



**UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA**

**Programa de Doctorado en Ingeniería y Producción Industrial**

**ESTUDIO DE LA ÓSMOSIS INVERSA OPERADA A BAJA PRESIÓN COMO  
TRATAMIENTO DE UNA FUENTE NATURAL CONTAMINADA POR  
ACTIVIDAD MINERA, EN LA MICROCUENCA MILLUNI EN BOLIVIA, PARA  
EL ABASTECIMIENTO DE AGUA SEGURA A POBLACIONES**

**TESIS DOCTORAL**

**Presentada por:**

**Paola Andrea Alvizuri Tintaya**

**Dirigida por:**

**Juan Ignacio Torregrosa López**

**Vanesa G. Lo Iacono Ferreira**

**Jaime Lora García**

**Noviembre, 2022**

## Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis directores de Tesis, Dr. Juan Ignacio Torregrosa López, Dr Jaime Lora Gracia y Dra, Vanesa G. Lo Iacono Ferreira por su apoyo, paciencia y extraordinaria guía durante estos años de doctorado.

En segundo lugar, quiero agradecer de forma muy especial a mi esposo por acompañarme de manera incondicional durante esta etapa. Estaré por siempre agradecida a mi familia por el aliento y motivación constante. Gracias a todos los amigos y colegas, grandes profesionales, con los que pude trabajar y aprender mucho.

En tercer lugar, quiero agradecer a la Universidad Católica Boliviana San Pablo por confiar en mí y patrocinar esta investigación doctoral.

Finalmente, esta Tesis doctoral va dedicada a mis padres, María y Ramiro.

## Índice

Resumen .....	1
Summary .....	3
Resum .....	5
1. Introducción.....	7
1.1. Recursos hídricos en los Andes de Bolivia.....	7
1.2. Contaminación de aguas superficiales con metales pesados y su efecto en la salud .....	9
1.3. Problemática del arsénico .....	13
1.4. Tecnologías para remoción de metales pesados .....	14
1.5. Procesos de filtración por membrana.....	18
2. Objetivos e Hipótesis.....	25
2.1. Objetivo General.....	25
2.2. Objetivos Específicos .....	25
2.3. Hipótesis .....	25
3. Materiales y Métodos .....	26
3.1. Área de estudio .....	26
3.1.1. Geomorfología.....	27
3.1.2. Cuerpos de agua superficiales de Milluni.....	27
3.1.3. Tratamiento de agua Milluni .....	29
3.1.4. Monitoreo de los recursos hídricos en Milluni.....	31
3.2. Metodología.....	32
3.2.1. Caracterización de los cuerpos de agua superficial de Milluni .....	33
3.2.1.1. Análisis de datos históricos de Milluni.....	33
3.2.1.2. Análisis climatológico de Milluni.....	33
3.2.1.3. Diseño del programa de monitoreo de calidad de agua .....	34
3.2.1.4. Implementación del programa de monitoreo .....	34
3.2.1.5. Análisis estadístico del año piloto del programa de monitoreo .....	35
3.2.2. Fortalecimiento de la gestión del agua en Milluni .....	36
3.2.2.1. Teledetección como complemento al programa de monitoreo .....	36
3.2.2.2. Identificación de Partes Interesadas en la gestión del agua en la cuenca de Milluni .....	37
3.2.3. Montaje del piloto experimental y diseño de experimentos .....	40
3.2.3.1. Diseño y puesta en marcha de la planta piloto de ósmosis inversa.....	40
3.2.3.2. Diseño de experimentos.....	41
3.2.4. Remoción del metal pesado problema.....	42
3.2.4.1. Preparación de aguas sintéticas.....	42
3.2.4.2. Análisis estadístico de los resultados del experimento .....	44
3.2.4.3. Desarrollo del modelo matemático .....	44
4. Resultados .....	50
4.1. Caracterización de los cuerpos de agua superficiales de Milluni .....	50
4.1.1. Resultado del análisis de los datos históricos de Milluni .....	50
4.1.1.1. Discriminación básica.....	50

4.1.1.2.	Análisis de datos aproximados de las series homogéneas .....	51
4.1.2.	Análisis climatológico de Milluni .....	53
4.1.3.	Propuesta de programa de monitoreo de calidad de agua.....	54
4.1.3.1.	Análisis de estándares internacionales.....	54
4.1.3.2.	Componentes del programa de monitoreo de la parte alta de la Microcuenca Milluni	56
4.1.4.	Resultados de la implementación de año piloto del programa .....	57
4.1.5.	Evaluación estadística de resultados del año 1 del programa de monitoreo.....	60
4.1.5.1.	Análisis MANOVA y ANOVA para la frecuencia de muestreo .....	60
4.1.5.2.	Búsqueda de indicadores de alta concentración de metales.....	62
4.2.	Propuestas para el fortalecimiento de la gestión del agua de Milluni.....	64
4.2.1.	Implementación de teledetección como complemento al programa de monitoreo .....	65
4.2.1.1.	Análisis de los resultados en las lagunas de estudio .....	67
4.2.2.	Partes Interesadas dentro de la gestión hídrica en Milluni .....	68
4.2.2.1.	Identificación partes interesadas en Milluni .....	69
4.2.2.2.	Clasificación y análisis de las partes interesadas.....	70
4.2.2.3.	Relacionamiento e interrelación de las partes interesadas con el proyecto .....	72
4.3.	Piloto experimental.....	72
4.3.1.	Diseño final y operación con una planta piloto de OI .....	73
4.3.2.	Número de ensayos y configuración de las variables.....	74
4.4.	Remoción del metal pesado problema.....	75
4.4.1.	Resultados de la experimentación con aguas sintéticas.....	75
4.4.1.1.	Efecto del flujo de alimentación ( $Q_f$ ) con respecto al Flux ( $J_v$ ) .....	76
4.4.1.2.	Efecto de la presión ( $\Delta p$ ) sobre el índice de remoción de arsénico ( $R_1$ ).....	77
4.4.1.3.	Efecto de la concentración de soluto ( $C_f$ ) con respecto al Flux ( $J_v$ ) y al índice de remoción de arsénico ( $R_1$ ) .....	78
4.4.2.	Valoración estadística de los resultados experimentales .....	79
4.4.2.1.	Índice de remoción de arsénico ( $R_1$ ) .....	80
4.4.2.2.	Índice de remoción de conductividad ( $R_2$ ).....	81
4.4.2.3.	Flux ( $J_v$ ).....	82
4.4.3.	Validación del modelo matemático .....	84
5.	Impacto científico-técnico, económico y social .....	87
6.	Discusión .....	89
7.	Conclusiones.....	91
	Referencias.....	95
	Anexos.....	118
	Anexo 1. Especificaciones técnicas de los equipos instalados en la planta de OI .....	118
	Anexo 2. Ensayos preliminares.....	121
	Anexo 3. Datos históricos del monitoreo de Milluni .....	125
	Anexo 4. Datos de precipitación y evapotranspiración 1999 -2018. ....	127
	Anexo 5. Detalle extendido de los componentes del programa de monitoreo de Milluni .....	129
	Anexo 6. Analíticas del monitoreo de metales pesados en Milluni. ....	131
	Anexo 7. Informe de la determinación de la frecuencia de muestreo .....	132

Anexo 8. Informe de la identificación de indicadores de alta concentración de metales .....	139
Anexo 9. Análisis de Partes Interesadas .....	145
Anexo 10. Vistas 2D y 3D de la planta piloto de OI .....	147
Anexo 11. Protocolo de limpieza del módulo de membrana .....	150
Anexo 12. Datos de la parte experimental con la planta piloto de OI .....	151
Anexo 13. Análisis estadístico completo de los resultados experimentales .....	152
Anexo 14. Scripts Matlab .....	157
Anexo 15. Experiencia docente - estudiantil: trabajo en una planta piloto de OI.....	163

## Índice de Figuras

Figura 1. Minas en producción.....	10
Figura 2. Procesos de Filtración por Membrana .....	19
Figura 3. Tasas de remoción de metales pesados en diferentes procesos de membranas .....	23
Figura 4. Mapa Microcuenca Milluni .....	26
Figura 5. Lagunas de la Microcuenca Milluni .....	28
Figura 6. Aporte por cuencas al abastecimiento del departamento de La Paz .....	29
Figura 7. Esquema del flujo de agua de Milluni a través de plantas de tratamiento de agua.....	30
Figura 8. Esquema metodológico de la tesis doctoral .....	32
Figura 9. Línea temporal del trabajo de campo.....	34
Figura 10. Diagrama de flujo – proceso de teledetección .....	37
Figura 11. Fases para el análisis de partes interesadas.....	38
Figura 12. Matriz de clasificación de partes interesadas según influencia e importancia activa .....	39
Figura 13. Esquema de planta piloto de OI.....	40
Figura 14. Pasos seguidos para el diseño de experimentos.....	42
Figura 15. Curva empírica para determinar la cantidad NaCl.....	43
Figura 16. Esquema de concentración-polarización en ósmosis inversa .....	45
Figura 17. Laguna Milluni Chico.....	52
Figura 18. Análisis climatológico de Milluni.....	54
Figura 19. Componentes del programa de monitoreo de Milluni .....	56
Figura 20. Puntos de monitoreo en la parte alta de Milluni .....	57
Figura 21. Puntos de monitoreo en la parte alta de Milluni .....	58
Figura 22. Gráfico de interacciones entre el mes y el punto de muestreo para la concentración de metales pesados.....	61
Figura 23. Grafica de medias con LSD intervalos de Fisher, para el efecto del mes de toma de muestras con la concentración de metales pesados.....	61
Figura 24. Gráfica de medias con intervalos LSD Fisher al 95% de confianza, para el efecto del punto de toma de muestra con la concentración de los metales pesados .....	62
Figura 25. Gráfica de medias con LSD Fisher intervalos de confianza del 95%, para el efecto del valor de pH con la concentración del As.....	63
Figura 26. Gráfica de del modelo ajustado para ver el efecto de la conductividad del agua con la concentración de As .....	64
Figura 27. Vistas Satelitales de los cuerpos de agua superficiales de Milluni .....	65
Figura 28. Identificación de las partes interesadas mediante el enfoque de órbitas.....	70
Figura 29. Matriz de identificación y clasificación de las partes interesadas por nivel de interés e influencia – Milluni.....	70
Figura 30. Matriz de Clasificación por interés y poder de las partes interesadas - Milluni .....	71
Figura 31. Metodología de operación en la planta piloto de OI.....	73
Figura 32. Comportamiento de Flux ( $J_v$ ) con respecto a la presión ( $\Delta p$ ) .....	76
Figura 33. Comportamiento del Flux ( $J_v$ ) respecto a la variación del flujo de ingreso ( $Q_f$ ) para arsénico .....	77
Figura 34. Influencia de la presión ( $\Delta p$ ) respecto al índice de remoción para arsénico ( $R_1$ ) .....	78
Figura 35. Influencia de la ( $C_f$ ) en el comportamiento de ( $J_v$ ) para arsénico.....	78
Figura 36. Influencia de la ( $C_f$ ) en el comportamiento del índice de rechazo de arsénico ( $R_1$ ).....	79
Figura 37. Gráfica de superficie respuesta $R_1$ – Presión baja.....	80
Figura 38. Gráfica de superficie respuesta $R_1$ – Presión media.....	80
Figura 39. Gráfica de superficie respuesta $R_1$ – Presión alta.....	81
Figura 40. Gráfica de superficie respuesta $R_2$ – Presión baja.....	82
Figura 41. Gráfica de superficie respuesta Flux – Presión baja .....	83
Figura 42. Gráfica de superficie respuesta Flux – Presión media .....	83

Figura 43. Gráfica de superficie respuesta Flux – Presión alta .....	84
Figura 44. Flux Teórico vs Flux Experimental en concentración baja.....	85
Figura 45. Flux Teórico vs Flux Experimental en concentración media .....	85
Figura 46. Flux Teórico vs Flux Experimental en concentración alta .....	86

## Índice de Tablas

Tabla 1. Estudios relacionados sobre recursos hídricos en Bolivia.....	8
Tabla 2. Estudios de contaminación minera en el Altiplano Boliviano .....	11
Tabla 3. LMC de metales pesados .....	12
Tabla 4. Comparación de procesos para la remoción de metales pesados .....	17
Tabla 5. Tratamientos para la remoción de As.....	18
Tabla 6. Eficiencia de los procesos de membranas en la remoción de plomo .....	20
Tabla 7. Eficiencia de los procesos de membranas en la remoción de cobre.....	21
Tabla 8. Eficiencia de los procesos de membranas en la remoción de cromo .....	21
Tabla 9. Eficiencia de los procesos de membranas en la remoción de cadmio.....	22
Tabla 10. Eficiencia de los procesos de membranas en la remoción de níquel.....	22
Tabla 11. Eficiencia de los procesos de membranas en la remoción de arsénico .....	22
Tabla 12. Eficiencia de los procesos de membranas en la remoción de zinc, manganeso y hierro...	23
Tabla 13. Procesos de las plantas potabilizadoras, El Alto y Achachicala .....	31
Tabla 14. Clasificación de las partes interesadas basada en atributos y escalas .....	39
Tabla 15. Interés-Influencia y relacionamiento entre partes interesadas .....	40
Tabla 16. Parámetros medidos en el punto de la cabecera de la Laguna Pata Khota.....	51
Tabla 17. Parámetros medidos en el punto en el efluente de la Laguna Milluni Chico .....	52
Tabla 18. Parámetros medidos en la Presa de almacenamiento en salida de la Laguna Milluni Grande.....	53
Tabla 19. Datos promedio de precipitación y evapotranspiración para el área de Milluni .....	53
Tabla 20. Componentes para el diseño de un programa de monitoreo de la calidad del agua .....	55
Tabla 21. Ubicación de los puntos de monitoreo .....	58
Tabla 22. Parámetros medidos in situ .....	59
Tabla 23. Observaciones por punto monitorizado.....	60
Tabla 24. Tabla ANOVA para la concentración de As en función del punto de muestreo.....	62
Tabla 25. Tabla ANOVA para la concentración de As en función del pH .....	63
Tabla 26. Regresión simple – As vs. Conductividad .....	64
Tabla 27. Porcentajes de concentraciones NDCI para cada laguna .....	66
Tabla 28. Partes interesadas en Milluni .....	69
Tabla 29. Configuración de experimentos .....	75
Tabla 30. Resultados de la experimentación .....	75
Tabla 31. Parámetros no lineales del modelo.....	84

## Acrónimos

AAPS	Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico
AECID	Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo
ALP	Asambleas Legislativas Departamentales
ANOVA	Análisis de Varianza
CA	Carbón Activado
CAF	Corporación Andina de Fomento
CGIAB	Comité de Gestión Integral del Agua en Bolivia
CINAES	Centro de Investigación en Agua, Energía y Sostenibilidad
CONIAG	Consejo Inter-Institucional del Agua
CP	Concentración-Polarización
ED	Electrodialisis
EPSAS	Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento
FAD	Flotación por Aire Disuelto
FEJUVE	Federaciones de Juntas Vecinales
FM	Filtración por Membrana
GADLP	Gobierno Autónomo Departamental de La Paz
GAMEA	Gobierno Autónomo Municipal de El Alto
GAML	Gobierno Autónomo Municipal de Laja
GAMPL	Gobierno Autónomo Municipal de La Paz
HPG	Granito del Huayna Potosí
IARC	Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer
INECAR	Instituto de Conservación e Investigación Ambiental
LMC	Límites Máximos de Concentración
MANOVA	Análisis Multivariado de Varianza
MMAyA	Ministerio de Medio Ambiente y Agua
MMM	Ministerio de Minería y Metalurgia
MEUF	Ultrafiltración Mejorada con Micelas
NDCI	Índice Normalizado de Clorofila-a
NDWI	Índice Normalizado de Agua
NF	Nano Filtración
OD	Oxígeno Disuelto
OI	Ósmosis Inversa
OINT	Organismos Internacionales
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONG	Organismo No Gubernamental
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PHICAB	Programa de Estudio de la Climatología e Hidrología de Bolivia
PEUF	Ultrafiltración Mejorada con Polímeros
PDCKyLMT	Plan Director de la Cuenca Katari y Lago Menor del Titicaca
PMCA	Programa de Monitoreo de Calidad de Agua
TI	Termodinámica Irreversible
SERGEOTECMIN	Servicio Geológico y Técnico de Minas
SIB	Sociedad de Ingenieros de Bolivia
UGCK	Unidad de Gestión de la Cuenca de Katari
UCB	La Universidad Católica Boliviana
UMSA	Las Universidad Mayor de San Andrés
UDAPE	Unidad de Análisis de Políticas Sociales y Económicas
UPEA	Universidad Pública de El Alto
UF	Ultra Filtración
VAPSB	Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico
VMABCCGDF	Viceministerio de Medio Ambiente Biodiversidad Cambio Climático y de Gestión de Desarrollo Forestal
VRHR	Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego
UTM	Mercado Transversal Universal

## Resumen

La problemática de los metales pesados en cuerpos de agua superficial se ha observado a nivel mundial y ha sido objeto de múltiples estudios. La presencia de metales en concentraciones por encima de los límites establecidos adquiere mayor relevancia cuando estos se encuentran en fuentes de agua para abastecimiento público. Esta investigación toma como área de estudio a la Microcuenca Milluni, la cual se encuentra cercana de actividades mineras pasadas e ilegales que afectan directamente sobre sus recursos hídricos. Milluni está ubicada en el departamento de La Paz y es una fuente natural de agua para dos ciudades importantes de Bolivia, La Paz y El Alto (540 000 habitantes aproximadamente). El objetivo de esta tesis doctoral es estudiar la implementación de la Ósmosis Inversa (OI) operada a bajas presiones como alternativa sostenible de tratamiento para eliminar la contaminación minera en las aguas de Milluni. Adicionalmente se busca contribuir a la gestión de recursos hídricos, con énfasis en el control de la de calidad de agua en la zona.

Esta investigación doctoral se desarrolló en cuatro etapas. En la primera etapa se hizo la caracterización de los cuerpos de agua superficiales para identificar el metal pesado más peligroso presente en Milluni. Para ello, se diseñó un programa de monitoreo considerando las particulares características y limitaciones en la gestión del agua del área. En la segunda etapa del estudio se formularon dos mecanismos para fortalecer la gestión del agua de Milluni, planteando complementar el programa de monitoreo tradicional con la herramienta de teledetección de contaminantes e identificar las partes interesadas de Milluni, para contribuir a la toma de decisiones de la zona. En la tercera etapa de la investigación se diseñó, montó y puso en marcha una planta piloto de OI, tecnología seleccionada debido a su alta eficiencia en la separación de compuestos iónicos del agua. Además, se realizó un diseño de experimentos para estudiar el comportamiento y eficiencia de una membrana tipo ULP 2540 Marca Keensen. Finalmente, en la cuarta etapa se desarrolló un análisis estadístico de los resultados experimentales obtenidos, y la validación de los mismos por medio de un modelo matemático basado en el modelo de concentración de polarización de Spiegler-Kedem. El modelo incluyó un factor de ajuste de temperatura tipo Arrhenius, para obtener una predicción precisa del rendimiento del proceso.

Los resultados de la primera etapa expusieron que, en las dos primeras lagunas de Milluni, las lagunas Pata Khota y Jankho Khota no se presenta contaminación. Sin embargo, en las lagunas tres y cuatro, Milluni Chico y Milluni Grande, se detectó contaminación por metales pesados tóxicos producto de las actividades mineras en la zona. Destacando que Milluni Chico es la laguna más contaminada del sistema. El arsénico fue identificado como ion problema prioritario en Milluni, debido a que las concentraciones detectadas en sus lagunas superan por 100 los límites permitidos. Mediante el análisis estadístico de los resultados del primer año del programa de monitoreo se determinó que la frecuencia de monitoreo adecuada es de, al menos, dos veces al año, a realizarse en los meses más representativos de las estaciones húmeda y seca. El pH y la conductividad se identificaron como parámetros básicos de control de la presencia de iones metálicos detectados fuera de los límites permisibles.

En la segunda etapa se obtuvo que, la combinación de técnicas de monitoreo tradicional y la efectuada mediante teledetección permitieron analizar la calidad del agua de las 4 lagunas de Milluni. Se comprobó nuevamente que el punto más contaminado es la laguna Milluni Chico. También, se realizó la identificación de partes interesadas dentro de la gestión del agua en la región de Milluni. Las 24 partes fueron analizadas y categorizadas de acuerdo a su importancia, poder e influencia en la aprobación e implementación de proyectos relacionados con el agua en la zona.

En la tercera etapa, la planta piloto de OI permitió el estudio del comportamiento y eficiencia de una membrana semipermeable de poliamida con configuración en espiral tipo ULP-2540, marca Kensem de procedencia China. El diseño de experimentos determinó 9 pruebas para analizar la interacción de las 3 variables de entrada al sistema, las cuales fueron presión, caudal y concentraciones del ion metálico problema (arsénico).

En la cuarta etapa se realizaron los experimentos con aguas sintéticas de arsénico. Los índices de rechazo del arsénico fueron superiores al 94% en todos los ensayos confirmando la eficiencia del proceso de OI operando con presiones bajas. Finalmente, se desarrolló un modelo matemático a partir del modelo de flujo unidimensional Concentración-Polarización (CP) de Spiegler-Kedem, incorporando un ajuste de temperatura tipo Arrhenius. En la validación del modelo se analizaron los valores teóricos esperados versus los datos experimentales obtenidos, presentando un error relativo de 4,4% entre ambos.

Esta tesis doctoral concluye que es posible remover el arsénico presente en aguas sintéticas utilizando la OI operada en condiciones sostenibles de presión (presiones bajas). Se ha demostrado que el uso de esta tecnología a baja presión no afecta a la eficiencia de separación del proceso y contribuye a disminuir el costo energético durante la operación. Este aporte es significativo en situaciones donde se cuenta con pocos recursos económicos y existen riesgos inminentes sobre la salud pública y los ecosistemas, como es el caso de la contaminación del agua por arsénico en Milluni, Bolivia.

## Summary

The problem of heavy metals in surface water bodies has been observed worldwide and has been the subject of multiple studies. The presence of metals in concentrations above the established limits becomes more relevant when they are found in water sources for public supply. This research takes the Milluni Micro-basin as a study area, which is close to past and illegal mining activities that directly affect its water resources. Milluni is located in the department of La Paz and is a natural source of water for two important cities in Bolivia, La Paz and El Alto (approximately 540,000 inhabitants). This doctoral thesis aims to study the implementation of Reverse Osmosis (RO) operated at low pressures as a sustainable treatment alternative to eliminate mining contamination in Milluni waters. Additionally, it seeks to contribute to the management of water resources, with an emphasis on the control of water quality in the area.

This doctoral research was developed in four stages. In the first stage, surface water bodies were characterized to identify the most dangerous heavy metal present in Milluni. For this, a monitoring program was started considering the particular characteristics and limitations of water management in the area. In the second stage, two mechanisms were formulated to strengthen Milluni's water management, proposing to complement the traditional monitoring study program with the contaminant remote sensing tool and to identify the invited parties of Milluni to contribute to the decision-making of the area. In the third stage of the investigation, a RO pilot plant was worked on, assembled, and started up, a technology selected due to its high efficiency in separating ionic compounds from water. In addition, a design of experiments was carried out to study the behavior and efficiency of a ULP 2540 Keensen brand membrane. Finally, in the fourth stage, a statistical analysis of the experimental results obtained was presented, and their validation using a mathematical model based on the Spiegler-Kedem polarization concentration model. The model includes an Arrhenius-type temperature adjustment factor to accurately predict the process performance.

The results of the first stage showed that, in the first two Milluni lagoons, the Pata Khota and Jankho Khota lagoons, there is no contamination. However, in lagoons three and four, Milluni Chico and Milluni Grande, contamination by toxic heavy metals were detected as a result of mining activities in the area. Emphasizing that Milluni Chico is the most polluted lagoon in the system. Arsenic was identified as a priority problem ion in Milluni because the concentrations detected in its lagoons exceed the permitted limits by 100%. Through the statistical analysis of the results of the first year of the monitoring program, it was determined that the appropriate monitoring frequency is at least twice a year, to be carried out in the most representative months of the wet and dry seasons. The pH and conductivity were identified as basic parameters to control the presence of metal ions detected outside the permissible limits.

In the second stage, it was obtained that the combination of traditional monitoring techniques and remote sensing made it possible to analyze the water quality of the 4 Milluni lagoons. It was verified again that the most polluted point is the Milluni Chico lagoon. Also, the identification of interested parties within water management in the Milluni region was carried

out. The 24 parties were analyzed and categorized according to their importance, power, and influence in the approval and implementation of water-related projects in the area.

In the third stage, the RO pilot plant allowed the study of the behavior and efficiency of a polyamide semi-permeable membrane with a spiral configuration type ULP-2540, a Kensem brand from China. The design of experiments determines 9 tests to analyze the interaction of the 3 input variables to the system, which were pressure, flow rate, and concentrations of the problem metal ion (arsenic).

In the fourth stage, the experiments were carried out with synthetic arsenic waters. Arsenic rejection rates were greater than 94% in all tests, confirming the efficiency of the RO process operating at low pressures. Finally, a mathematical model was developed from the Spiegler-Kedem Concentration-Polarization (CP) one-dimensional flow model, incorporating an Arrhenius-type temperature adjustment. In the validation of the model, the expected theoretical values were analyzed versus the experimental data obtained, presenting a relative error of 4.4% between the two.

This doctoral thesis concludes that it is possible to remove the arsenic present in synthetic waters using the RO operated under sustainable pressure conditions (low pressures). It has been shown that the use of this technology at low pressure does not affect the separation efficiency of the process and contributes to lower energy costs during operation. This contribution is significant in situations where there are few economic resources and there are imminent risks to public health and ecosystems, as is the case of water contamination by arsenic in Milluni, Bolivia.

## Resum

La problemàtica dels metalls pesats en cossos d'aigua superficial s'ha observat a nivell mundial i ha segut objecte de múltiples estudis. La presència de metalls en concentracions per damunt dels límits establerts adquireix major rellevància quan estos es troben en fonts d'aigua per a abastiment públic. Esta investigació pren com a àrea d'estudi a la Microcuena Milluni, la qual es troba propensa d'activitats mineres passades i il·legals que afecten directament sobre els seus recursos hídrics. Milluni està ubicada en el departament de la Pau i és una font natural d'aigua per a dos ciutats importants de Bolívia, La Pau i L'Alt (540 000 habitants aproximadament). L'objectiu d'esta tesi doctoral és estudiar l'implementació de la Òsmosis Inversa (OI) operada a baixes pressions com a alternativa sostenible de tractament per a eliminar la contaminació minera en les aigües de Milluni. Adicionalment es busca contribuir a la gestió de recursos hídrics, en émfasis en el control de la de qualitat d'aigua en la zona.

Esta investigació doctoral es va desenvolupar en quatre etapes. En la primera etapa es va fer la caracterització dels cossos d'aigua superficials per a identificar el metall pesat més perillós present en Milluni. Per a això, es va dissenyar un programa de monitoreo considerant les particulars característiques i limitacions en la gestió de l'aigua de l'àrea. En la segona etapa de l'estudi es varen formular dos mecanismes per a enfortir la gestió de l'aigua de Milluni, plantejant complementar el programa de monitoreo tradicional en la ferramenta d'teledetecció de contaminants i identificar les parts interessades de Milluni, per a contribuir a la presa de decisions de la zona. En la tercera etapa de l'investigació es va dissenyar, va montar i va posar en marcha una planta pilot de OI, tecnologia seleccionada per la seua alta eficiència en la separació de composts iònics de l'aigua. Ademés, es va realitzar un disseny d'experiments per a estudiar el comportament i eficiència d'una membrana tipu ULP 2540 Marca Keensen. Finalment, en la quarta etapa es va desenvolupar un anàlisi estadístic dels resultats experimentals obtinguts, i la validació dels mateixos per mig d'un model matemàtic basat en el model de concentració de polarització de Spiegler-Kedem. El model incloc un factor d'ajust de temperatura tipu Arrhenius, per a obtindre una predicció precisa del rendiment del procés.

Els resultats de la primera etapa varen expondre que, en les dos primers estanys de Milluni, els estanys Pata Khota i Jankho Khota no es presenta contaminació. No obstant, en els estanys tres i quatre, Milluni Chic i Milluni Gran, es va detectar contaminació per metalls pesats tòxics producte de les activitats mineres en la zona. Destacant que Milluni Chic és l'estany més contaminat del sistema. L'arsènic s'identifique com ion problema prioritari en Milluni, degut a que les concentracions detectades en els seus estanys superen per 100 els límits permesos. Per mig de l'anàlisi estadístic dels resultats del primer any del programa de monitoreo es va determinar que la freqüència de monitoreo adequada és de, a lo manco, dos voltes a l'any, a realisar-se en els mesos més representatius de les estacions humida i seca. El pH i la conductivitat es varen identificar com a paràmetros bàsics de control de la presència de ions metàllics detectats fora dels límits permissibles.

En la segona etapa es va obtindre que, la combinació de tècniques de monitoreo tradicional i l'efectuada per mig d'teledetecció varen permetre analisar la qualitat de l'aigua de les 4 estanys de Milluni. Es va comprovar novament que el punt més contaminat és l'estany Milluni Chic.

També, es va realitzar l'identificació de parts interessades dins de la gestió de l'aigua en la regió de Milluni. Les 24 parts varen ser analisades i \*categorizadas d'acort a la seua importància, poder i influència en l'aprovació i implementació de projectes relacionats en l'aigua en la zona.

En la tercera etapa, la planta pilot de OI va permetre l'estudi del comportament i eficiència d'una membrana semipermeable de poliamida en configuració en espiral tipo ULP-2540, marca Kensem de procedència China. El disseny d'experiments determine 9 proves per a analitzar l'interacció de les 3 variables d'entrada al sistema, les quals varen ser pressió, cabal i concentracions del ion metàlic problema (arsènic).

En la quarta etapa es varen realitzar els experiments en aigües sintètiques d'arsènic. Els índexs de rebuig de l'arsènic varen ser superiors al 94% en tots els ensajos confirmat l'eficiència del procés de OI operant en pressions baixes. Finalment, es va desenrollar un model matemàtic a partir del model de flux unidimensional Concentració-Polarisació (CP) de Spiegler-Kedem, incorporant un ajust de temperatura tipo Arrhenius. En la validació del model es varen analitzar els valors teòrics esperats versus les senyes experimentals obtingudes, presentant un error relatiu de 4,4% entre abdós.

Esta tesis doctoral conclou que és possible remoure l'arsènic present en aigües sintètiques utilisant la OI operada en condicions sostenibles de pressió (pressions baixes). S'ha demostrat que l'us d'esta tecnologia a baixa pressió no afecta a l'eficiència de separació del procés i contribuïx a disminuir el cost energètic durant l'operació. Este aporte és significatiu en situacions a on es conta en pocs recursos econòmics i existixen riscs imminents sobre la salut pública i els ecosistemes, com és el cas de la contaminació de l'aigua per arsènic en Milluni, Bolívia.

## 1. Introducción

Los países en desarrollo tienen las tasas más altas de pobreza y una mayor vulnerabilidad a la degradación ambiental, confirmando que la pobreza surge de interacciones complejas entre factores sociales y ambientales (Haider, et al., 2018). El agua potable está indiscutiblemente vinculada a la salud pública, y ésta a su vez con el desarrollo sostenible (Pereira y Marques, 2021). El agua y el saneamiento son un Derecho Humano desde el 28 de julio de 2010, por la Resolución 64/292 de Naciones Unidas (ONU, 2010; Cairns, 2018). Si embargo, las estimaciones revelan que alrededor del 40% de la población no tiene acceso a servicios de agua potable y saneamiento, nuevamente los países en desarrollo sufren el mayor impacto de esto (Langergraber & Muellegger, 2005). Por tal motivo, la búsqueda de soluciones para la problemática hídrica se presentan como prioridades en el Objetivo 6, “Agua Limpia y Saneamiento”, dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que enmarcan la agenda 2030 (United Nations, 2015).

Conociendo que el agua es un factor esencial para la vida y el desarrollo en la Tierra, su contaminación se ha convertido en un problema cada vez más importante (Tkaczyk et al, 2020). Actualmente, se invierten considerables cantidades de tiempo, esfuerzo y dinero en controlar, proteger, gestionar y restaurar los recursos hídricos superficiales, reconociendo la importancia del agua para la calidad del medio ambiente, el desarrollo económico y el bienestar social de las naciones (Rivas y Maldonado, 2011; Ha et al., 2016; Slaughter et al., 2017). Por ello, el estudio de calidad de los cuerpos de agua superficiales para su preservación y/o restauración, al ser de gran relevancia para la existencia de vida en la tierra, es el objeto fundamental de estudio de esta tesis doctoral.

En los siguientes apartados se expone en primer lugar la situación actual de los recursos hídricos en Bolivia. En segundo lugar, se aborda la contaminación de fuentes de agua con metales pesados y sus implicaciones en la salud. En tercer lugar, se enfatiza en la problemática del arsénico, al ser un metal pesado considerado peligroso para la salud pública. En cuarto lugar, se presenta el estado del arte de las tecnologías de remoción de metales pesados aplicadas en el mundo. Finalmente, se describen los procesos de filtración por membrana, haciendo especial énfasis en la ósmosis inversa.

### 1.1. Recursos hídricos en los Andes de Bolivia

Según el Foro Consultivo Científico y Tecnológico (2012), Bolivia en América Latina tiene una de las mayores ofertas de agua dulce por habitante, aproximadamente 50,000 m<sup>3</sup>/hab./año. Sin embargo, su potencial hídrico en sus macrocuencas, tanto superficial como subterráneo, no ha sido completamente determinado ni explorado. Existen algunos estudios a nivel nacional que proporcionan conocimiento sobre el estado de los recursos hídricos, la Tabla 1 expone un resumen de los documentos disponibles.

Tabla 1. Estudios relacionados sobre recursos hídricos en Bolivia

Estudio	Detalle	Referencia
Balace hídrico superficial de Bolivia	Este estudio es una síntesis de los términos del balance hídrico del país. Esta publicación es una visión sinóptica de las distribuciones de los recursos hídricos que pueda colaborar a la gestión del agua.	PHICAB, y Roche, 1992
Disponibilidad, uso y calidad de los recursos hídricos en Bolivia	El documento presenta un diagnóstico preliminar del estado para el año 2002 sobre el uso, la disponibilidad y la calidad de los recursos hídricos, el cual sirvió como guía durante el proceso de definición de las políticas hídricas de Bolivia. También, expone algunas pautas para el desarrollo de un Sistema de Información Geográfica sobre el agua en Bolivia, como una herramienta para la planificación de su uso.	Van Damme, CGIAB y CONIAC, 2002
Inventario Nacional de Presas	Esta publicación permite contar con información descriptiva de las características de diseño, construcción, uso y funcionamiento de las presas en Bolivia. Siendo las presas importantes dentro del sistema de gestión del agua.	VRHR-MMAyA, 2010
Manual para el Inventario y Planificación del Uso de Fuentes de Agua en Microcuencas	El documento presenta un manual metodológico para el Inventario y Planificación del Uso de Fuentes de Agua en Microcuencas (IPFA) para promover y contribuir una gestión sustentable del agua a nivel local (microcuencas), para la satisfacción de las necesidades hídricas de las poblaciones	VRHR-MMAyA, 2014
Compendio de la situación de los recursos hídricos en las ciudades capitales departamentales de Bolivia.	El estudio es un compendio del uso actual de los recursos hídricos en Bolivia, con énfasis en la administración del ciclo del agua en las ciudades capitales de los nueve departamentos del país. Contiene algunas conclusiones y recomendaciones para las autoridades gubernamentales bolivianas que regulan y administran el agua en el país.	Urquidí-Barrau, F., 2015.
Balace Hídrico Superficial de Bolivia	Este documento presenta la actualización del Balance Hidrológico de Bolivia para utilizarlo como herramienta para la evaluación y planificación del recurso hídrico superficial.	MMAyA, 2016
Agua y saneamiento en el Estado Plurinacional de Bolivia	Este informe expone un conjunto de asuntos específicos del sector de Agua Potable y Saneamiento (APyS) en Bolivia con el propósito de ayudar a identificar las barreras más importantes que impiden desarrollar el sector y ofrecer, al mismo tiempo, opciones para construir una agenda de prioridades estratégicas para los próximos años.	Mejía, A., Uzcátegui, G., y Valverde, O., 2017
Plan Sectorial de Desarrollo Integral del Ministerio de Medio Ambiente y Agua	Este estudio presenta el estado actual de la gestión integral del agua, en Bolivia. Presenta diagnóstico sobre cuencas y sus recursos hídricos, agua y saneamiento. También presenta un diagnóstico sobre el tratamiento de aguas residuales en los últimos años.	MMAyA, 2019
Plan Estratégico de Sostenibilidad de Fuentes de Agua	Presenta una estrategia dirigida a acompañar la implementación de las políticas públicas de acceso al agua potable. Busca contribuir en tres líneas la preservación y protección de las fuentes de agua, agua no contabilizada y tratamiento de agua residual. Sin embargo, no presenta el estado actual de sus tres líneas.	AAPS, 2020

Fuente: Elaboración propia, 2021.

De la Tabla 1 se observa que si bien existen estudios sobre los recursos hídricos disponibles en Bolivia, la información específica sobre calidad del agua en áreas gravemente contaminadas y que es lo que se está haciendo al respecto, aún no están disponible. Esta situación genera incertidumbre sobre el tipo de agua a la que se tiene acceso. El informe de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID, 2020) indica que, la falta de acceso a una agua con calidad adecuada y en cantidad suficiente es uno de los principales factores del aumento de enfermedades en la población boliviana.

La OMS afirma que solo el 50% de Bolivia tiene acceso a agua potable (OMS, 2015). La contaminación de las principales fuentes de agua para abastecimiento empeora la situación. También existen problemas relacionados a la capacidad de almacenamiento del recurso, ya que solo se tiene infraestructura disponible para acopio de 56 m<sup>3</sup> por habitante. En cuanto a la gestión del recurso se expone que entre el 42% y el 61% del agua potable no es registrada por operadores locales, debido a deficiencias en los sistemas de control y operación (OMS, 2017a).

Los Andes de Bolivia, una región altiplánica, presenta problemas en la gestión de sus recursos hídricos, lo que a su vez genera un problema de escasez de agua en la zona (Rivero et al., 2020). La preservación y el seguimiento de las fuentes de agua potable son muy importantes para evitar la incertidumbre sobre el acceso futuro al agua potable (Alvizuri, et al., 2019a). El informe “Agua y saneamiento en el Estado Plurinacional de Bolivia” indica que los sistemas de agua y saneamiento en las principales áreas urbanas son administrados por empresas operadoras que muestran un adecuado control entre las conexiones de agua y alcantarillado. Sin embargo, en las zonas rurales, la administración de los servicios es local, donde los sistemas de tratamiento o depuración en muchos casos no están adecuadamente controlados, lo que provoca la contaminación de las fuentes de agua potable (Corporación Andina de Fomento, 2017).

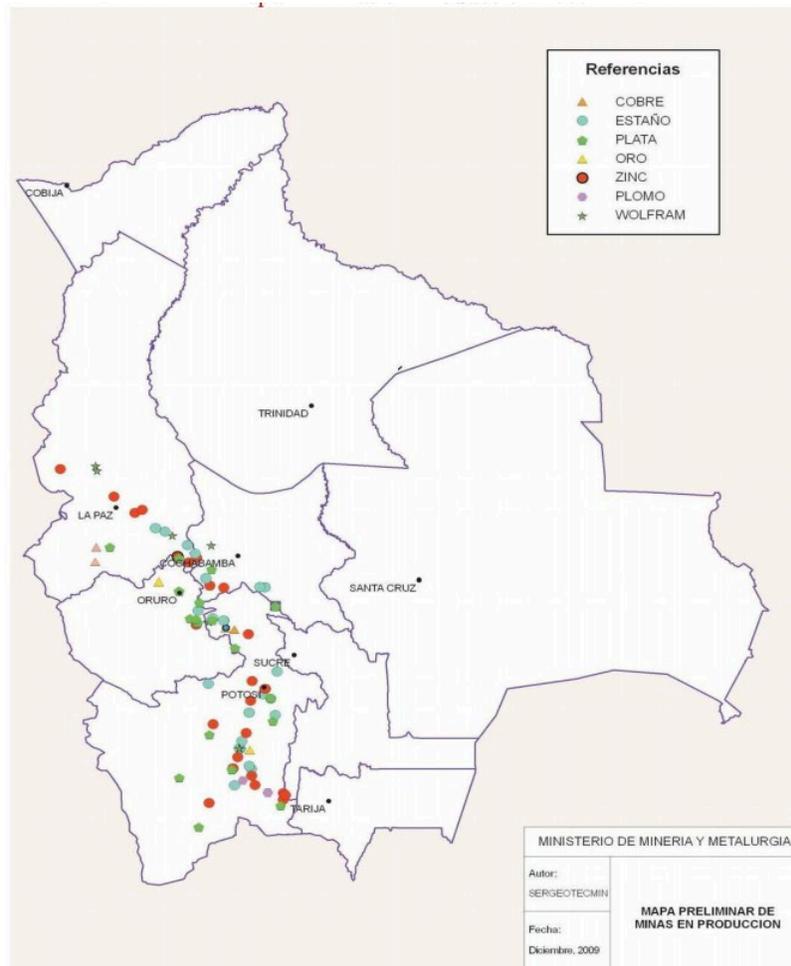
Actualmente, la cuenca es reconocida como la unidad territorial más adecuada para la gestión eficiente de los recursos hídricos (Saavedra, 2018). Pero los límites políticos/administrativos no siempre coinciden con los límites territoriales de las cuencas hidrológicas, haciendo en muchos casos difícil el proceso de aprovechamiento del ciclo hidrológico (Dourojeanni et al., 2002). Para garantizar el acceso a agua potable, los sistemas de manejo deben proporcionar una gestión integral y preventiva de los recursos hídricos, en la que todos los involucrados colaboren (OMS, 2017b).

## 1.2. Contaminación de aguas superficiales con metales pesados y su efecto en la salud

Múltiples intrusiones magmáticas debajo de la Cordillera Oriental y cinturón de empuje plegado de La Cordillera de los Andes han llevado a una mineralización generalizada en Bolivia (Miller y Villarroel, 2011). Esto ha provocado el desarrollo intenso de actividades mineras en varias regiones de Bolivia, causando importantes daños ambientales (Chatelain y Wittinton, 1992). A pesar de ello, la minería de plata, oro, estaño, plomo, zinc y antimonio, entre otros, sigue siendo un componente importante de la economía boliviana (Miller y Villarroel, 2011). Las zonas mineras son las principales fuentes antropogénicas de

contaminación del medio ambiente por metales pesados, donde la calidad del agua se ve afectada (Institute of Environmental Conservation and Research [INECAR], 2000). Los metales pesados pueden ser transportados por corrientes de agua, ya sea disueltos o como parte de materiales arrastrados, los cuales pueden acumularse en los sedimentos y/o infiltrarse en las aguas subterráneas (Duruibe et al., 2007). En la Figura 1 se presenta un mapa de las minas en producción en el área del altiplano Boliviano para el año 2009. El mapa fue efectuado por el Servicio Geológico y Técnico de Minas (SERGEOTECMIN) y presentado en el Diagnóstico Sectorial de Minería por la Unidad de Análisis de Políticas Sociales y Económicas (UDAPE) en el 2015.

Figura 1. Minas en producción



Fuente: SERGEOTECMIN en UDAPE, 2015.

De la Figura 1 se observa que las minas en producción en una mayoría se encuentran en los departamentos de Potosí, Oruro y La Paz, encontrándose en la región del altiplano de Bolivia. Los estudios Miller y Villaroel (2011), Perreault (2013) y Pavlonis et al. (2017) han evaluado y expuesto el impacto negativo de la minería hacia la salud y el medio ambiente en los Andes de Bolivia. Existen también otros estudios que exponen casos específicos de contaminación minera en lugares de gran altitud cercanos a recursos hídricos superficiales, la Tabla 2 presenta un detalle de los casos.

