhang, X., Wang, T., Xu, Z., Zhang, L., Dai, Y., Tang, X., Tao, R., Li, R., Yang, Y., y Tai, Y. (2020). Effect of heavy metals in mixed domestic-industrial wastewater on performance of recirculating standing hybrid constructed wetlands (RSHCWs) and their removal [Efecto de los metales pesados en las aguas residuales domésticas e



industriales mixtas sobre el rendimiento de la recirculación de humedales híbridos construidos en pie (RSHCW) y su eliminación]. *Chemical Engineering Journal*, 379(May), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122363>

Zhang, Z., Lu, Y., Li, H., Tu, Y., Liu, B., y Yang, Z. (2018). Assessment of heavy metal contamination, distribution and source identification in the sediments from the Zijiang River, China [Evaluación de la contaminación por metales pesados, distribución e identificación de fuentes en los sedimentos del río Zijiang, China]. *Science of the Total Environment*, 645, 235–243. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.026>



ANEXOS

Esta sección comprende los instrumentos, documentos o artefactos de investigación.



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL-DA
CON REGISTRO N° LE-029



Registro N° LE - 029

FDT 001 - 01

INFORME DE ENSAYO: 22869/2021

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO

Av. EL SOL Nro. 329 BARRIO BELLAVISTA Puno Puno Puno

ANALISIS DE METALES PESADOS - ANANEA

Emitido por: Evelyn Miñan Castillo

Fecha de Emisión: 17/05/2021

Evelyn Miñan Castillo
CQP: 778

Personal Signatario - Químico

Renovación de Acreditación a ALS LS Perú S.A.C. mediante registro LE-029
División - Medio Ambiente

Pág. 1 de 29

Revisión: 11
Fecha de Revisión: 24/09/2020

Av. República de Argentina N° 1859, Cercado de Lima - Perú Telf: (511) 488-9500
Av. Dolores 167, José Luis Bustamante y Rivero, Arequipa - Perú Telf: (054) 424-570
www.alsglobal.com

Anexo I. Informe de resultados de metales en sedimentos del lago Rinconada.



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL-DA
CON REGISTRO N° LE-029



FDT 001 - 01

INFORME DE ENSAYO: 22874/2021

UNIVERSIDAD DE INGENIERIA Y TECNOLOGIA

Jr. MEDRANO SILV URB. LA VIÑITA Nro. 165 BARRANCO Lima Lima

Ensayos de Agua Superficial y Sedimentos

Emitido por: Evelyn Miñan Castillo

Fecha de Emisión: 17/05/2021

Evelyn Miñan Castillo

CQP: 778

Personal Signatario - Químico

Renovación de Acreditación a ALS LS Perú S.A.C. mediante registro LE-029
División - Medio Ambiente

Pág. 1 de 40

Revisión: 11
Fecha de Revisión: 24/09/2020

Av. República de Argentina N° 1859, Cercado de Lima - Perú Telf: (511) 488-9500
Av. Dolores 167, José Luis Bustamante y Rivero, Arequipa - Perú Telf: (054) 424-570
www.alsglobal.com

Anexo 2. Informe de resultados de metales pesados en sedimentos del lago Sibinacocha.