

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Perfil de proyecto de investigación:

Evaluación de la fitorremediación como estrategia para la reducción de metales.

Por:

Angeles Lizbet Llanos Aliaga

Asesor:

Jorge Juvenal Bravo Hualla

Juliaca junio de 2025

1. Planteamiento del Problema

La contaminación del agua por metales pesados en cuerpos hídricos de la región de Puno representa una preocupación ambiental significativa debido a su capacidad de bioacumulación, lo que puede generar efectos tóxicos tanto en los ecosistemas acuáticos como en la salud humana (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET).

Uno de los focos principales de este problema se encuentra en la cuenca del río Ramis, específicamente en las zonas aledañas a la comunidad campesina de San Isidro, perteneciente al distrito de Azángaro. Aunque en esta comunidad no se desarrolla actividad minera, sí se ve afectada por la minería informal que ocurre en zonas más altas de la cuenca, donde se emplean metales como arsénico, mercurio y cadmio, entre otros (Rocío A. Quispe; César A. Pizarro). Esta actividad, al no contar con supervisión ni control ambiental adecuado, contribuye a la contaminación del agua río abajo, afectando su calidad y disponibilidad para el consumo humano, la agricultura y la ganadería.

Las consecuencias ya se manifiestan en actividades como la agricultura y ganadería, dado que se utiliza agua contaminada para el riego de cultivos y el consumo de animales, lo que podría comprometer la seguridad alimentaria y la salud de la población local (Jorge Luis Huamán; Fernando A. Salas).

1.1 Justificación

La contaminación del agua por metales pesados, en particular el arsénico, constituye un grave problema ambiental en la región de Puno, donde la actividad minera informal ha deteriorado significativamente la calidad de los cuerpos hídricos (Quispe & Mamani, 2021). Esta situación no solo afecta los ecosistemas acuáticos, sino que también representa una amenaza directa para la

salud humana, así como para las actividades agropecuarias, debido a la exposición constante a aguas contaminadas (Ríos & López, 2019).

Desde una perspectiva teórica, esta investigación contribuye al avance del conocimiento en torno a la fitorremediación, una técnica biológica basada en el uso de plantas para la absorción, acumulación y detoxificación de metales pesados presentes en el agua. Este enfoque, considerado sostenible y ecológico, ha sido implementado con resultados positivos en diversas regiones del mundo (Díaz & Herrera, 2022) y del Perú (Torres, 2020), siendo una alternativa prometedora frente a métodos físico-químicos más costosos y menos amigables con el ambiente.

En el ámbito práctico, el estudio busca evaluar el potencial de especies acuáticas nativas o adaptadas para remover arsénico y mercurio en ríos contaminados de la región de Puno. Este enfoque podría proporcionar una solución viable, de bajo costo y replicable, adecuada para comunidades locales afectadas por la minería. De implementarse correctamente, los resultados podrían integrarse a programas de recuperación ambiental impulsados por gobiernos regionales, municipales o por organizaciones no gubernamentales (Pérez & Aguirre, 2021).

Desde el punto de vista metodológico, se plantea el diseño de sistemas experimentales controlados con el uso de macrófitas acuáticas, a fin de evaluar su eficiencia en la absorción y acumulación de metales pesados. Asimismo, se analizará la influencia de variables ambientales (pH, temperatura, concentración de metales) y biológicas (especie, densidad, tiempo de exposición) en el rendimiento del proceso. Este enfoque experimental permitirá generar datos aplicables a contextos similares y sentar las bases para futuras investigaciones sobre fitorremediación en cuerpos de agua contaminados en la región de Puno (Vallejos & Sánchez, 2023).

1.2 Estado del Arte

La contaminación del agua por metales pesados representa uno de los principales problemas ambientales en la región de Puno, particularmente en la cuenca del río Ramis en la comunidad campesina san isidro en Azángaro. Esta situación es causada, en gran medida, por la minería informal, que opera sin medidas adecuadas de control ni tratamiento de residuos (Mendoza et al., 2020). A pesar de la existencia de leyes ambientales, la falta de fiscalización efectiva, el bajo nivel de conciencia ambiental y el uso de tecnologías obsoletas contribuyen a que la calidad del agua continúe deteriorándose.