Tabla 2. Estudios de contaminación minera en el Altiplano Boliviano

Estudio	Departamento	Cuerpo de agua afectado	Referencia
Fuentes, distribución y almacenamiento de metales pesados en el Río Pilcomayo, Bolivia	Potosí	Río Pilcomayo	Hudson-Edwards et al., 2001
Efectos de la contaminación por metales pesados en el sistema del río Pilcomayo, Bolivia, en las poblaciones humanas residentes	Potosí	Río Pilcomayo	Hudson-Edwards et al., 2003
Influencia de las actividades mineras en el norte de Potosí, Bolivia en la calidad del agua del río chayanta y sus consecuencias	Potosí	Río Chayanta	Rojas y Vandecasteele, 2007
Drenaje ácido de mina en Cerro Rico de Potosí II: Degradación severa de la cuenca del Alto Río Pilcomayo	Potosí	Río Pilcomayo	Strosnider et al., 2011
Identificación de la causa de la contaminación por cadmio del suelo con modelos de balance de masa de Monte Carlo: un estudio de caso de Potosí, Bolivia.	Potosí	Río Chayanta	Oporto et al., 2012
Cultivos de papa contaminados con metales y riesgo potencial para la salud humana en el altiplano minero boliviano	Potosí	Río Pilcomayo	Garrido et al., 2017
Composición elemental y mineral de sales de áreas naturales y afectadas por minas seleccionadas en los lagos Poopó y Uru-Uru (Bolivia)	Oruro	Lagos Poopó y Uru-Uru en Oruro	Fernández et al., 2014
Exposición y vulnerabilidad de la comunidad a la calidad del agua y disponibilidad: un estudio de caso en Pazña, zona afectada por la minería Municipio, Cuenca del Lago Poopó, Altiplano Boliviano	Oruro	Efluentes del Lago Poopó	French et al., 2017
Caracterización de la contaminación potencial por mercurio en el área minera de oro de Apolobamba, Bolivia	La Paz	Río Sunchullí-Viscachan	Acosta et al., 2011
Contenido de metal y evaluación de riesgo ambiental en sitios mineros de gran altitud	La Paz	Río Sunchulli	Muñoz et al., 2013

Fuente: Elaboración propia, 2021

Los estudios de la Tabla 2 demuestran el impacto negativo de la minería en diferentes cuerpos de agua superficial en los andes de Bolivia. Para realizar un control de los cuerpos de agua superficiales se necesita un monitoreo constante, con el fin de evitar la degradación de su calidad y la disminución de su disponibilidad para la población (Da Rocha et al., 2018).

El área de estudio que toma esta investigación es la Microcuenca Milluni. Los cuerpos de agua superficiales de Milluni se han y se ven afectados por minas ilegales, operativas y abandonadas, las cuales por sus drenajes ácidos contaminan sus lagunas con metales pesados (Salvarredy-Aranguren et al., 2008). Está comprobado que el consumo de metales pesados representa un riesgo inminente para la salud pública (Wang et al., 2005; Zhu et al., 2019).

Por ello, Milluni cobra especial importancia debido a que sus recursos hídricos superficiales son una importante fuente de agua para el departamento de La Paz (EPSAS, 2013). Milluni abastecería aproximadamente a 540 000 habitantes del departamento de La Paz, el cual es el segundo departamento más poblado de Bolivia (INE, 2020).

El término "metal pesado" se aplica a un grupo de elementos que tienen pesos atómicos entre 63,5 y 200,6 y una densidad relativa superior a 5,0. Algunos ejemplos son arsénico (As), plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd), cromo (Cr), zinc (Zn), manganeso (Mn), cobre (Cu), selenio (Se), plata (Ag), antimonio (Sb) y Hierro (Fe) (Srivastava & Majumder, 2008). Debido a su movilidad en ecosistemas acuáticos y su toxicidad para formas de vida superiores, los metales pesados en suministros de agua superficial y subterránea se han priorizado como los principales contaminantes inorgánicos del medio ambiente (Thayer y Brinckman, 1982).

La toxicidad de los metales pesados ha demostrado ser una gran amenaza para los seres humanos y existen varios riesgos asociados con estos (Jaishankar et al., 2014). En particular, los estos metales se consideran contaminantes peligrosos en las reservas de agua dulce (Alvizuri et al., 2019a). Los iones metálicos son necesarios en ciertas cantidades para mantener una buena salud, pero en grandes cantidades son perjudiciales (Raja Rajeshwari & Namburu, 2014). Los límites máximos de concentración (LMC) de metales pesados en el agua potable han sido establecidos por organizaciones internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA), entre otras. Los LMC han sido adoptados por diferentes naciones, como es el caso de Bolivia (Alvizuri et al., 2021b). La Tabla 1 expone los LMC para algunos metales pesados y sus efectos en la salud.

Tabla 3. LMC de metales pesados

Metales pesados	LMC			Efectos potenciales para la salud de la exposición a largo plazo por encima del LMC
	EPA mg/L	OMS mg/L	España mg/L	
As	0,01	0,01	0,01	Daños en la piel o problemas con sistemas circulatorios, y puede tener mayor riesgo de contraer cáncer
Cr	0,1	0,05	0,05	Dermatitis alérgica
Hg	0,002	0,001	0,001	Daño en los riñones, Afecta al sistema nervioso central y al sistema endocrino. Altas exposiciones prolongadas pueden producir daños neuronales y la muerte.
Mn	0,05	0,05	0,05	A muy altas exposiciones puede producir problemas neurológicos
Pb	0,015	0,01	0,01	Lactantes y niños: Retrasos en desarrollo físico o mental; los niños pueden mostrar ligeros déficits en la capacidad de atención y el aprendizaje de habilidades. Adultos: problemas renales; Alta presión sanguínea
Zn	5	3	NE	La ingestión de niveles altos de cinc durante varios meses puede producir anemia, daño del páncreas y disminución del tipo de colesterol beneficioso (HDL) en la sangre

NE: No Especificado.

Fuente: Elaboración propia basado en OMS (2017b), EPA (2009) y Ministerio de Sanidad de España (2013).

Las concentraciones por encima de los LMC pueden dañar el funcionamiento de órganos vitales, incluido cerebro, pulmones, riñones e hígado, y también pueden afectar la composición de la sangre. La exposición prolongada puede generar problemas físicos, musculares y neurológicos degenerativos semejantes a enfermedades como la esclerosis múltiple, la enfermedad de Parkinson, la enfermedad de Alzheimer y la distrofia muscular (Jaishankar et al., 2014). La exposición prolongada repetida a algunos metales y sus compuestos también se han relacionado con cánceres humanos (Raja Rajeshwari & Namburu, 2014).

### 1.3. Problemática del arsénico

La contaminación del agua por arsénico se ha observado en los cinco continentes (Litter et al., 2010; Ahmad y Bhattacharya, 2019). El arsénico es considerado altamente tóxico cuando su concentración en el agua supera los LMC según la OMS (2017b). También, se han observado graves efectos sobre la salud de poblaciones de todo el mundo que ingieren arsénico durante largos períodos de tiempo (EPA, 2006). El arsénico puede dañar la piel, generar trastornos vasculares y del sistema nervioso, es peligroso en sistemas vivos y en realidad no representa ninguna función metabólica beneficiosa (Podgorski y Berg, 2020). Además, el As está clasificado como carcinógeno humano dentro del Grupo I según La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, 2004). En consecuencia, la contaminación del agua por arsénico ha sido señalada como la catástrofe del siglo 2020 por grupos de investigadores y autoridades (Shakoor et al, 2017; da Silva et al., 2019; Hare et al., 2019).

El arsénico normalmente se encuentra en la naturaleza combinado con hierro, oxígeno, y azufre (Jain y Ali, 2000). Las actividades antropogénicas, las fuentes geográficas y la actividad biológica son los orígenes del arsénico inorgánico y orgánico en los ecosistemas. De hecho, su interacción con el medio ambiente juega un papel vital en la proliferación de arsénico dentro de los sistemas del suelo y agua (Dehbandi et al., 2019). Las reacciones de oxidación-reducción aumentan la solubilidad del arsénico, fenómeno que lo hace más móvil en el medio a través del sistema de agua (Jain y Ali, 2000). Por otro lado, la movilidad de arsénico es asociada también con factores antropogénicos, como la minería (Polya y Middleton, 2017). Actualmente, debido al agotamiento de los minerales de fácil acceso y comerciables, se explotan yacimientos de mayor profundidad donde existen mayores concentraciones de arsénico dentro de la estructura de minerales sulfurosos (Dehbandi et al., 2019).

El estudio de Bundschuh et al. (2012) expone que el arsénico está presente en 14 de 20 países latinoamericanos, estando Bolivia entre estos. Como muchos de los países en desarrollo, Bolivia es altamente vulnerable a los impactos negativos de la minería sobre diferentes factores ambientales, especialmente el agua. Como se mencionó en el apartado 1.2, la principal problemática de la minería asociada a la calidad del agua es la contaminación por metales pesados, entre los cuales el arsénico destaca por su alta toxicidad. Estudios de cuerpos de agua superficiales y subterráneos de Bolivia, han corroborado la presencia de As en concentraciones superiores a los límites establecidos por normativas nacionales e internacionales (Salvarredy-Aranguren et al., 2008; Ramos et al, 2012; Escalera y Ormachea,

2017). Esta información denota que, la presencia de arsénico en Bolivia, no solo existe en sectores alejados y con poca población, sino también en sectores peri-urbanos y urbanos. Esta problemática se agrava por el acceso al agua de manera directa, sin los suficientes controles a los niveles de contaminación establecidos para el consumo.

La eliminación de arsénico de las aguas no es una tarea fácil. Aspectos económicos son quizás, los factores más importantes para la selección de la tecnología de tratamiento, teniendo en cuenta el tamaño de la población, la incidencia de enfermedades crónicas, falta de agua potable, condiciones de pobreza, y otras variables socioeconómicas (Kemper y Minnatullah, 2005). Existen alternativas novedosas e interesantes para la remoción de arsénico del agua (Sarkar y Paul, 2016; Alka et al., 2021). Sin embargo, en muchos casos el costo de las técnicas sofisticadas es alto y su implementación en áreas vulnerables y de bajos recursos se presenta como un problema.

#### 1.4. Tecnologías para remoción de metales pesados

Las opciones de remediación para aguas contaminadas con metales pesados incluyen: atenuación natural monitoreada; intervención física para minimizar la liberación de contaminantes; y tecnologías de tratamiento de agua activas y pasivas (Younger, 2004). Los siguientes puntos describen las tecnologías de tratamiento de agua, tanto activas como pasivas, que se han utilizado ampliamente para eliminar metales pesados del agua.

- a) **Precipitación química**, es uno de los métodos mejor establecidos y más utilizados para eliminar metales de las aguas residuales (Gautam et al., 2016). Como su nombre lo indica, los productos químicos son utilizados para reaccionar con iones de metales pesados y formar precipitados insolubles que posteriormente pueden ser separados del agua por filtración o sedimentación (Fu y Wang, 2011; Zhao et al., 2016). Los procesos de precipitación química convencionales incluyen la precipitación por hidróxidos y sulfuros. Como alternativa, muchas empresas utilizan precipitantes quelantes para precipitar metales pesados de sistemas acuosos (Matlock et al., 2002). Mirbagheri y Hosseini (2005) utilizó  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y  $\text{NaOH}$  para eliminar los iones  $\text{Cu}(\text{II})$  y  $\text{Cr}(\text{VI})$  de las aguas residuales, reduciendo la concentración de cromato de  $30 \text{ mg / L}$  a  $0.01 \text{ mg / L}$  y cobre de  $48.51 \text{ mg / L}$  a  $0,694 \text{ mg / L}$ . Özverdi y Erdem (2006) investigaron el uso de pirita y sulfuro de hierro sintéticos para eliminar  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  y  $\text{Pb}^{2+}$ .
- b) **Intercambio iónico**, es un método ampliamente utilizado para eliminar metales pesados de aguas residuales utilizando resinas de intercambio iónico sólidas sintéticas o naturales, que tienen la capacidad de intercambiar cationes con metales en las aguas residuales (Cavaco et al.2007; Fu & Wang, 2011). Las resinas sintéticas se utilizan comúnmente por su eficiencia y capacidad de eliminación absoluta. Por ejemplo, Alyüz y Veli (2009) demostraron la eliminación de  $\text{Ni}$  y  $\text{Zn}$  de soluciones acuosas utilizando resinas sintéticas. Sin embargo, los minerales de silicato de origen natural y las zeolitas naturales también se han aplicado ampliamente debido a su costo relativamente bajo y a sus excelentes capacidades de adsorción de metales en diferentes condiciones experimentales (Ostroski et al., 2009).

- c) **Adsorción**, es un proceso en el que un solo o un grupo de iones/compuestos se acumula en la superficie de otro sólido o líquido (Silver and Phung, 1996). La sustancia sobre la que la adsorción tiene lugar se conoce como adsorbente y la sustancia que se adsorbe se llama adsorbato (Gautam et al., 2016). La efectividad de este proceso depende del material adsorbente (Zhao et al., 2016). Por ejemplo, el carbón activado (CA) es el adsorbente más usado, y un gran número de investigadores han estudiado la CA en el contexto de remoción de metales (Jusoh et al., 2007; Kang et al., 2008).

La búsqueda de otros adsorbentes de bajo costo y fácilmente disponibles para eliminar iones metálicos se ha convertido en un importante foco de investigación. Hasta la fecha, se han informado varios estudios sobre el uso de adsorbentes de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales con metales pesados (Fu and Wang, 2011). Koby (2004) estudió la eliminación de Cr (VI) de soluciones acuosas por adsorción sobre CA de cáscara de avellana. Sud et al. (2008) estudio material de desecho de agricultura como un adsorbente potencial para la eliminación de iones metálicos del agua. Wan Ngah y Hanafiah, (2008) estudiaron la eliminación de metales pesados de aguas residuales que utilizando desechos vegetales químicamente modificados como adsorbentes. De hecho, algunos de los adsorbentes modificados muestran buenas capacidades de adsorción con respecto a Cd, Cu, Pb, Zn y Ni.

- d) **Biosorción**, es un proceso aplicado en las últimas décadas. Se lo ha identificado como un proceso prometedor debido a los bajos costos que presenta en comparación de las técnicas convencionales (Apiratikul and Pavasant, 2008). Los biosorbentes típicos se pueden derivar de tres fuentes:

- Biomasa muerta, como cáscaras de papa (Aman et al., 2008);
- Biomasa de algas, como la macroalga verde marina seca *Chaetomorpha linum*, que se utilizó para la biosorción de  $\text{Cu}^{2+}$  y  $\text{Zn}^{2+}$  (Ajjabi & Chouba, 2009)
- Biomasa microbiana, como *Escherichia coli* usada en el proceso de biosorción en el estudio de Souiri et al., (2009).

Los biosorbentes tienen una amplia gama de fuentes, sin embargo, la investigación sobre la optimización bajo una variedad de condiciones de operación todavía se encuentra en etapas experimentales (Fu y Wang, 2011).

- e) **Humedales**, existen dos tipos de humedales, naturales y artificiales. Los humedales naturales se caracterizan por suelos saturados de agua con vegetación de soporte (Yadav & Jamal, 2016). En contraste, los humedales artificiales utilizan sustratos orgánicos para apoyar la eliminación de metales disueltos (Ayora et al., 2016).

Los humedales se clasifican en términos generales como aeróbicos o anaeróbicos. Los humedales aeróbicos son poco profundos estanques generalmente diseñados para promover la precipitación de óxidos o hidróxidos metálicos proporcionando aireación y tiempos de retención adecuados. Cuentan con especies de plantas emergentes y contienen un nivel de agua aproximado de 15 a 25 cm para mantener las condiciones aeróbicas (Sheoran & Sheoran, 2006). Este enfoque requiere un tiempo de retención más prolongado y una gran superficie para lograr el tratamiento del agua. Los humedales anaeróbicos son típicamente modificaciones

de humedales naturales con vegetación emergente, pero también contienen 30-60 cm de capa orgánica sobre un lecho de piedra caliza de 15-30 cm. Alternativamente, se puede aplicar una capa mixta de materia orgánica y piedra caliza a una profundidad de aproximadamente 50-100 cm (Zipper et al., 2011). Algunos ejemplos que demuestran cómo este tratamiento pasivo se ha desarrollado recientemente se encuentran en el estudio realizado por Pat-Espadas et al. (2018).

- f) **Coagulación y floculación.** La coagulación es la desestabilización de coloides por la neutralización de las fuerzas que los mantienen separados. Muchos coagulantes se utilizan ampliamente en procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales como aluminio, sulfato ferroso y cloruro férrico. La floculación implica la acción de una mezcla rápida y luego lenta para generar la unión de las partículas en grandes aglomerados o grupos que pueda ser removidos con mayor facilidad (Fu y Wang, 2011).  
Generalmente, la coagulación y la floculación no pueden eliminar completamente los metales pesados de aguas contaminadas (Chang y Wang, 2007). Por tanto, estos procesos deben estar seguidos por otras técnicas de tratamiento para ser completamente exitosas. Por ejemplo, Plattes et al. (2007) empleó los procesos de precipitación, coagulación y floculación utilizando cloruro férrico para eliminar el tungsteno de las aguas. Las condiciones ácidas ( $\text{pH} < 6$ ) demostraron ser más exitosas en su estudio, eliminando del 98 al 99% del tungsteno de las aguas tratadas.
- g) **Flotación,** originaria de la industria de procesamiento de minerales, la flotación se puede emplear para separar metales pesados de las fases líquidas a través de la unión de burbujas. Flotación por aire disuelto (FAD), flotación iónica y la flotación por precipitación son las principales técnicas utilizadas para la eliminación de iones metálicos de soluciones acuosas (Fu y Wang, 2011). Los sistemas DAF son los más utilizados para la purificación de aguas contaminadas con metales (Gautam et al., 2016). Estos sistemas han estudiado desde la década de 1990 (Waters, 1990) y siguen siendo objeto de un desarrollo continuo.
- h) **Filtración por membrana,** es un proceso de separación impulsado por un diferencial de presión, puede mejorarse tratando las membranas con materiales químicos adecuados (Zhao et al., 2016). Los procesos de membrana utilizados para eliminar metales de las aguas contaminadas son la ultrafiltración (UF), la nanofiltración (NF), la ósmosis inversa (OI) y la electrodiálisis (ED)(Fu y Wang, 2011; Liu et al., 2011).). En el apartado 1.5. se describirán y compararán los procesos membranas.
- i) **Tratamientos electroquímicos,** se trata del recubrimiento de iones metálicos en la superficie de un cátodo por medio del cual pueden recuperarse metales en el estado de metal elemental. Dadas las estrictas normativas medioambientales con respecto a la descarga de aguas residuales, las tecnologías electroquímicas se han ido desarrollando en todo el mundo cobrando importancia durante las dos últimas décadas (Wang et al., 2007). Por ejemplo, Chartrand y Bunce (2003), describieron la electrólisis de soluciones de Drenaje Acido de Mina sintético que contenía Fe, Cu, Ni y mezclas de estos metales, demostrando que los iones se pueden eliminar con éxito mediante este proceso.

La Tabla 4 resume las ventajas y limitaciones de las técnicas revisadas para el tratamiento de aguas con metales pesados. La selección de las técnicas de tratamiento depende de las concentraciones iniciales del metal, la composición de las aguas contaminadas, la inversión de capital, los costos operativos, la flexibilidad y/o confiabilidad de la planta y el impacto ambiental que podrían tener (Kurniawan et al., 2006).

Tabla 4. Comparación de procesos para la remoción de metales pesados

Proceso	Ventajas	Limitaciones
Precipitación química	Bien conocida Fácil de aplicar	Genera lodos y subproductos peligrosos Se utilizan productos químicos peligrosos en el proceso No es económico cuando las concentraciones de iones metálicos son altas debido a la gran demanda de productos químicos
Intercambio Iónico	Alta eficiencia de remoción Proceso rápido	Requiere pretratamiento Altos costos operativos Altos costos involucrados en la regeneración de resinas Para grandes cantidades de iones mono y divalentes que compiten, el intercambio iónico es casi totalmente ineficaz
Adsorción	Bajo costo en ciertos casos Fácil de operar Re-uso y reciclaje del sorbente	La eficacia depende de los materiales adsorbentes Generación de adsorbentes con metales pesados Dificultad para separar adsorbentes y metales pesados
Biosorción	Bajo costo Fácil operación Rápida sorción	La eficacia depende de los materiales adsorbentes Generación de biomasa con metales pesados Dificultad para separar adsorbentes y metales pesados
Humedales	Bajo costo de mantenimiento y operación	Alto costo inicial de construcción dependiendo de las condiciones para el crecimiento de las plantas Generación de biomasa con metales pesados Largo tiempo de remediación Requiere un área grande
Coagulación y Floculación	Se pueden tratar varios metales pesados	Debe ir seguido de otras técnicas de tratamiento para que sea completamente eficaz
Flotación	Alta selectividad de metales Tiempos de retención más cortos	Alto costo de capital inicial Altos costos de mantenimiento y operación. Todavía en estudio y desarrollo
Filtración por membrana	Altamente eficiente Alta selectividad de separación Ahorro de espacio Fácil operación Proceso de separación rápido	Requiere pretratamiento Altos costos operativos Alto consumo de energía
Tratamientos Electroquímicos	Bajos costos operativos	Gran inversión de capital Alto consumo de energía

Fuente: Elaboración propia basado en Gaikwad y Gupta (2008); Akpor y Muchie (2010); Fu y Wang (2011); Simate y Ndlovu (2014); Yadav y Jamal (2016); Zhao et al. (2016); y Kefeni et al. (2017).

Específicamente para la remoción del arsénico en los últimos años se han realizado extensos estudios sobre diferentes técnicas, buscando eliminar las concentraciones peligrosas del metal pesado en el agua. Los métodos actualmente examinados en experimentos de laboratorio y de campo son el intercambio iónico, la fitorremediación, la adsorción, la precipitación química y la filtración por membranas (Litter et al., 2010 ; Alka et al., 2021). Aunque estos procesos son útiles para eliminar el arsénico del agua, cada uno tiene sus inconvenientes importantes (Tabla 4), en particular en lo que respecta a costos y eficiencia. La Tabla 5 presenta en resumen de tratamientos aplicados para la remoción del As del agua.

Tabla 5. Tratamientos para la remoción de As

Proceso	Detalle	Eficiencia de remoción	Referencia
Adsorción	Uso de sólidos para eliminar sustancias de una solución líquida.	95%	Ghosal et al., 2018 Wang et al., 2018 Najib y Christodoulatos, 2019
Intercambio iónico	Iones de fase sólida compartidos con igual número de iones del agua contaminada	97,9%	Laatikainen et al., 2016 Hu y Boyer, 2018 Karakurt, 2019
Fitorremediación	Utiliza plantas para abordar la contaminación del suelo.	97%	Shukla y Srivastava, 2019 Yan et al., 2019
Precipitación química	Forma una sustancia sólida separable de una solución; elimina los metales disueltos (iónicos) de las soluciones, como las aguas residuales procesadas que contienen metales tóxicos.	95%	Senn et al., 2018 Vega-Hernandez et al., 2019
Filtración por membrana	La estructura de la membrana actúa como una barrera selectiva que permite el paso del movimiento de las moléculas con la ayuda de una fuerza impulsora que produce grandes volúmenes residuales.	98%	Chang et al., 2014 Ungureanu et al., 2015

Fuente: Elaboración propia, 2022.

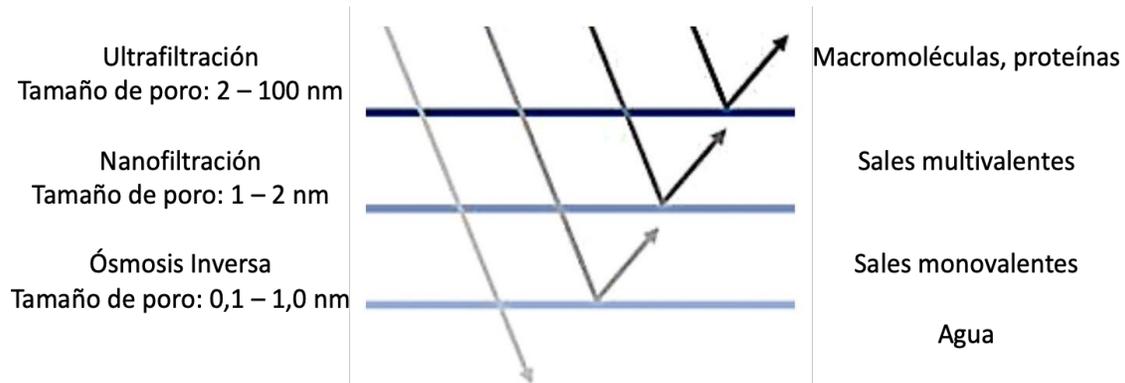
Las eficiencias de remoción expuestas en la Tabla 5 demuestran que la filtración por membrana es una técnica bastante prometedora. Los procesos de filtración por membrana debe ser estudiados y profundizados para identificar las innovaciones dentro de ellos, y así alcanzar la sostenibilidad.

### 1.5. Procesos de filtración por membrana

El agua potable ha sido motivo de preocupación durante mucho tiempo (Fu et al., 2012). Actualmente, existe un interés prioritario por la eliminación de agentes tóxicos del agua, como metales pesados, para evitar el riesgo que conlleva a la salud pública (Litter et al., 2010). Esto ha llevado a la publicación de artículos e informes sobre métodos de eliminación de metales pesados. En términos de eficiencia de remoción de metales, el intercambio iónico y la filtración por membrana (FM) tienen los mejores resultados (Fu y Wang 2011). Sin

embargo, la alta relación de selectividad de separación, además de otras ventajas como la fácil operación y el ahorro de tiempo y espacio, hace que la tecnología FM sea el método más prometedor para la eliminación de contaminantes metálicos del agua (Alvizuri et al., 2019b). Sin embargo, también presenta ciertas desventajas las cuales deben ser consideradas, como la necesidad de pretratamiento para asegurar un funcionamiento adecuado, altos costos operativos y alto consumo de energía (Fu y Wang, 2011). Para introducir los procesos de FM la Figura 2 muestra una descripción de estos con el diámetro de poro correspondiente y las especies que pueden ser retenidas en cada uno.

Figura 2. Procesos de Filtración por Membrana



Fuente: Elaboración propia en base a Yang et al., 2019.

A continuación, se describen las características principales de los procesos de FM.

- **Ultrafiltración**

Sobre la base del tamaño de los poros en el rango de 2 a 100 nm y el peso molecular de los compuestos de separación de 1000 a 100 000 Da, la UF es un proceso que consume mucha energía, funciona a bajas presiones transmembrana para la eliminación de materiales disueltos y coloidales (Zhao et al., 2016). Las partículas que son más grandes que el tamaño de los poros de las membranas de UF quedan atrapadas, mientras que los iones metálicos disueltos (en forma de iones hidratados o complejos de bajo peso molecular) pasan fácilmente (Vijayalakshmi et al., 2008). Para obtener una alta eficiencia de eliminación de iones metálicos se han propuesto dos mejoras al proceso convencional, la ultrafiltración mejorada con micelas (MEUF por sus siglas en inglés) y la ultrafiltración mejorada con polímeros (PEUF por sus siglas en inglés) (Fu y Wang, 2011). En el proceso MEUF, los iones metálicos se capturan dentro de las micelas de surfactante y forman grandes estructuras de metal-surfactante (Liu et al., 2016). En el proceso PEUF, los polímeros solubles en agua forman complejos con iones metálicos y forman macromoléculas con pesos moleculares más altos, que son luego retenidas cuando se bombea a través de una membrana de UF (Landaburu-Aguirre et al., 2009). Si bien estas mejoras al proceso han incrementado su eficiencia de remoción, también elevan los costos del mismo. Es por esto que aún se mantienen en estudio y desarrollo.

- **Nano Filtración**

NF es el proceso intermedio entre UF y OI (Fu y Wang, 2011), los pesos moleculares de los compuestos de separación oscilan entre 200 Da y 1000 Da con diámetros de

poro que varían de 1 nm a 2 nm (Khedr, 2008). La aplicación de procesos NF para el tratamiento de drenaje ácido de minas ha atraído recientemente la atención debido a su alta capacidad de rechazo de sales y metaloides (Kefeni et al., 2017). Este proceso es conocido también como la OI a bajas presiones lo que la convierte en un proceso menos costoso energéticamente hablando, pero su eficiencia de remoción de iones metálicos aún no sobrepasa a la OI (Fu et al., 2012).

- **Ósmosis Inversa**

La OI, que involucra membranas con un tamaño de poro de <1 nm, funciona según el principio de exclusión de tamaño y difusión de la solución a través de una membrana semipermeable (Greenlee et al., 2009). Una ventaja significativa de la OI sobre otras tecnologías tradicionales de tratamiento de agua es la capacidad de reducir las concentraciones de otros contaminantes iónicos y orgánicos disueltos (Fu y Wang, 2011). Dentro de las tecnologías de membranas, la OI es la tecnología más selectiva porque al seleccionar la membrana adecuada, se pueden obtener rechazos cercanos al 100% para la mayoría de los cationes metálicos (Akpor and Muchie, 2010; Fu & Wang, 2011).

Las mejoras significativas en la tecnología y el diseño de OI la han convertido en un proceso ecológico que trata el agua en muchas regiones del mundo, particularmente en aquellas donde sus fuentes son limitadas. También se ha visto que otros avances, como la disponibilidad de fuentes de energía alternativas, la posibilidad de pretratamiento y materiales emergentes aplicados, han ayudado a posicionar a la OI entre los métodos más prometedores en cuanto a tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados (Meschke et al., 2019).

La tecnología FM es uno de los métodos más utilizados para la eliminación de contaminantes emergentes del agua (Kim et al., 2018), incluidos los metales pesados (Fu & Wang 2011). Un resumen de algunos casos donde se aplicaron procesos de Filtración por Membrana (UF, NF y OI) para la remoción de diferentes metales pesados y los resultados obtenidos se presentan en las tablas 6, 7, 8, 9, 10 y 11.

Tabla 6. Eficiencia de los procesos de membranas en la remoción de plomo

<b>Metal pesado</b>	<b>Tipo de proceso de FM</b>	<b>Porcentaje de remoción (%)</b>	<b>Referencia</b>
Pb <sup>2+</sup>	MEUF	>99.0	Ferella et al., 2007
Pb <sup>2+</sup>	NF	93.0	Zhu et al., 2014
Pb <sup>2+</sup>	OI	98.9	Vera et al., 2018
Pb <sup>2+</sup>	NF	98.7	Vera et al., 2018

Nota: NF: nanofiltración; OI: ósmosis inversa; MEUF: ultrafiltración mejorada con micelas.

Tabla 7. Eficiencia de los procesos de membranas en la remoción de cobre

<b>Metal pesado</b>	<b>Tipo de proceso de FM</b>	<b>Porcentaje de remoción (%)</b>	<b>Referencia</b>
Cu <sup>2+</sup>	NF	47.0–66.0	Chaabane et al., 2006
Cu <sup>2+</sup>	NF	96.0–98.0	Tanninen et al., 2006
Cu <sup>2+</sup>	OI	99.5	Mohsen-Nia et al., 2007
Cu <sup>2+</sup>	PEUF	94.0	Molinari et al., 2008
Cu <sup>2+</sup>	OI+NF	95.0–99.0	Sudilovski et al., 2008
Cu <sup>2+</sup>	OI	70.0–95.0	Zhang et al., 2009
Cu <sup>2+</sup>	OI+NF	>95.0	Cséfalvay et al., 2009
Cu <sup>2+</sup>	NF	97.6	Barakat y Schmidt, 2010
Cu <sup>2+</sup>	PEUF	99.5	Camarilloa et al., 2010

Nota: NF: nanofiltración; OI: ósmosis inversa; PEUF: ultrafiltración mejorada con polímeros.

Tabla 8. Eficiencia de los procesos de membranas en la remoción de cromo

<b>Metal pesado</b>	<b>Tipo de proceso de FM</b>	<b>Porcentaje de remoción (%)</b>	<b>Referencia</b>
Cr(VI)	OI	99.9	Ozaki et al., 2002
Cr(VI)	NF	99.5	Muthukrishnan y Guha, 2008
Cr(VI)	PEUF	82.0–100.0	Korus y Loska, 2009
Cr(VI)	OI	>90.0	Yoon et al., 2009
Cr(VI)	OI	96.0	Cimen et al., 2014
Cr(III)	PEUF	82.0–100.0	Korus y Loska, 2009
Cr(III)	PEUF	99.5	Barakat y Schmidt, 2010

Nota: NF: nanofiltración; OI: ósmosis inversa; PEUF: ultrafiltración mejorada con polímeros.

Tabla 9. Eficiencia de los procesos de membranas en la remoción de cadmio

<b>Metal pesado</b>	<b>Tipo de proceso de FM</b>	<b>Porcentaje de remoción (%)</b>	<b>Referencia</b>
Cd <sup>2+</sup>	MEUF	92.0–98.0	Huang et al., 2010
Cd <sup>2+</sup>	NF	95.0	Zhu et al., 2014
Cd <sup>2+</sup>	PEUF	99.0	Ennigrou et al., 2009
Cd <sup>2+</sup>	MEUF	99.0	Landaburu-Aguirre et al., 2010
Cd <sup>2+</sup>	NF	98.1	Vera et al., 2018
Cd <sup>2+</sup>	OI	99.3	Vera et al., 2018

Nota: NF: nanofiltración; OI: ósmosis inversa; MEUF: ultrafiltración mejorada con micelas; PEUF: ultrafiltración mejorada con polímeros.

Tabla 10. Eficiencia de los procesos de membranas en la remoción de níquel

<b>Metal pesado</b>	<b>Tipo de proceso de FM</b>	<b>Porcentaje de remoción (%)</b>	<b>Referencia</b>
Ni <sup>2+</sup>	OI	99.3	Ipek, 2005
Ni <sup>2+</sup>	OI	99.5	Mohsen-Nia et al., 2007
Ni <sup>2+</sup>	MEUF	98.6	Danisa y Aydiner, 2009
Ni <sup>2+</sup>	PEUF	99.1	Barakat y Schmidt, 2010

Nota: OI: ósmosis inversa; MEUF: ultrafiltración mejorada con micelas; PEUF: ultrafiltración mejorada con polímeros.

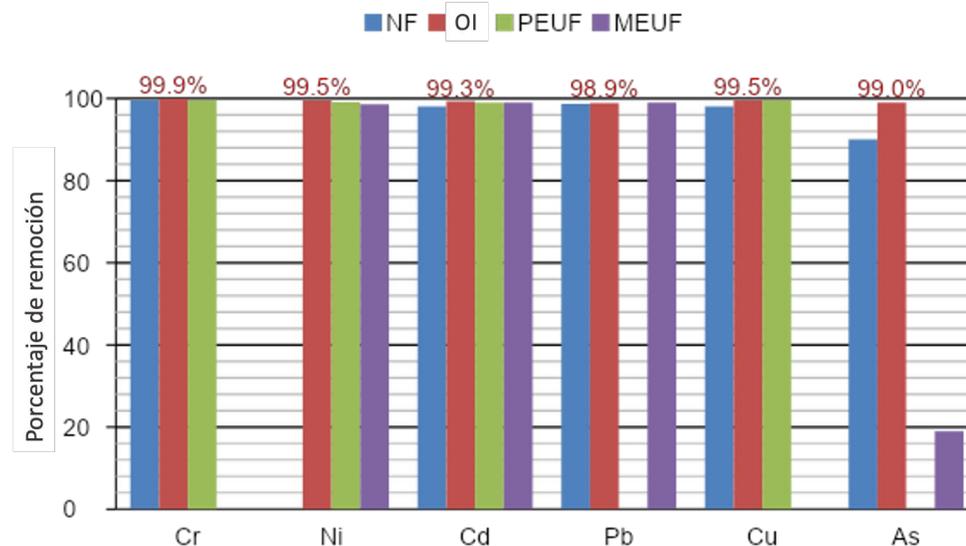
Tabla 11. Eficiencia de los procesos de membranas en la remoción de arsénico

<b>Metal pesado</b>	<b>Tipo de proceso de FM</b>	<b>Porcentaje de remoción (%)</b>	<b>Referencia</b>
As(VII)	MEUF	19	Ferella et al., 2007
As(V)	OI	91–99	Chan y Dudeney, 2008
As(V)	OI	>90	Yoon et al., 2009
As(V)	NF	>90	Figoli et al., 2010
As(III)	OI	20–55	Chan y Dudeney, 2008
As(III)	OI	98	Chang et al., 2014

Nota: NF: nanofiltración; OI: ósmosis inversa; MEUF: ultrafiltración mejorada con micelas.

La Figura 3 denota que los porcentajes de remoción de metales pesados más altos se obtuvieron por el proceso de ósmosis inversa. Esto demuestra que la OI es una técnica óptima aplicable al tratamiento de agua contaminada con estos iones metálicos.

Figura 3. Tasas de remoción de metales pesados en diferentes procesos de membranas



Nota: NF: nanofiltración; OI: ósmosis inversa; MEUF: ultrafiltración mejorada con micelas; PEUF: ultrafiltración mejorada con polímeros.

Para los metales como Zn, Fe y Mn, existen pocas investigaciones, las más representativas se presentan en la Tabla 12. Como se puede observar las tasas de eliminación alcanzadas para estos tres iones metálicos fueron altas y pueden mejorarse si se realizan más estudios.

Tabla 12. Eficiencia de los procesos de membranas en la remoción de zinc, manganeso y hierro

Metal pesado	Tipo de proceso de FM	Porcentaje de remoción (%)	Referencia
Zn <sup>2+</sup>	OI	98.9	Ipek, 2005
Zn <sup>2+</sup>	MEUF	92.0–98.0	Huang et al., 2010
Zn <sup>2+</sup>	MEUF	99.0	Landaburu-Aguirre et al., 2010
Mn	NF	96.0	Soares et al., 2005
Mn	UF-OI	95.8	Nasir et al., 2016
Fe	UF-OI	94.1	Nasir et al., 2016

Nota: NF: nanofiltración; OI: ósmosis inversa; MEUF: ultrafiltración mejorada con micelas.

En los últimos años aparecieron procesos híbridos, como biorreactores combinados con tecnologías de FM que han optimizado la eliminación de iones metálicos (Malamis et al., 2012; Mulyati & Syawaliah, 2018). Sin embargo, estos modelos híbridos aún están en desarrollo debido a aspectos como los elevados costes económicos y los costes energéticos que inciden directamente en su eficiencia.

En los procesos de filtración por membrana, el ensuciamiento de la membrana puede afectar significativamente a la eficiencia, sostenibilidad y viabilidad económica de los procesos (AlSawaftah, 2021). El fenómeno de Concentración-Polarización (CP) es uno de los mecanismos de taponamiento superficial que se pueden dar, debido a la compleja interacción física y química entre los diferentes componentes de alimento y la superficie de la membrana (Gu et al., 2021). Una manera adecuada de predecir el rendimiento de la membrana y los requisitos de energía para el bombeo se da por medio de una adecuada comprensión cuantitativa del fenómeno CP que sucede en la membrana, existiendo varias correlaciones de transferencia de masa para una descripción cuantitativa del fenómeno (Salcedo et al., 2014).

Fariñas (1999) explicó que cuando se desarrolla un proceso de separación con membranas, a medida que avanza el tiempo van quedando solutos cerca de la membrana del lado de la alimentación pertenecientes a sales disueltas que no pasaron por el permeado. Esto se debe principalmente al equilibrio de las fuerzas convectivas y difusivas. Las primeras son las que permiten el arrastre del soluto a la membrana y origina el permeado mientras que las segundas provocan que el soluto retorne al flujo de disolución (Salcedo, 2006). Los solutos retenidos cerca de la membrana deben ser arrastrados por la corriente de rechazo. Sin embargo, al ser esta velocidad casi nula, solo pueden pasar a la corriente de rechazo por difusión originando una zona en la que la concentración de especies es mayor que la del resto de la solución denominada Capa Límite (García, 2002). Esta situación se llama polarización de la membrana y cuando aumenta la concentración de esta solución en contacto con la membrana se genera una concentración de polarización. En esencia, la polarización de concentración refiere al soluto que se retiene en la zona adyacente de la membrana de forma no permanente, que, a diferencia del ensuciamiento, esta puede dejar de existir al cesar la fuerza impulsora (Salcedo, 2006).

## 2. Objetivos e Hipótesis

Esta tesis doctoral aborda, un objetivo general, cinco objetivos específicos y cinco hipótesis que se describen a continuación.

### 2.1. Objetivo General

El objetivo general de la presente tesis doctoral consiste en determinar la eficiencia de la ósmosis inversa operada a bajas presiones en la reducción de la concentración de arsénico en aguas superficiales contaminadas por pasivos mineros en la Microcuenca Milluni (Bolivia), con el fin de restaurar la calidad de agua del área estudio por medio de una alternativa de tratamiento orientada a la sostenibilidad.

### 2.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son:

1. Caracterizar las aguas naturales superficiales en la Microcuenca Milluni en 1 ciclo hidrológico (1 año).
2. Identificar y proponer mecanismos de fortalecimiento para la gestión del agua de Milluni
3. Diseñar y montar una planta experimental piloto de ósmosis inversa para estudiar la remoción del metal pesado problema.
4. Analizar de manera estadística los resultados experimentales para maximiza las variables respuesta.
5. Desarrollar un modelo matemático para comprender el comportamiento físico del proceso diseñando buscando su optimización y sostenibilidad.

### 2.3. Hipótesis

Las hipótesis son:

1. La actividad minera pasada e ilegal en la Microcuenca Milluni, ha causado una degradación en la calidad del agua de sus lagunas.
2. El actual desempeño del programa de monitoreo de la calidad de agua genera bases de datos estadísticamente validos de Milluni.
3. El pH y la conductividad pueden ser indicadores de la presencia de metales pesados.
4. La ósmosis inversa es un proceso de tratamiento efectivo para remover metales pesados, en específico arsénico, del agua.
5. La ósmosis inversa es capaz de trabajar con presiones bajas en el rango de 5 a 10 bares sin disminuir su eficiencia en la remoción del arsénico y produciendo un ahorro energético durante su operación.

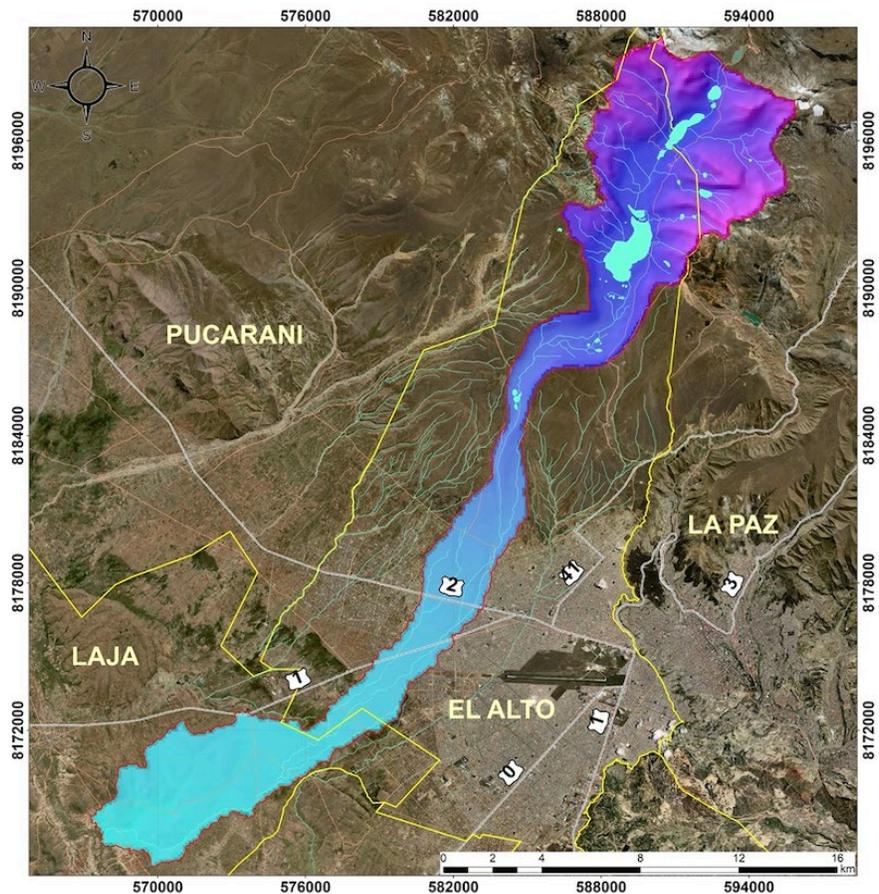
### 3. Materiales y Métodos

En esta sección, en primer lugar se presenta una descripción del área de estudio y en segundo lugar se expone la metodología aplicada en la tesis doctoral.

#### 3.1. Área de estudio

Milluni se encuentra en la provincia Murillo del departamento de La Paz (16 °08 'a 16 ° 10' de latitud sur y de 68 ° 17 'a 68 ° 21' de longitud oeste), aproximadamente 25 km al norte del área urbana de la ciudad de El Alto y a unos 30 km de la ciudad de La Paz (Miranda et al., 2010). Se sitúa a 4500 - 4700 m.s.n.m., tiene una extensión de alrededor de 40 km<sup>2</sup> y forma parte del sistema de cuencas del altiplano (Itis,1988). Esta microcuenca presenta condiciones climáticas extremas, como alta radiación solar y bajas temperaturas, que son propias de la zona altiplánica (Ahlfeld et al., 1964). En la Figura 4, se observa la existencia de fuentes de aguas naturales en la parte alta de la Microcuenca Milluni, estos recursos hídricos abastecen a dos ciudades importantes de Bolivia, La Paz y El Alto.

Figura 4. Mapa Microcuenca Milluni



Fuente: Elaboración propia, 2021.

En Milluni se desarrolló explotación minera de gran magnitud desde 1940 hasta 1990, principalmente extrayendo Sn, Zn y Pb. Un gran volumen de desechos mineros ricos en sulfuros se depositaron en el área como resultado de las actividades mineras que emplearon una variedad de técnicas de separación (Ríos, 1985). Aunque la minería en el área se detuvo hace unos 20 años, el impacto de los desechos mineros en la calidad del agua continua siendo un grave problema ambiental nacional (Salvarredy-Aranguren et al., 2008). En las últimas décadas ha surgido la minería a pequeña escala que opera sin regulación alguna. En su mayor parte, esta actividad es intermitente e ilegal, por lo que existe muy poca información sobre su impacto en la calidad del agua (Alvizuri et al., 2019a). Contemplando todo lo anterior se expone que, Milluni tiene una alta vulnerabilidad a que sus cuerpos de agua superficiales estén contaminados por metales pesados debido a la minería pasada y actual, siendo esto un riesgo inminente a la salud pública.

### 3.1.1. Geomorfología

Varios sectores de la microcuenca, particularmente la parte alta, están cubiertos con turberas y altos pastizales de montaña (Salvarredy-Aranguren et al., 2008). Las unidades litológicas se pueden resumir de norte a sur como:

- Terreno granítico parcialmente cubierto por glaciares (granito Huayna Potosí, HPG).
- Arenisca de grano fino ligeramente metamorfoseada con lutitas negras estratificadas (Cámbrico al Ordovícico).
- Arenisca Silúrica Mineralizada (Formación Catavi). La Formación Catavi esta principalmente compuesta por arenisca deformada por fallas y pliegues, lo que permitió que la mineralización ocurra (Ahlfeld et al., 1964).

Lehmann (1978) realizó una serie de investigaciones geológicas y de mineralización. Los minerales primarios de la región son: pirita ( $\text{FeS}_2$ ), marcasita ( $\text{FeS}_2$ ), pirrotita ( $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), casiterita ( $\text{SnO}_2$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), wolframita ( $\text{Fe, Mn}[\text{WO}_4]_2$ ) y estannito ( $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ ). Los minerales asociados incluyen cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), siderita ( $\text{FeCO}_3$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), apatita ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}_2$ ) y monacita ( $[\text{Ce, La, Nd}]\text{PO}_4$ ). Para explotar esta mineralización se utilizó minería subterránea, y se tuvo una producción máxima de 110 000 T/a de mineral en bruto extraído entre 1970 y 1980 (Ríos, 1985). La gran cantidad de los residuos mineros producidos, después de la extracción de minerales por gravimetría y procedimientos de flotación, se extendió peligrosamente en las laderas de la laguna de Milluni Chico ( $4,6 \text{ km}^2$ ) (Miranda et al., 2010).

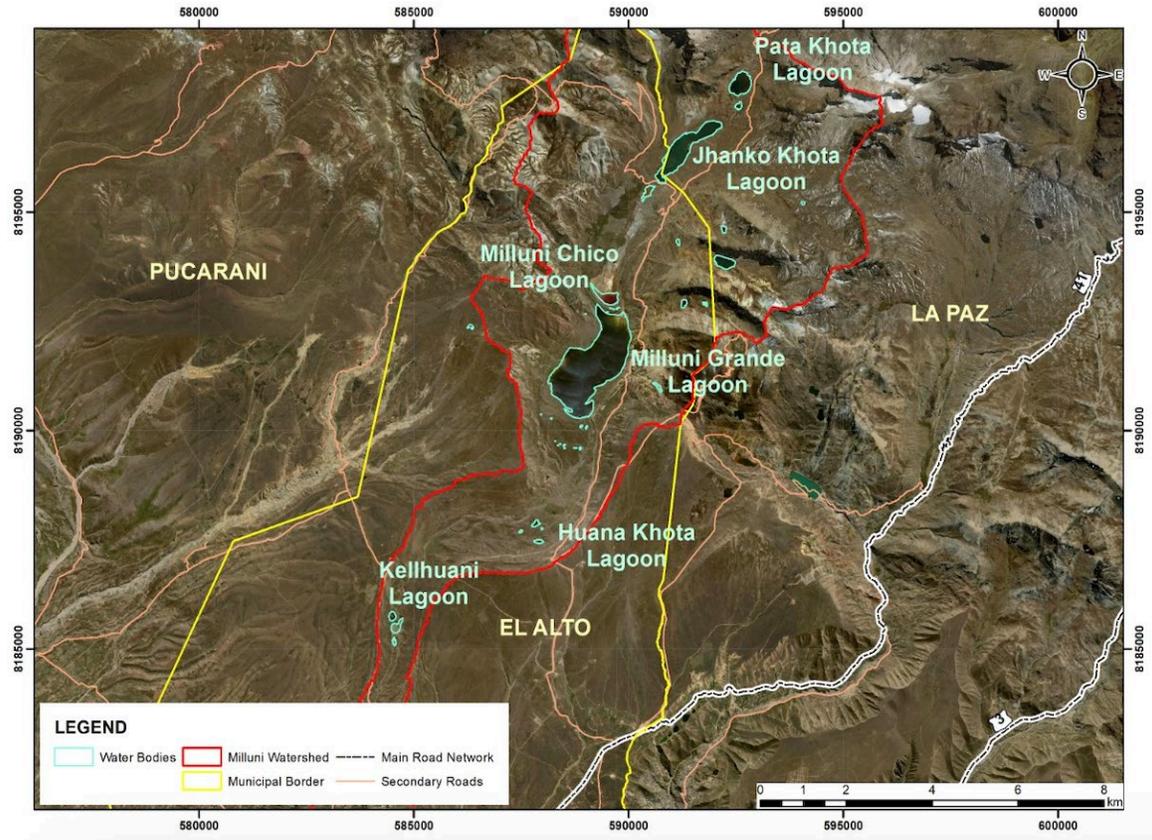
### 3.1.2. Cuerpos de agua superficiales de Milluni

Son cuatro las lagunas en la cuenca alta de Milluni (Iltis, 1988). La disposición de estas se observa en la Figura 5 y se detallan a continuación.

- Laguna Pata Khota es una laguna natural de forma irregular que recibe agua del deshielo del nevado Huayna Potosí. Se encuentra al inicio del sistema de lagunas a 4665 m.s.n.m., y no presenta contaminación aparente.

- Laguna Jankho Khota es la segunda laguna natural del sistema de lagunas que presenta forma irregular. Esta laguna recibe las aguas de la laguna Pata Khota. Se encuentra a 4560 m.s.n.m., y tampoco presenta contaminación aparente en sus aguas.
- Laguna Milluni Chico ubicada a una altitud de 4550 m.s.n.m., es una laguna artificial, con forma irregular. Sus afluentes son manantiales naturales y drenajes ácidos de minas. Fue construida para capturar las aguas provenientes de las minas para evitar que ingrese a la laguna Milluni Grande.
- Laguna Milluni Grande recibe efluentes principalmente de manantiales naturales y de la laguna Milluni Chico (con componentes de drenaje ácido de mina). También recibe agua de la laguna Jankho Khota a través de un "sistema bypass", que consiste en una bomba que extrae agua de la laguna Jankho Khota, esta es conducida a través de un canal de cemento abierto, hasta la presa Milluni Grande. Es la última laguna del sistema y se encuentra ubicada a 4530 m.s.n.m.

Figura 5. Lagunas de la Microcuenca Milluni

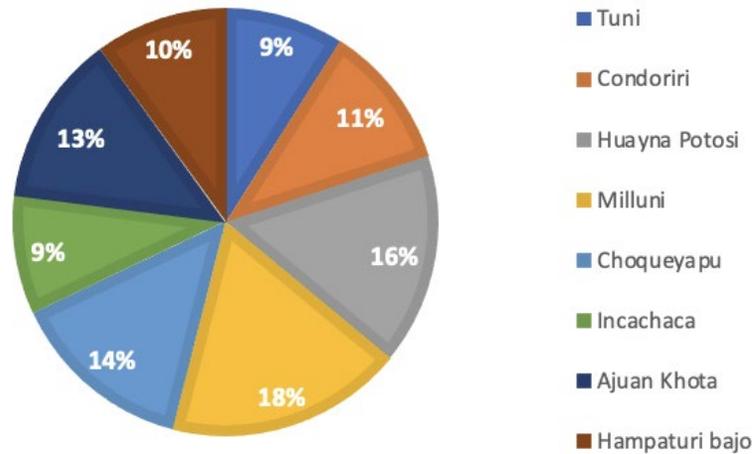


Fuente: Elaboración propia, 2021.

Las lagunas de Milluni contribuyen a la represa de almacenamiento ubicada en Laguna Milluni Grande. La represa tiene una capacidad de 10 000 000 m<sup>3</sup> y una superficie de 2 450 000 m<sup>2</sup> (Raffailac, 2002). La Figura 6 muestra el aporte de agua por cuenca para el departamento de La Paz, donde la microcuenca Milluni es la de mayor aporte para el

abastecimiento de agua. Por tal motivo la calidad del agua en esta zona es un tema de gran importancia.

Figura 6. Aporte por cuencas al abastecimiento del departamento de La Paz

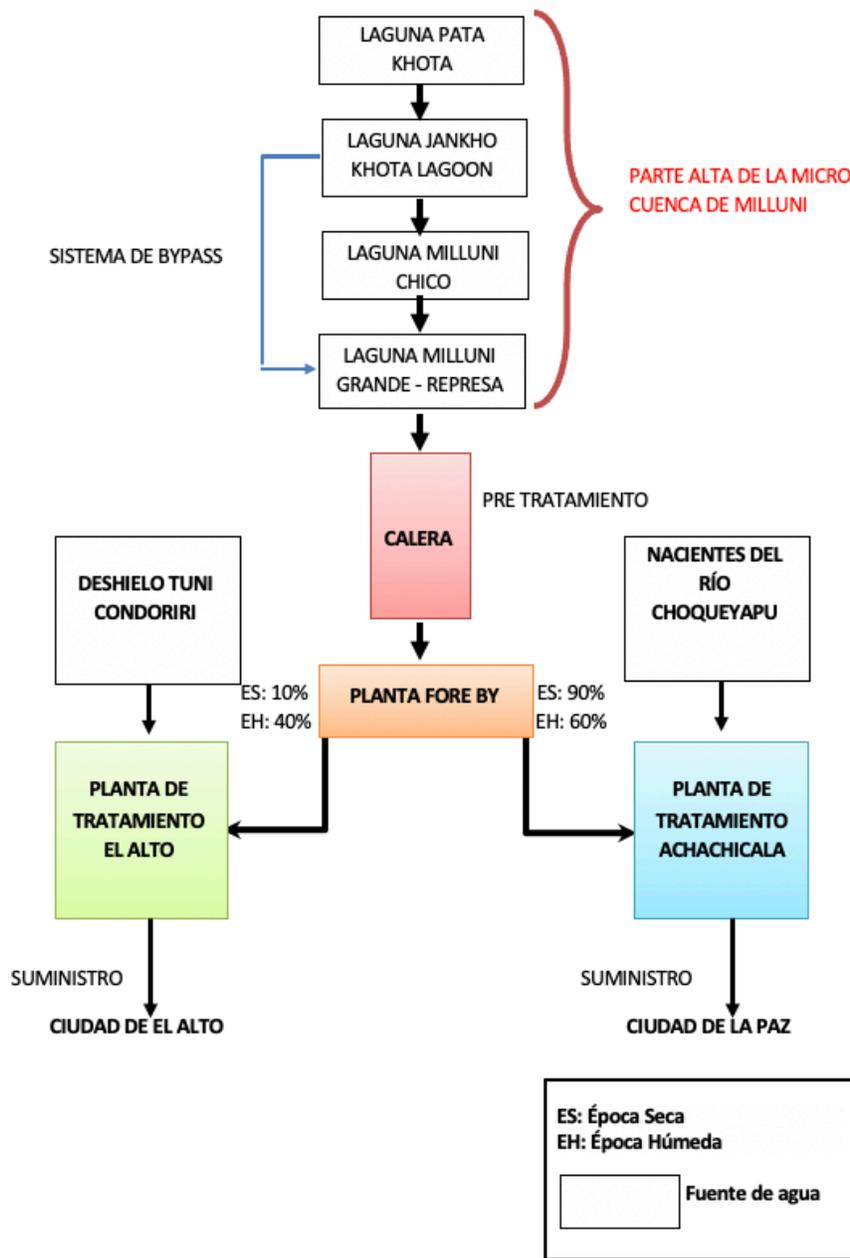


Fuente: EPSAS (2013).

### 3.1.3. Tratamiento de agua Milluni

La creciente demanda de agua potable para las ciudades de La Paz y El Alto, y el bajo volumen de agua de los glaciares como resultado del cambio climático, han llevado a que actualmente se usen las aguas contaminadas de Milluni para el suministro de agua. Aunque las aguas de Milluni reciben tratamiento, no significa que su calidad sea segura para el suministro (Alvizuri et al., 2019a). Como antes se mencionó, el agua proveniente de las lagunas de Milluni se almacena en la represa ubicada en la Laguna Milluni Grande, en este lugar el agua contaminada con residuos mineros se mezcla con agua no contaminada de la Laguna Jankho Khota. La mezcla de agua es acondicionada mediante la adición de cal de forma manual en un punto denominado La Calera, después ingresa a la planta Fore By. En la planta Fore By, el caudal total es distribuido hacia dos plantas de tratamiento de la Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento (EPSAS). La Figura 7, es un diagrama del proceso que sigue el agua de Milluni desde la fuente hasta el grifo.

Figura 7. Esquema del flujo de agua de Milluni a través de plantas de tratamiento de agua



Fuente: Alvizuri et al., 2019a.

La distribución del flujo a través de la planta de Fore By no es uniforme a lo largo del año. En las estaciones seca y húmeda, hay distribuciones de 10% y 90%, y 40% y 60% a las plantas de El Alto y Achachicala, respectivamente. Durante los periodos de mantenimiento de cualquiera de las plantas, el 100% del caudal va a la planta en operación. Ambas plantas tienen un caudal de entrada máximo de 1000 L/s (EPSAS, 2013). La línea de procesos que tiene cada planta se mencionan y describen a continuación en la Tabla 13.

Tabla 13. Procesos de las plantas potabilizadoras, El Alto y Achachicala

Procesos	Descripción	Plantas potabilizadoras	
		El Alto	Achachicala
Tanque homogenizador	Disminuye la energía cinética del agua	✓	✓
Tanque presedimentador	Elimina las partículas gruesas y finas suspendidas en el agua		✓
Tanque sedimentador	Eliminación de sólidos en suspensión	✓	✓
Cascadas de aireación	Aumenta el oxígeno disuelto en el agua	✓	
Tolvas y alimentadores de coagulantes	El sulfato de aluminio y la cal se utilizan como coagulantes	✓	✓
Tanques de floculación	Se agrega sulfato de aluminio o cal para generar la formación de flóculos para separar las partículas sólidas del agua	✓	✓
Filtros de gravedad rápidos	Tiene capas de arena y grava para retener flóculos e impurezas.	✓	✓
Tanque de lodos	S Almacenamiento de lodos de salida del filtro rápido		✓
Estanque de agua filtrada	Almacena agua filtrada para la cloración	✓	✓
Dispensador de cloro	Inyecta cloro gaseoso en el agua filtrada para su desinfección	✓	✓
Tanque de almacenamiento	Depósitos donde se acumula el total de agua antes del suministro	✓	✓
Sensor de calidad	Medida online de pH, temperatura, turbidez, cloro libre y conductividad	✓	✓

Fuente: elaboración propia en base a datos de EPSAS (2013).

De la Tabla 13 se observa que ambas plantas cuentan con procesos similares, aunque la planta de El Alto no cuenta con tanque de pre-sedimentación ni tanque de lodos, y la planta de Achachicala no cuenta con cascadas de aireación. El almacenamiento total de las plantas de El Alto y Achachicala es de 15 000 m<sup>3</sup> y 10 000 m<sup>3</sup>, respectivamente (EPSAS, 2013).

#### 3.1.4. Monitoreo de los recursos hídricos en Milluni.

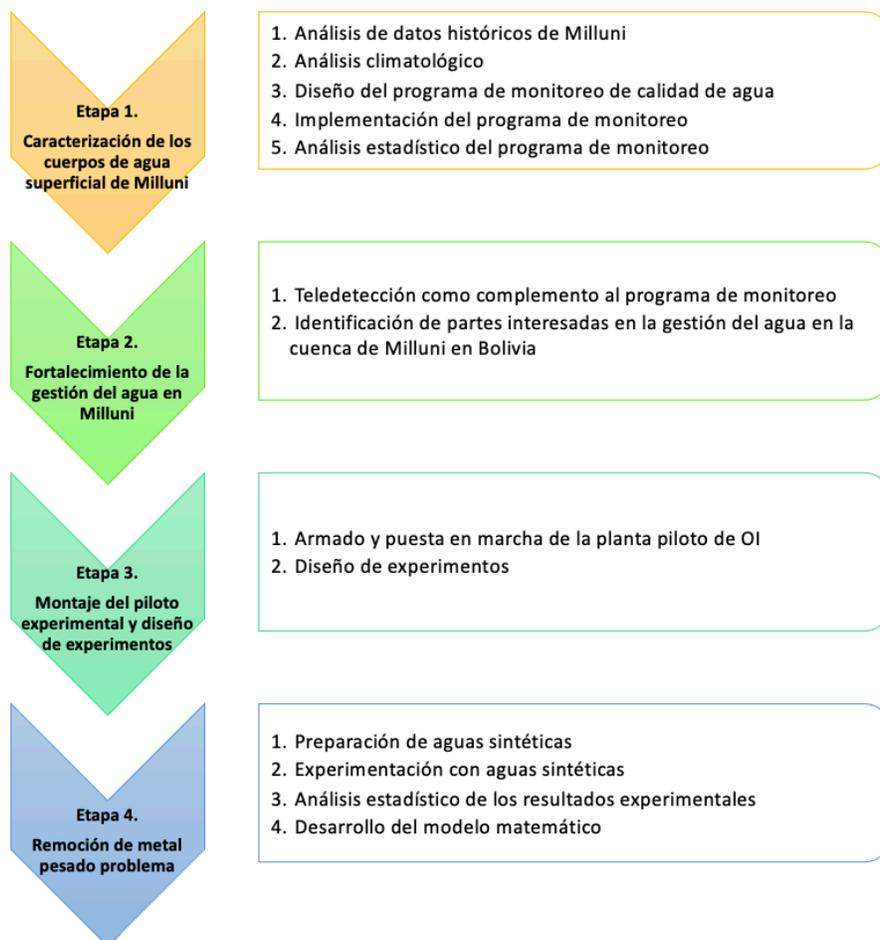
La Microcuenca Milluni forma parte de la Macrocuena Katari, la cual se define como una cuenca estratégica según el Plan Nacional de Cuencas de Bolivia (Saavedra, 2015). La Unidad de Gestión de la Cuenca de Katari (UGCK) es el organismo encargado de la gestión ambiental y monitoreo de la Microcuenca Milluni. Desde 2006 a la fecha se ha monitorizado la Cuenca Katari. El programa del monitoreo general que englobaba a Milluni, fue creado

para brindar una descripción general de la calidad del agua de toda la macrocuenca, sin estudiar a profundidad sitios específicos. En sus inicios solo proporcionó información para ciertos proyectos que estaban siendo desarrollados en la zona. A partir de 2016, el programa de monitoreo planteo su objetivo principal, "Generar una base de datos sobre la calidad del agua en la cuenca Katari" el cual se mantiene hasta la fecha.

### 3.2. Metodología

En este apartado se expone la metodología aplicada, la cual consta de 4 etapas. La primera etapa muestra el proceso de caracterización de los cuerpos hídricos superficiales del área de Milluni. La segunda etapa detalla el planteamiento de dos mecanismos para fortalecer la gestión del agua del área de estudio. La tercera etapa describe el montaje de la planta piloto y el desarrollo del diseño de experimentos. Finalmente, la cuarta etapa presenta como se realizó la parte experimental con la planta de IO. La Figura 8 exhibe los componentes de cada etapa, los cuales se puntualizarán en los siguientes apartados.

Figura 8. Esquema metodológico de la tesis doctoral



Fuente: elaboración propia, 2022.

### 3.2.1. Caracterización de los cuerpos de agua superficial de Milluni

Para la caracterización de los recursos hídricos del área de Milluni se desarrollaron 5 pasos, sus metodologías se detallan a continuación.

#### 3.2.1.1. Análisis de datos históricos de Milluni

Para tener una primera aproximación de la contaminación en Milluni se recopilaron datos históricos de los monitoreos realizados en el área de estudio. El periodo de tiempo analizado fue desde el 2006 hasta el 2018. El objetivo del análisis fue identificar contaminantes peligrosos y persistentes para priorizar y tomar medidas para su eliminación.

El procedimiento adoptado se sustenta según Dahmen et al., (1990) y es de dos instancias. La primera es una discriminación básica para la selección de la información, en la cual se examinaron todos los datos disponibles para identificar las series más homogéneas a lo largo del periodo de estudio. Como segunda instancia se analizaron los datos de las series identificadas como homogéneas, para encontrar a los metales pesados con concentraciones peligrosas y con alta frecuencia de aparición en los puntos de monitoreo. Los valores de los parámetros (metales pesados) fueron comparados con los LMC establecidos en la Normativa Boliviana 512 para agua potable, Norma Española y la EPA.

#### 3.2.1.2. Análisis climatológico de Milluni

Un análisis climatológico es fundamental para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos (Molina, 2004; Soria, 2016). A través del análisis climatológico de Milluni, se pudo conocer la distribución de épocas seca y húmeda, por meses en un año hidrológico (julio - junio). Este análisis tuvo como fin el interpretar la incidencia del comportamiento climatológico en los niveles de contaminación en los principales cuerpos de agua en la microcuenca de estudio.

En el análisis climatológico se realizó el siguiente procedimiento:

1. Recopilación de la información meteorológica de la estación de Alto Achachicala de SENHAMI para el análisis climatológico: Precipitación (mm) y Evapotranspiración (mm) en el marco de un año hidrológico, con una tasa de retorno de 18 años (1999 - 2018).
2. Procesamiento estadístico de la información recolectada con el fin de obtener datos totales y promedios por mes de los parámetros de precipitación y evapotranspiración.
3. Generación de gráfico con datos mensuales de los parámetros de: Precipitación Total, Evapotranspiración Media y Total.
4. Identificación de épocas secas y húmedas en Milluni.

### 3.2.1.3. Diseño del programa de monitoreo de calidad de agua

Puede haber tantos tipos de programas de monitoreo como objetivos, cuerpos de agua, contaminantes y usos del agua (Chapman et al., 1996). Un programa de monitoreo funcional genera información válida para la identificación exacta del contaminante, lo que permite elegir el tipo de tratamiento requerido para su eliminación (Alvizuri, 2019a). El Programa de Monitoreo de Calidad de Agua (PMCA) se planteó específicamente para la parte alta de la Microcuenca de Milluni, debido a presencia de fuentes naturales de agua vulnerables que deben ser monitorizadas. Un análisis comparativo entre el protocolo “Guía práctica para el diseño e implementación de estudios y programas de monitoreo de la calidad del agua dulce” y el protocolo “ISO 5667-1: 2006 Calidad del agua - Muestreo - Parte 1: Orientación sobre el diseño de programas de muestreo y técnicas de muestreo”, se realizó para identificar los componentes que debía tener el PMCA para Milluni. Además, fue importante el considerar las particularidades de la zona y tomar en cuenta las especificaciones del sistema de gestión de recursos hídricos de la Macrocuena Katari, de manera que el PMCA de Milluni pueda alinearse y ser parte del sistema de gestión macro. El análisis de las normas internacionales y el programa de seguimiento propuesto para la área de Milluni se presenta en la sección de resultados.

### 3.2.1.4. Implementación del programa de monitoreo

La metodología desarrollada se divide en dos etapas. La primera referente a la coordinación previa al trabajo de campo, realizada el segundo semestre del 2018. La segunda expone la implementación del año piloto del programa de monitoreo diseñado para la parte alta de la Microcuenca de Milluni, llevada a cabo el 2019.

El trabajo de campo fue coordinado con la entidad de gestión de la macro cuenca de Katari (UGCK). Esto se efectuó con el objetivo de no interferir ni obstaculizar el trabajo que realiza esta unidad dentro del área de estudio y optimizar los recursos disponibles. Los meses para el trabajo de campo fueron definidos por la temporalidad del área, debido a que existen dos estaciones marcadas, la estación seca y la húmeda, este dato fue obtenido del análisis climatológico planteado en el apartado 3.2.1.2.. Los tres meses representativos de la estación seca son mayo, agosto y octubre; y los tres meses representativos de la estación húmeda son diciembre, enero y marzo. Al monitorear tres veces durante cada temporada, se buscó determinar la dinámica de los contaminantes e identificar el mes más representativo dentro de cada temporada. La Figura 9 presenta la línea temporal del trabajo de campo efectuado

Figura 9. Línea temporal del trabajo de campo



Fuente: elaboración propia, 2022.

El trabajo de campo comprendió las siguientes tareas:

- Medición de parámetros *in situ* con un multímetro portátil HQ40D-Hach y un turbidímetro portátil Hach 2100Q.
- Los parámetros *ex situ* (metales pesados) se analizaron con un espectrómetro de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) Agilent Modelo 7700x.
- Muestreo, transporte y almacenamiento, siguiendo el protocolo establecido en ISO 5667-1, para evitar la contaminación de las muestras.

#### 3.2.1.5. Análisis estadístico del año piloto del programa de monitoreo

Luego de la implementación del año piloto del programa de monitoreo, el objetivo fue validar y optimizar los componentes del programa propuesto. Esto requirió de un análisis estadístico de los resultados para determinar la frecuencia que adoptará el programa de monitoreo en su futura implementación. Paralelamente, se estudiaron de manera estadística los parámetros *in situ* para evaluar si pueden ser indicadores de la presencia de metales pesados, para optimizar los recursos durante el seguimiento futuro. El desarrollo que se describe a continuación se basa en análisis estadísticos de problemas similares en otras partes del mundo (Saha y Rahman, 2018; Adeleke et al., 2020; Ugbede et al., 2020).

El análisis estadístico se realizó con el software Statgraphics Centurion 18. En primer lugar se determinó la correlación entre los puntos de monitoreo definidos y el mes del año con las concentraciones de los metales pesados seleccionados. Para llevar a cabo el proceso fue necesario un análisis multivariado de varianza (MANOVA) con el objetivo de detectar la presencia de interacciones, y determinar si la época del año afecta en los puntos de monitoreo de manera diferente. Si esto no ocurría, se procedió con un análisis de varianza (ANOVA) para determinar individualmente el efecto de estos dos factores (puntos de muestreo y mes del año) sobre la concentración de los metales.

Además, se contrastaron dos hipótesis sobre la influencia de dos parámetros básicos de control, pH y conductividad, con las concentraciones de metales en los puntos de recolección de muestras.

- El PH es un parámetro que describe las propiedades ácido-base de una solución (Crittenden et al., 2012). Por ello, una condición ácida de los iones metálicos nos lleva a entender que un pH bajo está relacionado con una mayor presencia de iones metálicos.
- El agua pura no es un buen conductor de electricidad y los iones disueltos aumentan su conductividad (NB 512, 2004). Por tanto, la alta conductividad está relacionada con una mayor presencia de iones metálicos.

En este caso, para evaluar las relaciones entre la variable de concentración vs conductividad o valores de pH, se buscaron correlaciones mediante regresión múltiple, con la intención de identificar efectos/interacciones conjuntas y determinar la importancia del efecto en cada caso. Si se observaba que una variable independiente no era significativa, se procedía al análisis de la regresión simple entre la variable que permanece como significativa y la

concentración de los metales. Además, el pH también se trató como un factor que tiene dos niveles, es decir, ácido por debajo de 6 y el resto de los valores neutros. En este caso, se realizó nuevamente un ANOVA, lo que permitió determinar si, en este caso, existía una correlación entre el factor y la concentración de metales.

### 3.2.2. Fortalecimiento de la gestión del agua en Milluni

En este apartado se presenta como se plantearon los dos mecanismos para fortalecer el sistema de gestión del agua en Milluni.

#### 3.2.2.1. Teledetección como complemento al programa de monitoreo

Considerando las limitaciones técnicas y económicas que tiene la UGCK para la gestión de la Macrocuenca Katari, donde se encuentra el área de Milluni, se consideró que la teledetección de contaminantes, hasta el momento no implementada, podría fortalecer y complementar el monitoreo de los cuerpos superficiales de la zona. Para efectuar dicho procedimiento fue necesario aplicar procesos secuenciales desarrollados en base a la teledetección, a través de la plataforma Google Earth Engine. Las imágenes satelitales que fueron seleccionadas para este fin se capturaron por el satélite Sentinel-2, gracias a la adecuada resolución espacial que posee. La temporalidad dentro del año 2019 tuvo relación con la disponibilidad de imágenes capturadas por el satélite y con las fechas de monitoreo en campo.

Para el estudio de la calidad de agua en los principales cuerpos de agua de la Microcuenca Milluni, se realizó la manipulación de bandas satelitales mediante scripts en lenguaje Java, dentro de la plataforma Google Earth Engine. Obteniendo, de esta manera, dos indicadores principales el Índice Normalizado de Agua (NDWI) y el Índice Normalizado de Clorofila-a (NDCI), con los cuales se identificó los píxeles representativos de áreas con cobertura de agua y de los mismos el nivel de calidad que poseen. Cabe señalar que el NDCI es un indicador de la presencia de eutrofización. Las ecuaciones para determinar los valores de los índices se presentan a continuación.

- NDWI. Para obtener los píxeles que representan el agua se trabajó con dos bandas espectrales, verde e infrarrojo de onda corta (SWIR, por sus siglas en inglés), siguiendo la ecuación 1.

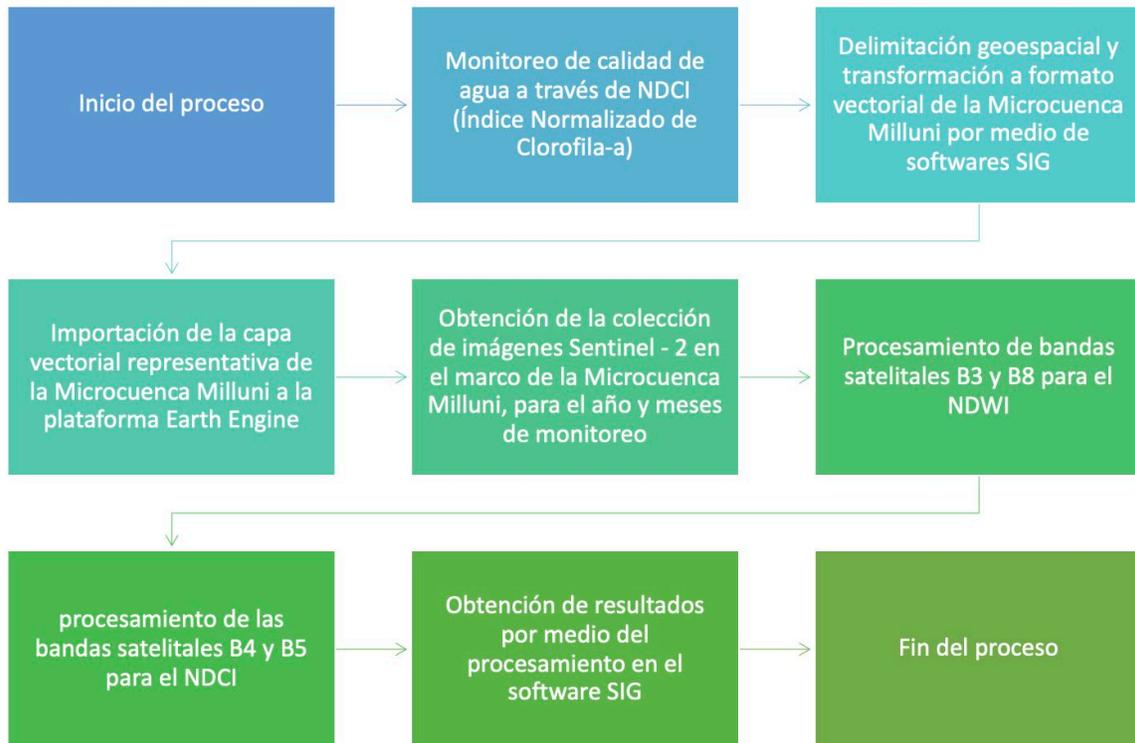
$$NDWI = \frac{green - SWIR}{green + SWIR} \quad (1)$$

- NDCI. Para obtener los píxeles que representan el agua se usó dos bandas espectrales, Red edge one y Red, siguiendo la ecuación 2.

$$NDCI = \frac{Red\ edge1 - Red}{Red\ edge1 + Red} \quad (2)$$

En la Figura 10 se detalla la secuencia de procesos que se ha seguido.

Figura 10. Diagrama de flujo – proceso de teledetección



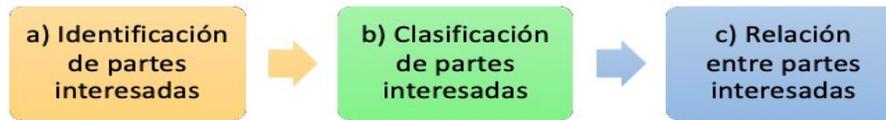
Fuente: elaboración propia 2022.

Las imágenes de satélite obtenidas del proceso anterior se presentan en el apartado 4.2.1.. Las lagunas tuvieron tres colores relacionados con los niveles de concentración determinados por el NDCI. Es fundamental analizar los tres niveles del indicador para evaluar el riesgo de eutrofización en cada laguna. La baja concentración, se visualizó en amarillo, significando pocas posibilidades de eutrofización. La concentración media implica un riesgo moderado de eutrofización y se expuso con una coloración naranja. Una alta concentración, presentada en rojo, sugiere un alto riesgo de eutrofización. Finalmente, se expusieron la interpretación de la correlación de los resultados obtenidos mediante la teledetección y los valores obtenidos después de la implementación del primer año del PMCA en Milluni donde se midieron parámetros *in situ* y *ex situ*.

### 3.2.2.2. Identificación de Partes Interesadas en la gestión del agua en la cuenca de Milluni

El estudio de partes interesadas de la gestión del agua en el área de estudio propuso un primer análisis de las principales instancias involucradas, con el propósito de alcanzar una adecuada gobernanza del agua en la Microcuenca Milluni. Se trabajó bajo los enfoques y metodologías propuestas por Mayers, J. (2005), Yang et al. (2016), Trawick, A. (2003), Lupo, P. (2010), Reed et al., (2009) y ODA (1995 a, b). El análisis de partes interesadas de Milluni comprendió tres fases, las cuales se exponen en la Figura 11.

Figura 11. Fases para el análisis de partes interesadas



Fuente: elaboración propia, 2022.

A continuación, se describen las fases del análisis de partes interesadas.

#### a) Identificación de las partes interesadas y sus intereses

Para la identificación de las partes se pueden utilizar entrevistas con expertos, grupos focales, muestreo de bolas de nieve o una combinación de estos. Reed et al. (2009) y Clarkson, (1994, 1995) indican que la identificación de las partes interesadas suele ser un proceso iterativo y fácil, en el que se agregan partes interesadas adicionales a medida que avanza el análisis. Sin embargo, existe el riesgo de que algunas partes interesadas se pasen por alto accidentalmente, lo que resultará en que no se identifiquen todas las partes relevantes del fenómeno. Clarke y Clegg (1998) señalan que, en algún momento se debe trazar una línea de responsabilidades e intereses en base a criterios bien fundamentados como criterios geográficos, demográficos, políticos e incluso de nacionalidad, edad, etc. Para este estudio se aplicaron entrevistas online con actores clave de la UGCK, debido a las limitaciones de reuniones presenciales por la emergencia sanitaria del COVID 19.

#### b) Clasificación y diferenciación de las partes interesadas

Lupo (2010) expone la taxonomía propuesta por Mitchell, et al. (1997) que clasifica a los actores latentes, expectantes y definitivos, obtenidos mediante la asignación de atributos. Atributos como el poder, La legitimidad, la urgencia, la proximidad, los cuales se describen a continuación

- El poder, definido como la influencia pasada y presente que los interesados tienen alrededor del sistema de gestión a nivel nacional, departamental o local, ya sea en la etapa de diseño o ejecución del mismo.
- La legitimidad, cuando los reclamos, solicitudes, gestiones o interés que los interesados tengan en el proyecto sean adecuados, apropiados y elegibles dentro del sistema social y político.
- La urgencia, definida como la medida en que un interesado es activo y puede demostrar su esfuerzo, gestión y solicitudes con la mayor urgencia y solicitar atención inmediata en la ejecución del proyecto.
- La proximidad que permite medir el estado, la calidad o el hecho de estar cerca del área de intervención del proyecto.

En este procedimiento, Coplin et al. (1998), propone una escala de valores a ser establecida para cada interesado en base a los atributos establecidos, donde 1 es el más bajo y 5 el más alto de las escalas atribuidas. Los puntajes otorgados a cada actor deben ser objetivos basados principalmente en el poder, interés e influencia que puedan tener en la ejecución del proyecto. Se recomienda que se considere alto a aquellas partes interesadas cuyo puntaje promedio para

cada atributo sea superior o igual a 3, mientras que menos de 3 se considere bajo. Cuando las partes interesadas tienen todos los atributos con una puntuación de 3 o superior, se clasifican como partes interesadas definitivas, por el contrario, cuando se observa que las partes interesadas tienen un atributo único o ninguno con puntuaciones iguales o superiores a 3 puntos, serán clasificados como latentes. No obstante, se clasifican como expectante a todos los que se encuentren en una posición media, es decir, entre 2 a 3 atributos con puntuaciones de 3 puntos o más (Lupo, 2010).

El adecuado grado de participación de los actores calificados como definitivos tendrán una intervención definida como “colaborativo - colaborar”, porque estos actores tienen mucho poder, legitimidad, urgencia y están cerca del área de influencia; en otras palabras, son las partes interesadas más importantes y deben participar al más alto nivel. Los grupos de interés clasificados como expectantes tendrán una intervención de “pensamiento”, lo que significa que estos grupos de interés deben ser consultados para obtener información y opiniones útiles. Para aquellos con clasificación latente, tendrá una intervención sólo de “conocimiento”, lo que significa que los interesados sólo deben ser informados (Lupo Stanghellini y Collentine, 2008). La Tabla 14 presenta el modelo de tabla que se implementó en esta parte.

Tabla 14. Clasificación de las partes interesadas basada en atributos y escalas

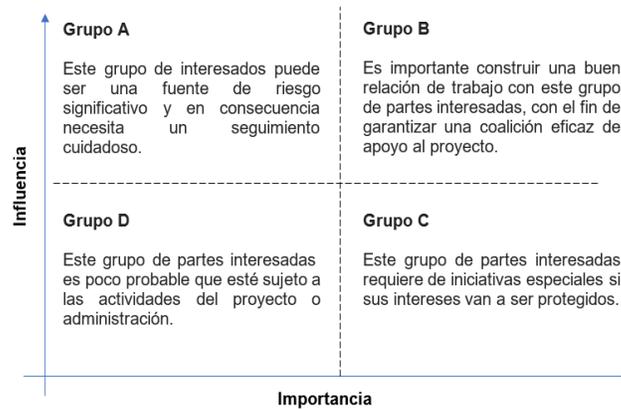
Parte interesada	Poder	Legitimidad	Urgencia	Proximidad	Escala final	Clasificación	Intervención
------------------	-------	-------------	----------	------------	--------------	---------------	--------------

Fuente: Lupo, P. (2010) y Mitchell et al. (1997).

### c) Relación entre partes interesadas

Un método común que permite describir las interrelaciones de las partes interesadas es la matriz de vinculación descrita en la Figura 12, propuesta por ODA, (1995a, b), Grimble & Wellard, (1997), Biggs y Matsaert, (1999) y Lupo, (2010).

Figura 12. Matriz de clasificación de partes interesadas según influencia e importancia activa



Fuente: elaborado en base a ODA, 1995a, b; Grimble and Wellard, 1997; EC, 2003; Aggens, 1998; Lupo, P., 2010.

La matriz que se usó en esta fase se presenta en la Tabla 15, donde se enumeran los actores en las filas y columnas creando de manera visual las interrelaciones las cuales pueden describirse utilizando palabras clave.

Tabla 15. Interés-Influencia y relacionamiento entre partes interesadas

Parte interesada	Interés	Influencia sobre el uso del agua	Percepción y cercanía al proyecto	Relación clave con otras partes interesadas	Cargos de contacto
------------------	---------	----------------------------------	-----------------------------------	---	--------------------

Fuente: Lupo, P., 2010 y Mitchell et al., 1997.

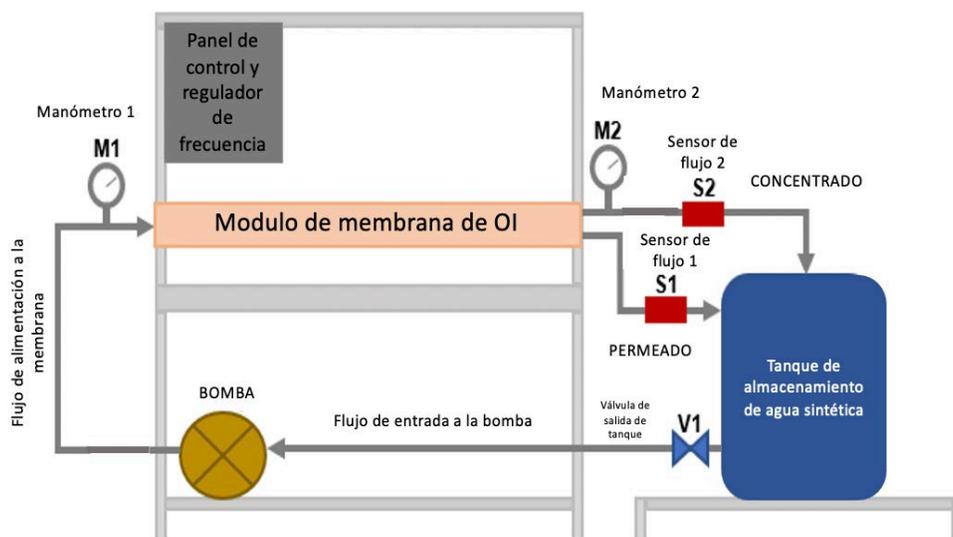
### 3.2.3. Montaje del piloto experimental y diseño de experimentos

En este apartado se describen el proceso de montaje de la planta piloto y el desarrollo del diseño de experimentos.

#### 3.2.3.1. Diseño y puesta en marcha de la planta piloto de ósmosis inversa

Para analizar y evaluar la remoción de metales pesados en el agua se diseñó una planta piloto de OI. Este piloto tuvo sus bases en un prototipo de la Universidad Politécnica de Valencia. La implementación del piloto se efectuó en el laboratorio del Centro de Investigación en Agua, Energía y Sostenibilidad (CINAES) en el campus de La Paz de la Universidad Católica Boliviana “San Pablo”. El sistema se montó en un marco de aluminio y una mesa de acero inoxidable. Es importante destacar que el sistema trabajó en circuito cerrado. El agua sintética se introdujo en el tanque de almacenamiento y mediante bombeo esta circula al módulo de OI (membrana), la cual tiene dos salidas, el concentrado y el permeado, ambas son recirculadas al tanque de almacenamiento. La Figura 13 presenta un esquema del sistema.