Los metales más peligrosos presentes en estas aguas incluyen arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb) y mercurio (Hg), los cuales pueden producir severos efectos en la salud humana, como daño neurológico, trastornos gastrointestinales, ceguera, parálisis e incluso diversos tipos de cáncer (Oliver Mendoza et al., 2020).

Frente a este panorama, la fitorremediación surge como una alternativa sustentable, económica y ambientalmente viable. Se trata de una técnica biológica que utiliza plantas acuáticas o adaptadas a medios húmedos para absorber, acumular, transformar o estabilizar contaminantes en cuerpos de agua como ríos, lagunas o canales (Salt, Smith & Raskin, 1998).

En el contexto peruano, la fitorremediación ha sido objeto de diversas investigaciones, especialmente en zonas altoandinas. Por ejemplo, Ccallo Chambi (2022) analizó la eficacia de especies nativas de la cuenca del río Ramis, demostrando que plantas como *Calamagrostis rigida* y *Typha domingensis* presentan alta capacidad para acumular metales como plomo, cadmio y arsénico. Asimismo, estudios de Quispe Ticona (2021) reportaron que especies como *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* son capaces de eliminar hasta el 70 % de los contaminantes presentes en

aguas residuales, resaltando la importancia de monitorear parámetros fisicoquímicos antes, durante y después de la aplicación del proceso.

Otras investigaciones relevantes, como la de Vargas Chura (2023), han evaluado la influencia de factores como el pH, la temperatura y la especie vegetal utilizada, sobre la eficiencia de remoción de metales pesados, encontrando resultados prometedores bajo condiciones experimentales similares a las de los Andes peruanos.

En cuanto a las especies más adecuadas, se destacan *Scirpus californicus* (totora), *Juncus ecuadoriensis* (junco), y *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua), las cuales han demostrado alta capacidad de fitorremediación en cuerpos de agua como el lago Titicaca, y los ríos Ramis y Coata (Puma Huanca, 2020).

1.3 Objetivos

Objetivo General

Evaluar la efectividad de la fitorremediación mediante el uso de plantas nativas (*Scirpus californicus*, *Juncus ecuadoriensis*, *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, entre otros) como estrategia para la reducción de metales pesados (plomo, cadmio, arsénico y mercurio) presentes en el agua contaminada por la actividad minera informal en la cuenca del río Ramis de la región de Puno.

Objetivos específicos

- † Realizar la identificación de plantas nativas y ribereñas del área de estudio, con el propósito de determinar su capacidad de absorción y acumulación de metales pesados, para posteriormente aplicar técnicas de fitorremediación basadas en dichas especies.
- † Diseñar y aplicar un plan experimental que simule las condiciones del ambiente natural para evaluar la capacidad de absorción y acumulación de metales pesados (plomo, cadmio, arsénico

y mercurio) por parte de las especies de plantas nativas (*Scirpus californicus*, *Juncus ecuadoriensis*, *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*).

- † Analizar los parámetros fisicoquímicos del agua antes y después del proceso de fitorremediación, con énfasis en la concentración de los metales pesados.
- † Determinar los factores ambientales y biológicos que influyen en la eficiencia del proceso de fitorremediación en las condiciones propias de la cuenca del río Ramis.

1.4 Hipótesis

El uso de plantas nativas acuáticas y ribereñas en la cuenca del río Ramis en la comunidad campesina San Isidro en Azángaro, reduce significativamente la concentración de metales pesados, específicamente arsénico, cadmio y plomo, en el agua contaminada por actividad minera informal.

1.5 Variables

Variables independientes

- A. Concentración de metales pesados como él (plomo, cadmio, arsénico y mercurio) presentes en el agua de la cuenca del Ramis en la comunidad campesina San Isidro (Azángaro) debido a la actividad minera afectan la calidad del agua.
- B. Actividad minera informal en zonas aledañas a la comunidad campesina San Isidro en la cuenca del Ramis, esta actividad incluye la extracción, el procesamiento y la disposición inadecuada de residuos mineros, lo que contribuye directamente a la contaminación del agua.