Figura 13. Esquema de planta piloto de OI



Fuente: Elaborado en base a Villena et al., 2020.

En el piloto experimental se utilizó una membrana comercial Keesen modelo ULP-2540 (Keensen, 2020) con una carcasa Wave Cyber (Shanghai) modelo 2540.300.1. La membrana del tipo Poliamida, enrollada en espiral tiene un área activa de 25 m<sup>2</sup>, permite un permeado de 2.84 m<sup>3</sup>/d con un rechazo de concentrado de hasta un 99.3%, según datos del Fabricante. La máxima presión de trabajo que puede aplicarse es de 600 psi (40 bares) y la proporción mínima de concentrado es de 8%, según datos del fabricante (Keensen, 2020).

Al ser la OI un proceso que necesita una fuerza impulsora para poder efectuar el proceso de separación, se utilizó una bomba centrífuga/eléctrica multietapa modelo LEO-2ACM150H. La potencia de la bomba es de 2 HP y tiene una presión máxima de operación de hasta 35 bares. Además, se contó con una válvula de seguridad ante posibles cambios de presión. El sistema de bombeo se configuró mediante un regulador de frecuencia que permitió la manipulación del caudal de ingreso al sistema. Con el objetivo de proteger al módulo de la membrana se necesitó incorporar antes de la bomba un filtro de agua capaz de retener posibles materiales en suspensión.

Para monitorizar las presiones de ingreso y salida del sistema se usaron manómetros ubicados antes y después del módulo de membrana. Estos permiten visualizar la pérdida de presión existente y controlar las presiones de trabajo. Para la evaluación del comportamiento y funcionamiento de la membrana es necesario el control permanente de los flujos de las dos salidas del módulo de membrana (permeado y concentrado), para esto se instalaron sensores de flujo en ambas salidas. Los sensores de flujo son de la marca Gems Sensors, con escalas de 0.5 a 5 l/min para el permeado y de 1 a 25 l/min para el concentrado. Los sensores estuvieron programados a una tarjeta Arduino, la cual al conectarse a un ordenador permitió la medición y registro de datos de caudal a tiempo real. Adicionalmente, se instaló un rotámetro analógico en el concentrado para tener un control visual de esta salida. Las especificaciones técnicas de los equipos anteriormente mencionados se encuentran en el Anexo 1.

Para la puesta en marcha de la planta piloto se realizaron dos ensayos preliminares. En primer lugar se hizo el ensayo de permeado, el cual proporciono los valores referenciales de inicio de operación en la planta de OI, estos valores sirvieron para saber si la membrana disminuye su permeabilidad con el paso de del tiempo y controlar la efectividad de las sesiones de limpieza. Posteriormente, se efectuó el ensayo de corrección de temperatura para evitar que esta variable pueda interferir en los resultados de la experimentación. Los procedimientos de ambos ensayos preliminares se encuentran en el Anexo 2.

### 3.2.3.2. Diseño de experimentos

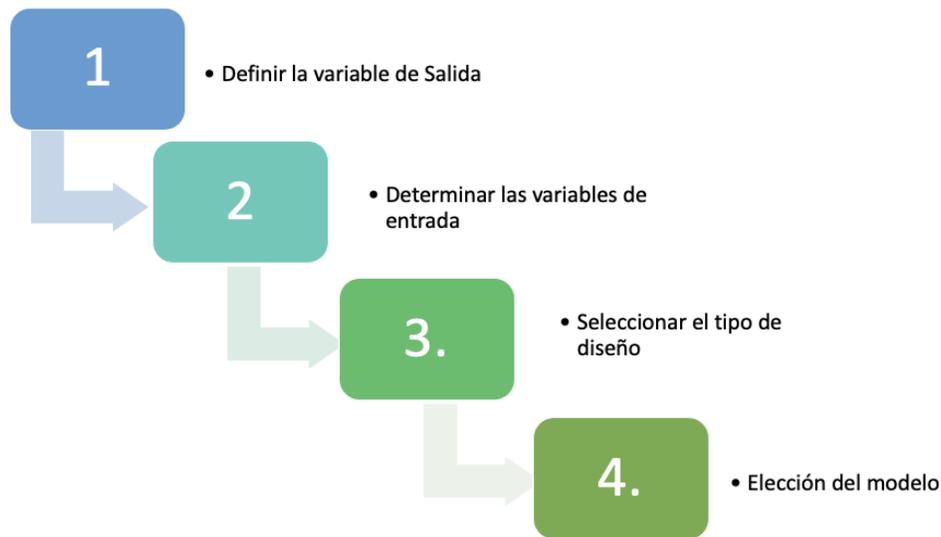
Para determinar el número de pruebas necesarias para obtener resultados representativos del experimento, es necesario un diseño de experimentos. El diseño se realizó con el programa de Statgraphics Centurion XVIII (2018), específicamente usando la aplicación “Asistente de Diseño de Experimentos”. A continuación se detallan los pasos que se siguieron:

1. Primero se introdujeron las variables de salida con sus unidades en el sistema. Estas fueron: Flux medio analítico “Flux”, Índice de rechazo de Metal “R1” e Índice de rechazo de conductividad “R2”.

2. Como segundo paso se definieron las variables de entrada, además se determinó que las variables sean de tipo continuo y se fijaron sus valores altos, medios y bajos. Las variables de entrada fueron: Presión “P”, Caudal de Ingreso “Co” y Concentración del metal “C”
3. Como tercer paso se eligió el tipo de diseño a utilizar.
4. Finalmente, se determinó el modelo cuadrático para ajustar los resultados del experimento.

En la Figura 14 se observa una síntesis el proceso.

Figura 14. Pasos seguidos para el diseño de experimentos



Fuente: Elaboración propia, 2022.

#### 3.2.4. Remoción del metal pesado problema

Para la remoción del metal pesado identificado como problema en el área de Milluni se desarrollaron tres fases, las metodologías de estas se detallan a continuación.

##### 3.2.4.1. Preparación de aguas sintéticas

Para el diseño de experimentos se definió que se trabajará con tres niveles de concentración para las aguas sintéticas, estas fueron baja, media y alta. Para preparar la concentración baja (Co), se utiliza el valor de la concentración máxima admisible del ion metálico según la Norma Boliviana 512, la cual tiene congruencia con la EPA. La concentración media es cinco veces la primera concentración (Cox5). Finalmente, la concentración alta fue diez veces la concentración inicial preparada (Cox10).

Las aguas sintéticas que contenían arsénico se prepararon utilizando patrón de As de 1000 µg/mL de Inorganic Ventures®. La preparación de las aguas sintéticas se realizó empleando la ecuación 3.

$$V * C = V' * C' \quad (3)$$

Donde:

- V= Volumen de la solución patrón del metal
- C= Concentración del metal en la solución
- V'=Volumen deseado
- C'= Concentración deseada

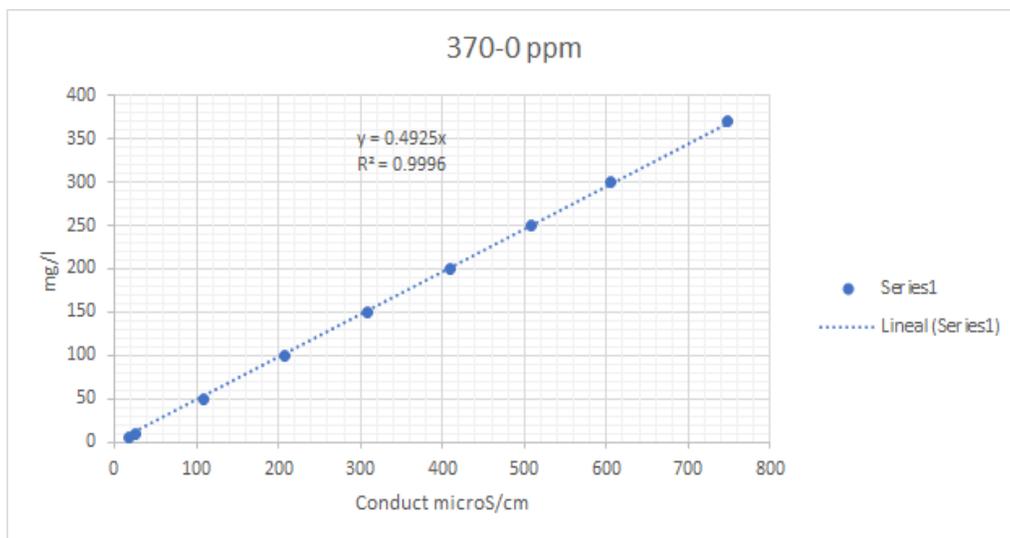
El volumen del patrón necesario para llegar a la concentración deseada para la experimentación se obtuvo mediante la ecuación 4.

$$V = \frac{V' * C'}{C} \quad (4)$$

Una consideración importante para la preparación de las aguas sintéticas es que el volumen que se tomó para la experimentación es de 40 litros. Además, para simular la conductividad representativa del área de estudio, se usó cloruro de sodio (NaCl) como reactivo que proporciona conductividad al agua. El NaCl utilizado fue proporcionado por VIOPACK® con una pureza >99%. Para conocer la cantidad de NaCl necesaria para alcanzar las conductividades deseadas en las aguas sintéticas para los tres niveles se utilizó la ecuación 5 obtenida mediante la curva experimental del trabajo de Domínguez (2018) que se muestra en la Figura 15.

$$y = 0,4925x \quad (5)$$

Figura 15. Curva empírica para determinar la cantidad NaCl



Fuente: Domínguez, 2018.

#### 3.2.4.2. Análisis estadístico de los resultados del experimento

Una vez realizados los experimentos, se prosiguió con el análisis estadístico de los resultados mediante el programa de Statgraphics Centurion XVIII (2018), con el objetivo de maximizar las variables de respuesta. Para la interpretación de los resultados se observó y analizó el diagrama de Pareto, la tabla ANOVA, el gráfico de efectos principales, el gráfico de interacciones y gráfico de superficie respuesta.

#### 3.2.4.3. Desarrollo del modelo matemático

La OI es el tratamiento más prometedor en el mundo entero para la separación de contaminantes a nivel iónico presentes en el agua (Feria-Díaz et al., 2021). Sin embargo, se ha observado que los altos costos energéticos durante su operación han limitado su aplicabilidad (Yang, et al., 2019). Para establecer un modelo matemático del proceso de separación se analizó el fenómeno de concentración – polarización. El modelo matemático permite comprender el comportamiento físico del sistema y buscar la optimización del mismo.

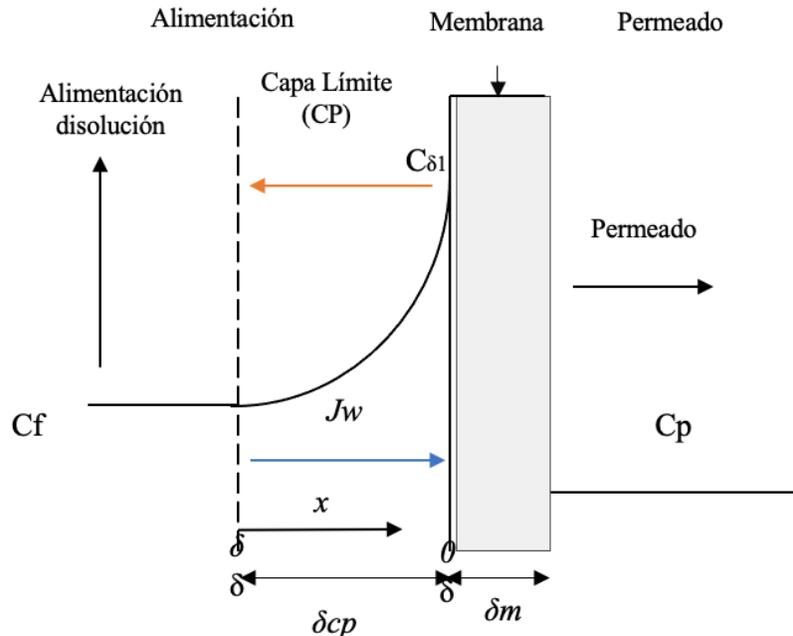
##### 3.2.4.3.1. La Concentración – Polarización

Una razón principal para la disminución del flujo durante el período inicial de un proceso de separación es la polarización de la concentración del soluto en la superficie membrana (Sablani et al., 2001). El fenómeno de polarización – concentración (CP) que ocurre cerca de la membrana, afecta significativamente al proceso de transferencia de masa. Por tanto, el estudio de la transferencia de masa a la membrana exterior se centra en el modelado del fenómeno CP (Chenghan y Han, 2019).

El efecto de la polarización por concentración en un sistema de ósmosis inversa sucede cuando el soluto tiende a acumularse sobre la superficie de la membrana evitando dejar pasar al disolvente (Armijo y Condorhuaman, 2012). En la medida que avanza el proceso de separación del soluto en la membrana de ósmosis inversa, estos van quedando retenidos dentro de la membrana y en el lado interno de la misma, estos solutos corresponden a sales disueltas o iones contaminantes que no han podido pasar el permeado. Este proceso de transferencia de masa ocurre en la capa límite e interna de la membrana y es denominada la Capa de CP (Garcia, 2002).

La Figura 16 esquematiza el modelo de transferencia de masa por incremento de concentración en la zona próxima a la membrana (Capa Interna) por efecto de la acumulación del soluto retenido.

Figura 16. Esquema de concentración-polarización en ósmosis inversa



Fuente: Elaboración propia en base a Chenghan y Han, 2019.

De acuerdo con el esquema de la Figura 16 el sistema supone que las condiciones del flujo a distancias mayores que  $\delta$  la concentración del soluto de ingreso ( $C_f$ ) es constante debido a que el flujo es turbulento paralelo a la membrana. Sin embargo, cerca de la membrana se tiene la capa límite donde la concentración aumenta y puede llegar a un máximo en la superficie de la membrana  $C_{\delta 1}$ . El flujo convectivo de solutos hacia la membrana es  $J_w$ , si el soluto no es retenido completamente por la membrana se tendrá un soluto a través de esta, representada como la concentración de permeado ( $C_p$ ) (Salcedo-Díaz, 2006 y Chenghan y Han, 2019).

La temperatura es un parámetro muy difícil de controlar en un medio natural, sin embargo, en un proceso operativo en planta es importante evaluar su efecto en el funcionamiento de la OI (Lora, et al. 2020). Para esto, el modelo de Arrhenius plantea que la variabilidad de la permeabilidad con la temperatura en los procesos de transporte en OI deben ser considerados en el análisis complementario (Mulder et al., 1996). Por este motivo se realizó un ajuste al factor temperatura que se basó en el modelo de Arrhenius, para evitar que este factor influya en las variables respuesta.

#### 3.2.4.3.2. Modelo de Spiegler-Kedem

Según Pontié et al. (2008), el modelo de Spiegler-Kedem señala que el transporte de solutos a través de una membrana puede ser descrito con los principios de la Termodinámica Irreversible (TI), que relaciona los flujos del disolvente y soluto con los coeficientes de transporte que, a su vez son independientes de la concentración de soluto (Hidalgo et al., 2013). Para un sistema conformado por dos componentes, agua y soluto, la TI plantea las ecuaciones 6 y 7 que son las básicas del modelo.

$$Jv = Lp(\Delta p - \sigma * \Delta \pi) \quad (6)$$

$$Js = B_s (C_{\delta,1} - C_p) + (1 - \sigma) * Jv * C_s = Jv * C_p \quad (7)$$

Donde:

- $Jv$  = Flux del disolvente.
- $Js$  = Flux del soluto.
- $Lp$  = Coeficiente de permeabilidad del disolvente (permeabilidad del agua en la membrana).
- $\Delta p$  = Presión transmembrana o presión de operación del sistema.
- $\Delta \pi$  = Diferencia en la presión osmótica.
- $\sigma$  = Coeficiente de reflexión.
- $B_s$  = Coeficiente de transporte del soluto.
- $C_{\delta,1}$  = Concentración de soluto en la superficie de la membrana (lado de alimentación).
- $C_p$  = Concentración del soluto en el permeado.
- $C_s$  = Concentración del soluto dentro de la membrana.

La expresión  $Jv * C_p$ , se expresa en la ecuación 8.

$$Jv * C_p = Jv * C - D \frac{dc}{dx} \quad (8)$$

Donde:

- $C$  = Concentración del soluto en la capa CP.
- $D$  = Coeficiente de difusión.

La ecuación 8 puede transformarse a la ecuación 9 si se trasponen factores.

$$D \frac{dc}{dx} = Jv * C - Jv * C_p \quad (9)$$

De acuerdo con el esquema de la Figura 15, las condiciones límites son:

$$X=0 \rightarrow C = C_{\delta,1}$$

$$X=\delta \rightarrow C = C_f$$

Integrando se tiene la ecuación 10, que se presenta a continuación.

$$\frac{C_{\delta,1} - C_p}{C_f - C_p} = e^{\frac{Jv \cdot \delta_{cp}}{D}} = e^{\frac{Jv}{k}} \quad (10)$$

Donde:

- $\delta_{cp}$  = Espesor de la capa CP.
- $k$  = Coeficiente de transferencia de masa en la CP.

El principio de conservación de masa se plantea por medio de las ecuaciones 11 y 12:

$$Q_f \cdot C_f = Q_b \cdot C_b + Q_p \cdot C_p \quad (11)$$

$$Q_f = Q_b + Q_p \quad (12)$$

Donde:

- $Q_f$  = Flujo de alimentación.
- $Q_b$  = Flujo del concentrado.
- $Q_p$  = Flujo del permeado.
- $C_b$  = Concentración del flujo de concentrado.

La relación entre  $Q_p$  y  $Jv$  se muestra en la ecuación 13:

$$Jv = \frac{Q_p}{S} \quad (13)$$

Donde:

- $S$  = Área efectiva de la membrana.

La recuperación “y”, que representa la capacidad de producción de agua es definida como la fracción del flujo de alimentación que pasa a través de la membrana o también denominado el flujo de permeado. Cuanto mayor es este flujo mayor es la capacidad de producción del sistema de OI, este valor se determina con la ecuación 14.

$$y = \frac{Q_p}{Q_f} * 100 \quad (14)$$

El coeficiente de rechazo que se representa en la ecuación 15, compara la concentración de soluto en el flujo de ingreso  $C_f$ , respecto a la concentración del soluto en el flujo de permeado  $C_p$ .

$$RO = \frac{C_f - C_p}{C_f} \quad (15)$$

El coeficiente de reflexión muestra la capacidad de separación de una membrana, para un  $\sigma=0$  no existe separación, mientras que para  $\sigma=1$  se tiene un 100% de separación, para este caso y al tener una membrana semipermeable, el  $\sigma$  para este estudio estará próximo a 1.

$\Delta\pi$ , se calcula con la ecuación 16.

$$\Delta\pi = R * T (C_{\delta,1} - C_{\delta,2}) = R * T (C_{\delta,1} - C_p) \quad (16)$$

Donde:

- R = Constante de la ley de los gases.
- T = Temperatura.
- $C_{\delta 2}$  = Concentración del soluto en la superficie de la membrana (lado permeado).

Una de las ventajas del modelo es la manera rápida y sencilla de calcular los factores el factor  $\sigma$  a través de ajuste de curvas, para esto se supone que la concentración del soluto en la alimentación  $C_f$  es semejante a la de la superficie en la membrana  $C_{\delta 1}$  (Hidalgo et al., 2013), por lo que la ecuación 17 queda como:

$$\Delta\pi = R * T (C_{\delta,1} - C_p) \quad (17)$$

Al sustituir la ecuación 10 y 17 en la ecuación 6, se tiene la ecuación 18.

$$Jv = Lp (\Delta p - \sigma * \Delta\pi) = Lp(T) [\Delta p - \sigma * \Delta\pi * e^{\frac{Jv}{k}}] \quad (18)$$

La variación de temperatura durante el proceso experimental genera una variación del parámetro  $Lp$ , por lo que el mismo debe ser ajustado con el modelo de Arrhenius (Huang y Lin, 1968), esto se muestra en la ecuación 19.

$$A = A_0 * e^{-\frac{\Delta H}{R} * (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (19)$$

Considerando al valor de A como el parámetro  $Lp(FaT)$  ajustado al factor de ajuste por temperatura y  $A_0$  como el factor teórico de  $Lp_0$ , con estas consideraciones la ecuación 20 quedaría como:

$$Lp(FaT) = Lp_0 * e^{-\frac{\Delta H}{R} * (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (20)$$

Donde el factor de ajuste viene representado de acuerdo con la ecuación 21.

$$FaT = e^{-\frac{\Delta H}{R} * (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (21)$$

Combinando las ecuaciones 18, 20 y 21 se tiene la ecuación 22 que representa el modelo final propuesto.

$$Jv = Lp_0 \cdot e^{-\frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \cdot [\Delta p - \sigma * R * T (C_f - C_p) e^{\frac{Jv}{k}}] \quad (22)$$

El valor de  $-\Delta H/R$ , se calcula a partir de la recta de calibración del ensayo de permeabilidad de la membrana realizado con diferentes temperaturas, el modelo considera una temperatura base de 293 K.

Los parámetros del modelo  $L_p$ ,  $\sigma$  y  $k$ , fueron determinados a partir de los datos experimentales y regresiones no lineal con la herramienta de cálculo y modelación Matlab.

## 4. Resultados

En este apartado se presentan los resultados de la investigación en cuatro etapas. La primera etapa expone la caracterización del área de estudio. La segunda etapa engloba la propuesta para el fortalecimiento de la gestión del agua en la microcuenca de estudio. La tercera etapa muestra el diseño final del prototipo experimental y la operación del mismo. Finalmente, en la cuarta etapa, se presentan los resultados de la implementación de la tecnología de OI en la remoción del metal pesado identificado como peligroso en Milluni.

### 4.1. Caracterización de los cuerpos de agua superficiales de Milluni

A continuación, se presentan cinco pasos que fueron imprescindibles para una adecuada caracterización del área de estudio. En primer lugar, se hizo el análisis de los datos históricos de Milluni, permitiendo una primera discriminación de la información válida del área. Como un segundo paso se realizó un análisis climatológico para comprender la dinámica hidrológica que sigue la microcuenca de estudio. Como tercer paso se formuló el programa de monitoreo de calidad del agua para la parte alta de Milluni, con base en estándares internacionales y tomando en cuenta la información obtenida de los pasos anteriores. Como cuarto paso se obtuvieron los resultados de la implementación del año piloto (primer año) del programa de monitoreo. Por último, en el quinto paso, se evaluaron estadísticamente los resultados del paso anterior para poder validar los componentes del programa de monitoreo.

#### 4.1.1. Resultado del análisis de los datos históricos de Milluni

En los siguientes apartados se presentan los resultados de las dos instancias que comprenden el análisis de los datos históricos de monitoreo de Milluni.

##### 4.1.1.1. Discriminación básica

Del análisis de todos los datos disponibles de monitoreo del área de Milluni del 2006 al 2018 (Anexo 3), se destacan los siguientes puntos:

- **El monitoreo no fue homogéneo en su frecuencia.** Entre 2006 y 2015 ocurrió un solo evento de monitoreo cada año. Sin embargo, desde 2015 hasta el presente, ocurrieron dos eventos de monitoreo cada año, uno en la estación seca y otro en la estación húmeda.
- **Los puntos de monitoreo no se mantuvieron.** En algunos casos los puntos monitorizados cambiaron su ubicación con el tiempo, provocando que no se pueden realizar comparaciones entre puntos.
- **Se cambiaron los parámetros de monitoreo.** Esto dificultó el análisis de la variabilidad de ciertos parámetros a lo largo del tiempo.
- **En 2016 se realizó un estudio detallado de la zona de Milluni.** Se monitorizaron ocho puntos, lo que permitió validar los puntos a mantener en el futuro.

Como resultado, existe una inconsistencia y heterogeneidad en los datos de monitoreo de Milluni. Las debilidades detectadas sugieren que es necesaria la optimización del programa de monitoreo para generar información completa y confiable sobre la calidad del agua en el área de estudio. El objetivo principal de este análisis fue identificar las series homogéneas. Las series homogéneas pertenecen a los puntos monitorizados que cuentan con más datos dentro del periodo de tiempo estudiado. Las series homogéneas identificadas fueron 3: Punto de la cabecera de la Laguna Pata Khota, Punto en el efluente de la Laguna Milluni Chico y Punto en la Presa de almacenamiento en salida de la Laguna Milluni Grande.

Por la falta de datos en las series identificadas se imposibilita realizar un estudio estadístico de los datos históricos. Por lo tanto, se llevó a cabo un análisis de datos aproximados para identificar la presencia de metales pesados y su persistencia en el tiempo, los resultados de este análisis se presentan en el siguiente apartado.

#### 4.1.1.2. Análisis de datos aproximados de las series homogéneas

Las series homogéneas analizadas cuentan con una ubicación estratégica para vislumbrar de manera inicial la contaminación existente en las lagunas de Milluni. A continuación, en las Tablas 16, 17 y 18 se expone el resumen de los metales pesados detectados en los puntos monitoreo. Se debe denotar que no se presentan valores numéricos para los parámetros debido a la confidencialidad solicitada por la UGCK. Sin embargo, como referencia se compararon los valores de los parámetros con los LCM para agua potable de la Norma Boliviana 512.

La Tabla 16 presenta los datos del punto en la cabecera de la Laguna Pata Khota. Este es el punto más alto de la cuenca, las lagunas se alimentan directamente del deshielo del glaciar Huayna Potosí. En 2015, tres metales, As, Cd y Fe, excedieron los límites aceptables. Este fenómeno podría deberse a una pequeña actividad de exploración minera que ocurrió en un corto período de tiempo. El arsénico es el metal que, con mayor frecuencia, excede los valores regulatorios, lo que implica que el As debe ser priorizado en futuros monitoreos.

Tabla 16. Parámetros medidos en el punto de la cabecera de la Laguna Pata Khota

Metal	2011 (EH)	2011 (ES)	2012 (EH)	2014 (ES)	2015 (EH)	2015 (ES)	2016 (EH)	2017 (ES)	2018 (EH)
As	✓	x	-	x	x	✓	x	✓	✓
Cd	-	✓	-	✓	x	✓	✓	✓	✓
Fe	-	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	✓
Zn	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	✓
Mn	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	✓

Nota: x= valores que exceden la regulación; ✓ = valores que están dentro de la normativa; - = valores no disponibles; ES= Estación Seca; EH= Estación Húmeda. Fuente: Datos de UGCK, 2018.

La Tabla 17 muestra que el punto en el efluente de la Laguna Milluni Chico es la parte más contaminada del área. Este Punto, solo se monitoriza desde 2016 lo que proporciona

información limitada del sitio. La contaminación por desechos mineros es evidente en el color naranja rojizo del agua y los sedimentos de esta zona (Figura 17). Además, las concentraciones de As, Cd, Fe, Zn y Mn superan los límites permitidos de la Norma Boliviana 512, en los años monitorizados.

Tabla 17. Parámetros medidos en el punto en el efluente de la Laguna Milluni Chico

<b>Metal</b>	<b>2016 (EH)</b>	<b>2017 (ES)</b>	<b>2018 (EH)</b>
As	x	x	x
Cd	x	x	x
Fe	x	x	x
Zn	x	x	x
Mn	x	x	x

Nota: x= valores que exceden la regulación; ✓ = valores que están dentro de la normativa; - = valores no disponibles; ES= Estación Seca; EH= Estación Húmeda. Fuente: Datos de UGCK, 2018.

Figura 17. Laguna Milluni Chico



La Tabla 18 expone los datos correspondientes al punto ubicado en la represa de almacenamiento, salida de la Laguna Milluni Grande. Este es el punto que tienen mayor información y con datos más homogéneos. La contaminación de la Laguna Milluni Grande era esperada porque recibe agua de la Laguna Milluni Chico, el cuerpo de agua más contaminado de Milluni expuesto anteriormente. Las concentraciones de As, Cd, Fe, Zn y Mn, superan los límites permitidos.

Tabla 18. Parámetros medidos en la Presa de almacenamiento en salida de la Laguna Milluni Grande

Metal	2006 (ES)	2007 (EH)	2007 (ES)	2008 (EH)	2011 (EH)	2011 (ES)	2014 (ES)	2016 (EH)	2017 (ES)	2018 (EH)
As	x	x	x	✓	✓	x	x	x	x	x
Cd	-	x	x	✓	-	x	x	x	x	x
Fe	x	x	x	x	-	✓	✓	x	x	x
Zn	x	x	x	✓	✓	✓	-	x	x	x
Mn	-	x	x	✓	✓	✓	-	x	x	x

Nota: x= valores que exceden la regulación; ✓= valores que están dentro de la normativa; - = valores no disponibles; ES= Estación Seca; EH= Estación Húmeda. Fuente: Datos de UGCK, 2018.

En resumen, el análisis de los datos históricos de Milluni reveló que existe contaminación por metales pesados, los cuales están presentes en concentraciones que exceden los LMC. Para validar esta primera evaluación, se implementó un año de monitoreo específico para metales pesados, los resultados del mismo se presentan más adelante en el apartado 4.1.4..

#### 4.1.2. Análisis climatológico de Milluni

Para realizar el análisis climatológico se realizó el procedimiento expuesto en el apartado 3.2.1.2.. En primer lugar, se recolectó información de precipitación y evapotranspiración de las estaciones meteorológicas de SENHAMI desde 1999 hasta 2018; los datos completos se presentan en el Anexo 4. La Tabla 19 muestra los valores promedio obtenidos para todos los meses del año en términos de precipitación total y evapotranspiración total y media.

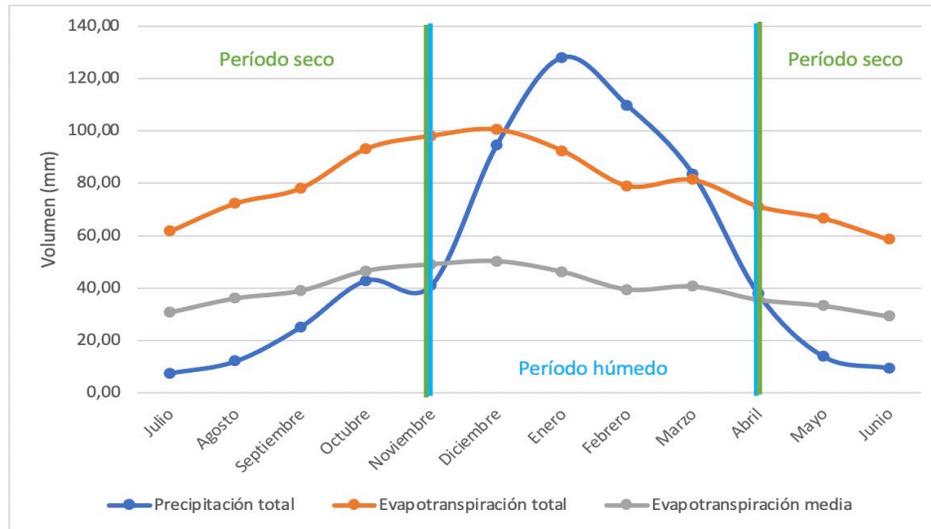
Tabla 19. Datos promedio de precipitación y evapotranspiración para el área de Milluni

Mes	Precipitación total	Evapotranspiración total	Evapotranspiración media
Julio	7,54	61,62	30,81
Agosto	12,10	72,26	36,13
Septiembre	25,16	78,05	39,03
Octubre	42,92	93,12	46,56
Noviembre	41,09	98,06	49,03
Diciembre	94,67	100,49	50,24
Enero	128,06	92,43	46,22
Febrero	109,71	79,00	39,50
Marzo	83,67	81,25	40,63
Abril	37,92	71,17	35,59
Mayo	13,95	66,55	33,27
Junio	9,52	58,44	29,22

Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI, 2021.

Con los datos de la Tabla 19 se realizó la Figura 18, en la cual se puede apreciar los periodos seco y húmedo de esta área. El período seco comienza en mayo y dura hasta finales de octubre. El período húmedo comienza en noviembre y finaliza en abril.

Figura 18. Análisis climatológico de Milluni



Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI, 2021.

Del análisis climatológico de Milluni se observa que el pico máximo de precipitación se presenta durante el mes de enero. Esto puede provocar que las lagunas aumenten de volumen y que el fenómeno de dilución de contaminantes se produzca de forma natural. Además, se debe considerar que los meses más secos son junio, julio y agosto. En el período seco, podría ocurrir una concentración de contaminantes debido a la reducción del volumen de agua en las lagunas. Los meses de enero, junio, julio y agosto deben ser prioritarios en programas de monitoreo en el área y examinarse cuidadosamente.

#### 4.1.3. Propuesta de programa de monitoreo de calidad de agua

Este apartado se divide en dos etapas. La primera expone la revisión de los estándares internacionales para identificar los componentes necesarios a incluir en el diseño de programa de monitoreo de aguas superficiales. La segunda presenta la propuesta del PMCA para Milluni, considerando las características especiales del área de estudio descritas en el apartado 3.1..

##### 4.1.3.1. Análisis de estándares internacionales

La ISO (2006), define el monitoreo como "el proceso programado de muestreo, medición y posterior registro o señalización, o ambos, de varias características del agua, a menudo con el propósito de evaluar la conformidad con objetivos específicos". Según el UNEP/WHO (1996), se debe definir el tipo de programa de monitoreo a implementar, y esto está ligado a su propósito u objetivo. Los componentes principales para el diseño de un programa de monitoreo de la calidad del agua están estipulados en ambos estándares internacionales, los cuales se exponen en la Tabla 20.

Tabla 20. Componentes para el diseño de un programa de monitoreo de la calidad del agua

N°	UNEP/WHO, 1996	N°	ISO, 2006
1	Definir claramente los objetivos y el propósito del programa	1	Definir el propósito del programa de monitoreo tomando en cuenta experiencias previas en el área
2	Definir las expectativas y los usos previstos de la información generada por el programa	2	Definir los objetivos del programa
3	Encuesta preliminar	3	Determinación de puntos de muestreo
4	Delimitación del área que va a ser cubierta por el programa de monitoreo	4	Definir la frecuencia y la duración del muestreo
5	Determinación de sitios de muestreo y estaciones de muestreo	5	Definir los requisitos analíticos de las variables a estudiar
6	Definir las variables de calidad del agua a medir	6	Definir qué protocolos de muestreo se utilizarán (muestreo, transporte y almacenamiento para evitar la contaminación de las muestras)
7	Definir la frecuencia y el momento de muestreo propuestos	7	Determinar los recursos necesarios para la implementación del programa
8	Estimación de recursos para la implementación del programa	8	-
9	Establecer un plan para el control y seguimiento de la calidad del programa	9	-

Fuente: Alvizuri et al, 2020.

Los estándares internacionales revisados son de diferentes décadas, pero exponen muchas similitudes con respecto a los componentes que debe contener un programa de monitoreo de la calidad del agua. Ambos documentos enfatizan que los objetivos y propósito del programa son las etapas iniciales y más importantes que definen los demás componentes. Ambos estándares presentan una estrategia para optimizar el diseño del programa. La norma ISO 5667-1:2006 indica que es importante tomar en cuenta experiencias previas en el área para obtener retroalimentación que pueda contribuir al programa que se esté diseñando. Con el propósito de evaluar el programa de monitoreo, la guía de diseño de la UNEP/WHO (1996) propone la implementación de un año piloto al inicio del programa.

Algunos de los componentes similares más significativos entre ambos estándares internacionales incluyen:

- La delimitación del área a estudiar.
- La determinación de los puntos de muestreo.
- La definición de la frecuencia y duración del muestreo.
- La determinación de las variables a medir.
- La estimación y determinación de los recursos (tiempo y dinero) que se deben asignar al programa para tener éxito en su implementación.

Los componentes, lineamientos y recomendaciones de los estándares internacionales fueron tomados en cuenta para el diseño del PMCA de Milluni, el cual se presenta en el siguiente apartado.

#### 4.1.3.2. Componentes del programa de monitoreo de la parte alta de la Microcuenca Milluni

En muchos países, los programas de monitoreo de la calidad del agua se encuentran en protocolos, guías y/o reglamentos. En el caso específico de los cuerpos de agua superficiales, como lagos y lagunas, pocas veces existen secciones específicas. Sin embargo, Bolivia adopta la norma ISO 5667-4:2016, la cual habla específicamente de lagos y lagunas, esta normativa fue usada como referencia clave a la hora del diseño del programa de monitoreo para Milluni. El diseño del PMCA para Milluni tomo estándares internacionales como base y considero las condiciones específicas del área. Los componentes del PMCA se presentan de manera resumida en la Figura 19 y de manera extendida en el Anexo 5.

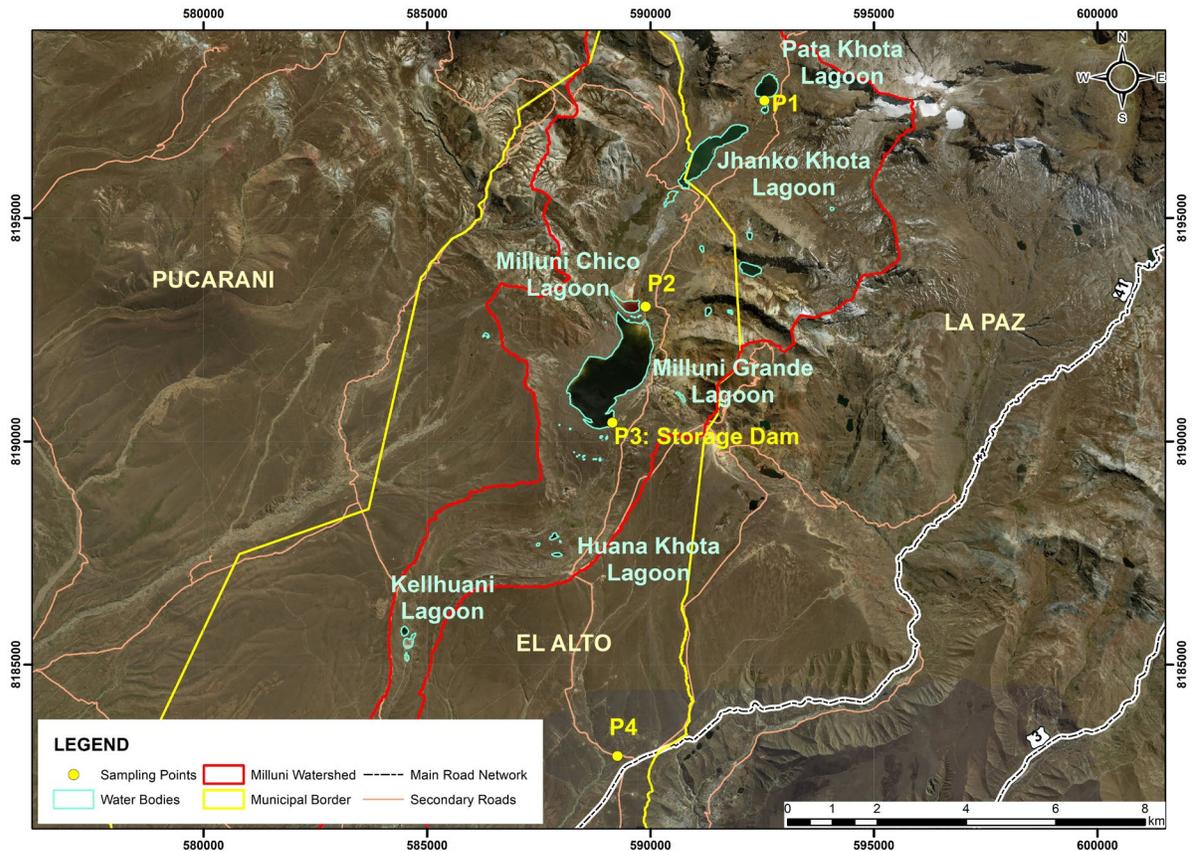
Figura 19. Componentes del programa de monitoreo de Milluni



Fuente: Elaboración propia en base a Alvizuri et al, 2020.

Se debe destacar que la mayoría de los componentes de la ISO 5667-1:2006 son los mismos que en la ISO 5667-4: 2016, con la excepción de las recomendaciones específicas para el protocolo de monitoreo de lagos naturales y artificiales que presenta esta última. La Figura 20 muestra los puntos de monitoreo ubicados en Milluni.

Figura 20. Puntos de monitoreo en la parte alta de Milluni

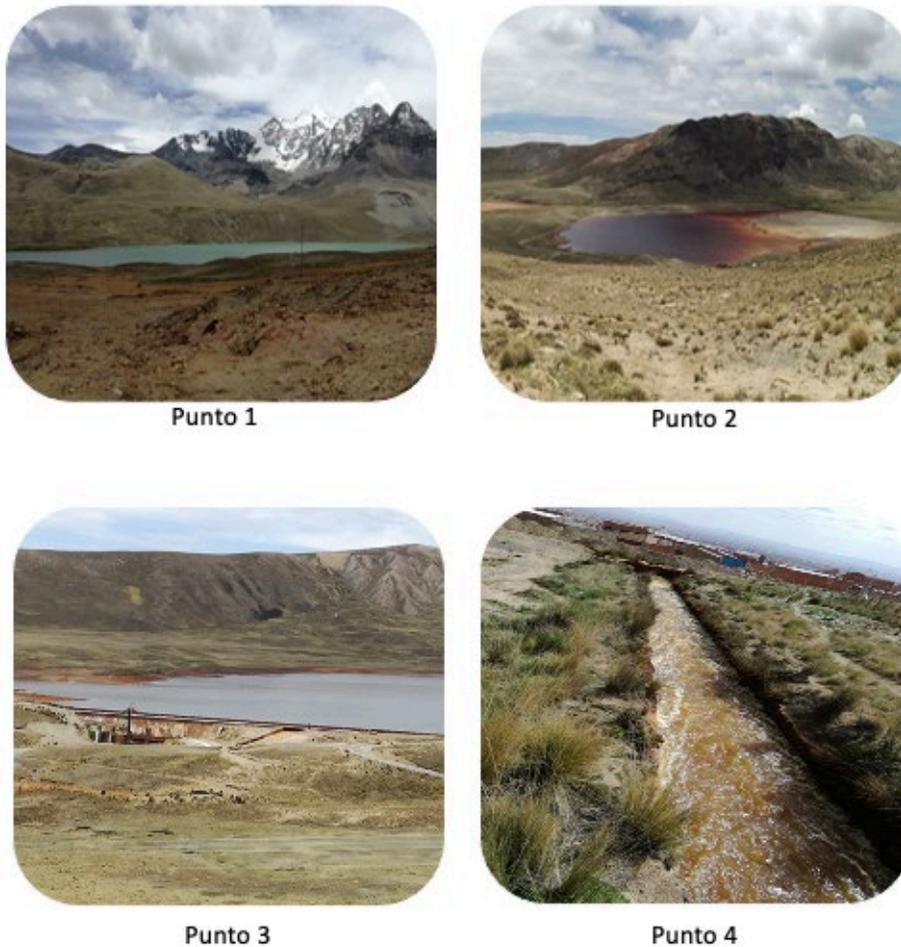


Fuente: Elaboración propia, 2021.

#### 4.1.4. Resultados de la implementación de año piloto del programa

Durante el primer año de implementación del PMCA (año piloto), se midieron parámetros *in situ* y *ex situ* en 4 puntos anteriormente determinados. La Figura 21 muestra fotografías de los puntos.