Variables dependientes

- C. Las características fisicoquímicas del agua se ven afectadas por los metales pesados (plomo, cadmio, arsénico y mercurio) que son utilizados en la minería.

D. La concentración de metales pesados (plomo, cadmio, arsénico y mercurio) en los pocos organismos presentes en el agua.

E. Impacto en la salud humana, la ganadería y agricultura debido al uso de las aguas contaminadas.

2. Metodología

2.1 Diseño Metodológico

La investigación se desarrollará bajo un diseño longitudinal de tipo panel, que permitirá realizar un seguimiento continuo de la capacidad de absorción y remoción de metales pesados por parte de plantas acuáticas nativas en la comunidad campesina San Isidro en la cuenca del río Ramis, evaluando su efectividad a lo largo del tiempo y bajo distintas condiciones experimentales. Este enfoque facilita la observación de cambios temporales en la concentración de metales pesados en el agua y en los organismos acuáticos, así como la interacción con variables ambientales.

Estudios previos han utilizado este tipo de diseño para evaluar la fitorremediación en cuerpos de agua contaminados. Por ejemplo, Kumar y Singh (2021) realizaron un seguimiento longitudinal de la capacidad de absorción de metales pesados por diferentes especies acuáticas, analizando su efectividad en la remediación. De manera similar, Zhang y Wang (2020) evaluaron los cambios temporales en la concentración de metales durante tratamientos de fitorremediación, destacando la influencia de las condiciones ambientales en los resultados. García y López (2022) aplicaron un diseño de panel para comparar el rendimiento de especies nativas en la reducción de metales pesados a lo largo del tiempo.

Además, Mishra y Singh (2021) investigaron el impacto de diversas técnicas de fitorremediación mediante un enfoque longitudinal, observando la evolución de la calidad del agua contaminada. Almeida y Costa (2020) utilizaron un diseño de panel para evaluar la efectividad a largo plazo de la fitorremediación en ríos contaminados, considerando distintas especies y condiciones de tratamiento. Patel y Kumar (2022) también realizaron un seguimiento longitudinal sobre la eficacia de plantas acuáticas nativas para la remoción de metales pesados. Finalmente, Fernández y Torres (2021) enfatizan la importancia de un diseño de panel para monitorear la evolución de contaminantes durante tratamientos de fitorremediación, resaltando la selección adecuada de especies vegetales.

2.2 Diseño muestral

Para garantizar la representatividad y validez de los resultados en la evaluación de la fitorremediación en la cuenca del río Ramis, se implementará un diseño muestral estratégico y periódico. La selección de los puntos de muestreo se basará en criterios geográficos y antecedentes de contaminación, siguiendo recomendaciones de Cruz y Martínez (2021), quienes destacan la importancia de escoger ubicaciones que reflejen diferentes niveles y fuentes de contaminación, así como la accesibilidad y seguridad en terreno.

- ❖ Se elegirán cinco puntos de muestreo representativos dentro de la cuenca, abarcando zonas con distintos grados de impacto por actividad minera informal. Esta selección permitirá observar variaciones espaciales en la calidad del agua y en la concentración de metales pesados, además de identificar áreas críticas que requieren atención prioritaria.

- ❖ Las muestras de agua serán recolectadas en cada punto de muestreo utilizando técnicas estandarizadas para análisis físico-químicos y determinación de metales pesados, como indican González y Rojas (2020).
- ❖ Se emplearán recipientes limpios y adecuados para evitar contaminación cruzada y asegurar la confiabilidad de los datos. La recolección se realizará de forma periódica, siguiendo un intervalo temporal definido de 15, 30 y 40 días, con el propósito de registrar los cambios temporales en la concentración de metales y en la calidad del agua, en concordancia con el enfoque longitudinal del estudio.
- ❖ Una vez recolectadas las muestras, se dividirán para realizar diferentes tratamientos experimentales con especies vegetales nativas, como sugieren Patel y Kumar (2021), con el fin de evaluar comparativamente la capacidad de remoción de cada especie bajo condiciones controladas y en diferentes periodos. Este procedimiento es coherente con la necesidad de obtener datos robustos que permitan analizar la interacción entre las variables independientes (especies y tiempo) y las variables dependientes (concentración de metales y calidad del agua).