Figura 21. Puntos de monitoreo en la parte alta de Milluni



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Las ubicaciones georreferenciales, en coordenadas UTM (Universal Transversal Mercator), de los puntos se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21. Ubicación de los puntos de monitoreo

Punto	Coordenadas UTM		Detalle
	E	N	
Punto 1	592549	8197635	Ubicado al inicio del sistema lagunar
Punto 2	589887	8193022	Se encuentra en la salida de la laguna Milluni Chico
Punto 3	589147	8190424	Ubicado en la Laguna Milluni Grande, específicamente en la presa de almacenamiento de agua potable.
Punto 4	592251	8186615	Se encuentra a la salida del sistema de lagunas.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Los parámetros monitorizados *in situ*, fueron los básicos de control que se exige en la Normativa Boliviana 512, los cuales son temperatura, turbidez, pH, oxígeno disuelto y conductividad. Los valores de los parámetros monitorizados se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22. Parámetros medidos *in situ*

Meses	Puntos	Parámetros medidos					
		Temperatura	Turbidez	pH	Oxígeno Disuelto		Conductividad
		°C	NTU		mg/l	% Saturación	uS/cm
Enero	Punto 1	4,50	4,14	6,85	7,31	56,5	48,3
	Punto 2	10,8	29,3	3,32	5,54	50,2	745,0
	Punto 3	13,9	11,7	3,03	5,21	50,7	1119,0
	Punto 4	17,4	81,2	4,16	5,17	54,0	331,2
Marzo	Punto 1	4,50	3,21	7,01	7,56	55,1	37,8
	Punto 2	8,80	20,6	3,54	6,01	51,2	800,0
	Punto 3	9,50	11,7	3,45	5,59	50,6	1080,0
	Punto 4	13,0	75,3	4,45	5,20	53,1	554,0
Mayo	Punto 1	4,60	1,83	6,70	7,90	107,2	38,7
	Punto 2	8,70	3,41	2,83	6,59	97,7	1723,0
	Punto 3	9,00	2,75	2,76	7,06	104,2	1246,0
	Punto 4	9,70	55,8	2,83	7,13	104,6	1033,0
Agosto	Punto 1	4,00	3,25	7,37	7,66	102,8	64,9
	Punto 2	10,8	7,83	2,78	6,41	101,6	1966,0
	Punto 3	10,6	8,07	2,68	6,68	104,3	1442,0
	Punto 4	7,70	109	3,38	7,34	103,2	972,0
Octubre	Punto 1	6,50	3,51	4,60	5,60	100,0	71,5
	Punto 2	11,5	5,30	2,81	4,99	94,0	1718,0
	Punto 3	14,4	23,2	2,67	5,67	99,6	1486,0
	Punto 4	13,0	36,9	3,25	6,04	96,1	727,0
Diciembre	Punto 1	5,50	2,54	6,50	5,80	100,0	65,2
	Punto 2	10,5	4,50	3,23	4,45	102,0	850,0
	Punto 3	12,4	9,80	2,57	4,98	99,2	1200,0
	Punto 4	11,3	67,0	4,50	6,10	97,6	956,0

Fuente: Elaboración propia, 2021.

De la Tabla 22 se denota que, la mayor turbidez se encuentra en el punto 4 para todos los meses monitorizados. El pH más bajo se da en los puntos 2 y 3, exponiendo un carácter ácido en las aguas de estos puntos. El rango de Oxígeno Disuelto (OD) para todos los puntos es aceptable, lo que indica que no hay condiciones anóxicas. Finalmente, se observa que las mayores conductividades se presentan en los puntos 2 y 3, para todos los meses monitorizados.

Relacionando los valores presentados en la Tabla 22 con las ubicaciones de los puntos monitorizados, se presentan algunas observaciones para cada punto en la Tabla 23.

Tabla 23. Observaciones por punto monitorizado

Punto de monitoreo	Observación
Punto 1	En el primer punto monitorizado, ubicado en la cabecera del sistema hídrico Milluni, es el menos contaminado, verificando los valores obtenidos con la norma boliviana 1333 en su Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 1992), corresponde a un agua tipo A, apta para consumo humano.
Punto 2	El segundo punto ubicado en la Laguna Milluni Chico es el más contaminado. Esto se puede atribuir a la actividad minera pasada y actual que se desarrolla a su alrededor, ya que tiene un carácter ácido y altas conductividades.
Punto 3	En el tercer punto se ubica en la represa de almacenamiento de agua, se presentan parámetros correspondientes aguas acidas demostrando que las fuentes de agua naturales que son los afluentes de la Laguna Milluni Grande son impactadas negativamente por las actividades antrópicas en la zona.
Punto 4	El cuarto punto muestra que el pretratamiento aplicado al efluente de la represa no estaría acondicionando adecuadamente el agua para su ingreso a la planta de potabilización, ocasionando un riesgo en su correcto funcionamiento.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

En cuanto a los parámetros medidos *ex situ*, los datos completos se encuentran en el Anexo 6. Este análisis confirmó la presencia de arsénico en concentraciones que superan la normatividad nacional de agua potable. El LMC, en la normativa boliviana, para el arsénico es de 0.01 mg/L. La presencia del arsénico en concentraciones por encima de lo establecido representa un riesgo inminente a la salud pública ya que las plantas de tratamiento que tratan las aguas provenientes de Milluni no tienen procesos específicos para remover metales pesados, en específico arsénico.

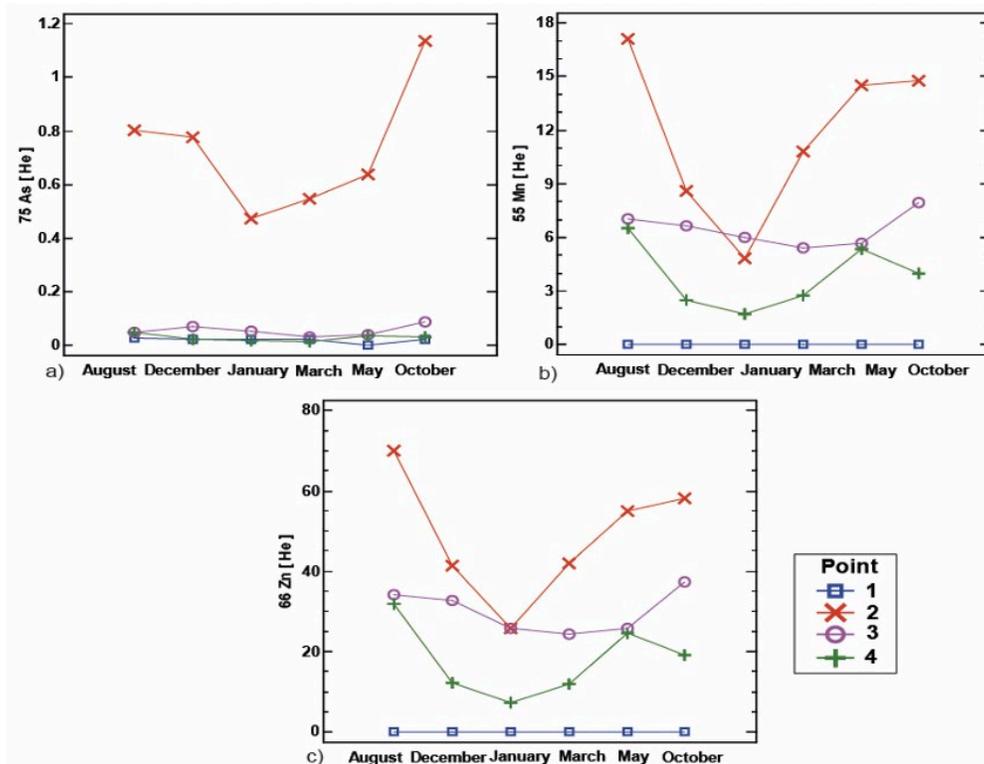
#### 4.1.5. Evaluación estadística de resultados del año 1 del programa de monitoreo

En el análisis estadístico se utilizó al arsénico como metal principal, debido a que sus concentraciones detectadas fueron superiores a los LMC, lo cual representa un riesgo inminente para la salud pública y los ecosistemas por su toxicidad en sistemas vivos. También se analizaron dos metales secundarios para complementar la evaluación, estos fueron el zinc por sus altas concentraciones y el manganeso por su persistencia en el área.

##### 4.1.5.1. Análisis MANOVA y ANOVA para la frecuencia de muestreo

Con las concentraciones de los tres metales As, Zn y Mn se realizó un ANOVA multifactorial. Este análisis busca detectar interacciones entre la frecuencia de monitoreo por meses y puntos de muestreo. En ninguno de los tres casos se detectaron interacciones significativas entre ambos factores. En general, enero es cuando menos metales se encuentran en todos los puntos, como se puede observar en el ejemplo de la Figura 22.

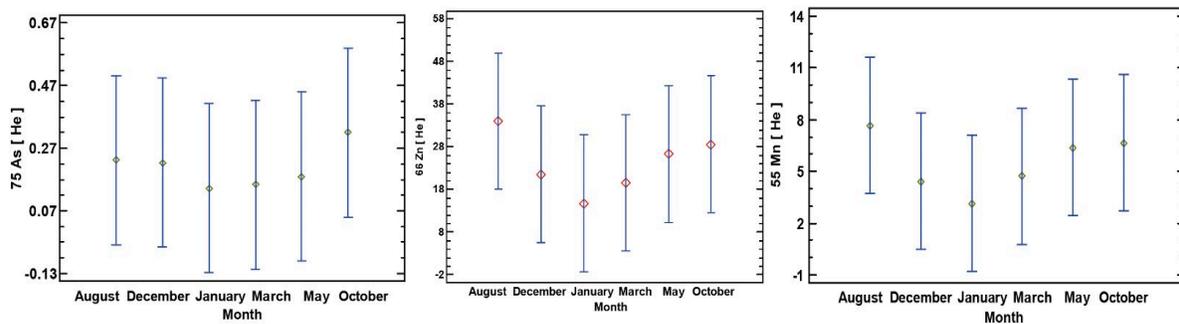
Figura 22. Gráfico de interacciones entre el mes y el punto de muestreo para la concentración de metales pesados



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Se descartó la presencia de interacciones significativas previo a la realización del ANOVA por factores para los tres metales. En los tres casos se obtuvieron P valores de 0,05 para el análisis del efecto del tiempo de muestreo (mes). Como conclusión se obtuvo que, para los tres metales no existe efecto significativo al momento del muestreo. La única tendencia observada en los gráficos es que enero es el mes con menor concentración de cualquiera de los tres metales, y agosto es el mes con mayor concentración. La Figura 23 muestra las concentraciones de los metales para en los meses de monitoreo.

Figura 23. Grafica de medias con LSD intervalos de Fisher, para el efecto del mes de toma de muestras con la concentración de metales pesados



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Para los tres metales estudiados se observó el mismo comportamiento cuando se analizó el efecto del factor del punto de muestreo con respecto a la concentración del metal. En todos los casos se obtuvo un P-Valor de 0.000 (el informe completo se encuentra en el Anexo 7). La Tabla 24, presenta el ANOVA para el arsénico.

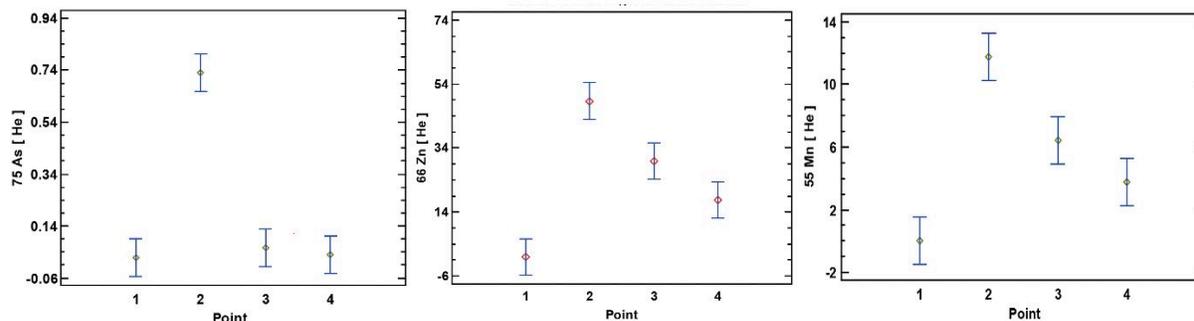
Tabla 24. Tabla ANOVA para la concentración de As en función del punto de muestreo

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	F-razón	P-valor
Entre grupos	2,18115	3	0,727052	51,14	0,0000
Inter grupos	0,284319	20	0,0142159		
Total (corr.)	2,46547	23			

Fuente: Elaboración propia, 2021.

El punto monitorizado con mayor concentración de metales aplicado fue el punto 2, seguido del 3 y 4, por último, el punto 1, lo cual puede verse en la Figura 24.

Figura 24. Gráfica de medias con intervalos LSD Fisher al 95% de confianza, para el efecto del punto de toma de muestra con la concentración de los metales pesados



Fuente: Elaboración propia, 2021.

#### 4.1.5.2. Búsqueda de indicadores de alta concentración de metales

Primero se realizó un ajuste de regresión múltiple entre los valores de pH y conductividad como variables independientes en contraste con la concentración de metales. Debido a la alta correlación entre el pH y los factores de conductividad, no fue posible modelar la concentración de los tres metales con estos dos factores, y el pH se identificó como no significativo tanto en la regresión múltiple como en la simple. Como alternativa, ambas variables se analizaron por separado con las concentraciones de los tres metales, transformando el pH en un factor (ácido o básico) y manteniendo la conductividad como numérica. Los resultados en ambos casos se resumen a continuación en los puntos 4.1.5.2.1. y 4.1.5.2.2.

#### 4.1.5.2.1. Validación de la hipótesis sobre el efecto del pH

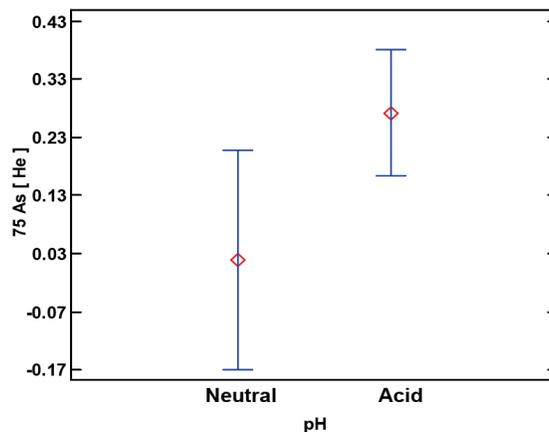
Una vez transformados los valores de pH a niveles ácidos (<6) y neutrales (a partir de 7 hasta 14), se realizó el ANOVA. Se denominaron pH neutrales dado que no existen niveles de pH básicos, y hacer una tercera categoría sin datos perjudicaría a la exposición de los resultados. En los tres casos, lo que se obtuvo coincide con que las concentraciones de los tres metales son significativamente mayores en pH ácido que en pH neutro, como se puede observar en la Tabla 25 y la Figura 25.

Tabla 25. Tabla ANOVA para la concentración de As en función del pH

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	F-razón	P-valor
Entre grupos	0,286827	1	0,286827	1,90	0.1029
Intrergupos	2,17865	22	0,0990294		
Total (corr.)	2,46547	23			

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 25. Gráfica de medias con LSD Fisher intervalos de confianza del 95%, para el efecto del valor de pH con la concentración del As



Fuente: Elaboración propia, 2021.

#### 4.1.5.2.2. Validación de hipótesis del efecto de la conductividad medida

La conductividad se determinó como una variable dependiente significativa en los intentos de modelado de regresión múltiple. Se decidió buscar el modelo con mejor ajuste mediante regresión lineal. Luego de comparar los modelos en los tres metales, se concluyó que el modelo con mejor ajuste fue el de la Raíz Cuadrada de Y:  $Y = (b \cdot X)^2$ . En el ejemplo mostrado para el análisis de la concentración de As en la Tabla 26, se obtuvo un coeficiente de 0,98 y un R-cuadrado de 95,8%. El ajuste del modelo mejoró al eliminar la constante no significativa, quedando una relación positiva entre los valores de conductividad y la de los tres metales analizados, como se puede apreciar en la Figura 26.

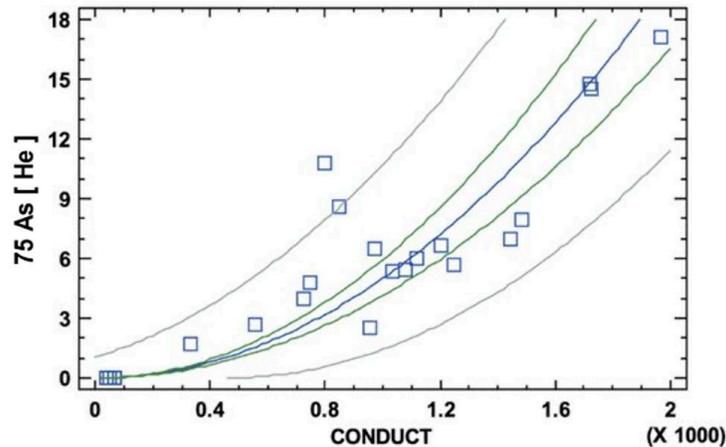
Tabla 26. Regresión simple – As vs. Conductividad

Coeficiente de mínimos cuadrados					
Parámetro	Estimativado	Error estandar	T-Statística	P-valor	
Pendiente	0.00223672	0.0000975989	22.9175	0.0000	
Análisis de varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	F-razón	P-valor
Modelo	126.526	1	126.526	525.21	0.0000
Residuo	5.54082	23	0.240905		
Total	132.067	24			

Coeficiente de correlación= 0.978798, R-cuadrado = 95.8045 %,  
 Modelo:  $75 \text{ As [He]} = (0.00223672 * \text{CONDUCT})^2$

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 26. Gráfica de del modelo ajustado para ver el efecto de la conductividad del agua con la concentración de As



Fuente: Elaboración propia, 2021.

El Informe completo se encuentra en el Anexo 8.

#### 4.2. Propuestas para el fortalecimiento de la gestión del agua de Milluni

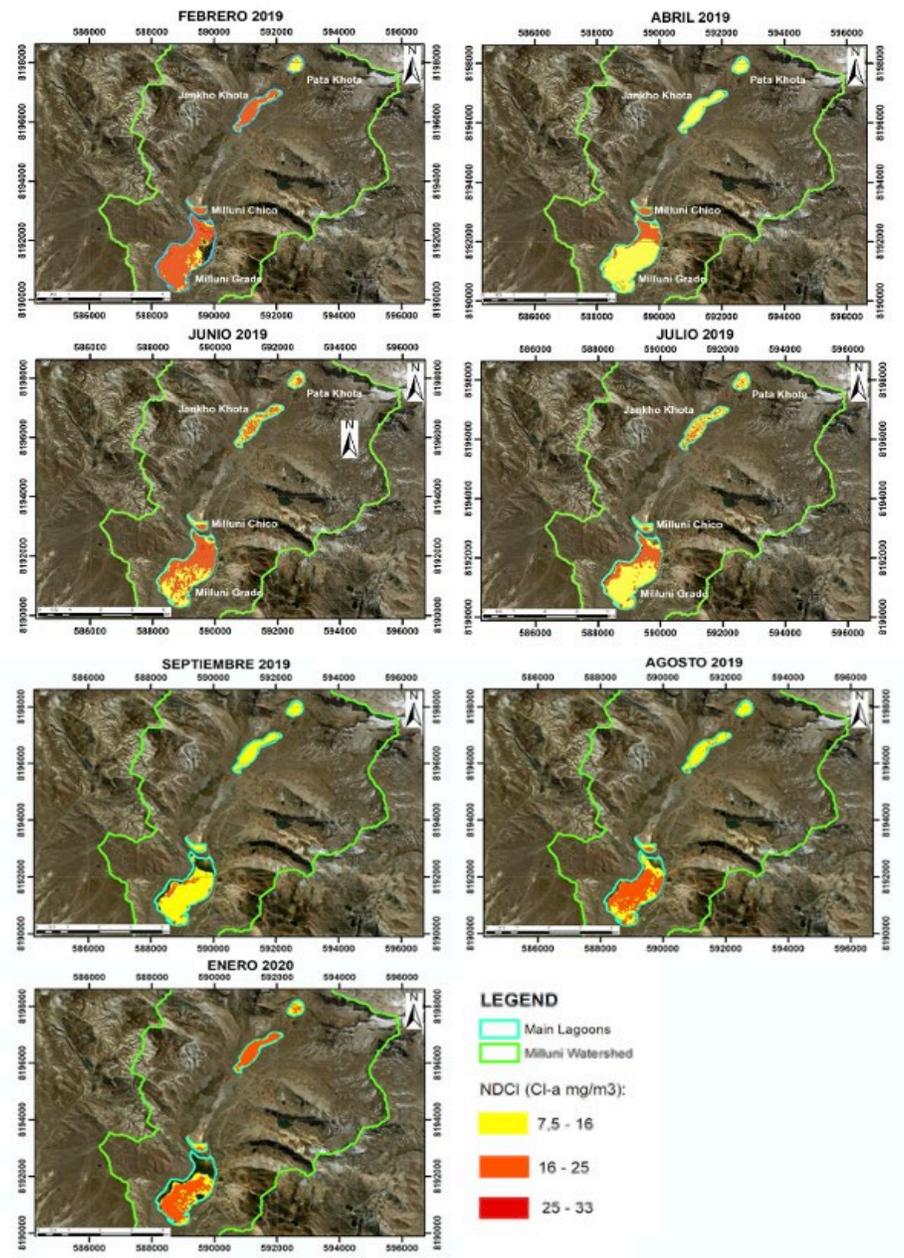
Un manejo adecuado de los recursos hídricos de un área solo se alcanza si se tiene un sistema de gestión enfocado en el control de la cantidad y calidad de los recursos disponibles. También es importante conocer las partes involucradas dentro de la gestión del agua, para identificar los grados de interés, poder e influencia de las mismas en cualquier proyecto relacionado con la temática agua. Con el propósito de complementar el monitoreo de las aguas superficiales de Milluni, en el apartado 4.2.1 se presenta la implementación de la

teledetección de contaminantes como una herramienta para fortalecer el programa de monitoreo de la zona. Adicionalmente, en el apartado 4.2.2 se expone la identificación de las partes interesadas dentro de la gestión del agua en Milluni.

#### 4.2.1. Implementación de teledetección como complemento al programa de monitoreo

Las imágenes satelitales (Figura 27) seleccionadas para el estudio comprenden los meses de febrero, abril, junio, julio, agosto, septiembre del 2019 y enero de 2020 (Alvizuri-Tintaya et al., 2022).

Figura 27. Vistas Satelitales de los cuerpos de agua superficiales de Milluni



Los meses de enero, marzo, mayo, octubre, noviembre y diciembre del 2019, no fueron tomados en cuenta debido a la baja visibilidad ocasionada por las nubes densas de esos meses. Por ello, se determinó que la visibilidad del área se encuentra condicionada a la presencia de nubes en el momento de captar las imágenes, lo cual vendría a ser una limitante de la técnica de teledetección de contaminantes. Sin embargo, existen otras beneficios que subsanan la mencionada limitación, como por ejemplo que la técnica puede realizarse en softwares libre que no significarían costos extras al PMCA. La Tabla 27 expone de manera numérica las concentraciones NDCI detectadas en las 4 lagunas estudiadas.

Tabla 27. Porcentajes de concentraciones NDCI para cada laguna

Laguna	Tipo de Concentración	Concentración de cobertura superficial de Clorofila -a (mg m <sup>-3</sup> )	Porcentajes de cobertura superficial de Clorofila -a por mes						
			Febrero	Abril	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Enero
Milluni Grande	Baja	7,5 - 16	14%	81%	66%	65%	31%	91%	29%
	Media	16 - 25	85%	19%	33%	34%	68%	8%	70%
	Alta	25 - 33	1%	0%	1%	1%	1%	1%	1%
Milluni Chico	Baja	7,5 - 16	29%	28%	66%	70%	62%	92%	67%
	Media	16 - 25	71%	72%	34%	30%	38%	8%	33%
	Alta	25 - 33	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Jhanko Khota	Baja	7,5 - 16	16%	98%	63%	80%	90%	98%	11%
	Media	16 - 25	83%	2%	36%	19%	9%	2%	88%
	Alta	25 - 33	1%	0%	1%	1%	1%	0%	1%
Pata Khota	Baja	7,5 - 16	89%	99%	78%	62%	95%	99%	65%
	Media	16 - 25	11%	1%	21%	38%	4%	1%	35%
	Alta	25 - 33	0%	0%	1%	0%	1%	0%	0%

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Como se puede apreciar en la Tabla 27, existe cobertura de concentraciones altas del NDCI, es decir en el rango de 25 a 33 mg m<sup>-3</sup>, muy bajas (<1%). Por ello, se expone que el riesgo de eutrofización extremo en los cuerpos de agua superficial de Milluni es bajo. Sin embargo, las concentraciones medias del NDCI son prevalentes en algunos meses como febrero, junio y agosto del 2019 y enero del 2020. Tanto febrero del 2019 y enero del 2020, son meses que se encuentran en época húmeda según el análisis climatológico del área, lo cual indicaría que un aumento o disminución en la precipitación no afectaría en la concentración media prevalente en las lagunas de Milluni. Esto implicaría que la época no influye totalmente en la presencia de contaminantes orgánicos en el sistema de lagunas de Milluni.

Como se indica previamente, los parámetros *in situ* de control monitorizados fueron el pH, conductividad, OD y turbidez. Los primeros dos vinculados con la presencia de iones

metálicos y los últimos dos vinculados de forma directa con el NDCI, el cual es un indicador de eutrofización. Al mismo tiempo se monitorizaron parámetros *ex situ* (metales pesados), haciendo énfasis especial en el arsénico. En el siguiente apartado se presenta la correlación de los parámetros *in situ* y *ex situ* monitorizados con las concentraciones de NDCI obtenidas por la teledetección aplicada. Los valores de estos parámetros *in situ* se encuentran en la Tabla 22 y los valores de los parámetros *ex situ* se encuentran en el Anexo 6.

#### 4.2.1.1. Análisis de los resultados en las lagunas de estudio

A continuación, se presentan el análisis de correlación de los resultados para cada laguna de la parte alta de la Microcuenca Milluni.

##### 4.2.1.1.1. Laguna Pata Khota

En la Laguna Pata Khota ubicada en el inicio del sistema de lagunas se monitoreo el Punto 1. Este punto es el menos contaminado según el contraste de los parámetros *in situ* y *ex situ* con la Normativa Boliviana 512. La dinámica de la Laguna Pata khota se encuentra en función al análisis climatológico donde se denotan épocas húmedas y secas. La carga orgánica en base a lo registrado por el NDCI está en función de la época. Al compararse la concentración de clorofila-a predominante en la Laguna Pata Khota, que es la concentración baja (7,5 - 16 mg m<sup>-3</sup>), con los valores de turbidez y OD demuestran que no existe un agente contaminante que estaría incrementando la carga orgánica propia de la laguna. Al contrario, si los valores del OD disminuyeran y aumentarían los valores de la turbidez se produciría un proceso de eutrofización en la Laguna Pata khota, y la concentración predominante de clorofila-a sería de rango medio o alto. Además, el Punto 1 monitorizado presenta un pH neutro y una conductividad baja durante todo el año, sin verse afectado por la temporada seca o húmeda. Esto indicaría la ausencia de iones metálicos, lo cual se ratifica con las bajas concentraciones de los metales pesados analizados.

##### 4.2.1.1.2. Laguna Jhanko Khota

Esta laguna no fue monitorizada debido a que se encuentra muy cerca de la Laguna Pata Khota, ambas lagunas se encuentran interconectadas y visualmente son muy parecidas. Sin embargo, se observó que la calidad de su agua es diferente al de la primera laguna, especialmente en los meses de enero y febrero, pertenecientes a la época húmeda según el análisis climatológico realizado. Exponiendo que durante enero y febrero existe una contaminación orgánica puntual, cuya fuente debería estudiarse.

##### 4.2.1.1.3. Laguna Milluni Chico

En la Laguna Milluni Chico se ubicó el segundo punto monitorizado (P2). El P2 visualmente es el aparentemente es el más contaminado (Figura 17), esto fue ratificado de forma analítica según los parámetros monitorizados. La degradación de la calidad del agua en el P2 se atribuye a la actividad minera que se efectúa a su alrededor y los indicadores de presencia de metales pesados lo corroboran. La Laguna Milluni Chico tiene un carácter ácido durante todo el año sin verse afectada por la época. También presenta conductividades por encima de 700 uS/cm, lo cual implica la presencia de iones metálicos en el agua. Las conductividades más

bajas se presentan en la época de mayor precipitación lo cual se explica por el efecto de dilución de los contaminantes. La concentración de los iones metálicos se encuentra por fuera de los límites permisibles en todos los meses. Asimismo, se tiene una disminución de turbidez en mayo lo cual es congruente con la disminución de la concentración media del índice de clorofila-a. En cuanto a los valores de OD, se puede decir que son aceptables, con una tendencia a disminuir a partir de mayo, donde comienza la época de estiaje.

Según los datos de la Tabla 27, se observa que la Laguna de Milluni Chico tiene en febrero una mayor cantidad de clorofila-a en concentración media y esta va disminuyendo a lo largo del año, con un pico mínimo en septiembre. Al contrario de lo que ocurre con la concentración baja de clorofila-a, que presenta su época más baja en febrero y tiende a subir todo el año con un pico creciente máximo en septiembre. Denotando que la dinámica de los contaminantes orgánicos en esta laguna no está relacionada con la época seca o humedad detectadas en el análisis climatológico de Milluni.

#### 4.2.1.1.4. Laguna Milluni Grande

El Punto 3 monitorizado se encuentra en la represa de almacenamiento de agua ubicada en la Laguna Milluni Grande. El agua de este punto debería tener una calidad elevada considerando que esta proviene de nevados naturales y es utilizada para el abastecimiento público. Sin embargo, Milluni Grande presenta un carácter ácido durante todo el año sin verse afectado por la época. Las conductividades se encuentran por encima de 1000 uS/cm. Nuevamente la conductividad más baja se presenta en la época de mayor precipitación denotando el efecto de dilución de los contaminantes presentes. Esto se corrobora con altas conductividades durante la época seca. Tanto el pH como la conductividad sugieren la presencia de iones metálicos en el agua, lo cual se ratifica con las concentraciones de los metales pesados que se encontraban fuera de los límites permisibles. Por ello, se comprueba que la fuente de agua natural estaría siendo impactada negativamente por la minería de la zona.

En cuanto a la turbidez, se observa que esta disminuye en la época de lluvia y aumenta a partir de mayo, esto expone una vez más el efecto de dilución de contaminantes que se genera por el aumento de agua en la represa. Los valores de OD en este punto son aceptables, con una tendencia a disminuir a partir de mayo, donde comienza la época de estiaje. Según los datos de la Tabla 27, se observa que las concentraciones, baja y media de Clorofila a en Milluni Grande varían a lo largo del año, lo cual significa que el factor que influye en las concentraciones, baja y media de Clorofila-a es independiente a la época de Milluni.

#### 4.2.2. Partes Interesadas dentro de la gestión hídrica en Milluni

Se analizaron las instancias e instituciones relacionadas con la gestión y manejo del agua con el fin de identificar y clasificar todas las partes interesadas en la Microcuenca Milluni. Se aplicaron las metodologías propuestas por Lupo (2010) y Reed et al. (2009), cuyos métodos han sido desarrollados para la gestión del agua a nivel de cuencas. En los siguientes apartados se presenta la identificación, clasificación y relación de las partes interesadas en Milluni.

#### 4.2.2.1. Identificación partes interesadas en Milluni

En la Tabla 28 se detallan las partes interesadas identificadas para el área de estudio.

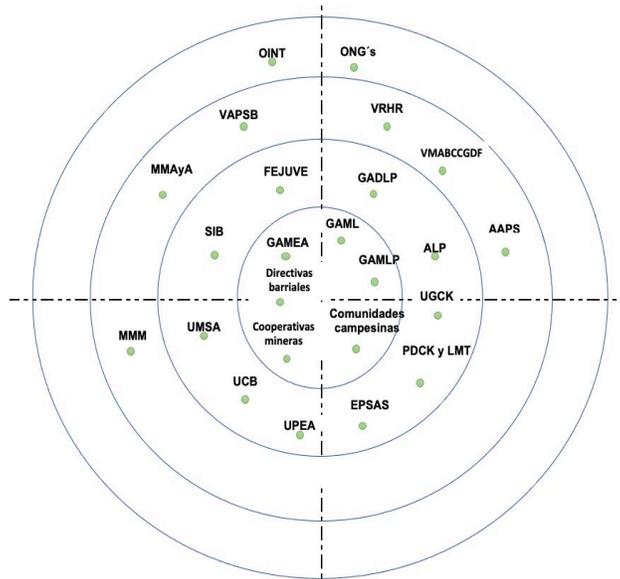
Tabla 28. Partes interesadas en Milluni

Niveles	Partes interesadas
Internacional	<ul style="list-style-type: none"> <li>Organismos Internacionales (<b>OINT</b>) y Organismos No Gubernamentales (<b>ONG</b>), que operan en Bolivia, son consideradas como organismos internacionales.</li> </ul>
Nacional	<ul style="list-style-type: none"> <li>La Asamblea Legislativa Plurinacional: cuya tuición de dictar leyes nacionales pueden jugar un rol fundamental en ciertas legislaciones del proyecto</li> <li>Ministerio de Medio Ambiente y Agua (<b>MMAyA</b>) del cual forma parte los siguientes Viceministerios que tienen intervención en el proyecto: <ul style="list-style-type: none"> <li>Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico: <b>VAPSB</b></li> <li>Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego: <b>VRHR</b></li> <li>Viceministerio de Medio Ambiente Biodiversidad Cambio Climático y de Gestión de Desarrollo Forestal: <b>VMABCCGDF</b></li> </ul> </li> <li>Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico: <b>AAPS</b>.</li> <li>Ministerio de Minería y Metalurgia <b>MMM</b></li> </ul>
Departamental	<ul style="list-style-type: none"> <li>Las Asambleas Legislativas Departamentales, que puede generar normas departamentales en torno al proyecto <b>ALP</b></li> <li>Gobierno Autónomo Departamental de La Paz <b>GADLP</b></li> <li>Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento <b>EPSAS</b></li> <li>Las Universidad Mayor de San Andrés <b>UMSA</b></li> <li>La Universidad Católica Boliviana <b>UCB</b></li> <li>Universidad Pública de El Alto <b>UPEA</b></li> <li>Las Federaciones de Juntas Vecinales <b>FEJUVE</b></li> <li>Sociedad de Ingenieros de Bolivia <b>SIB</b></li> <li>Unidad de Gestión de la Cuenca Katari <b>UGCK</b></li> <li>Plan Director de la Cuenca Katari y Lago Menor del Titicaca <b>PDCKyLMT</b></li> </ul>
Local	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gobiernos Autónomos Municipales de La Paz, El Alto y Laja: <b>GAMLP</b>, <b>GAMEA</b> y <b>GAML</b></li> <li>Cooperativas Mineras</li> <li>Directivas barriales</li> <li>Comunidades campesinas</li> </ul>

Fuente: elaboración propia, 2021.

La Figura 28 muestra el sistema de ordenamiento de las partes interesadas para la microcuenca de estudio, identificando los grupos según el ámbito geográfico de participación. De afuera hacia adentro se tiene los siguientes niveles: internacional, nacional, departamental y local.

Figura 28. Identificación de las partes interesadas mediante el enfoque de órbitas

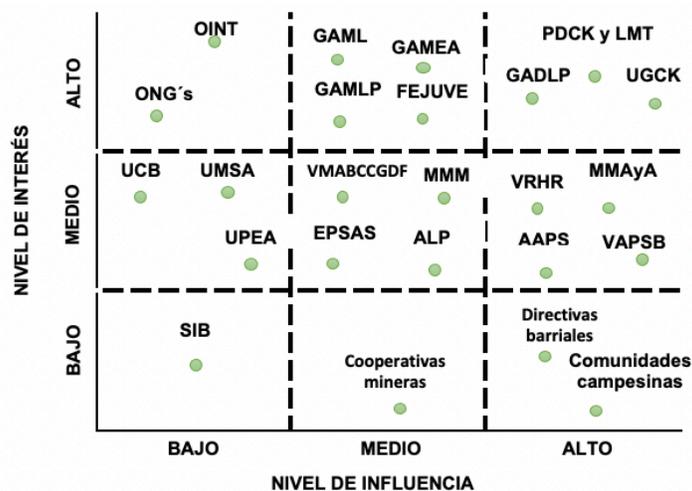


Fuente: Elaboración propia, 2020.

#### 4.2.2.2. Clasificación y análisis de las partes interesadas

En la Figura 29, se presenta la matriz de identificación de las partes interesadas en función al nivel mínimo, medio y máximo de influencia e interés. El detalle extenso para este análisis se presenta en el Anexo 9.

Figura 29. Matriz de identificación y clasificación de las partes interesadas por nivel de interés e influencia – Milluni



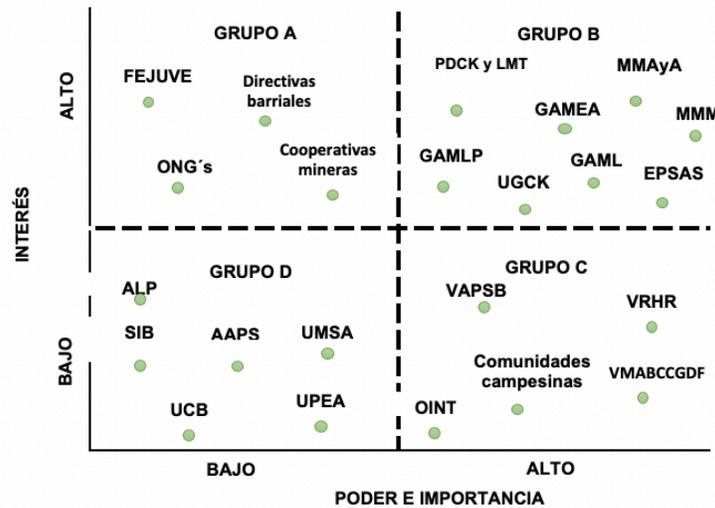
Fuente: Elaboración propia, 2021.

De la Figura 29 se puede observar que, las directivas barriales y las comunidades campesinas en Milluni tienen una alta influencia sobre los usos del agua, pero presentan un bajo interés

en los proyectos, debido a que ellos no habitan en el lugar, pero si lo utilizan para realizar sus actividades económicas. También se puede ver que las tres universidades que son parte del comité técnico (UMSA, UPEA y UCB), tienen un interés y participación moderado. En el punto de mayor interés e influencia, se encuentran la UGCK, unidad gestora de la cuenca estratégica Katari que engloba Milluni.

Identificadas las partes interesadas, se clasificaron en 4 grupos de acuerdo al poder e interés en la gestión del agua. En el grupo A se ubican las instancias privadas como las ONG's que no tienen ningún poder de decisión en el proyecto, pero un alto interés comercial en los mismos. Por otro lado, la FEJUVE's, las Directivas de barrios y las Cooperativas mineras tienen un interés importante dentro de la gestión del agua, pero el nivel de poder es relativamente bajo. El grupo B, formado por los Ministerios, los Gobiernos municipales, EPSAS, la UGCK y el PDCK y LMT muestran un alto poder de decisión e interés. El grupo C conformado por los Viceministerios del área, las comunidades campesinas y los organismos internaciones no muestran alto interés, pero el poder de decisión es alto. Finalmente, tenemos el grupo D, cuyo interés y poder es bajo, esto debido a que principalmente están conformados por instancias académicas y reguladoras. A continuación, en la Figura 30 muestran los grupos de interés clasificados por interés y poder.

Figura 30. Matriz de Clasificación por interés y poder de las partes interesadas - Milluni



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Los ministerios, viceministerios, gobernaciones y municipios tienen una participación definitiva en el sistema de gestión y una intervención colaborativa, de igual manera las instancias legislativas a nivel nacional, departamental y local deben participar activa y definitivamente toda vez que este tipo de sistemas pueden requerir de legislaciones especiales para su implementación. Sin embargo, las comunidades campesinas tienen una participación definitiva por estar ubicadas las fuentes de agua en sus territorios, su intervención solamente es de conocimiento y no de colaboración. En el grupo donde se encuentran otras instancias ejecutivas a nivel nacional, como los viceministerios de medio ambiente y el de saneamiento básico tienen una participación expectante ante la necesidad de su intervención o

conocimiento. Finalmente tenemos el grupo D con una participación latente como las instancias privadas y académicas cuya atribución es a nivel de microcuencia y no pueden intervenir directamente en el sistema de gestión.

#### 4.2.2.3. Relacionamiento e interrelación de las partes interesadas con el proyecto

Para el análisis cualitativo se realizaron entrevistas, pero también se acudió a las redes sociales e información proveniente de medios de prensa e información obtenida de instituciones públicas como la gobernación, empresas de servicios, gobiernos municipales, etc. Las entrevistas se las realizaron de manera flexible lo que permitió que el entrevistado pueda responder en el orden y de la manera que elijan. Se realizaron preguntas centradas en aspectos claves como los de calidad de recursos hídricos, sistemas de potabilización, manejo del agua, instituciones responsables y recursos económicos destinados a este sector.

La interrelación o el relacionamiento entre las partes interesadas, permitió identificar los grupos que se conforman entre las partes, en muchos casos esto puede ser beneficioso para el sistema de gestión. Sin embargo, en algunos otros casos puede resultar perjudicial para el mismo, sobre todo considerando los grupos de interés político y económico.

La relación entre los niveles de Gobierno Departamental y Local con el Nacional es necesaria e imperativa, considerando las competencias que tienen cada uno y la asignación de recursos económicos. Por la constitución el ejecutivo nacional a través del Ministerio de Medio Ambiente y Aguas (MMAyA) y sus viceministerios tienen la tuición y competencia de intervenir en proyectos relacionados con recursos hídricos. Esto obliga a las gobernaciones y municipios a trabajar de manera coordinada con la instancia nacional.

A nivel departamental, La FEJUVE y EPSAS, son partes de correlación de intereses importantes. Por una parte, es atribución que la FEJUVE fiscalice y gestione proyectos sociales. Por otro lado, EPSAS requiere de inversiones para asegurar su rentabilidad en el área de concesión. Es importante señalar que, por la constitución boliviana, todo proyecto que quiera implementarse dentro del sistema de gestión del agua debe tener un proceso de consulta previa con las comunidades campesinas. Por este motivo las instancias públicas departamentales y municipales deben estar vinculadas y relacionadas con estas instancias. Finalmente, los órganos legislativos tienen un peso político muy importante por lo que cualquier instancia ejecutiva debe tener una relación directa con parlamentarios y legisladores para la gestión y trámite de normas que fortalezcan el sistema de gestión.

### 4.3. Piloto experimental

En este apartado se presenta el diseño final de la planta piloto de OI montada en el laboratorio del CINAES de la Universidad Católica Boliviana San Pablo – Sede La Paz, también se presenta el mecanismo de operación con la misma. Finalmente, se expone la configuración de las variables de operación y el número de ensayos determinados por el diseño de experimentos.

#### 4.3.1. Diseño final y operación con una planta piloto de OI

Las vistas 2D y 3D del prototipo experimental se presentan en el Anexo 10. Posterior a la etapa constructiva del piloto se procedió a la operación con el mismo, para esto existen consideraciones previas que se deben tener en cuenta:

- Revisar que todo esté bien conectado y no haya fugas.
- La válvula de seguridad de la bomba debe estar tarada de acuerdo a la máxima presión de trabajo de la membrana para evitar trabajar con presiones fuera de las especificaciones del módulo.
- Verificar que la manguera de la válvula de seguridad de la bomba esté fija en el desagüe.

Después de tomar en cuenta las consideraciones previas se comenzó con la experimentación en la planta piloto. A continuación, la Figura 31 expone los pasos a seguir para operar la planta piloto, seguido se detallan los mismos.

Figura 31. Metodología de operación en la planta piloto de OI



Fuente: Elaboración propia, 2021.

- Paso 1. Encendido

Después de tomar en cuenta las consideraciones previas, el encendido de la planta siguió la siguiente secuencia de pasos.

1. Abrir el paso de agua del tanque de almacenamiento, verificar nuevamente que no haya fugas.
2. Enchufar el motor de la bomba.
3. Subir el interruptor ubicado en el panel de control.
4. Encender la bomba oprimiendo el botón verde, en el panel de control.
5. Verificar que el regulador de frecuencia esté en el mínimo aceptable (0 Hertz).

- Paso 2. Manipulación del sistema

La manipulación del sistema se efectuó manejando 3 variables, a continuación se detallan estas:

- a. Presión. Las presiones de trabajo de la membrana pueden ser distintas a la de la carcasa del módulo, por lo que es importante verificar las especificaciones técnicas. La membrana de la planta trabaja a presiones máximas de 40 bares y su carcasa a 20 bares. Por lo tanto, la presión de trabajo máxima de la planta no fue superior los 19 bares, por precaución. Para poder variar la presión de trabajo se cerró o abrió la válvula de control ubicada antes del segundo manómetro, ubicado después del módulo de membrana (Figura 13). También, se pudo variar la presión del sistema aumentando o disminuyendo la frecuencia por medio su regulador.
  - b. Caudal. El caudal de entrada al sistema se determinó sumando los dos caudales de salida, permeado y rechazo. Los caudales de salida fueron medidos con los sensores de flujo instalados en ambas salidas (Figura 13). Se trabajo con tres niveles de caudal, bajo, medio y alto.
  - c. Concentración. Esta variable fue de fácil manejo, dependió directamente de la preparación de las aguas sintéticas. El trabajo se realizó para tres concentraciones y se inició con la baja, siguiendo con la media y terminando con la alta.
- Paso 3. Toma de muestras

Una vez se alcanzó la interacción de las 3 variables con los valores definidos según el diseño de experimentos, se esperó a que el sistema se estabilizara. Después que el sistema permaneció estable por un periodo razonable de tiempo, aproximadamente 10 minutos, se extrajo una muestra del permeado (100 ml). La muestra paso inicialmente por un control básico de conductividad, después fue acidificada con ácido nítrico y paso a ser almacenada en un contenedor de 5 ml esterilizado y etiquetado. El remanente del volumen de la muestra fue almacenado bajo las condiciones adecuadas como un respaldo del ensayo.

- Paso 4. Apagado

Para apagar el sistema se seguido la siguiente secuencia de pasos:

1. Abrir la válvula de control por completo.
2. Apagar la bomba, en la caja de seguridad.
3. Bajar el switch ubicado en la caja de seguridad.
4. Desenchufar el motor de la bomba.
5. Cerrar el paso de agua del tanque de almacenamiento.

#### 4.3.2. Número de ensayos y configuración de las variables

El tipo de diseño que se seleccionó fue la Fracción Factorial con 3 niveles. Con esto se obtuvo el número de pruebas necesarias, que fueron nueve (9). Se decidió trabajar con tres niveles para las tres variables porque se sospecho que no existe un carácter lineal en estas, y para evitar perder un punto intermedio óptimo dentro de las variables. La configuración de los experimentos según el diseño realizado se presenta en la Tabla 29.

Tabla 29. Configuración de experimentos

N° de ensayo	Variables Entrada		
	Concentración del metal “C”	Presión “P”	Caudal de ingreso “Co”
1	Baja	Baja	Bajo
2	Baja	Media	Alto
3	Baja	Alta	Medio
4	Media	Baja	Medio
5	Media	Media	Bajo
6	Media	Alta	Alto
7	Alta	Baja	Alto
8	Alta	Media	Medio
9	Alta	Alta	Bajo

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Después de cada ensayo se procedió a limpiarla la membrana para no tener ninguna influencia en los siguientes ensayos. El protocolo de limpieza se presenta en el Anexo 11.

#### 4.4. Remoción del metal pesado problema

En este apartado se presentan los resultados de la experimentación con la planta de OI.

##### 4.4.1. Resultados de la experimentación con aguas sintéticas

La Tabla 30 expone los resultados obtenidos en las 9 corridas estipuladas según el diseño de experimentos. Los datos del Flux que se presentan fueron calculados mediante la ecuación 13 y aplicando el factor de corrección de la temperatura previamente hallado para la planta piloto de OI (Anexo 2). Como se mencionó antes en el apartado 3.2.3.1., la temperatura es un factor que tiene incidencia en los resultados, ya que este varía con el medio. Los índices de rechazo fueron calculados por la ecuación 15. Los datos completos se encuentran en el Anexo 12.

Tabla 30. Resultados de la experimentación

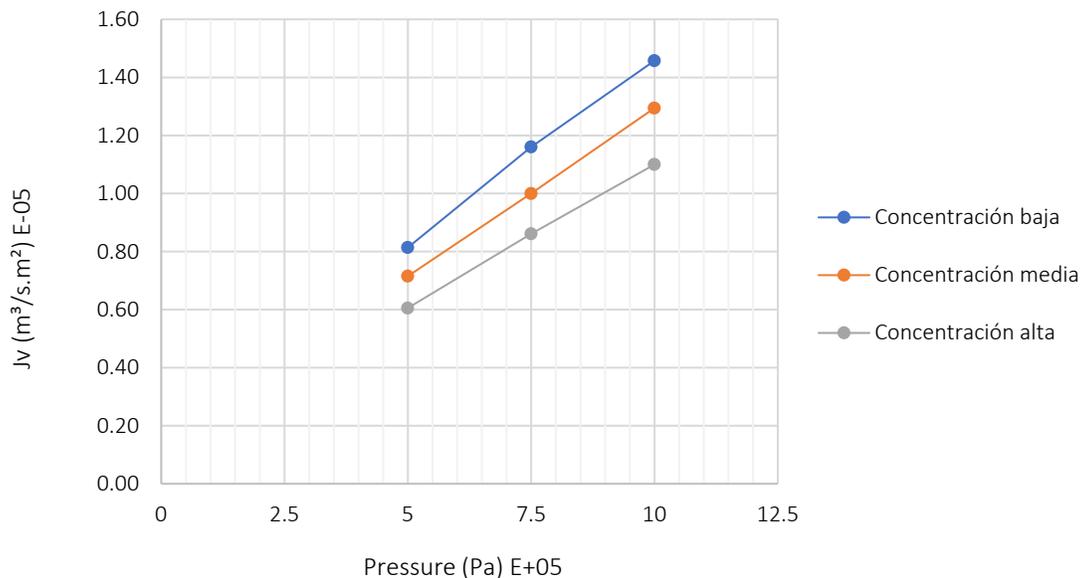
N° de ensayo	Concentración solución Co (mol/m <sup>3</sup> )	Presión P (Pa)	Caudal de ingreso C (m <sup>3</sup> /h)	Flux (con corrección de Temperatura) Jv (m <sup>3</sup> /s *m <sup>2</sup> )	Índice de rechazo del metal R1 (%)	Índice de rechazo de conductividad R2 (%)
1	Baja	Baja	Bajo	8,14E-06	98,64	99,36
2	Baja	Media	Alto	1,16E-05	98,62	99,35
3	Baja	Alta	Medio	1,46E-05	97,61	99,37
4	Media	Baja	Medio	7,15E-06	96,76	99,28
5	Media	Media	Bajo	9,39E-06	96,50	99,28
6	Media	Alta	Alto	1,29E-05	96,14	99,60
7	Alta	Baja	Alto	6,06E-06	95,27	99,11
8	Alta	Media	Medio	8,61E-06	95,32	99,19
9	Alta	Alta	Bajo	1,03E-05	94,13	99,13

Fuente: Elaboración propia, 2021.

La Figura 32 presenta el comportamiento de la membrana durante el proceso de separación de iones de arsénico de acuerdo a la ecuación 22. Como era de esperar, se observó la directa proporcionalidad entre Flux y la Presión. También se apreció que a medida que la concentración aumenta el Flux disminuye, exponiendo la inversa proporcionalidad entre ambas variables. Los resultados indican que la microestructura de la membrana estaría interactuando adecuadamente con la solución.

Se sabe que cuando se trabaja con presiones bajas el comportamiento del flujo con la presión tiende a ser lineal, por lo que no se observa compactación física de la membrana cuando las concentraciones de soluto son bajas. Para altas concentraciones la curva se ubicó por debajo de las curvas de las concentraciones baja y media, esto debido a la dificultad en el proceso de transferencia de masa cerca de la superficie de la membrana.

Figura 32. Comportamiento de Flux ( $J_v$ ) con respecto a la presión ( $\Delta p$ )



Fuente: Elaboración propia, 2022.

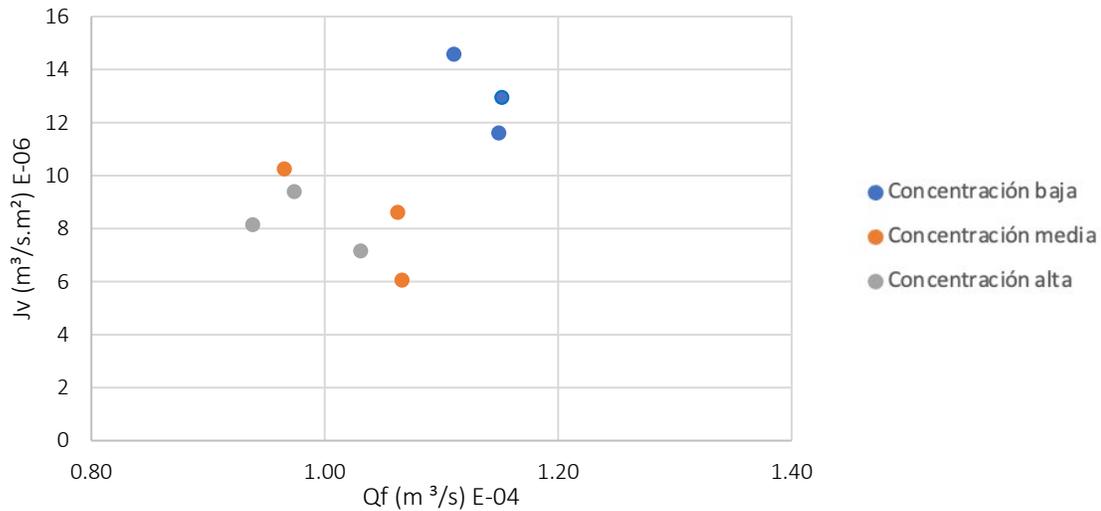
Para comprender el comportamiento físico de la membrana durante la experimentación se analizaron los efectos de las variables de entrada sobre las respuestas y se presentan en los siguientes apartados.

#### 4.4.1.1. Efecto del flujo de alimentación ( $Q_f$ ) con respecto al Flux ( $J_v$ )

Los rangos de caudal de entrada utilizados para el sistema son  $8,06 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} < Q_f < 1,11 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ , las concentraciones de ingreso se detallaron en el apartado 3.2.4.1. La variable de temperatura se consideró como un factor de ajuste para el Flux, obteniendo dicho ajuste por el modelo de Arrhenius (Mulder et al., 1996) (Ecuación 19). La Figura 33 expone el

comportamiento del Flux ajustado ( $J_v$ ) con respecto al caudal de alimentación ( $Q_f$ ), ilustrando los resultados de las 9 corridas experimentales.

Figura 33. Comportamiento del Flux ( $J_v$ ) respecto a la variación del flujo de ingreso ( $Q_f$ ) para arsénico



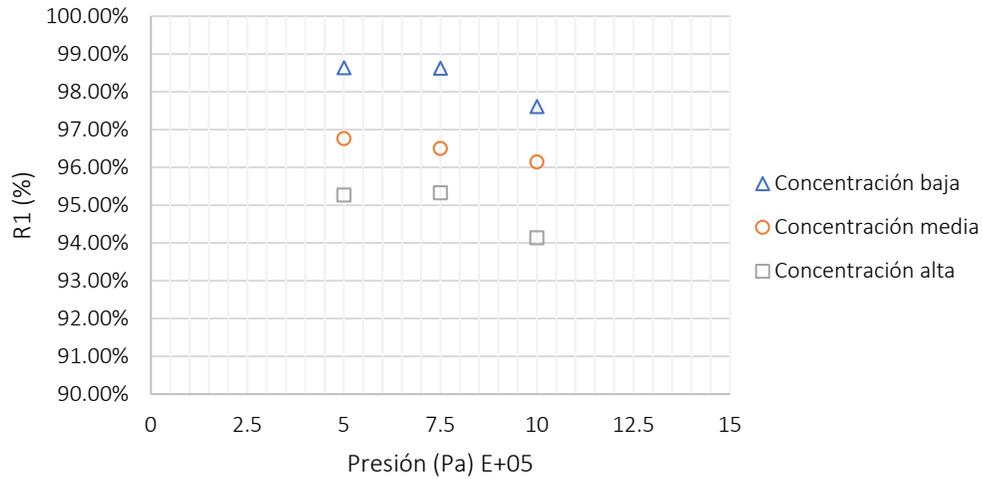
Fuente: Elaboración propia, 2022.

Las Figura 33 muestra el aumento del Flux ( $J_v$ ) con el aumento del caudal de entrada ( $Q_f$ ), sin embargo también se observó que con el aumento de la concentración el flujo disminuye proporcionalmente. Aumentar el  $Q_f$  con bajas concentraciones aumenta la velocidad, esto hace que aumente el coeficiente de transferencia de masa y por lo tanto aumente el flujo. Por el contrario, el aumento de la concentración hace que aumente el CP y disminuya el flujo. Como se indica en el trabajo de investigación sobre un proceso de CP por ósmosis inversa de una solución de glucosa presentado por Chenghan y Han (2019). Por ello, se demuestra que a bajas concentraciones el mecanismo de control es la transferencia de masa, mientras que a altas concentraciones el mecanismo que gobierna el proceso es la concentración de polarización.

#### 4.4.1.2. Efecto de la presión ( $\Delta p$ ) sobre el índice de remoción de arsénico (R1)

En cuanto a la eficiencia en la remoción del contaminante, la Figura 34 muestra un comportamiento adecuado del índice de rechazo del metal (R1), aunque no se visualiza una tendencia muy clara, los rechazos en la mayoría de los casos son superiores al 94%. Esto en términos cuantitativos permite establecer que las concentraciones de arsénico en el permeado se encuentran por debajo de los parámetros establecidos en la normatividad nacional e internacional para aguas de consumo humano, por lo tanto se demostró que el proceso de RO permite obtener aguas seguras. Se ha determinado que no existen grandes diferencias entre las eficiencias de remoción operando a presiones bajas, medias o altas, lo que implicaría que el gasto energético podría reducirse si se opta por trabajar a presiones bajas o medias.

Figura 34. Influencia de la presión ( $\Delta p$ ) respecto al índice de remoción para arsénico (R1)



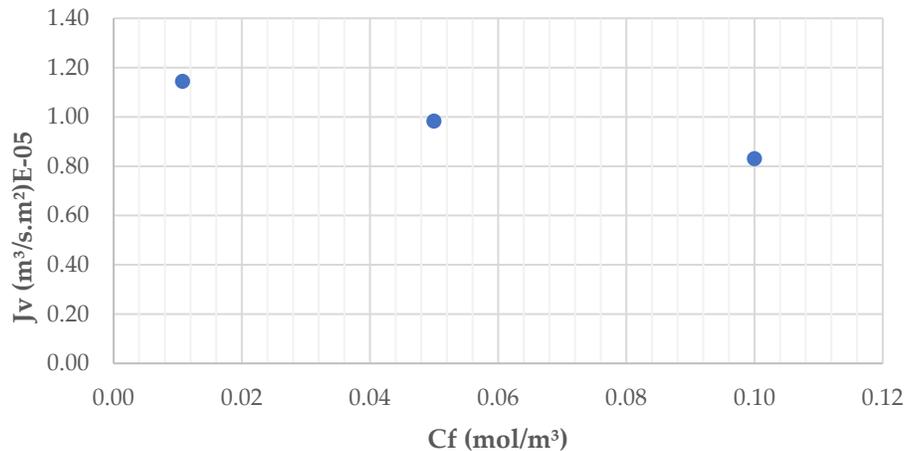
Fuente: Elaboración propia, 2022.

La Figura 34 muestra que las tasas de rechazo no son las esperadas con el aumento de presión, esto refuta lo descrito por Alannod et al. (2020). Alannod et al., indica que el aumento de presión en un proceso de desalinización de agua salobre por OI permite una mejor recuperación. Entonces se abre la posibilidad de trabajo con bajas presiones que puedan llevar a la técnica de OI hacia a la sostenibilidad sin disminuir su eficiencia de remoción.

#### 4.4.1.3. Efecto de la concentración de soluto ( $C_f$ ) con respecto al Flux ( $J_v$ ) y al índice de remoción de arsénico (R1)

Las figuras 35 y 36 muestran el comportamiento del sistema con respecto al aumento de las concentraciones de arsénico.

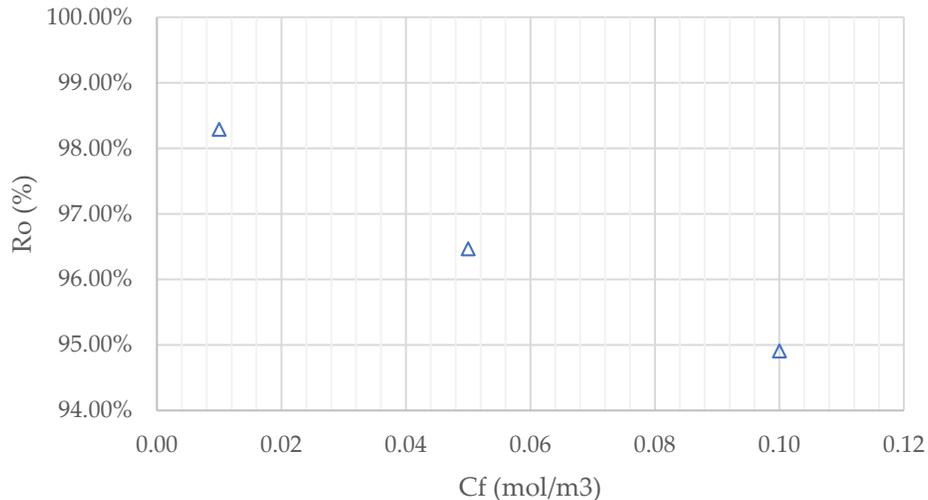
Figura 35. Influencia de la ( $C_f$ ) en el comportamiento de ( $J_v$ ) para arsénico



Fuente: Elaboración propia, 2022.

La Figura 35 muestra que cuando la concentración del soluto ( $C_f$ ) aumenta, el Flux ( $J_v$ ) disminuye, esto se explica por la disminución en la transferencia de masa y la concentración de polarización cerca de la capa límite de la membrana.

Figura 36. Influencia de la ( $C_f$ ) en el comportamiento del índice de rechazo de arsénico (R1)



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Aunque los rechazos son superiores al 94%, en la Figura 36 se observa una ligera disminución de R1, esto debido a que a medida que aumenta la concentración el proceso de CP se acerca a la capa límite de la membrana, produciendo una disminución en el rechazo del soluto. Estos resultados concuerdan con el trabajo de Pontié et al. (2008), quienes presentan un enfoque que combina la caracterización y el modelado de la transferencia de masa en un sistema de OI a bajas presiones.

#### 4.4.2. Valoración estadística de los resultados experimentales

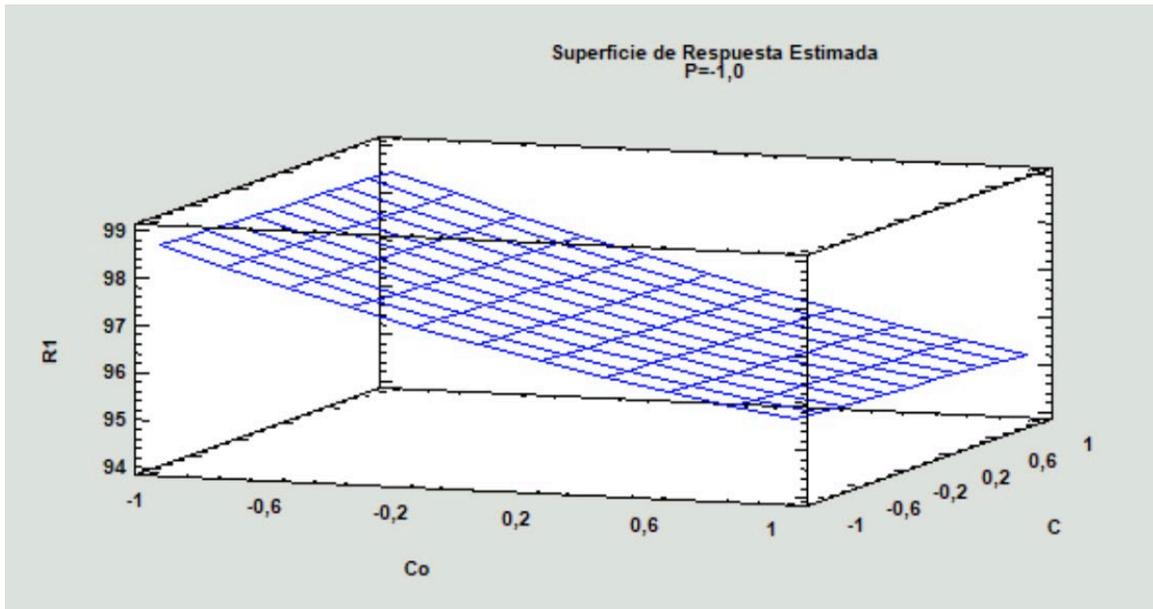
Los resultados experimentales obtenidos expuestos en la Tabla 30 sirvieron como base del análisis estadístico del proceso, con el objetivo de maximizar las variables de respuesta. El análisis completo de los resultados se encuentra en el Anexo 13. El resultado más significativo del estudio estadístico es que los índices más altos de remoción se alcanzaron en el rango de presiones baja- media. Se destaca que, los tres niveles de presión con los que se operó fueron presiones bajas (5, 7,5 y 10 bares), en relación a las presiones con las que normalmente se operan plantas de ósmosis inversa. Se trabajó con presiones bajas para observar el comportamiento de la tecnología en condiciones críticas de presión.

A continuación, se presentan los gráficos de superficie respuesta, donde se observa la interacción de las tres variables de entrada concentración, presión y caudal, para cada una de las variables de respuesta índice de rechazo del ion metálico, índice de rechazo de conductividad y Flux.

#### 4.4.2.1. Índice de remoción de arsénico (R1)

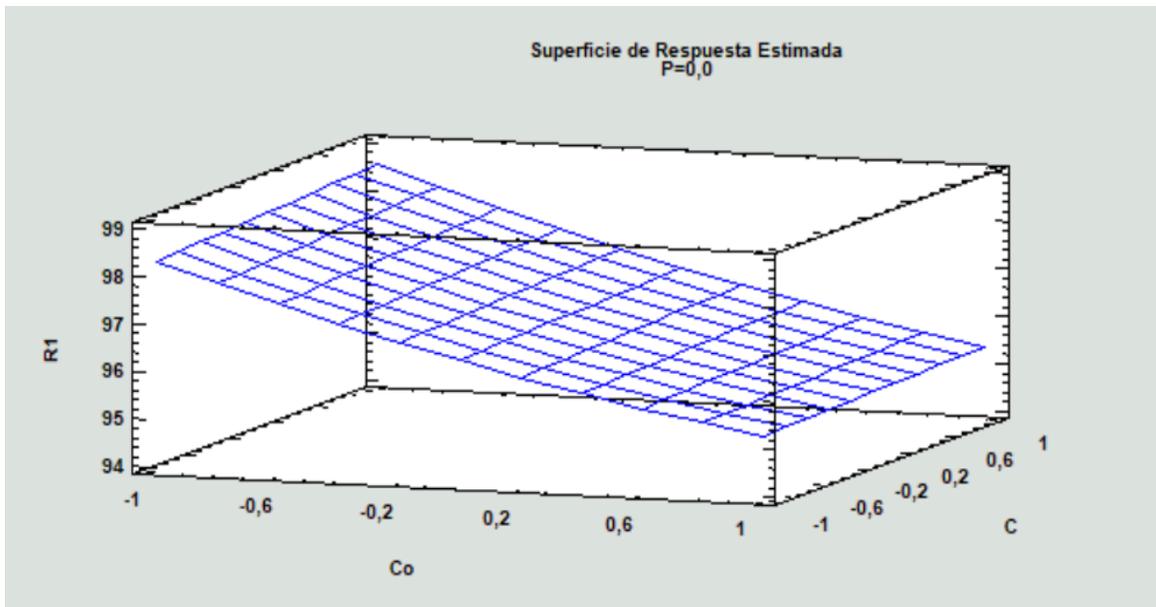
En las figuras 37, 38 y 39 las gráficas de superficie respuesta en función de los tres niveles de presión aplicadas, que son presión baja= -1, presión media= 0 y presión alta= 1.

Figura 37. Gráfica de superficie respuesta R1 – Presión baja



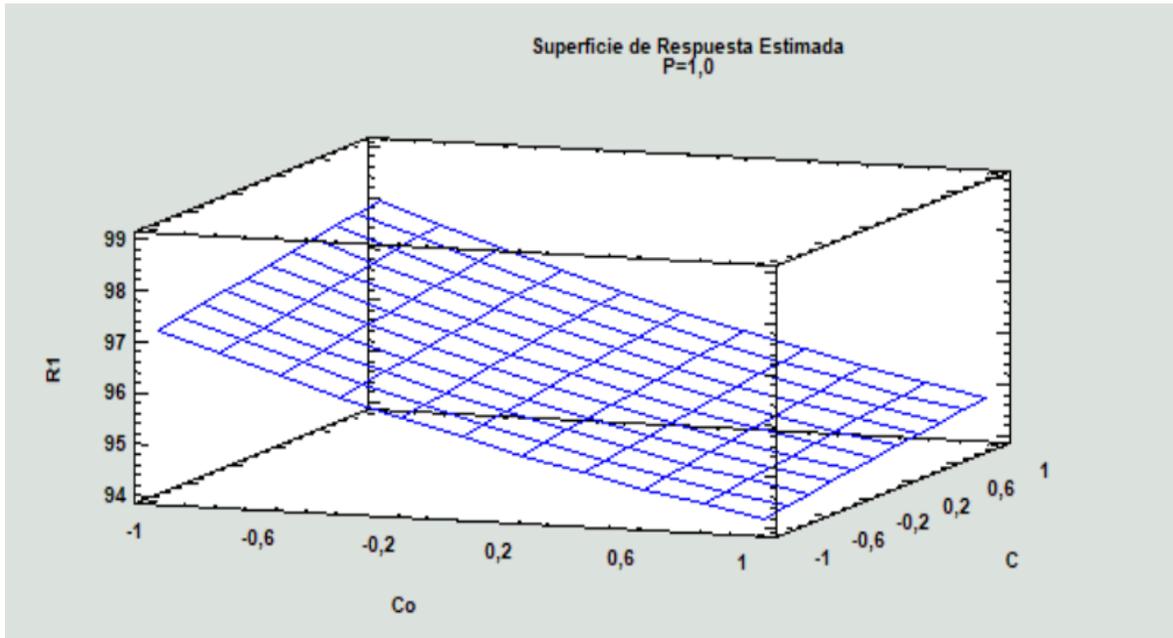
Nota: R1= Índice de remoción de arsénico; P= Presión; Co= Concentración; C= Caudal.  
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 38. Gráfica de superficie respuesta R1 – Presión media



Nota: R1= Índice de remoción de arsénico; P= Presión; Co= Concentración; C= Caudal.  
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 39. Gráfica de superficie respuesta R1 – Presión alta



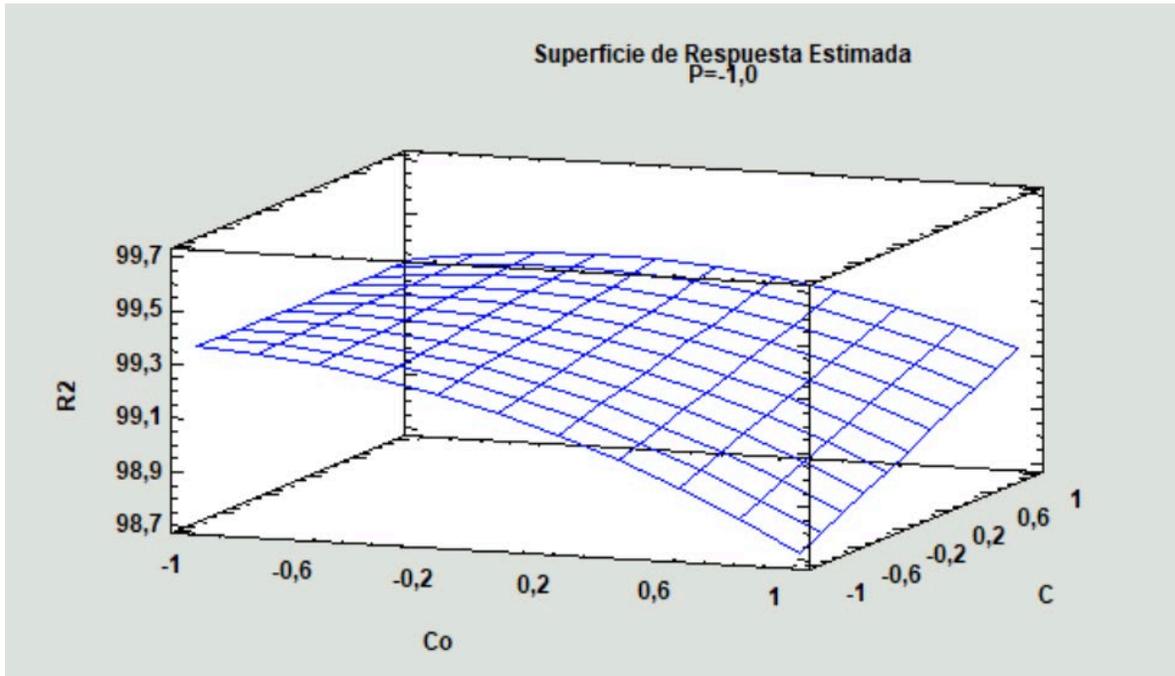
Nota: R1= Índice de remoción de arsénico; P= Presión; Co= Concentración; C= Caudal.  
Fuente: Elaboración propia, 2021.

De las figuras 37, 38 y 39 se observa que, el nivel de presión baja serían el punto más conveniente para alcanzar una sostenibilidad en la técnica de OI, debido a que en este nivel se alcanzaron los porcentajes de remoción del arsénico más altos. Esto significaría un ahorro energético sin afectar la eficiencia de separación. También se observa que para los tres niveles de concentraciones el porcentaje de remoción supera el 94,13%, lo cual es significativo ya que la concentración baja es la representativa de la contaminación existente en el área de estudio, excediendo los LCM. Por ello, tener una eliminación de 94,13% con cualquier nivel de concentración solucionaría el problema de contaminación, incluso si este aumentara 5 o 10 veces más, concentraciones simuladas por los niveles medio y alto, respectivamente. En cuanto al caudal puede verse que, trabajar con un caudal bajo, medio o alto no causó un efecto directo significativo en la variable respuesta “R1”.

#### 4.4.2.2. Índice de remoción de conductividad (R2)

Durante la fase experimental, la conductividad fue un parámetro de control *in situ*. Se destaca que los índices de remoción de conductividad superaron el 99,11%, lo cual denota que todos los niveles a los que se operó son adecuados para obtener altos porcentajes de remoción de la conductividad. Sin embargo, los índices más altos se encontraron a presiones bajas (Figura 40). Trabajando a presión baja se observó un mayor índice de rechazo de conductividad para concentraciones bajas. Por otro lado, analizando el caudal la situación es diferente, ya que se alcanzó un mayor índice de rechazo de conductividad operando con caudales altos.

Figura 40. Gráfica de superficie respuesta R2 – Presión baja



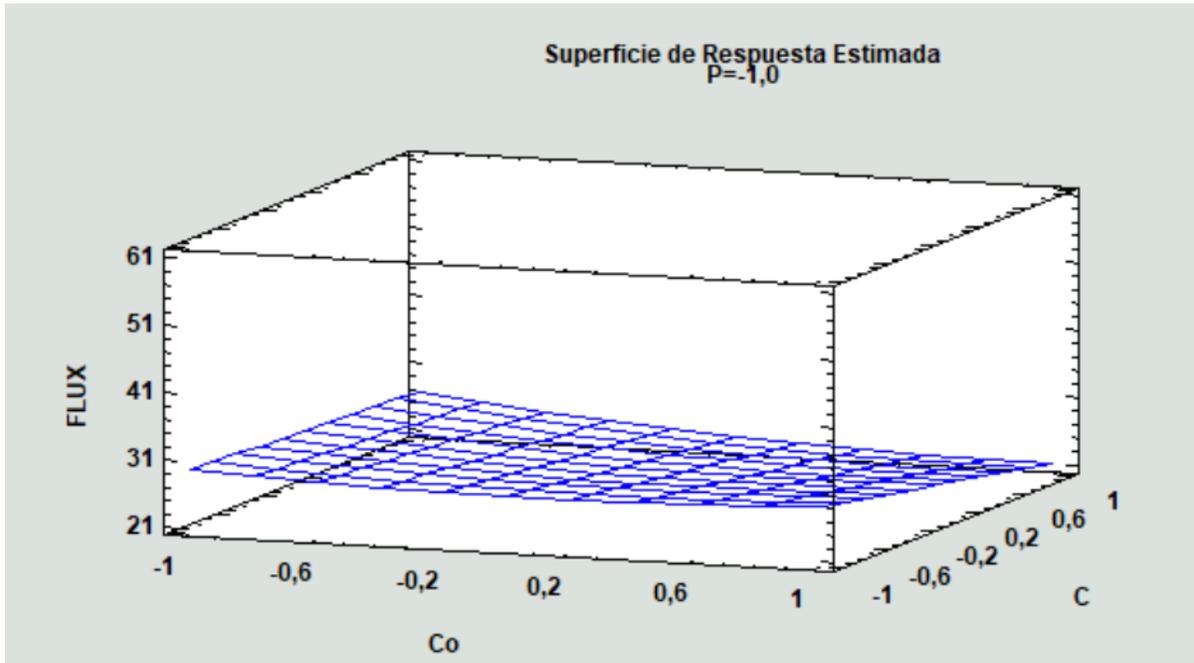
Nota: R2= Índice de remoción de conductividad; P= Presión; Co= Concentración; C= Caudal.  
Fuente: Elaboración propia, 2021.

#### 4.4.2.3. Flux (Jv)

El Flux representa el flujo de agua sobre el área activa de membrana. Esta variable respuesta sirvió como indicador en la operación para la planta piloto de OI. Los valores de Flux con los que se operó en la experimentación fueron menores al recomendado por el fabricante, el cual es de 47,33 l/m<sup>2</sup> hr. Trabajar con Flux menor al preestablecido por el fabricante permitió obtener altos índices de remoción del ion metálico y de conductividad, trabajando a presiones bajas lo que implicó menor consumo eléctrico.

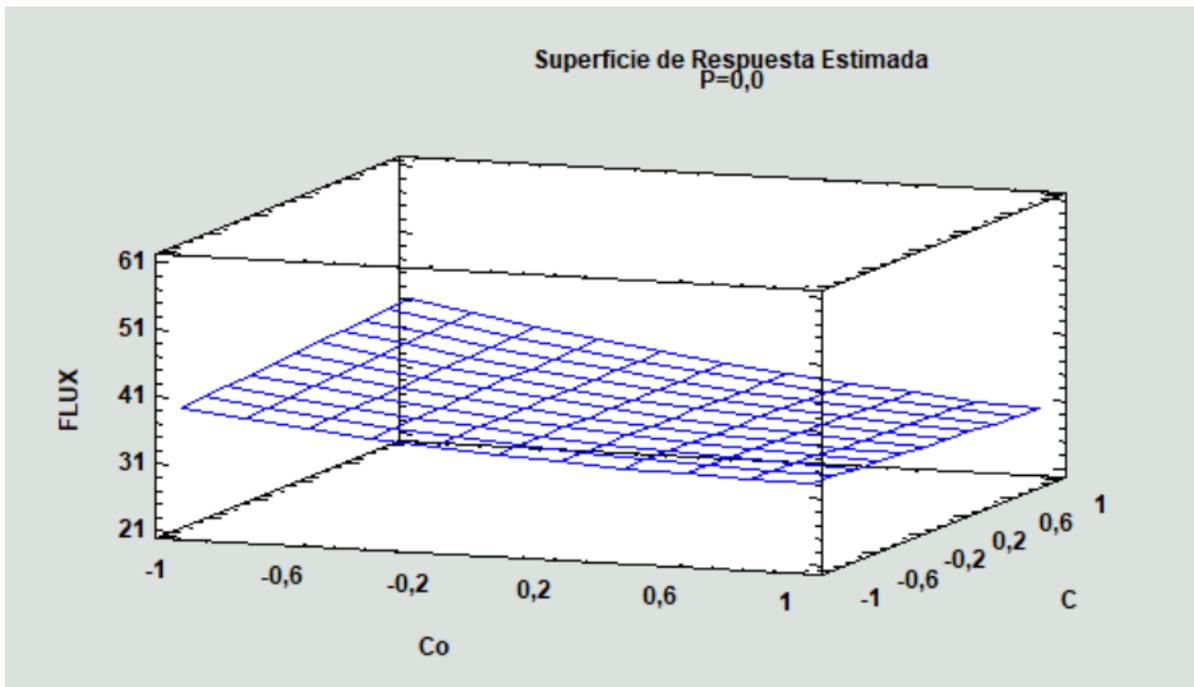
A continuación, se presenta en las figuras 41, 42 y 43, las gráficas de superficie respuesta en función de los tres niveles de presión aplicadas, que son presión baja= -1, presión media= 0 y presión alta= 1.

Figura 41. Gráfica de superficie respuesta Flux – Presión baja



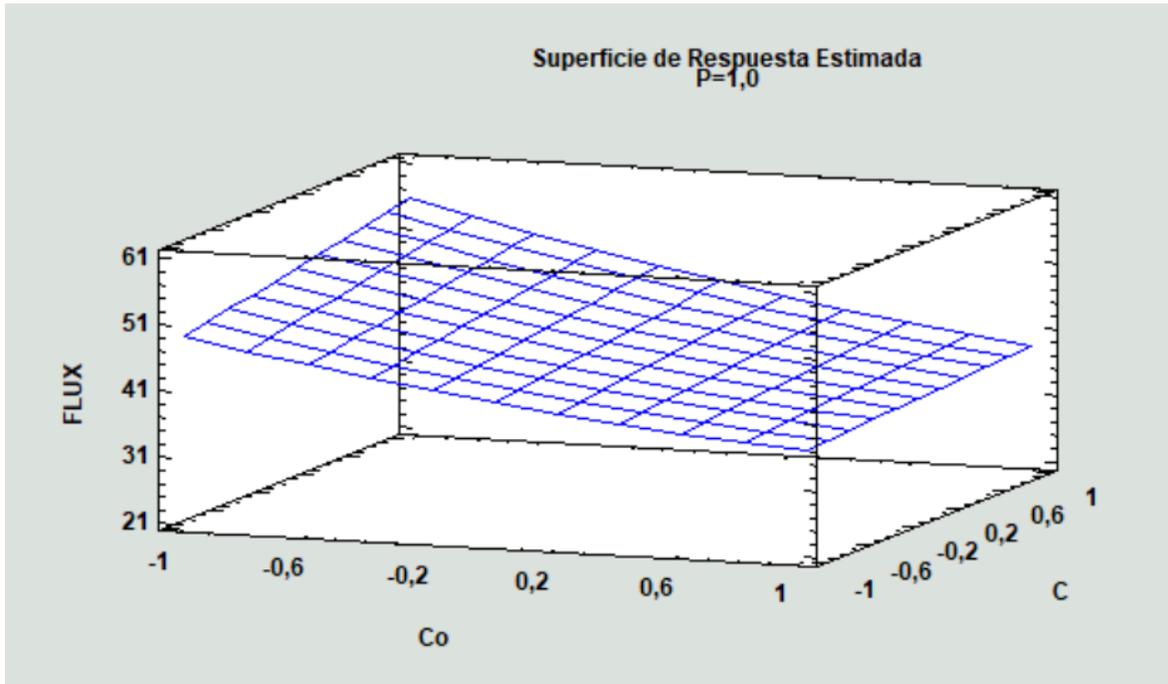
Nota: Flux= flujo de agua sobre el área activa de membrana; P= Presión; Co= Concentración; C= Caudal.  
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 42. Gráfica de superficie respuesta Flux – Presión media



Nota: Flux= flujo de agua sobre el área activa de membrana; P= Presión; Co= Concentración; C= Caudal.  
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 43. Gráfica de superficie respuesta Flux – Presión alta



Nota: Flux= flujo de agua sobre el área activa de membrana; P= Presión; Co= Concentración; C= Caudal.  
 Fuente: Elaboración propia, 2021.

De las figuras 41, 42 y 43 se observa, cómo era esperado, los valores más altos para el Flux se encuentran en el nivel de presión alto, demostrando un comportamiento habitual de la membrana.

#### 4.4.3. Validación del modelo matemático

Para el proceso de validación del modelo matemático se ha estimado el coeficiente de reflexión  $\sigma$  mediante ajuste de curvas utilizando la aplicación *curve fitting* del Matlab. También se realizó el cálculo de los parámetros no lineales como la constante de permeabilidad hidráulica  $L_p$  y el coeficiente de transferencia de masa  $k$ . La Tabla 31 se detallan los coeficientes encontrados para el arsénico en sus tres concentraciones.

Tabla 31. Parámetros no lineales del modelo

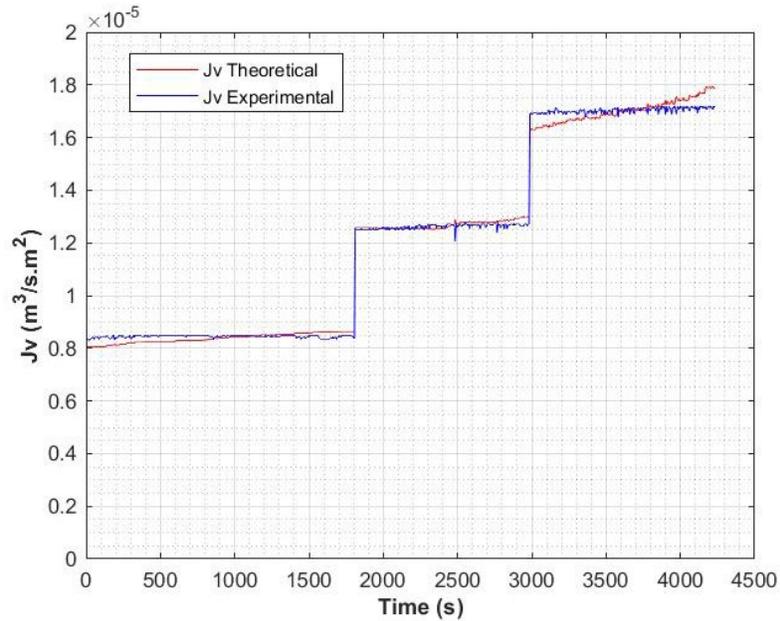
Metal	Concentración		$\sigma$	$L_p$ (m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> .Pas)	K (m/s)
	mg/L	Nivel			
As	0,01	Baja	0,9935	1,7218E-11	5,6E-06
	0,05	Media	0,9890	2,116E-11	5,83E-06
	0,1	Alta	0,9912	1.9043E-11	7,49E-06

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Con los parámetros obtenidos en la tabla anterior e incorporándolos a la ecuación 22 previamente descrita y explicada, se calculó el  $J_v$  (valor teórico). Las gráficas resultantes del  $J_v$  teórico (calculado) y el  $J_v$  experimental se muestran sobrepuestas en las figuras 44, 45 y

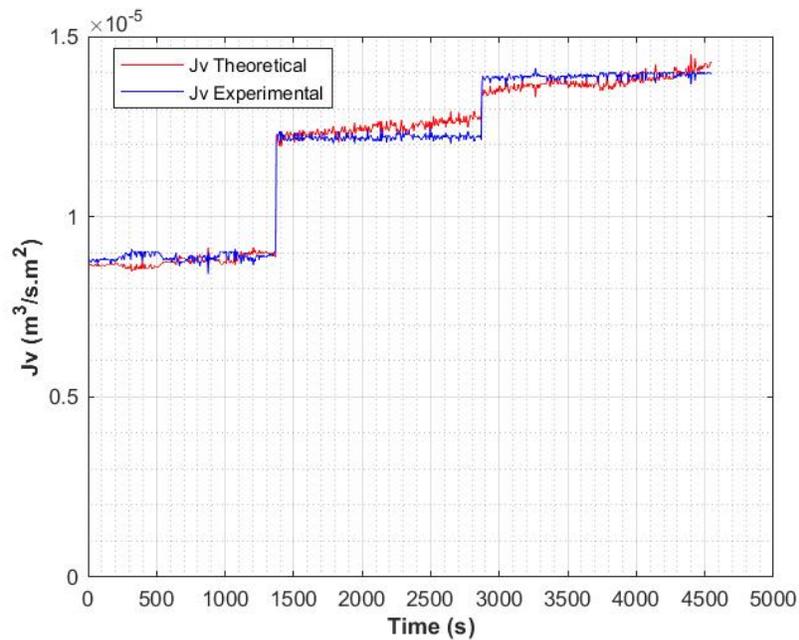
46. Estas graficas fueron las herramienta visual para la validación del modelo comparando el comportamiento Flux experimental respecto al teórico. En el Anexo 14 se encuentran la programación de los cálculos realizados en Matlab.