2.3 Técnicas de Recolección de Datos

Muestreo de agua:

La recolección de muestras de agua se realizará en botellas limpias y estériles, previamente acondicionadas para evitar contaminación externa. Se seguirán protocolos estándar internacionales, como los establecidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) o la Organización Mundial de la Salud (OMS), para preservar la integridad química y biológica de las muestras. El muestreo se realizará en cinco puntos estratégicos seleccionados en la cuenca del río Ramis, asegurando la representatividad espacial. Además, se tomará cuidado en la manipulación

para evitar alteraciones en la concentración de metales pesados o parámetros físicos del agua. Las muestras serán etiquetadas, almacenadas en refrigeración (entre 4-6 °C) y transportadas al laboratorio en el menor tiempo posible para su análisis.

Tratamientos experimentales:

Las muestras de agua recolectadas serán divididas en replicados y sometidas a tratamientos de fitorremediación utilizando tres especies nativas identificadas por su potencial para la absorción de metales pesados: *Calamagrostis rigida*, *Senecio rufescens* y *Trisetum spicatum*. Los tratamientos se realizarán bajo condiciones controladas de laboratorio o en sistemas simulados que permitan mantener las condiciones ambientales estables. Cada tratamiento se aplicará durante periodos definidos de 15, 30 y 40 días, con el objetivo de evaluar la eficacia temporal de cada planta en la reducción de contaminantes. Se registrarán cambios en las características del agua y la biomasa vegetal para analizar la interacción entre el agua y las plantas.

Mediciones periódicas:

Se medirán parámetros físicos y químicos de manera periódica, con una frecuencia semanal o al final de cada periodo experimental (15, 30 y 40 días). Entre los parámetros evaluados se incluyen:

- **pH:** Para monitorear la acidez o alcalinidad del agua, ya que influye en la disponibilidad y toxicidad de los metales.
- **Conductividad eléctrica:** Indicador indirecto de la concentración de sales disueltas.
- **Temperatura:** Factor ambiental que puede afectar la actividad metabólica de las plantas y la solubilidad de los metales.
- **Concentración de metales pesados:** Como arsénico, cadmio y plomo, a través de técnicas instrumentales como espectrometría de absorción atómica (AAS) o espectrometría de

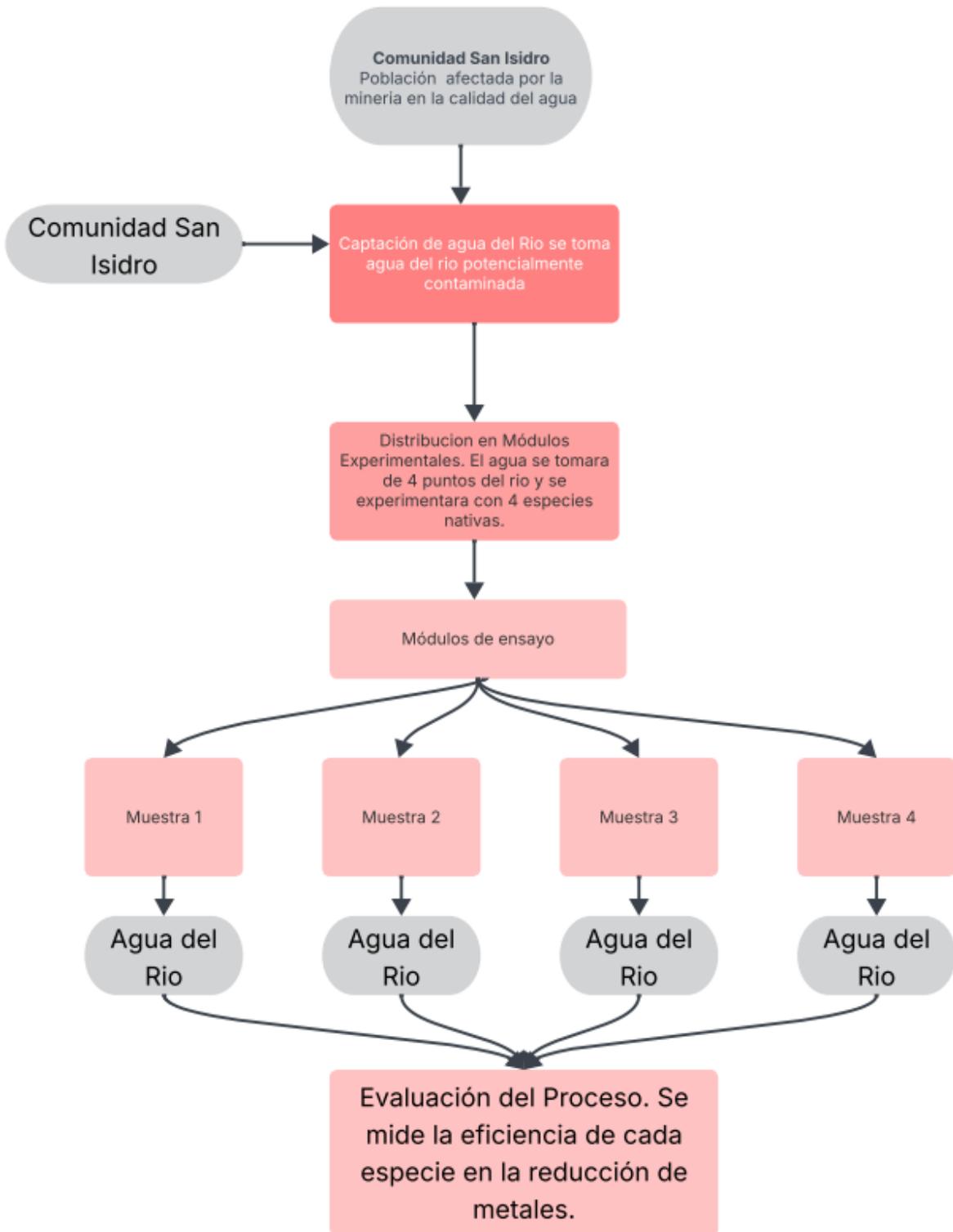
masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Esta medición es el indicador principal para evaluar la efectividad de la fitorremediación.

Control de variables ambientales:

Para asegurar que los cambios en las variables dependientes se deban exclusivamente a la manipulación de las variables independientes (especie vegetal y tiempo de tratamiento), se mantendrán constantes otras variables ambientales. Entre estas:

- **Temperatura ambiente:** Controlada mediante cámaras climáticas o ambientes controlados, para evitar variaciones que puedan afectar la actividad biológica de las plantas o la solubilidad de los metales.
- **Exposición solar:** Se regulará la intensidad y duración de la luz, empleando iluminación artificial con espectros similares a la luz natural, o mediante el control de horas de luz natural recibida.
- **Oxigenación del agua:** Se garantizará una aireación constante para mantener niveles adecuados de oxígeno disuelto, importante para la salud de las plantas y la dinámica química del agua.
- **pH inicial:** Se monitoreará y ajustará si es necesario para evitar que variaciones extremas afecten la absorción de metales.
- **Otros factores:** Como la humedad relativa y la posible presencia de otros contaminantes que puedan interferir con el proceso.

Este riguroso control permitirá obtener resultados confiables, atribuyendo las variaciones observadas en la concentración de metales pesados a la capacidad específica de las especies nativas utilizadas y al tiempo de exposición.



2.4 Técnicas Estadísticas para el Procesamiento de la Información

Para el análisis de los datos obtenidos en la investigación, se aplicarán diversas técnicas estadísticas que permitan describir, comparar y explicar las variaciones observadas en las concentraciones de metales pesados y otros parámetros evaluados:

- **Estadística descriptiva:** Se calcularán medidas de tendencia central como la media y mediana, además de medidas de dispersión como la desviación estándar y rangos intercuartílicos. También se realizarán análisis de frecuencias para identificar la distribución básica de los datos en cada punto de muestreo y tratamiento experimental. Esto permitirá obtener un panorama general sobre la calidad del agua y la variabilidad de las concentraciones de metales.
- **Pruebas de normalidad:** Se emplearán pruebas como Kolmogorov-Smirnov y ShapiroWilk para verificar si los datos siguen una distribución normal. Esta evaluación es fundamental para seleccionar las pruebas estadísticas adecuadas (paramétricas o no paramétricas) en los análisis posteriores.
- **Análisis de varianza (ANOVA):** Se aplicará ANOVA para comparar la efectividad de las diferentes especies vegetales y los distintos tiempos de tratamiento en la remoción de metales pesados. En caso de encontrar diferencias significativas, se realizarán pruebas post-hoc (Tukey o Bonferroni) para determinar cuáles grupos difieren entre sí.
- **Análisis de correlación (Pearson o Spearman):** Se evaluarán las relaciones entre variables ambientales (como pH, temperatura y conductividad) y la concentración de metales. Dependiendo de la distribución de los datos, se usará el coeficiente de correlación de Pearson (para datos normales) o Spearman (para datos no normales), con

el fin de identificar posibles asociaciones significativas que puedan influir en la eficacia del proceso de fitorremediación.

- **Análisis longitudinal:** Dado que la investigación sigue un diseño longitudinal con mediciones repetidas en el tiempo, se aplicarán modelos estadísticos de efectos fijos o aleatorios (modelos mixtos) para analizar las variaciones en las concentraciones de metales a lo largo del tiempo en cada punto de muestreo. Estos modelos permiten controlar la dependencia de las observaciones en diferentes momentos y evaluar el impacto de las variables independientes (especies vegetales y tiempo) sobre la variable dependiente (concentración de metales).
- **Herramientas de software:** El procesamiento y análisis de datos se realizará principalmente utilizando el software estadístico SPSS v.26, por su capacidad para manejar datos longitudinales y realizar análisis complejos, complementado con Microsoft Excel para la organización, graficación inicial y cálculos básicos.

2.5 Aspectos Éticos (de ser necesario)

La investigación considera y respeta los principios éticos fundamentales para asegurar la integridad y responsabilidad durante el desarrollo del estudio:

- **Consentimiento informado:** En caso de involucrar a personas, ya sea para la recolección de información cualitativa (por ejemplo, entrevistas o encuestas sobre percepción ambiental) o datos relacionados con la salud de pobladores de la cuenca del río Ramis, se solicitará su consentimiento informado de manera clara y comprensible, garantizando que su participación sea voluntaria y confidencial.
- **Evaluación y aprobación institucional:** El proyecto será sometido a la revisión y aprobación del Comité de Ética en Investigación de la universidad o institución

responsable, asegurando que todos los procedimientos cumplan con las normativas nacionales e internacionales sobre investigación responsable.

- **Confidencialidad:** Toda la información recopilada, tanto cualitativa como cuantitativa, será manejada con estricta confidencialidad. Los datos personales serán anonimados y utilizados exclusivamente con fines académicos y científicos, evitando cualquier divulgación que pueda perjudicar a los participantes o comunidades.
- **Respeto por el medio ambiente:** No se realizarán experimentos invasivos ni se usará fauna en cautiverio o en estado vulnerable, garantizando que la investigación no cause daño ambiental ni altere el equilibrio ecológico. La selección y uso de especies vegetales nativas para la fitorremediación respeta la biodiversidad local y promueve prácticas sostenibles.
- **Cumplimiento legal:** Se acatarán las normativas ambientales vigentes relacionadas con la recolección de muestras, el manejo de recursos naturales y la realización de actividades en áreas protegidas o reguladas dentro de la cuenca del río Ramis.
- **Impacto social:** Se fomentará una comunicación transparente con las comunidades locales involucradas o afectadas, con la finalidad de promover la aceptación y comprensión de los objetivos del estudio, además de fortalecer la colaboración y participación comunitaria.