Figura 44. Flux Teórico vs Flux Experimental en concentración baja



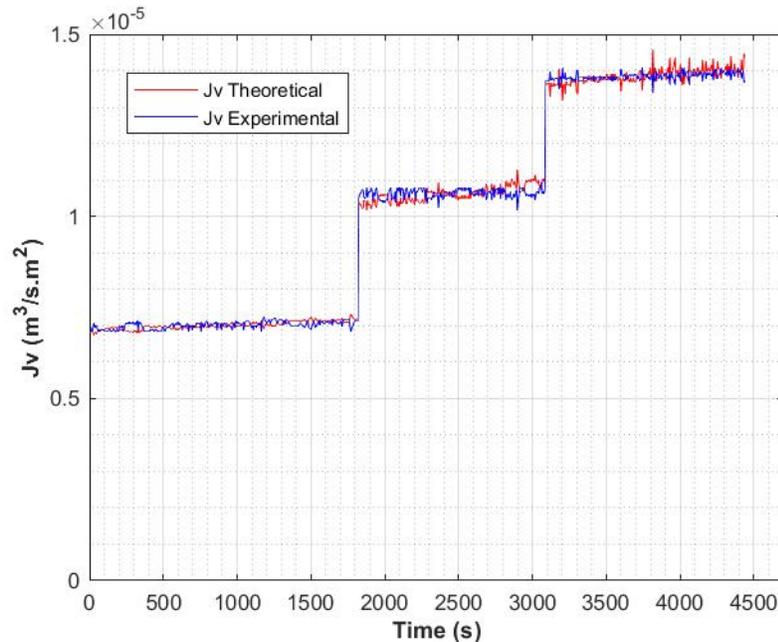
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 45. Flux Teórico vs Flux Experimental en concentración media



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 46. Flux Teórico vs Flux Experimental en concentración alta



Fuente: Elaboración propia, 2021.

De las anteriores figuras se puede apreciar que, la diferencia máxima entre los valores teóricos y experimentales es de 4,4%. La concentración media es la que presenta mayor diferencia, la cual se presenta en la Figura 45.

El análisis y evaluación de la CP en la membrana ha permitido validar la eficiencia del sistema. La corrección de temperatura incluida en el modelo CP permite un adecuado ajuste de la misma, considerando que la permeabilidad de la membrana varía en función del incremento de temperatura del proceso experimental. Esto se observa en el flujo teórico calculado, el cual muestra una clara tendencia creciente, lo cual es normal en el proceso de separación a medida que aumenta la temperatura de la solución. Se destaca una congruencia entre el comportamiento experimental y el teórico, validando el modelo propuesto.

## 5. Impacto científico-técnico, económico y social

La ósmosis inversa ha evolucionado en las últimas décadas, pasando de ser una tecnología emergente a ser un proceso consolidado. Actualmente, la OI es la principal técnica de desalación de agua a nivel mundial. Sin embargo, su implementación en PTAP y PTAR aun no es viable en todos los contextos, debido a los altos costes que implica su implantación y operación. Un factor clave para lograr adaptar exitosamente la técnica de OI dentro de plantas de tratamiento es conocer las necesidades y limitaciones de cada caso. Para Bolivia un país en vías de desarrollo, el agua segura es una necesidad inminente para evitar un riesgo actual y futuro en la salud pública, pero una limitante importante se encuentra en los recursos económicos destinados para el tratamiento de aguas. Entonces, lo que se busca para este y otros casos donde el factor económico juega un rol principal para implementar o no un proceso de tratamiento de agua altamente eficiente es optimizar los costes del mismo.

El impacto científico-técnico y económico de esta tesis doctoral recae en alcanzar la sostenibilidad de la OI, como un avance en el conocimiento dentro del tratamiento. Como un primer paso, se estudió el proceso para identificar las variables que lo controlan. Se determinó que los costes de energía son el mayor componente en los costes de operación del agua acondicionada mediante OI, es por esto que disminuirlos elimina uno de los principales condicionantes para su implementación en plantas de tratamiento. Se trabajó con bajas presiones modificando la presión de operación convencional, pero sin disminuir la eficiencia de separación de la técnica. Operar en condiciones de presión baja significa que es posible obtener agua de alta calidad por medio de la OI pero reduciendo sus costes operativos. La transferencia del conocimiento obtenido al sector encargado del tratamiento de agua en Bolivia, sería el paso inicial para lograr la aplicación de OI para garantizar el acceso a agua segura para la población.

Una de las principales ventajas del uso de la OI respecto a otros tratamientos es que su uso resulta sencillo y seguro, ya que no precisa de reactivos químicos, reduciendo con ello la huella ambiental del tratamiento de aguas, dado que no produce descargas de efluentes químicos que necesitan posteriormente de tratamientos de depuración adicionales. También se debe mencionar que, la recuperación de la calidad del agua por medio de la OI es inmediata, lo cual es atractivo para solucionar problemáticas hídricas muy urgentes, como es el caso de Milluni en Bolivia. La parte alta de la Microcuenca Milluni comprende fuentes de agua importantes para el abastecimiento de las ciudades de La Paz y El Alto, ciudades en constante crecimiento en Bolivia. Las lagunas de Milluni se encuentran contaminadas con metales pesados tóxicos, como el arsénico, generado por actividades mineras pasadas e ilegales. Para obtener la aceptación social del proyecto de descontaminación del agua de Milluni, las principales generalidades de la OI como sus puntos positivos deben ser de conocimiento de todas las partes que jueguen papeles de decisión y aceptación alto en el área problema. Esta investigación presentó el análisis de partes interesadas de Milluni, como el aporte al ámbito social de la misma. Esta contribución apoyará al planteamiento de una adecuada estrategia de socialización de la técnica de OI o cualquier otro proyecto que se quiera implementar en el área. Teniendo como objetivo que las partes se sientan vinculadas al proyecto y lo acepten, evitando un veto social que pueda interferir en la realización del mismo.

Finalmente, como se mencionó anteriormente la transferencia del conocimiento obtenido es crucial no solo en dirección a las actuales esferas que manejan los recursos hídricos, si no hacia las nuevas generaciones que se encargaran de encaminar el mundo a la sostenibilidad. Estudios previos denotan que países en vías de desarrollo como Bolivia requieren de formación especializada para satisfacer las necesidades en las diferentes áreas tecnológicas emergentes (Lo Iacono, et al. 2018). En este sentido, la implementación del manejo de tecnologías desde la formación pregrado es importante. El impacto social de esta tesis doctoral se realizó mediante una experiencia desarrollada con estudiantes de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Católica boliviana “San Pablo” – Sede La Paz (Alvizuri et al., 2021a). Se trabajo con la planta piloto de OI para implementar una metodología activa de enseñanza-aprendizaje. Lo que se busco fue reducir la brecha entre la teoría y la práctica, además de complementar la formación de los futuros ingenieros con habilidades prácticas útiles para su proximo desempeño laboral. Detalles de la experiencia en el Anexo 15.

## 6. Discusión

El agua sin contaminantes está vinculada a la salud pública y tiene un impacto positivo en ella (Tkaczyk et al, 2020; Pereira y Marques, 2021). El agua con calidad adecuada para el consumo juega un papel fundamental en la carrera por alcanzar el desarrollo sostenible en las diferentes naciones. Teniendo en cuenta que los recursos hídricos superficiales no son infinitos, es necesaria la evaluación de estos, especialmente en regiones rurales y en desarrollo, para reducir el riesgo en la salud por una mala calidad del agua y la limitada disponibilidad y accesibilidad a la misma, como indica French et al. (2017). Por lo tanto, el estudio de la calidad de los cuerpos de agua superficiales es necesario para identificar si existe contaminación en ellos. La caracterización de los cuerpos de agua es el ante paso para la búsqueda e implementación de tratamiento para remover los contaminantes presentes en el agua y preservar su calidad.

Durante la caracterización de los cuerpos superficiales de Milluni como primer paso se analizó la data histórica de monitoreo del área. Se identificó que existe cierta inconsistencia y heterogeneidad en los datos, lo cual imposibilitó realizar un estudio estadístico exponiendo que las series temporales de datos hidrológicos deben ser lo más completas posibles para poder ser representativas en congruencia a lo estipulado por Yevjevich & Jeng, (1969). Para generar información completa y confiable de las lagunas de Milluni se diseñó un programa de monitoreo considerando las limitaciones que existen en el manejo del área de estudio. Después de la implementación del año piloto del programa, se analizaron los resultados buscando optimizar los recursos económicos, técnicos y de tiempo para la futura implementación del programa. Un mecanismo de control al programa siempre será útil y necesario para evaluar el programa en la línea de mejora continua, en concordancia con UNEP/WHO (1996).

Siendo el factor económico la principal limitante para el constante monitoreo en el área de estudio, existen alternativas de parámetros y mecanismos de control de bajo costo que podrían implementarse. El monitoreo continuo de parámetros básicos como pH y conductividad podría dar indicios de contaminación por metales pesados (NB512, 2004; Crittenden et al., 2012). Monitorizar parámetros básicos, no representaría un costo adicional importante dentro del programa de monitoreo ya establecido. Otra alternativa es la teledetección que puede realizarse por softwares de acceso libre, permitiendo el control de cuerpos de agua, su caracterización, entre otros aspectos fundamentales (Ortega et al., 2016).

Mediante la caracterización de los cuerpos superficiales de Milluni, se evidenció la contaminación por metales pesados, con especial atención en el arsénico al ser un metal altamente tóxico, representando un riesgo importante a la salud pública. Se debe considerar que cada caso de estudio es único, por lo tanto, la naturaleza y el tamaño de los riesgos asociados y la viabilidad de las diferentes opciones de mitigación variarán de un sitio a otro. Por este motivo, la selección de los tratamientos adecuados debe estudiarse de manera puntual. Además, es preciso entender la interrelación entre las partes interesadas del área, para elaborar estrategias de trabajo colaborativo buscando la implementación exitosa de proyectos relacionados con el manejo del agua, evitando problemas de tipo social, político y económico.

Con el objetivo de garantizar el acceso al agua segura para la población se seleccionó la OI para remover arsénico del agua por su alta eficiencia, y rápida ejecución (Meschke et al., 2019). Posteriormente, se montó y se puso en marcha un piloto para estudiar esta tecnología. Normalmente la OI opera en un rango presiones alto establecido por los fabricantes de membranas, varios estudios comprueban la efectividad en torno a la remoción de arsénico en estas condiciones (Chan y Dudeney, 2008; Yoon et al., 2009; Chang et al., 2014). Sin embargo los rangos de presión convencionales significan un costo energético alto lo cual limita la implantación de la OI en todos los contextos. En el diseño de experimentos para el trabajo con la planta de OI se definieron rangos de presión para una operación sostenible, buscando disminuir el consumo energético en congruencia con el estudio de García (2012). Se ratificaron los resultados de Villena, et al. (2022). Por un lado, un análisis estadístico de los resultados experimentales permitió maximiza las variables respuesta, observando que es posible trabajar con presiones bajas-medias, sin disminuir la eficiencia de separación. Por otro lado, Un modelo matemático fue fundamental para comprender el comportamiento físico del proceso en la búsqueda de su optimización.

Un adecuado tratamiento para agua de las lagunas Milluni no solo hará más seguro el suministro de agua para las ciudades de La Paz y El Alto, sino que evitará la contaminación de suelos y aguas subterráneas en la zona. Además, la fauna y flora de la región no estarán en riesgo de bioacumulación de metales pesados, como el arsénico. El agua de las lagunas de Milluni sigue siendo una fuente directa de agua para pequeñas poblaciones que no están conectadas a la red de agua potable, lo que aumenta aún más la necesidad de encontrar una solución sostenible a este problema.

## 7. Conclusiones

A nivel mundial, muchos cuerpos de agua superficial presentan concentraciones de metales pesados que exceden los límites permitidos. Esta problemática es mayor cuando los cuerpos de agua contaminados se utilizan como fuentes de abastecimiento público. Los recursos de agua superficial de Milluni son una importante fuente de agua potable para las ciudades de La Paz y El Alto, sin embargo estos se ven afectados por la contaminación de metales pesados. Este trabajo en primera instancia realizó una caracterización de los cuerpos de agua superficiales del área de estudio y se validó la primera hipótesis, ya que se determinó una degradación de la calidad del agua de Milluni debida a la minería pasada e ilegal desarrollada en la zona. Adicionalmente, se identificaron mecanismos para fortalecer la gestión del agua en la zona, con énfasis en el control de la calidad del agua. Finalmente, se implementó la tecnología de OI como una alternativa para la solución sostenible al problema identificado, y así garantizar agua segura para el abastecimiento público.

La evaluación de los datos históricos del monitoreo en Milluni expuso que el actual desempeño del programa de monitoreo de la calidad de agua no genera bases de datos estadísticamente válidos de Milluni, refutando la hipótesis dos. Se concluye que, la información disponible analizada es muy limitada, presentando series incompletas, lo cual imposibilita un análisis estadístico de los datos históricos. Sin embargo, se identificaron algunos metales pesados con concentraciones superiores a los valores establecidos en la Norma Boliviana 512 para agua potable. Entre todos, se consideró el arsénico como el más peligroso. Para caracterizar los cuerpos de agua superficiales de Milluni se diseñó e implementó un programa de monitoreo específico para el área considerando sus particulares características y limitaciones en su manejo. El diseño del programa se basó en estándares internacionales, y sus componentes se definieron para adaptarse a la gestión del agua de la Macrocuenca Katari a la cual la Microcuenca de Milluni pertenece.

La valoración de los resultados de la implementación del primer año del programa de monitoreo (año piloto) se puede apreciar en el apartado 4.1.5.. Como puntos importantes se observa que en el punto de monitoreo 1, Laguna Pata Khota, no se presenta contaminación, es decir, no se ve afectada la calidad del agua de manera negativa por factores externos. Sin embargo, los puntos monitorizados 2, 3 y 4 muestran niveles de contaminación por metales pesados tóxicos producto de las actividades mineras en la zona. Finalmente, cabe señalar que el punto 2 es el sector que presenta mayores niveles de contaminación en la Microcuenca de Milluni, y la degradación de la calidad de sus aguas es muy alta. Al estar conectadas la Laguna Milluni Chico (punto 2) con la Laguna Milluni Grande (punto 3), donde se ubica la presa de almacenamiento, se observó que los efluentes contaminados de Milluni Chico están afectando negativamente a la calidad del agua en la presa de almacenamiento.

La evaluación estadística de los resultados de la implementación del año piloto del programa de monitoreo demostró que no existe variación en la concentración de contaminantes dentro de las estaciones húmeda y seca. Sin embargo, existe una variación significativa que contrasta las dos estaciones. Por lo tanto, se estableció que el monitoreo se debe realizar al menos dos veces al año en los meses más representativos de cada estación. Se determinaron enero para la estación húmeda y agosto para la estación seca. En cuanto a los demás componentes del

programa de monitoreo, como objetivo, propósito, puntos de muestreo, protocolo de muestreo y parámetros medidos, se concluyó que son adecuados y están alineados, y pueden ser incorporados al sistema de gestión del agua de la Macrocuenca Katari.

Los parámetros de pH y conductividad medidos *in situ*, considerados como parámetros básicos de control en el Reglamento 512 de Bolivia y otras normas sobre la calidad del agua potable, se relacionaron con la presencia de iones metálicos detectados fuera de los límites permisibles. Esto fue corroborado por el análisis estadístico realizado. Tanto el pH como la conductividad resultaron ser indicadores de la presencia de metales pesados, validando la hipótesis 3. Estos dos parámetros no pueden reemplazar el monitoreo específico de metales, pero son una alternativa de bajo costo para el seguimiento de la presencia de iones metálicos. El objetivo es controlar la calidad de los recursos superficiales de Milluni continuamente, sin agregar costos adicionales al programa de monitoreo.

Como una medida de complementación y fortalecimiento al PMCA propuesto, se hizo una correlación entre los resultados del primer año del programa con imágenes satelitales obtenidas por metodologías de teledetección y programación en la plataforma “Google Earth Engine”. Se demostró que es posible optimizar los monitoreos tradicionales con ayuda de la teledetección de contaminantes, teniendo como principal ventaja un control continuo en línea de los cuerpos de agua sin costo adicional ya que se trabajó con un software libre. Sin embargo, la resolución de las imágenes satelitales es limitada en temporadas de alta nubosidad, lo cual vendría a ser una desventaja de esta técnica de monitoreo. Los resultados de esta correlación de información expusieron que las 4 lagunas de Milluni presentaron diferentes calidades en sus aguas. Se puede ver que en el sistema existe una parte que no estaría siendo impactada negativamente por actividades antropogénicas y otra que sí. La primera parte, comprende las dos primeras lagunas que son Pata Khota y Jhanco Khota. La segunda parte del sistema serían las lagunas Milluni Chico y Mulluni Grande, estas últimas se ven afectadas de forma muy agresiva por actividades mineras. Esto es congruente con los resultados del análisis estadístico de los resultados del primer año de monitoreo presentado anteriormente.

Una parte importante dentro de todo sistema de gestión de recursos hídricos son las partes involucradas, por este motivo se hizo una determinación de partes interesadas en Milluni, como un segundo mecanismo de fortalecimiento para la actual gestión del agua. Se identificaron 24 partes las cuales juegan un papel fundamental en la aprobación e implementación de proyectos relacionados con la temática del agua. El análisis de partes interesadas permitió conocer cuál es el rol que cumple cada parte y su influencia a la hora de toma de decisiones. Este tipo de análisis es imprescindible para lograr la aceptación y posterior ejecución de la propuesta de tratamiento para las aguas de Milluni. Los aspectos más destacados de este análisis fueron 3. En primer lugar, se observó que la relación entre los niveles de Gobierno Departamental y Local con el Nacional es necesaria e imperativa, considerando las competencias que tienen cada instancia para asegurar una asignación de recursos económicos adecuada. En segundo lugar, se determinó que la colaboración y sinergia entre ministerios, viceministerios, gobernaciones, municipios y la Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento (EPSAS) es fundamental para lograr una de gestión del agua exitosa en la zona. Finalmente, la parte social, Las Federaciones de Juntas Vecinales (FEJUVE), tiene un papel importante al momento de la toma de decisiones, ya que la

constitución boliviana establece que todo proyecto a implementarse dentro del sistema de gestión del agua debe pasar un proceso de consulta previa con las comunidades campesinas.

Después de quedar expuesta la problemática de metales pesados en Milluni, se determinó al arsénico como ion problema principal debido a que al estar presente en el agua con concentraciones por encima de los LMC su toxicidad y peligrosidad en sistemas vivos es inminente. El arsénico fue el metal presente en las aguas sintéticas durante la experimentación con la planta piloto de ósmosis inversa. En la selección del tratamiento se eligió el proceso de OI, al ser altamente eficiente en la separación de compuestos iónicos del agua, ya que alcanza índices de remoción de iones metálicos entre el 90-99%, validando la hipótesis cuatro del estudio. Como se ha observado en diversas investigaciones, se requiere una gran cantidad de energía para el funcionamiento de la OI. Por ello, en el trabajo experimental con la planta piloto de OI se desarrolló en condiciones de baja presión, tomando un rango de 5 -10 bares, considerando que el fabricante recomienda operar entre 20 - 40 bares para alcanzar las máximas eficiencias de separación. Trabajar con presiones bajas busco que el proceso de OI en su implementación a gran escala sea sostenible.

La experimentación en la planta piloto ha permitido estudiar el comportamiento y eficiencia de una membrana semipermeable de poliamida con configuración en espiral tipo ULP-2540, marca Kensem de procedencia China. La remoción del ion metálico del agua fue verificada por dos indicadores, el índice de rechazo de la conductividad medido *in situ* durante las corridas experimentales y el índice de remoción del metal problema determinado por analíticas realizadas por un espectrómetro de emisión óptico con plasma de acoplamiento inductivo. Los índices de rechazo del arsénico fueron superiores al 94% en todos los ensayos, donde se trabajó con tres niveles de concentración de arsénico (baja, media y alta), lo cual ha confirmado la eficiencia del proceso de OI operando en condiciones críticas moderadas de presión. Se debe mencionar que trabajar con un Flux menor al preestablecido por el fabricante, 47,33 l/hr\*m<sup>2</sup>, permitió obtener altos índices de remoción del ion metálico y de conductividad, trabajando a presiones bajas lo que implicó un menor consumo energético.

El análisis de los efectos de las variables sobre las respuestas del proceso expusieron que, si bien todos los índices de rechazo son superiores al 94%, para altas concentraciones se verifica que la concentración por polarización tiene una alta influencia en el proceso. Se confirmó que a bajas concentraciones la transferencia de masa a través de la membrana disminuye, siendo este fenómeno que gobierna el proceso, sin embargo, a altas concentraciones es el fenómeno CP quien gobierna, esto debido a que a medida que el soluto aumenta, este se acumula en la capa límite de la membrana. Según la valoración estadística de los resultados experimentales realizada con el software Statgraphics Centurion XVIII, los dos índices de rechazo del arsénico alcanzan porcentajes superiores al 96% en concentraciones baja y media (0,01 y 0,05 mg/l, respectivamente), sin embargo, para la concentración alta (0,1 mg/l) los porcentajes de rechazo muestra una leve caída encontrándose sobre 94%, esto debido al efecto de la concentración de los solutos en la capa límite de la membrana.

Se desarrolló un modelo matemático a partir del modelo de flujo unidimensional Concentración-Polarización (CP) de Spiegler-Kedem, incorporando un ajuste de temperatura tipo Arrhenius. El modelo expuso el comportamiento físico del proceso de separación por ósmosis inversa. Los resultados obtenidos en el proceso experimental permitieron la

estimación de los parámetros planteados dentro del modelo, los cuales son el coeficiente de reflexión ( $\sigma$ ), la constante de permeabilidad hidráulica ( $L_p$ ) y el coeficiente de transferencia de masa ( $k$ ), sus valores se presentaron en la Tabla 31. Para la validación del modelo se graficaron sobrepuestos los valores teóricos vs los datos experimentales (Figuras 44, 45 y 46), donde se observa consistencia entre los valores teóricos y los experimentales, presentando un error relativo de 4,4% entre ambos.

La investigación realizada expuso que es posible trabajar a presiones bajas con la tecnología de OI, sin afectar la eficiencia de separación del proceso dando paso a la disminución de costos energéticos durante la etapa de operación, quedando validada la hipótesis cinco del estudio. Este aporte es significativo en situaciones donde se cuenta con pocos recursos económicos pero existe un riesgo inminente sobre la salud pública y los ecosistemas, como es el caso de la contaminación del agua por arsénico en Milluni en Bolivia. Futuras investigaciones pueden tomar como base este estudio para la implementación a gran escala de la OI, valorar el ahorro energético real así como la viabilidad de la técnica en proyectos de recuperación de la calidad del agua.

## Referencias

AAPS. (2020). Plan Estratégico de Sostenibilidad de Fuentes de Agua – PESFA – herramienta de planificación para el uso y aprovechamiento sustentable del recurso hídrico. Disponible online: <http://www.aaps.gob.bo/images/DRA/REPORTE%20PESFA%202020%20.pdf> (22/02/2022).

Acosta, J. A., Martínez, S. M., Faz, A., Millán, R., Muñoz, M. A., Terán, T., & Vera, R. (2011). Characterization of the potential mercury contamination in the Apolobamba gold mining area, Bolivia. *Spanish Journal of Soil Science: SJSS*, 1(1), 86-99. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2011.V1.N1.06>

AECID. (2020). Programa de Gestión Integral del Agua en Áreas Urbanas; AECID: La Paz, Bolivia. Disponible online: [https://www.aecid.gob.es/es/TablonAnuncios/Documents/agua%20en%20%C3%A1reas%20urbanas%20en%20Bolivia/Anexo%20I.%20Condiciones%20Particulares%20\(Descripcion%20de%20la%20Acci%C3%B3n\).pdf](https://www.aecid.gob.es/es/TablonAnuncios/Documents/agua%20en%20%C3%A1reas%20urbanas%20en%20Bolivia/Anexo%20I.%20Condiciones%20Particulares%20(Descripcion%20de%20la%20Acci%C3%B3n).pdf) (15/12/2021).

Adeleke, B., Robertson-Andersson, D., and Moodley, G. (2020). Comparative analysis of trace metal levels in the crab *Dotilla fenestrata*, sediments and water in Durban Bay harbour, Richards Bay harbour and Mlalazi estuary, Kwazulu-Natal, South Africa. *Heliyon*, 6, e04725. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04725>

Aggens, L. (1998). Identifying different levels of public interest in participation. In *Public Involvement Techniques: A Reader of Ten Years Experiences at the Institute for Water Resources*, prepared by Creighton, J. L., Delli Priscoli, J. & Dunning, C. M. IWR-USACE, Alexandria, Virginia, IWR Research Report. <https://www.iwr.usace.army.mil/portals/70/docs/iwrreports/82-r-1.pdf> (20/04/2020).

Ahlfeld, F., Schneider-Scherbina, A., & Bolivia. (1964). Los yacimientos minerales y de hidrocarburos de Bolivia. La Paz: Departamento Nacional de Geología, Ministerio de Minas y Petróleo.

Ahmad, A., & Bhattacharya, P. (2019). Environmental arsenic in a changing world. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 169-171. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.11.001>

Ajjabi, L.C., and Chouba, L. (2009). Biosorption of Cu<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup> from aqueous solutions by dried marine green macroalga *Chaetomorpha linum*. *Journal of Environmental Management*, 90, 3485-3489. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.001>

Akpor, O.B., and Muchie, M. (2010). Remediation of Heavy Metals in Drinking Water and Wastewater Treatment Systems: Processes and Applications. *International Journal of Physical Sciences*, 5 (12). 1807–17. Disponible online: [https://www.researchgate.net/publication/277775724\\_Remediation\\_of\\_heavy\\_metals\\_in\\_dr](https://www.researchgate.net/publication/277775724_Remediation_of_heavy_metals_in_dr)

[inking water and wastewater treatment systems Processes and applications](#) (25/02/2020).

Alka, S., Shahir, S., Ibrahim, N., Ndejiko, M.J., Vo, D.-V.N., and Manan, F.A. (2021). Arsenic removal technologies and future trends: A mini review. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123805. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123805>

Alanood, A., Al-Obajdib, M.A., Al-Hroubc, A.M., Patela, R., and Mujtaba, I.M. (2020). Evaluation and minimisation of energy consumption in a mediumscale reverse osmosis brackish water desalination plant. *Journal of Cleaner Production*, 248, 1-10, e119220. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119220>

AlSawaftah, N., Abuwatfa, W., Darwish, N. and Hussein, G. (2021). A Comprehensive Review on Membrane Fouling: Mathematical Modelling, Prediction, Diagnosis, and Mitigation. *Water*, 13, 1327. <https://doi.org/10.3390/w13091327>

Alvizuri Tintaya, P.A., Torregrosa López, J.I., Lo Iacono Ferreira, V.G., and Salinas Villafañe, O.R. (2019a). Heavy metals problem in micro basin that feeds a drinking water dam, Milluni—Bolivia case. In Proceedings of the XXIII International Congress on Project Management and Engineering, Málaga, Spain, 10–12 July. Disponible online: <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/2396> (20/06/2021).

Alvizuri Tintaya, P. A., Torregrosa López, J. I., Lo Iacono Ferreira V. G. and Salinas Villafañe O. R. (2019b). Review of treatment technologies for heavy metals from acid mine drainage. In Proceedings of the XXIII International Congress on Project Management and Engineering, Málaga, Spain, 10–12 July. Disponible online: <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/2315> (20/06/2021).

Alvizuri Tintaya, P. A., Villena Martínez, E. M., Torregrosa López, J. I., Lo Iacono Ferreira V. G. & Lora Garcia, J. (2020). Design of a monitoring program with the application of Bolivian Standard NB/ISO 5667-4: A case study of Milluni, Bolivia. In Proceedings of the XXIV International Congress on Project Management and Engineering, Alcoy, Spain, 7 – 9 July. Disponible online: <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/2499> (20/07/2021).

Alvizuri Tintaya, P.A., Ballivián Torrez, L.G., Torregrosa-López, J.I., Lo-Iacono-Ferreira, V.G. and Lora Garcia, J. (2021a). Teacher- Student Experience: Work in a pilot plant of reverse osmosis. In Proceedings of XXV International Congress on Project Management and Engineering, Alcoy, Spain, 6-9 July. Disponible online: <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/475> (12/04/22).

Alvizuri Tintaya, P.A., Villena Martínez, E.M., Micó Vicent, B., Lora Garcia, J., Torregrosa-López, J.I., and Lo-Iacono-Ferreira, V.G. (2021b). On the Road to Sustainable Water Supply: Reducing Public Health Risks and Preserving Surface Water Resources in the Milluni Micro-Basin, Bolivia. *Environments*, 9, 4. <https://doi.org/10.3390/environments9010004>

Alvizuri-Tintaya, P. A., Rios-Ruiz, M., Lora-Garcia, J., Torregrosa-López, J. I., & Lo-Iacono-Ferreira, V. G. (2022). Study and Evaluation of Surface Water Resources Affected by Ancient and Illegal Mining in the Upper Part of the Milluni Micro-Basin, Bolivia. *Resources*, 11(4), 36. <https://doi.org/10.3390/resources11040036>

Alyüz, B., and Veli, S. (2009). Kinetics and equilibrium studies for the removal of nickel and zinc from aqueous solutions by ion exchange resins. *Journal of Hazardous Materials*, 167, 482-488. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.006>

Aman, T., Kazi, A.A., Sabri, M.U., and Bano, Q. (2008). Potato peels as solid waste for the removal of heavy metal copper (II) from wastewater/industrial effluent. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 63, 116-121. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2007.11.013>

Apiratikul, R., and Pavasant, P. (2008). Batch and column studies of biosorption of heavy metals by *Caulerpa lentillifera*. *Bioresource Technology*, 99, 2766-2777. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.036>

Aramijo, C., and Condorhuaman, C., (2012). Simulación dinámica de sistemas de ósmosis inversa. *Rev. Per. Quim. Ing. Química*. 15, 21-34: Disponible online: <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/quim/article/view/4758/3831> (14/10/2021).

Ayora, C., Macías, F., Torres, E., Lozano, A., Carrero, S., Nieto, J.M., Perez-Lopez, R., Fernandez-Martínez, A., and Castillo-Michel, H. (2016). Recovery of rare earth elements and yttrium from passive-remediation systems of acid mine drainage. *Environmental, Science and Technology*, 50, 8255-8262. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02084>

Barakat, M.A., and Schmidt, E. (2010). Polymer-enhanced ultrafiltration process for heavy metals removal from industrial wastewater. *Desalination*, 256, 90-93. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.02.008>

Biggs, S., Matsaert, H. (1999). An actor-orientated approach for strengthening research and development capabilities in natural resource systems. *Public Administration and Development* 19, 231–262. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-162X\(199908\)19:3<231::AID-PAD71>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-162X(199908)19:3<231::AID-PAD71>3.0.CO;2-E)

Bundschuh, J., Litter, M.I., Parvez, F., Román-Ross, G., Nicolli, H.B., Jean, J.-S., Liu, C.-W., López, D., Armienta, M.A., Guilherme, L.R.G., Gomez Cuevas, A., Cornejo, L., Cumbal, L., and Toujaguez, R. (2012). One century of arsenic exposure in Latin America: a review of history and occurrence from 14 countries. *Science of The Total Environment*, 429, 2–35. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.024>

Cairns, M.R. (2018). Metering water: Analyzing the concurrent pressures of conservation, sustainability, health impact, and equity in use. *World Development*, 110, 411–421. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.06.001>

Camarilloa, R., Llanos, J., García-Fernández, L., Pérez, Á, and Cañizares, P. (2010). Treatment of copper (II)-loaded aqueous nitrate solutions by polymer enhanced ultrafiltration and electrodeposition. *Separation and Purification Technology*, 70, 320-328. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.10.014>

Cavaco, S.A., Fernandes, S., Quina, M.M., and Ferreira, L.M. (2007). Removal of chromium from electroplating industry effluents by ion exchange resins. *Journal Hazardous Materials*, 144(3), 634–638. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.087>

Chaabane, T., Taha, S., Taleb Ahmed, M., Maachi, R., and Dorange, G. (2006). Removal of copper from industrial effluent using a spiral wound module d film theory and hydrodynamic approach. *Desalination*, 200, 403-405. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.348>

Chan, B.K.C., and Dudeney, A.W.L. (2008). Reverse osmosis removal of arsenic residues from bioleaching of refractory gold concentrates. *Minerals Engineering*, 21, 272-278. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.10.003>

Chang, Q., and Wang, G. (2007). Study on the macromolecular coagulant PEX which traps heavy metals. *Chemical Engineering Science*, 62, 4636-4643. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.05.002>

Chang, F.F., Liu, W.J., & Wang, X.M. (2014). Comparison of polyamide nanofiltration and low-pressure reverse osmosis membranes on As (III) rejection under various operational conditions. *Desalination*, 334,10–16. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.11.002>

Chapman, D.V., World Health Organization, Unesco, and United Nations Environment Programme. (1996). *Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*, 2nd ed.; Chapman, D., Ed.; E & FN Spon: London, UK, 1996. Disponible online: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/41850> (15/02/2021).

Chartrand, M., and Bunce, N. (2003). Electrochemical remediation of acid mine drainage. *Journal of Applied Electrochemistry*, 33, 259–264. <https://doi.org/10.1023/A:1024139304342>

Chatelain, D. y Wittinton, H.M. (1992). Evaluación de los Recursos Hídricos en Bolivia, Sur América. Seminario de los Recursos Hídricos en Bolivia y su Dimensión Ambiental: Políticas, Planificación, Aspectos Legales, Aprovechamiento y Calidad de Aguas, Manejo de Cuencas, Degradación, Contaminación y Estudios; Ricaldi, V., Flores, C., Anaya, L., Eds.; AROL: Cochabamba, Bolivia. pp. 133–136.

Chenghan, C., and Han, Q., (2019). A Mathematical Modeling of the Reverse Osmosis Concentration Process of a Glucose Solution. *Processes*, 7, 271, 2-12. <https://doi.org/10.3390/pr7050271>

Clarkson, M. B. E. (1994). A risk based model of stakeholder theory. Proceedings of the Second Toronto Conference on Stakeholder Theory, Toronto, Centre for Corporate Social Performance & Ethics, University of Toronto.

Clarkson, M.B.E. (1995). A stakeholder framework for analyzing and evaluating corporate social performance. *Academy of Management Review*, 20, 65–91. <http://www.jstor.org/stable/258888>

Clarke, T., Clegg, S., (1998). Changing Paradigms: The Transformation of Management Knowledge for the 21st Century. Harper Collins, London.

Cimen, A., Kilicel, F., and Arslan, G. (2014). Removal of chromium ions from waste waters using reverse osmosis AG and SWHR membranes, *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 88, 845–850. <https://doi.org/10.1134/S0036024414050045>

Coplin, W. D., McMaster, D. J. and O’Learly, M. K. (1998). Creating policy profile. In Public Involvement Techniques: A Reader of Ten Years Experiences at the Institute for Water Resources, prepared by Creighton, J. L., Delli Priscoli, J. & Dunning, C. M. IWR-USACE, Alexandria, Virginia, IWR Research Report 82\_R-1, <http://www.iwr.usace.army.mil/inside/products/pub/pubsearchAll.cfm?alpha¼P> (07/10/2021).

Corporación Andina de Fomento. (2017). Agua y Saneamiento en el Estado Plurinacional de Bolivia. Disponible online: <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1081?show=full> (07/10/2021).

Crittenden, J.C., Rhodes Trussell, R., Hand, D.W., Howe, K.J., Tchobanoglou, G. (2012). MWH’s Water Treatment: Principles and Design, 3rd ed.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA.

Cséfalvay, E., Pauer, V., and Mizsey, P. (2009). Recovery of copper from process waters by nanofiltration and reverse osmosis. *Desalination*, 240, 132-142. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.11.070>

Da Rocha, M.P., Dourado, P.L.R., Cardoso, C.A.L., Candido, L.S., Pereira, J.G., De Oliveira, K.M.P., and Grisolia, A.B. (2018). Tools for monitoring aquatic environments to identify anthropic effects. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 61. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6440-2>

da Silva, E. B., Mussoline, W.A., Wilkie, A. C., and Ma, L. Q. (2019). Anaerobic digestion to reduce biomass and remove arsenic from As-hyperaccumulator *Pteris vittate*. *Environmental Pollution*, 250, 23-28. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.117>

Dahmen, E. R., Hall, M. J., and International Institute for Land Reclamation and Improvement (1990). Screening of hydrological data: tests for stationarity and relative

consistency. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, Netherlands. Disponible online: <https://trove.nla.gov.au/version/43003247> (18/02/20).

Danisa, U., and Aydiner, C. (2009). Investigation of process performance and fouling mechanisms in micellar-enhanced ultrafiltration of nickel-contaminated waters. *Journal of Hazardous Materials*, 162, 577-587. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.098>

Dehbandi, R., Abbasnejad, A., Karimi, Z., Herath, I., and Bundschuh, J. (2019). Hydrogeochemical controls on arsenic mobility in an arid inland basin, Southeast of Iran: The role of alkaline conditions and salt water intrusion. *Environmental Pollution*, 249, 910-922. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.082>

Domínguez Candela, I. (2018). Economía circular aplicada a aguas residuales del curtido mediante ósmosis directa. <http://hdl.handle.net/10251/107181>

Dourojeanni, A., Jouravlev, A. y Chávez, G. (2002). Gestión del Agua a Nivel de Cuencas: Teoría y Práctica. Chile: Naciones Unidas. Disponible online: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/6407> (24/11/2020).

Duruibe, Joseph Onyinye, Jude N. Egwurugwu, and M.O.C. Ogwuegbu. (2007). Heavy Metal Pollution and Human Biotoxic Effects. *International Journal of Physical Sciences*, 2, 112-118. Disponible online: <http://www.academicjournals.org/IJPS> (15/02/20).

Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento. EPSAS. Capacidad de Fuentes. (2013). Disponible online: <https://www.epsas.com.bo/web/> (08/04/2021).

Ennigrou, D.J., Gzara, L., Ben Romdhane, M.R., and Dhahbi, M. (2009). Cadmium removal from aqueous solutions by polyelectrolyte enhanced ultrafiltration. *Desalination*, 246, 363-369. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.04.053>

EPA. (2006). Arsenic. Office of Ground Water and Drinking Water. Disponible online: <http://www.epa.gov/OGWDW/arsenic/basicinformation.html> (15/09/21).

EPA. (2009). Regulaciones Nacionales Primarias de Agua Potable. Disponible online: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-06/documents/npwdr\\_complete\\_table.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-06/documents/npwdr_complete_table.pdf) (15/08/21).

Escalera Vásquez, R., and Ormachea Muñoz, M. (2017). Hidroquímica de la presencia natural de arsénico en aguas subterráneas de áreas suburbanas de Cochabamba-Bolivia y evaluación de la viabilidad técnica de procesos de remoción. *Investigación & Desarrollo*, 1(17), 27-41. Disponible online: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S251844312017000100004&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S251844312017000100004&lng=es&tlng=es) (10/02/21)

Ferella, F., Prisciandaro, M., Michelis, I.D., and Veglio, F. (2007). Removal of heavy metals by surfactant-enhanced ultrafiltration from wastewaters. *Desalination*, 207, 125-133. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.07.007>

Feria-Díaz, J.J., Correa-Mahecha, F., López-Méndez, M.C., Rodríguez-Miranda, J.P., and Barrera-Rojas, J., (2021). Recent Desalination Technologies by Hybridization and Integration with Reverse Osmosis: A Review. *Water*. 13, 10, e1369. <https://doi.org/10.3390/w13101369>

Fernández-López, C., Faz Cano, Á., Arocena, J.M., and Alcolea, A. (2014). Elemental and mineral composition of salts from selected natural and mine-affected areas in the Poopó and Uru-Uru lakes (Bolivia). *Journal of Great Lakes Research*, 40 (4), 841-850. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.08.003>

Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC. Diagnóstico del agua en las Américas; The InterAmerican Network of Academies of Sciences: Irvine, CA, USA, 2012; ISBN 978-607-9217-04-4. Disponible online: <https://www.ianas.org/water/book/mexico.pdf> (20/2 /2021).

French, M., Alem, N., Edwards, S. J., Blanco Coariti, E., Cauthin, H., Hudson-Edwards, K. A., Luyckx K., Quintanilla, J., & Sánchez Miranda, O. (2017). Community exposure and vulnerability to water quality and availability: a case study in the mining-affected Pazña Municipality, Lake Poopó Basin, Bolivian Altiplano. *Environmental management*, 60(4), 555-573. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0893-5>

Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., and Melin, T. (2007). State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination*, 216. 1-76. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.12.009>

Fu, F.L., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 92, 407-418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>

Fu, H.-Z.; Wang, M.-H.; Ho, Y.-S. (2012). Mapping of drinking water research: A bibliometric analysis of research output during 1992-2011. *Science of The Total Environment*, 443, 757-765. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.061>

Gaikwad, R.W., and Gupta, D.V. (2008). Review on Removal of Heavy Metals from Acid Mine Drainage. *Applied Ecology and Environmental Research*, 6, 81-98. [https://doi.org/10.15666/aeer/0603\\_081098](https://doi.org/10.15666/aeer/0603_081098)

García, C., (2002). Aplicación de ósmosis inversa y nanofiltración en acondicionamiento de agua para calderas. Tesis Doctoral Universidad de Oviedo, España. Disponible online: <https://www.tesisenred.net/handle/10803/11146> (20/02/2021).

García-Fayos, B., Arnal, J.M., Gimenez, A., Alvarez, S., Sancho, M. (2016). Valorization of reverse osmosis membrane modules retired from a desalination plant. Installation design. In Proceedings of the XX International Congress on Project Management and Engineering,

Cartagena Spain, 13 – 15 July Disponible online: <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/867> (20/02/2021).

Garrido, A.E., Strosnider, W.H.J., Wilson, R.T., Condori, J., and Nairn, R.W. (2017). Metalcontaminated potato crops and potential human health risk in Bolivian mining highlands. *Environmental Geochemistry and Health*, 39 (3), 681-700. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9943-4>

Gautam, P.K., Gautam, R.K., Banerjee, S., Chattopadhyaya, M.C. and Pandey, J. D. (2016). Chapter 4: Heavy metals in the environment: Fate, transport, toxicity and remediation technologies. En Deepak Pathania (Eds). *Heavy Metals: Sources, Toxicity and Remediation Techniques* (pp 1- 25). India: Nova. Disponible online: [https://www.researchgate.net/publication/314465070\\_Heavy\\_metals\\_in\\_the\\_environment\\_Fate\\_transport\\_toxicity\\_and\\_remediation\\_technologies](https://www.researchgate.net/publication/314465070_Heavy_metals_in_the_environment_Fate_transport_toxicity_and_remediation_technologies) (20/02/19).

Ghosal, P.S., Kattil, K.V., Yadav, M.K., and Gupta, A.K. (2018). Adsorptive removal of arsenic by novel iron/olivine composite: insights into preparation and adsorption process by response surface methodology and artificial neural network. *Journal of Environmental Management*, 209, 176-187. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.040>

Google Earth Engine. Disponible online: <https://earthengine.google.com/> (15/03/22).