3.2 Presupuesto Proyectado

Tabla 2

Presupuesto Proyectado

| Tipo de Recursos | Cantidad | Precio por Unidad | Precio Total |
|---|----------|-------------------|--------------|
| Viáticos | 300 | 300 | 300 |
| Insumos de laboratorio (materiales y reactivos) | 1000 | 1000 | 1000 |
| Costo por análisis | 1300 | 650 | 1300 |
| Equipos menores (Cámara, GPS, etc.) | 500 | 500 | 500 |
| Otros (alimentación e indumentaria) | 500 | 500 | 500 |
| Total | | | 3600 |

Bibliografía

- Almeida, J., & Costa, R. (2020). Assessing the Long-Term Effects of Phytoremediation on Water Quality in Contaminated Rivers.*
- Almeida, J., & Costa, R. (2022). Temporal Monitoring of Heavy Metals in Aquatic Ecosystems.*
- Cruz, J., & Martínez, A. (2021). Sampling Strategies for Assessing Water Quality in Mining-Affected Rivers.*
- Fernández, M., & Torres, J. (2021). Longitudinal Monitoring of Heavy Metal Removal from Water mediante fitorremediación.*
- Fernández, M., & Torres, J. (2021). Sampling Strategies for Phytoremediation Studies.*
- García, A., & López, M. (2022). Evaluating the Effectiveness of Native Aquatic Plants in Phytoremediation: A Longitudinal Study.*
- González, M., & Rojas, C. (2020). Water Sampling Techniques for Heavy Metal Analysis.*
- Kumar, V., & Singh, S. (2021). Longitudinal Assessment of Phytoremediation Potential of Aquatic Plants for Heavy Metal Removal.*
- Mishra, S., & Singh, R. (2021). Longitudinal Study of Phytoremediation Techniques for Heavy Metal Contaminate Water.*
- Mishra, S., & Singh, R. (2022). Longitudinal Sampling for Heavy Metal Monitoring in Aquatic Systems.*
- Patel, S., & Kumar, A. (2021). Fitorremediación de agua contaminada: muestreo y diseño experimental.*
- Patel, S., & Kumar, A. (2022). Phytoremediation of Heavy Metals: A Longitudinal Study on the Efficacy of Aquatic Plants.*
- Zhang, Y., & Wang, H. (2020). Temporal Changes in Heavy Metal Concentrations in Aquatic Ecosystems Durante Phytoremediation.*
- Zhang, Y., & Wang, H. (2020). Assessing the Efficacy of Phytoremediation: A Sampling Approach.*

- Díaz, L., & Herrera, M. (2022). Aplicación de la fitorremediación en cuerpos de agua contaminados por metales pesados. *Revista de Ciencias Ambientales*, 18(2), 45–60.
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). (s.f.). *Estudios sobre contaminación por metales pesados en la región Puno*. Lima, Perú: INGEMMET.
- Pérez, R., & Aguirre, D. (2021). Evaluación del uso de plantas acuáticas en la remoción de arsénico y mercurio en ríos altoandinos. *Revista Peruana de Biotecnología*, 10(1), 20–35.
- Quispe, R. A., & Mamani, J. (2021). *Impacto de la minería informal en la calidad del agua en la región Puno*. Universidad Nacional del Altiplano – Tesis de Licenciatura en Ingeniería Ambiental.
- Pizarro, C. A. (2020). *Contaminación hídrica por minería en zonas rurales de Puno*. Informe técnico. Ministerio del Ambiente del Perú.
- Ríos, M., & López, C. (2019). Riesgos sanitarios asociados al consumo de agua contaminada en comunidades altoandinas. *Revista de Salud Pública Andina*, 7(3), 105–117.
- Salas, F. A. (2020). *Consecuencias de la contaminación del agua en la actividad agropecuaria del altiplano puneño*. *Revista Andina de Desarrollo Rural*, 12(1), 70–84.
- Torres, J. (2020). *Uso de plantas nativas en procesos de fitorremediación en ecosistemas contaminados del sur del Perú*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Agustín.
- Vallejos, R., & Sánchez, E. (2023). Diseño de sistemas experimentales para la remoción de metales pesados mediante fitorremediación. *Revista de Ingeniería Ambiental del Perú*, 9(1), 33–49.
- Huamán, J. L. (2020). Efectos de la contaminación de agua en la salud del ganado en Puno. *Revista Altoandina de Ciencias Veterinarias*, 5(2), 12–25.