Greenlee, L.F., Lawler, D.F., Freeman, B.D., Marrot, B., and Moulin, P. (2009). Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. *Water Research*, 43(9), 2317-2348. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.010>

Grimble, R. & Wellard, K. (1997). Stakeholder methodologies in natural resource management: a review of principles, context, experiences and opportunities. *Agricultural Systems*, 55(2), 173–193. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(97\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(97)00006-1)

Gu, B., Adjiman, C.S., and Xu, X.Y., (2021). Correlations for Concentration Polarization and Pressure Drop in Spacer-Filled RO Membrane Modules Based on CFD *Simulations. Membranes*, 11, 5, e338. <https://doi.org/10.3390/membranes11050338>

Ha, P.T.T., Kokutse, N., Duchesne, S., Villeneuve, J.-P., Bélanger, A., Hien, H.N., Tombou, B., and Bach, D.N. (2016). Assessing and selecting interventions for river water quality improvement within the context of population growth and urbanization: A case study of the Cau River basin in Vietnam. *Environment, Development and Sustainability*, 19, 1701–1729. <https://doi.org/10.1007/s10668-016-9822-7>

Haider, L.J., Boonstra, W.J., Peterson, G.D. and Schlüter, M. (2018). Traps and Sustainable Development in Rural Areas: A Review. *World Development*, 101, 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.05.038>

Hare V., Chowdhary P., Kumar B., Sharma D.C., Baghel V.S. (2019). Arsenic Toxicity and Its Remediation Strategies for Fighting the Environmental Threat. In: Bharagava R.,

Chowdhary P. (eds). *Emerging and Eco-Friendly Approaches for Waste Management*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-8669-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-10-8669-4_8)

Hidalgo, A.M., Gómez, M., Murcia, M.D., Serrano, J., and Otón, J. (2013). Caracterización de la membrana NF-97 mediante disoluciones salinas. Aplicación del modelo de Spiegler-Kedem-Kachalsky. *Afinidad*. LXX. 70, 48-53, 561. Disponible online: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/268539> (24/10/2021).

Hu, Y., and Boyer, T.H. (2018). Removal of multiple drinking water contaminants by combined ion exchange resin in a completely mixed flow reactor. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 67 (7), 659-672. <https://doi.org/10.2166/aqua.2018.101>

Huang, R.Y., and Lin, V.J. (1968). Separation of liquid mixtures through the use of polymeric membranes. I. Permeability of binary organic liquid mixtures through polyethylene. *Journal Applied Polymer Science*. 12 (12), 2615-2631. Disponible online: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/app.1968.070121204> (15/05/21).

Huang, J.H., Zeng, G.M., Zhou, C.F., Li, X., Shi, L.J., and He, S.B. (2010). Adsorption of surfactant micelles and Cd<sup>+2</sup>/Zn<sup>+2</sup> in micellar-enhanced ultrafiltration. *Journal of Hazardous Materials*, 183, 287-293. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.022>

Hudson-Edwards, K.A., Macklin, M. G., Miller, J. R., and Lechler, P. J. (2001). Sources, distribution and storage of heavy metals in the Río Pilcomayo, Bolivia. *Journal of Geochemical Exploration*, 72(3), 229-250. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(01\)00164-9](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(01)00164-9)

Hudson-Edwards, K. A., Miller, J. R., Presto, D., Lechler, P. J., Macklin, M. G., Miners, J. S., & Turner, J. N. (2003). Effects of heavy metal pollution in the Pilcomayo River system, Bolivia, on resident human populations. In *Journal de Physique IV (Proceedings)*, 107, 637-640. EDP sciences. <https://doi.org/10.1051/jp4:20030384>

IARC. 2004. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans - Some Drinking-Water Disinfectants and Contaminants, Including Arsenic. vol. 84. Disponible online: <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Some-Drinking-Water-Disinfectants-And-Contaminants-Including-Arsenic-2004> (15/05/21).

Iltis, A. (1988). Datos sobre las lagunas altura de la región de la Paz (Bolivie). La Paz: ORSTOM, (14), 50 p. multigr. (Informe - ORSTOM; 14). Disponible online: [http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/doc34-05/26148.pdf](http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/doc34-05/26148.pdf) (15/02/21).

Instituto Nacional de Estadística. (2020). Estimaciones y Proyecciones de Población de Bolivia, Departamentos y Municipios. Revisión 2020. Disponible online: <https://www.ine.gob.bo/index.php/publicaciones/estimaciones-y-proyecciones-de-poblacion-de-bolivia-departamentos-y-municipios-revision-2020/> (15/02/21).

Institute of Environmental Conservation and Research. (2000). Position Paper Against Mining in Rapu-Rapu, Published by INECAR, Ateneo de Naga University, Philippines. Disponible online: [www.adnu.edu.ph/Institutes/Inecar/pospaper1.asp](http://www.adnu.edu.ph/Institutes/Inecar/pospaper1.asp) (15/02/20).

International Organization for Standardization. ISO 5667-1. (2006). Water Quality—Sampling—Part 1: Guidance on the Design of Sampling Programmes and Sampling Techniques; ISO: Geneva, Switzerland.

International Organization for Standardization. ISO 5667-4. (2016). Water Quality—Sampling—Part 4: Guidance on Sampling from Lakes, Natural and Man-Made; ISO: Geneva, Switzerland.

Ipek, U. (2005). Removal of Ni (II) and Zn (II) from an aqueous solution by reverse osmosis. *Desalination*, 174, 161-169. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.09.009>

Jain, C.K., and Ali, I. (2000). Arsenic: occurrence, toxicity and speciation techniques. *Water Research*, 34(17), 4304-4312. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00182-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00182-2)

Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B.B., and Beeregowda, K.N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7 (2), 60-72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>

Jusoh, A., Shiung, L.S., Ali, N., and Noor, M.J.M.M. (2007). A simulation study of the removal efficiency of granular activated carbon on cadmium and lead. *Desalination*, 206, 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.04.048>

Kang, K.C., Kim, S.S., Choi, J.W., and Kwon, S.H. (2008). Sorption of Cu<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> onto acid- and base-pretreated granular activated carbon and activated carbon fiber samples. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 14, 131-135. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2007.08.007>

Karakurt, S. (2019). Removal of carcinogenic arsenic from drinking water by the application of ion exchange resins. *Oncogen*, 2 (1), 1-8. <https://doi.org/10.35702/onc.10005>

Keensen, (2020). <http://www.keensen.com/Products/ultralowpressur.html>

Kefeni, K.K., Msagati, T.A.M., and Mamba, B.B. (2017). Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. *Journal of Cleaner Production*, 151, 475-493. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.082>

Kemper, K., Minnatullah, K., (2005). Towards a More Effective Operational Response. Arsenic Contamination of Groundwater in South and East Asian Countries. WSP Report No. 31303. In: Policy Report – The World Bank, vol. I. Environment and Social Unit – South Asia Region, Water and Sanitation Program, Washington, DC, USA.

Khedr, M.G. (2008). Membrane methods in tailoring simpler, more efficient, and cost-effective wastewater treatment alternatives. *Desalination*, 222(1–3), 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.02.066>

Kim, S., Chu, K.H., Al-Hamadani, Y.A.J., Park, C.M., Jang, M., Kim, D.-H., Yu, M., Heo, J., and Y. Yoon. (2018). Removal of Contaminants of Emerging Concern by Membranes in Water and Wastewater: A Review. *Chemical Engineering Journal*, 335, 896–914. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.044>

Kobyas, M. (2004). Removal of Cr (VI) from aqueous solutions by adsorption onto hazelnut shell activated carbon: kinetic and equilibrium studies. *Bioresource Technology*, 91, 317–321. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00068-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00068-2)

Korus, I., & Loska, K. (2009). Removal of Cr (III) and Cr (VI) ions from aqueous solutions by means of polyelectrolyte-enhanced ultrafiltration. *Desalination*, 247, 390–395. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.12.036>

Kurniawan, T.A., Chan, G.Y.S., Lo, W.H., and Babel, S. (2006). Physico–chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals, *Chemical Engineering Journal*, 118, 83–98. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.01.015>

Laatikainen, M., Sillanpaa, M., and Sainio, T. (2016). Comparison of ion exchange process configurations for arsenic removal from natural waters. *Desalination and Water Treatment*, 57 (29), 13770–13781. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1061456>

Landaburu-Aguirre, J., García, V., Pongrácz, E., and Keiski, R.L. (2009). The removal of zinc from synthetic wastewaters by micellar-enhanced ultrafiltration: statistical design of experiments. *Desalination*, 240(1–3), 262–269. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.11.077>

Landaburu-Aguirre, J., Pongrácz, E., Perämäk, P., and Keiski, R.L. (2010). Micellar enhanced ultrafiltration for the removal of cadmium and zinc: use of response surfacemethodology to improve understanding of process performance and optimisation. *Journal of Hazardous Materials*, 180, 524–534. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.066>

Langergraber, G., and Muellegger, E. (2005). Ecological Sanitation—A way to solve global sanitation problems?. *Environment International*, 31, 433–444. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.08.006>

Lehmann, B. (1978). Memoria explicativa del mapa geológico de Milluni, Cordillera Real (Bolivia). *Revista de Geociencias, Universidad Mayor de San Andrés*, 2(1): 187–257.

Litter, M.I., Morgada, M.E., Bundschuh, J. (2010). Possible treatments for arsenic removal in Latin American waters for human consumption, *Environmental Pollution*, 158(5), 1105–1118. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.01.028>

Liu, M., Lü, Z., Chen, Z., Yu, S., and Gao, C., (2011). Comparison of reverse osmosis and nanofiltration membranes in the treatment of biologically treated textile effluent for water reuse. *Desalination*, 281. 372-378. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.023>

Liu, G., Yu, S., Yang, H., Hu, J., Zhang, Y., He, B., Li, L., and Liu, Z. (2016). Molecular mechanisms of ultrafiltration membrane fouling in polymer-flooding wastewater treatment: role of ions in polymeric fouling. *Environmental Science Technology*, 50(3), 1393-1402. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04098>

Lo-Iacono-Ferreira, V., Balderrama-Durán, I.M. & Torregrosa-López J.I. (2017). Experiences in the development and management of a technological master online: Master in Water Technology for Bolivia. In Proceedings of XXI International Congress on Project Management and Engineering, Cádiz, Spain, 12-14 July. Disponible online: <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/475> (12/04/22).

Lora, J., Fernández, M.S., and Soriano, E. (2002). Desalación de aguas (licenciado en Ciencias Ambientales). Valencia: Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia.

Lora, J., López, M., Cardona, S., Fombuena, V., and Carbonell, A. (2020). Análisis del consumo Energético como factor clave en proyectos de desalación de agua de mar. 24th International Congress on Project Management and Engineering. 991-1003, e04-004. <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/2486> (12/04/22).

Loucks, D.P., van Beek, E. (2017). Water Resources Planning and Management: An Overview. In Water Resource Systems Planning and Management; Springer: Cham, Switzerland.

Lupo Stanghellini, P. S. and Collentine, D. (2008). Stakeholder discourse and water management - Implementation of the participatory model CATCH in a Northern Italian alpine sub-catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*. 12. 317–331. <https://doi.org/10.5194/hess-12-317-2008>

Lupo, P. (2010). Stakeholder involvement in water management: the role of the stakeholder analysis within participatory processes. *Water Policy*. 12, 675-694. <https://doi.org/10.2166/wp.2010.004>

Malamis, S., Katsou, E., Takopoulos, K., Demetriou, P., and Loizidou, M. (2012). Assessment of metal removal, biomass activity and RO concentrate treatment in an MBR-RO system. *Journal of Hazardous Materials*, 209 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.10.085>

Matlock, M.M., Henke, K.R., and Atwood, D.A., (2002). Effectiveness of commercial reagents for heavy metal removal from water with new insights for future chelate designs. *Journal of Hazardous Materials*, 92(2), 129-142. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00389-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00389-2)

Mayers, J. (2005). Análisis del poder de las partes interesadas. International Institute for Environment and Development. Disponible en: [https://policy-powertools.org/Tools/Understanding/docs/stakeholder\\_power\\_tool\\_spanish.pdf](https://policy-powertools.org/Tools/Understanding/docs/stakeholder_power_tool_spanish.pdf) (05/12/20)

Mejía, A., Uzcátegui, G., & Valverde, O. (2017). Agua y saneamiento en el Estado Plurinacional de Bolivia. Disponible online: [https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1081/Agua\\_y\\_saneamiento\\_en\\_el\\_Estado\\_Plurinacional\\_de\\_Bolivia.pdf](https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1081/Agua_y_saneamiento_en_el_Estado_Plurinacional_de_Bolivia.pdf) (22/02/2022).

Meschke, K., Hofmann, R., Haseneder, R., and Repke, J.-U. (2019). Membrane treatment of leached mining waste – A potential process chain for the separation of the strategic elements germanium and rhenium. *Chemical Engineering Journal*, 380, 122476. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122476>

Miller, J.R., and Villarroel, L.F. (2011). Bolivia: Mining, River Contamination, and Human Health. *Encyclopedia of Environmental Health*. 421-441. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52272-6.00375-5>

Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (1992). Ley 1333 de Medio Ambiente, Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. En D. G. Climáticos, Normativa de Gestión Ambiental, Bolivia.

Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA). (2016). Balance Hídrico Superficial de Bolivia. Disponible online: [https://www.bivica.org/files/balance-hidrico\\_Bolivia.pdf](https://www.bivica.org/files/balance-hidrico_Bolivia.pdf) (22/02/2022).

Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA). (2019). Plan Sectorial de Desarrollo Integral del Ministerio de Medio Ambiente y Agua. Disponible online: [https://www.mmaya.gob.bo/wpcontent/uploads/2019/06/PLAN\\_SECTORIAL\\_DE\\_DESARROLLO\\_INTEGRAL\\_DEL\\_MMAyA-PSDI\\_20-04-2017-1.pdf](https://www.mmaya.gob.bo/wpcontent/uploads/2019/06/PLAN_SECTORIAL_DE_DESARROLLO_INTEGRAL_DEL_MMAyA-PSDI_20-04-2017-1.pdf) (20/01/2021).

Ministerio de Sanidad. (2020). Calidad del agua de consumo en España 2019 – Informe Técnico. Disponible online: [https://www.sanidad.gob.es/profesionales/saludPublica/docs/INFORME\\_AC\\_2019.pdf](https://www.sanidad.gob.es/profesionales/saludPublica/docs/INFORME_AC_2019.pdf) (20/01/2021).

Miranda, A., Arancibia, H., & Quispe, R. (2010). Reconocimiento del patrimonio geológico y minero de la región de Milluni en La Paz Bolivia. pp. 74-76. Disponible online: 1070 <https://www.slideshare.net/neocien/patrimonio-geolgico-y-minero-de-la-regin-de-milluni-enla-paz-bolivia> (18/02/20).

Mirbagheri, S.A., and Hosseini, S.N., (2005). Pilot plant investigation on petrochemical wastewater treatment for the removal of copper and chromium with the objective of reuse. *Desalination*, 171, 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.03.022>

- Mitchell, R. K., Agle, B. R. & Wood, D. J. (1997). Toward a theory of stakeholder identification and salience: the principle of who and what really counts. *Academy of Management Review*, 22(4), 853–886. <https://doi.org/10.2307/259247>
- Mohsen-Nia, M., Montazeri, P., and Modarress, H. (2007). Removal of Cu<sup>+2</sup> and Ni<sup>+2</sup> from wastewater with a chelating agent and reverse osmosis processes. *Desalination*, 217, 276-281. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.01.043>
- Molina Carpio J., Diaz E., Condori E. (2004). Balance hídrico microregional de Bolivia, primeros resultados. Congreso de Ingeniería Civil. La Paz (Bolivia).
- Molinari, R., Poerio, T., and Argurio, P. (2008). Selective separation of copper (II) and nickel (II) from aqueous media using the complexation ultrafiltration process. *Chemosphere*, 70, 341-348. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.07.041>
- Mulder, M. (1996). Basic Principles of Membrane Technology. Springer Science & Business Media, pp. 281–304. pp 246-248. Disponible online: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaupves-ebooks/reader.action?docID=3102158&ppg=1> (15/10/2021).
- Mulyati, Sri & Syawaliah, Syawaliah. (2018). Removal of Cd<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> heavy metals in water by using adsorption-ultrafiltration hybrid process. *Jurnal Teknologi*. 80. <https://doi.org/10.11113/jt.v80.12738>
- Muñoz, M.A., Faz, A., Acosta, J.A., Martínez-Martínez, S., and Arocena, J.M. (2013). Metal content and environmental risk assessment around high-altitude mine sites. *Environmental Earth Sciences*, 69 (1), 141-149. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1942-2>
- Muthukrishnan, M., and Guha, B.K. (2008). Effect of pH on rejection of hexavalent chromium by nanofiltration. *Desalination*, 219, 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.04.054>
- Najib, N., Christodoulatos, C. (2019). Removal of arsenic using functionalized cellulose nanofibrils from aqueous solutions. *Journal of Hazardous Materials*, 367, 256-266. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.12.067>
- Nasir, S., Ibrahim, E., and Arief, A.T. (2016). Design and experimental testing of small-scale acid mine drainage treatment plant. *Journal of Materials and Environmental Science*, 7, 2912-2918. Disponible online: [https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol7/vol7\\_N8/303-JMES-1791-Nasir.pdf](https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol7/vol7_N8/303-JMES-1791-Nasir.pdf) (18/02/2020).
- Norma Boliviana NB 512: Agua Potable—Requisitos; IBNORCA: La Paz, Bolivia, 2004.
- ODA. (1995a). Guidance Note on How to Do Stakeholder Analysis of Aid Projects and Programmes. <https://beamexchange.org/resources/548/> (20/11/2021).

ODA. (1995b). Note on Enhancing Stakeholder Participation in Aid Activities. <https://www.participatorymethods.org/resource/note-enhancing-stakeholder-participation-aid-activities> (07/11/2021).

OMS. (2015). Proporción de la Población que Usa Instalaciones de Saneamiento Mejoradas. Disponible online: <https://www.esglobal.org/bolivia-agua-una-relacion-complicada/> (07/11/2021).

OMS. (2017a). Agua y Saneamiento. Joint Monitoring Programme, JMP. Disponible online: <https://www.paho.org/es/temas/agua-saneamiento> (07/11/ 2021).

OMS. (2017b). Guidelines for Drinking Water Quality quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum; WHO: Geneva, Switzerland. Disponible online: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950> (10/11/2020).

Organización de las Naciones Unidas. (2010). Resolución 64/292. El derecho humano al agua y el saneamiento. Disponible online: <https://www.refworld.org/cgi-bin/texis/vtx/rwmain/opendocpdf.pdf?reldoc=y&docid=4cc9270b2> (20/03/2022).

Oporto, C., Smolders, E., and Vandecasteele, C. (2012). Identifying the cause of soil cadmium contamination with Monte Carlo mass balance modelling: A case study from Potosi, Bolivia. *Environmental Technology*, 33 (5), 555-561. <https://doi.org/10.1080/09593330.2011.586054>

Ortega, E., Ramos, B.M., Ezquerro, A., and Otero, I. (2016). Sistemas de información Geográfica. Dextra Editorial. Disponible online: <https://www.perlego.com/book/2051352/sistemas-de-informacin-geografica-pdf> (21/10/2021).

Ostroski, I.C., Barros, M.A.S.D., Silva, E.A., Dantas, J.H., Arroyo, P.A., and Lima, O.C.M. (2009). A comparative study for the ion exchange of Fe (III) and Zn (II) on zeolite NaY. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2-3), 1404-1412. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.111>

Ozaki, H., Sharma, K., and Saktaywin, W. (2002). Performance of an ultra-low-pressure reverse osmosis membrane (ULPROM) for separating heavy metal: effects of interference parameters. *Desalination*, 144(1-3), 287-294, ISSN 0011-9164. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00329-6](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00329-6)

Özverdi, A., and Erdem, M. (2006). Cu<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> adsorption from aqueous solutions by pyrite and synthetic iron sulphide. *Journal of Hazardous Materials*, 137, 626 - 632. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.051>

Pat-Espadas, M., Loredó, R., Amabilis-Sosa, L.E., Gómez, G. and Vidal, G. (2018). Review of Constructed Wetlands for Acid Mine Drainage Treatment. *Water*, 10(11), 1685-1700. <https://doi.org/10.3390/w10111685>

Pavilonis, B., Grassman, J., Johnson, G., Diaz, Y., and Caravanos, J. (2017). Characterization and risk of exposure to elements from artisanal gold mining operations in the Bolivian Andes. *Environmental Research*, 154, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.12.010>

Perreault, T. (2013). Dispossession by accumulation? Mining, water and the nature of enclosure on the Bolivian Altiplano. *Antipode*, 45(5), 1050-1069. <https://doi.org/10.1111/anti.12005>

PHICAB, & Roche, M. A. (1992). Balance hídrico superficial de Bolivia. PHICAB. Bolivia. Disponible online: [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers10-12/010020120.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers10-12/010020120.pdf) (15/02/2022).

Plattes, M., Bertrand, A., Schmitt, B., Sinner, J., Verstraeten, F., and Welfring, J. (2007). Removal of tungsten oxyanions from industrial wastewater by precipitation, coagulation and flocculation processes. *Journal of Hazardous Materials*, 148, 613-615. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.03.016>

Pereira, M.A. y Marques, R.C. (2021). The ‘Sustainable Public Health Index’: What if public health and sustainable development are compatible?. *World Development*, 149, 105708. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105708>

Podgorski, J., and Berg, M. (2020). Global threat of arsenic in groundwater. *Science*, 368 (6493), 845-850. <https://doi.org/10.1126/science.aba1510>

Polya, D. A., & Middleton, D. R. (2017). Arsenic in drinking water: Sources & human exposure. Best practice guide on the control of arsenic in drinking water, 1-24.

Pontié, M., Dach, H., Leparc, J., Hafsi, M., and Lhassani, A. (2008). Novel approach combining physico-chemical characterizations and mass transfer modelling of nanofiltration and low pressure reverse osmosis membranes for brackish water desalination intensification. *Desalination*, 221, 174-191. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.075>.

Raffailac, E. (2002). Estudio de la contaminación de la Cuenca de Milluni, Mémoire de stage en Aguas del Illimani, (Inédito), 96 p., La Paz.

Raja Rajeshwari, T., and Namburu, S. (2014). Impact of heavy metals on environmental pollution, National Seminar on Impact of Toxic Metals, Minerals and Solvents leading to environmental pollution. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 3, 175-181. Disponible online: <https://www.jchps.com/specialissues/Special%20issue3/42%20jchps%20si3%20addn%20ai%20laja%20175-181.pdf> (20/02/21).

Ramos Ramos, O.E., Cáceres, L.F., Ormachea Muñoz, M.R., Bhattacharya, P., Quino, I., Quintanilla, J., Sracek, O., Thunvik, R., Bundschunh, J., and García M.E. (2012). Sources and behavior of arsenic and trace elements in groundwater and surface water in the Poopó

Lake Basin, Bolivian Altiplano. *Environmental Earth Sciences*, 66, 793–807. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1288-1>

Reed, M., Graves, A., Dandy, N., Póstumo, H., Hubacek, K., Morris, J., Prella, C., Quienn, C. & Stringer L. (2009). Who's in and why? A typology of stakeholder analysis methods for natural resource management. *Journal of Environmental Management*. 90, 1933-1949. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.01.001>

Ríos, C.G. (1985). Estudio de la Contaminación Ambiental por las Descargas Mineras de COMSUR en la Represa de Milluni. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz.

Rivas R. F. y Maldonado Q. X. (2011). Acuerdos de monitoreo de calidad del agua en Estados Unidos de Norte América: Estado del Arte. *Visión Gerencial*, 1,173-187. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=465545890013> (05/01/2022).

Rivero, N.P.P., Morais, D.C., and Pereira, L.D.S. (2020). Assessment of actions to tackle the shortages of water in La Paz, Bolivia. *Water Policy*, 22, 177–192. <https://doi.org/10.2166/wp.2020.087>

Rojas, J. C., & Vandecasteele, C. (2007). Influence of mining activities in the North of Potosi, Bolivia on the water quality of the Chayanta River, and its consequences. *Environmental monitoring and assessment*, 132(1), 321-330. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9536-7>

Ruiz, S. G., Zerrouk, M. H., y Alonso, J. M. Q. (2016). Ensuciamiento y limpieza de membranas empleadas en la desalación de aguas. *Tecnoaqua*, (17), 104-117. Obtenido de: <https://www.tecnoaqua.es/media/uploads/noticias/documentos/articulo-tecnico-ensuciamiento-limpieza-membranas-empleadas-desalacion-aguas-tecnoaqua-es.pdf> (20/10/2021).

Saavedra, Carlos & Riego, Viceministerio. (2015). Plan Nacional de Cuencas de Bolivia. Disponible online: [https://www.researchgate.net/publication/281244646\\_Plan\\_Nacional\\_de\\_Cuencas\\_de\\_Bolivia/references](https://www.researchgate.net/publication/281244646_Plan_Nacional_de_Cuencas_de_Bolivia/references) (12/12/2021).

Saavedra, C. (2018). Cuencas sostenibles: Fundamentos y recomendaciones. Proyecto gestión integral del agua de la Coperación suiza en Bolivia. HELVETAS Swiss Intercooperation. Disponible online: [https://www.academia.edu/37886322/Cuencas\\_sostenibles\\_Fundamentos\\_y\\_recomendaciones](https://www.academia.edu/37886322/Cuencas_sostenibles_Fundamentos_y_recomendaciones) (12/11/2021).

Sablani, S.S., Goosen, M.F.A., Al-Belushi, R., and Wilf, M., (2001). Concentration polarization in ultrafiltration and reverse osmosis: a critical review. *Desalination*, 141, 3, 269-289. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)85005-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)85005-0)

Saha, N., and Rahman, M.S. Multivariate statistical analysis of metal contamination in surface water around Dhaka export processing industrial zone, Bangladesh. *Environmental*

*Nanotechnology Monitoring & Management*. 2018, 10, 206–211.  
<https://doi.org/10.1016/j.enmm.2018.07.007>

Salcedo-Díaz, R. (2006). Aplicación de la interferometría holográfica al estudio de la capa de polarización en ósmosis inversa. Efecto de la convección natural. Tesis Doctoral Universidad de Alicante. España. Disponible online:  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=68704>

Salcedo-Díaz, R., García-Algado, P., García-Rodríguez, M., Fernández-Sempere, J., Ruiz-Bevíá, F. (2014). Visualization and modeling of the polarization layer in crossflow reverse osmosis in a slit-type channel. *Journal of Membrane Science*. 456, 21-30.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2014.01.019>

Salvarredy-Aranguren, M.M., Probst, A., Roulet, M., and Isaure, M.-P. (2008). Contamination of surface waters by mining wastes in the Milluni Valley (Cordillera Real, Bolivia): Mineralogical and hydrological influences. *Applied Geochemistry*, 23, 1299–1324.  
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2007.11.019>

Sarkar, A., and Paul, B. (2016). The global menace of arsenic and its conventional remediation-a critical review. *Chemosphere* 158, 37-49.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.05.043>

SENAMHI. Base de Datos Meteorológico del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología-SISMET. Bolivia. (2021). Disponible online: <http://senamhi.gob.bo/index.php/inicio> (07 /11/ 2021).

Senn, A.C., Hug, S.J., Kaegi, R., Hering, J.G., and Voegelin, A. (2018). Arsenate coprecipitation with Fe (II) oxidation products and retention or release during precipitate aging. *Water Research*. 131, 334-345. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.038>

Shakoor, M.B., Nawaz, R., Hussain, F., Raza, M., Ali, S., Rizwan, M., Oh, S.E., and Ahmad, S. (2017). Human health implications, risk assessment and remediation of As- contaminated water: a critical review. *Science of The Total Environment*, 601, 756-769.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.223>

Sheoran, A.S., and Sheoran, V. (2006). Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. *Minerals Engineering*, 19(2). 105-116.  
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.08.006>

Shukla, A., and Srivastava, S. (2019). Chapter 8 - A Review of Phytoremediation Prospects for Arsenic Contaminated Water and Soil. *Phytomanagement of Polluted Sites*. Elsevier, 243-254. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813912-7.00008-9>

Silver, S., and Phung, L. T., (1996). Bacterial heavy metal resistance: new surprises. *Annual Reviews Microbiology*, 50, 753 - 789. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.50.1.753>

Simate, G.S., and Ndlovu, S. (2014). Acid mine drainage: Challenges and opportunities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2 (3), 1785-1803. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.07.021>

Slaughter, A., Hughes, D., Retief, D., and Mantel, S. (2017). A management-oriented water quality model for data scarce catchments. *Environmental Modelling & Software*, 97, 93–111. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.07.015>

Soares, M., Bertrand, M., Lemos, F., Masson, I. (2005). Removal of lead, cadmium and zinc from industrial effluents using nanofiltration and reverse osmosis membranes, in: XIII International Conference on Heavy Metals in the Environment, Rio de Janeiro, Brazil, 2005.

Soria, F. (2016). Guía metodológica para la elaboración de balances hídricos superficiales (versión resumida). Disponible online: [https://www.researchgate.net/publication/318646276\\_Guia\\_metodologia\\_para\\_la\\_elaboracion\\_de\\_balances\\_hidricos\\_superficiales\\_version\\_resumida/citations](https://www.researchgate.net/publication/318646276_Guia_metodologia_para_la_elaboracion_de_balances_hidricos_superficiales_version_resumida/citations) (25/06/ 2021).

Souiri, M., Gammoudi, I., Ouada, H.B., Mora, L., Jouenne, T., Jaffrezic-Renault, N., Dejous, C., Othmane, A., and Duncan, A.C. (2009). Escherichia coli-functionalized magnetic nanobeads as an ultrasensitive biosensor for heavy metals. *Procedia Chemistry*, 1, 1027-1030. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2009.07.256>

Srivastava, N.K., and Majumder, C.B. (2008). Novel biofiltration methods for the treatment of heavy metals from industrial wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 151(1): 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.101>

Statgraphics. Statgraphics Centurion XVIII. 2018. Disponible online: <https://statgraphics.net/> (07/11/ 2021).

Strosnider, W. H., Llanos López, F. S., & Nairn, R. W. (2011). Acid mine drainage at Cerro Rico de Potosí II: severe degradation of the Upper Rio Pilcomayo watershed. *Environmental Earth Sciences*, 64(4), 911-923. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0899-2>

Sud, D., Mahajan, G., and Kaur, M.P. (2008). Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions - A review. *Bioresource Technology*, 99, 6017-6027. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.11.064>

Sudilovskiy, P.S., Kagramanov, G.G., and Kolesnikov, V.A., (2008). Use of RO and NF for treatment of copper containing wastewaters in combination with flotation. *Desalination*, 221, 192-201. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.076>

Tanninen, J., Mänttari, M., and Nyström, M., (2006). Nanofiltration of concentrated acidic copper sulphate solutions. *Desalination*, 189, 92-96. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.06.017>

Thayer, J.S., and Brinckman, F.E. (1982). The biological methylation of metals and metalloids, *Advances in Organometallic Chemistry*, 20, 313 – 356. [https://doi.org/10.1016/S0065-3055\(08\)60524-9](https://doi.org/10.1016/S0065-3055(08)60524-9)

Tkaczyk, A., Mitrowska, K. and Posyniak, A. (2020). Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review. *Science of The Total Environment*, 717, 137222. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137222>

Trawick, P. (2003). Against the privatization of water: An indigenous model for improving existing laws and successfully governing the commons. *World Development*, 31, 977–996. [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(03\)00049-4](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(03)00049-4)

UDAPE. (2015). Diagnósticos Sectoriales - Minería. Disponible online: [https://www.udape.gob.bo/portales\\_html/diagnosticos/diagnostico2015/TOMO%20%20III%20-%20SECTOR%20MINERIA.pdf](https://www.udape.gob.bo/portales_html/diagnosticos/diagnostico2015/TOMO%20%20III%20-%20SECTOR%20MINERIA.pdf) (07/11/ 2021).

Ugbede, F.O., Aduo, B.C., Ogbonna, O.N., and Ekoh, O.C. (2020). Natural radionuclides, heavy metals and health risk assessment in surface water of Nkalagu river dam with statistical analysis. *Scientific African*, 8, e00439. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00439>

United Nations Environment Programme and World Health Organization, UNEP/WHO. (1996). *Water Quality Monitoring—A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes*; Bartram, J., Balance, R., Eds.; United Nations Environment Programme and the World Health Organization: Geneva, Switzerland; ISBN 0419223207. Disponible online: [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/resourcesquality/waterqualmonitor.pdf](https://www.who.int/water_sanitation_health/resourcesquality/waterqualmonitor.pdf) (18/02/2021).

United Nations. The General Assembly Adopts the 2030 Agenda for Sustainable Development. (2015). Available online: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/> (25/06/ 2021).

Ungureanu, G., Santos, S., Boaventura, R., and Botelho, C. (2015). Arsenic and antimony in water and wastewater: overview of removal techniques with special reference to latest advances in adsorption. *Journal of Environmental. Management*, 151, 326-342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.12.051>

Urquidi-Barrau, F. (2015). Compendio de la situación de los recursos hídricos en las ciudades capitales departamentales de Bolivia. *AGUA URBANA*, 54. Disponible online: [https://www.researchgate.net/profile/JacintaPalerm/publication/273885588\\_Agua\\_Urbana\\_en\\_Mexico/links/550f22e20cf2ac2905ae0099/Agua-Urbana-en-Mexico.pdf#page=55](https://www.researchgate.net/profile/JacintaPalerm/publication/273885588_Agua_Urbana_en_Mexico/links/550f22e20cf2ac2905ae0099/Agua-Urbana-en-Mexico.pdf#page=55) (25/02/2022)

Van Damme, P., CONIAG, y CGIAB. (2002). Disponibilidad, uso y calidad de los recursos hídricos en Bolivia. *Revista Virtual Redesma*, volumen 10. Disponible online:

[https://cebem.org/revistaredesma/vol10/pdf/informacion/recursos\\_hidricos\\_bol.pdf](https://cebem.org/revistaredesma/vol10/pdf/informacion/recursos_hidricos_bol.pdf)  
(25/02/2022)

Vega-Hernandez, S., Weijma, J., and Buisman, C.J. (2019). Immobilization of arsenic as scorodite by a thermoacidophilic mixed culture via as (III)-catalyzed oxidation with activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 368, 221-227. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.01.051>

Vera, L., García, N., Uguña, M.F., Flores, M., González, E., and Brazales, D. (2018). Biosorption technologies and membranes in the removal of heavy metals. *Tecnología y ciencias del agua*, 9, 91-102. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-06-04>

Vijayalakshmi, A., Arockiasamy, D.L., Nagendran, A., and Mohan, D. (2008). Separation of proteins and toxic heavy metal ions from aqueous solution by CA/PC blend ultrafiltration membranes. *Separation and Purification Technology*, 62(1), 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.12.019>

Villena E., Alvizuri, P., Torregrosa J., Lo Iacono, V., Villena, and Lora, J. (2020). Reverse Osmosis Pilot Plant to Removal Heavy Metal Pb, As, Zn, and Mn in Consumption Waters in Bolivia. 24d International Congress on Project Management and Engineering, Alcoi, España. Disponible online: <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/2509> (25/02/2022)

Villena-Martínez, E. M., Alvizuri-Tintaya, P. A., Lora-García, J., Torregrosa-López, J. I., & Lo-Iacono-Ferreira, V. G. (2022). A Comparative Analysis of Statistical Models and Mathematics in Reverse Osmosis Evaluation Processes as a Search Path to Achieve Better Efficiency. *Water*, 14(16), 2485. <https://doi.org/10.3390/w14162485>

VRHR-MMAyA. (2010). Inventario Nacional de Presas 2010. Disponible online: [https://www.bivica.org/files/presas-inventario\\_a.pdf](https://www.bivica.org/files/presas-inventario_a.pdf) (25/02/2022).

VRHR-MMAyA. (2014). Manual para el Inventario y Planificación del Uso de Fuentes de Agua en Microcuencas. Disponible en: <https://www.bivica.org/file/view/id/14> (25/02/2022).

Wan Ngah, S.W., and Hanafiah, M.A.K.M. (2008). Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents: a review. *Bioresource Technol*, 99, 3935-3948. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.011>

Wang, X., Sato, T., Xing, B., and Tao, S. (2005). Health risks of heavy metals to the general public in Tianjin, China via consumption of vegetables and fish. *Science of The Total Environment*, 350, 28-37. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.044>

Wang, L.K., Hung, Y.T., and Shamma, N.K. (2007). Advanced physicochemical treatment technologies. *Handbook of Environmental Engineering*, 5. Humana, New Jersey.

Wang, J., Zhang, T., Li, M., Yang, Y., Lu, P., Ning, P., Wang, Q. (2018). Arsenic removal from water/wastewater using layered double hydroxide derived adsorbents, a critical review. *RSC Advances*, 8 (40), 22694-22709. <https://doi.org/10.1039/c8ra03647k>

Waters, A. (1990). Dissolved air flotation used as primary separation for heavy metal removal. *Filtration & Separation*, 27(2), 70- 73. [https://doi.org/10.1016/0015-1882\(90\)80152-B](https://doi.org/10.1016/0015-1882(90)80152-B)

Yadav, H.L., and Jamal, A. (2016). Treatment of Acid Mine Drainage: A General Review. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 3(11), 116-122. Disponible en: <https://www.iajset.com/upload/2016/november-16/IARJSET%2023.pdf> (20/02/2021).

Yan, H., Gao, Y., Wu, L., Wang, L., Zhang, T., Dai, C., Xu, W., Feng, L., Ma, M., Zhu, Y.G., and He, Z. (2019). Potential use of the *Pteris vittata* arsenic hyperaccumulation- regulation network for phytoremediation. *Journal of Hazardous Materials*. 368, 386-396. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.01.072>

Yang, L., Shun-Chan, F. and Scheffran Y. (2016). Climate change, water management and stakeholder analysis in the Dongjiang River basin in South China. *International Journal of Water Resources Development*. 34:2, 166-191. <https://doi.org/10.1080/07900627.2016.1264294>

Yang, Z., Zhou, Y., Feng, Z., Rui, X., Zhang, T., and Zhang, Z. (2019). A Review on Reverse Osmosis and Nanofiltration Membranes for Water Purification. *Polymers*, 11(8),1252. <https://doi.org/10.3390/polym11081252>

Younger, P. (2004). The mine water pollution threat to water resources and its remediation in practice. University of Glasgow. United Kingdom. Disponible online: [https://www.researchgate.net/publication/228480697\\_The\\_mine\\_water\\_pollution\\_threat\\_to\\_water\\_resources\\_and\\_its\\_remediation\\_in\\_practice](https://www.researchgate.net/publication/228480697_The_mine_water_pollution_threat_to_water_resources_and_its_remediation_in_practice) (18/02/2019).

Yoon, J., Amy, G., Chung, J., Sohn, J., and Yoon, Y. (2009). Removal of toxic ions (chromate, arsenate, and perchlorate) using reverse osmosis, nanofiltration, and ultrafiltration membranes, *Chemosphere*, 77, 228–235. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.07.028>

Zhang, L.N., Wu, Y.J., Qu, X.Y., & Li, Z.S., and Ni, J.R. (2009). Mechanism of combination membrane and electro-winning process on treatment and remediation of Cu<sup>2+</sup> polluted water body. *Journal of Environmental Sciences*, 21, 764-769. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62338-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62338-4)

Zhao, M., Xu, Y., Zhang, C., Rong, H., and Zeng, G. (2016). New trends in removing heavy metals from wastewater. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(15), 6509-6518. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7646-x>

Zhu W.-P., Sun S.-P., Gao J., Fu F.-J., and Chung T.-S. (2014). Dual-layer polybenzimidazole/polyethersulfone (PBI/PES) nanofiltration (NF) hollow fiber membranes for heavy metals removal from wastewater. *Journal of Membrane Science*, 456, 117-127, ISSN 0376-7388. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.01.001>

Zhu, Y., Fan, W., Zhou, T., and Li, X. (2019). Removal of chelated heavy metals from aqueous solution: A review of current methods and mechanisms. *Science of The Total Environment*. 678, 253–266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.416>

Zipper, C., Skousen, J. and Jage, C., (2011). Passive treatment of acid mine drainage. Virginia Tech, Issue Reclamation guidelines for surface mined land, 1 - 14. <https://doi.org/10.1002/9781118749197.ch30>

Anexos

Anexo 1. Especificaciones técnicas de los equipos instalados en la planta de OI

1.1.Membrana



HUNAN KEENSEN TECHNOLOGY CO., LTD.

Model:ULP-2540

<b>Performance</b>	Permeate Flow: 750 gpd (2.84 m3/d)
	Salt Rejection 99.3 % (99.0 % minimum)

<b>Type</b>	Configuration: Spiral Wound
	Membrane Polymer: Composite Polyamide
	Membrane Active Area: 27 ft2

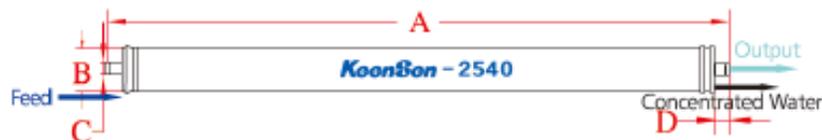
**Application Data**

Maximum Applied Pressure: 600 psig (4.14 MPa)  
 Maximum Chlorine Concentration: < 0.1 mg/L  
 Maximum Operating Temperature: 113° F (45°C)  
 pH Range, Continuous (Cleaning) 3.0 –10.0  
 Maximum Feedwater Turbidity: 1.0 NTU  
 Maximum Feedwater SDI (15 mins): 5.0  
 Maximum Feed Flow: 1.4m<sup>3</sup>/h  
 Minimum Ratio of Concentrate to 8%  
 Maximum Pressure Drop for Each Element: 10 psi

**Test Conditions:**

1500 PPM NaCl solution  
 150 psi (1.03 MPa) Applied Pressure  
 77 °F (25 °C) Operating Temperature  
 8% Permeate Recovery  
 7.5 – 8.0 pH Range  
 (Data taken after 30 minutes of operation)

Notes: The permeate flow of single membrane element may vary with in ±15%.



A= 40.0"(1016MM) B= 2.4"(61MM) C= 0.75" (19.1MM) D= 1.12" (28.5MM)



b) Sensor Gems Sensors, de 1 a 25 l/min.

### Especificaciones

Atributo	Valor
Medio Monitorizado	Líquido
Tipo de Dispositivo	Turbinas
Tasa Mínima de Caudal	1 l/min
Tasa Máxima de Caudal	25 l/min
Tensión de Alimentación	5 → 24 V dc
Rango de Diámetro de la Tubería	3/8 pulg.
Tipo de Conexión	Conector macho NPT 3/8
Presión Máxima	13.7bar
Material	Nylon 12
Temperatura de Funcionamiento Mínima	-20°C
Temperatura de Funcionamiento Máxima	+100°C
Corriente Nominal	8 mA
Serie	FT-110

Fuente: Proveedor- <https://es.rs-online.com/web/p/sensores-e-indicadores-de-flujo/9074031/>

## Anexo 2. Ensayos preliminares

### 2.1. Ensayo de Permeabilidad.

La permeabilidad de la membrana se determinó mediante de los datos de caudales de permeado y concentrado variando la presión del sistema, de acuerdo al siguiente proceso:

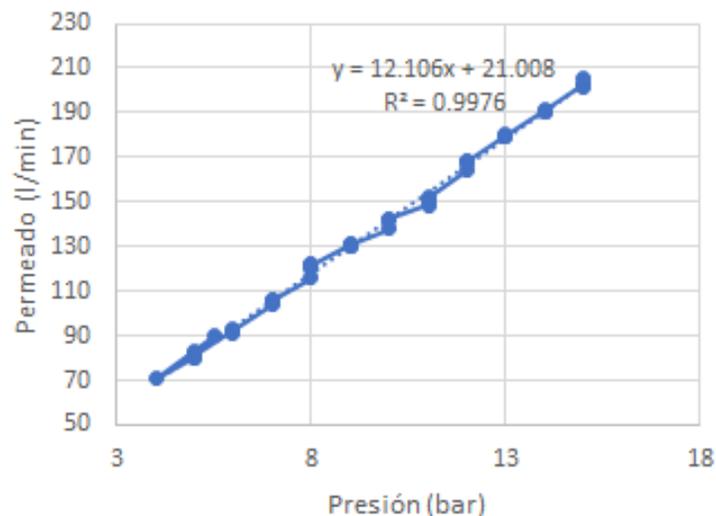
1. Prender la Bomba verificando que el regulador de frecuencia esté en cero y que la presión indicada en el manómetro no esté más de 5 bares.
2. Registrar la variación de temperatura e iniciar con la observación de los caudales de permeado y concentrado que registran los sensores.
3. Comenzar con el aumento de la presión de 1 bar en 1 bar, anotar los caudales, y verificar que la conversión esté en el orden del 15%, para esto se utilizará la siguiente ecuación:

$$Y = P/F$$

Donde:

- Y = Conversión
  - P= caudal permeado
  - F = Caudal de Ingreso  $F = P+C$
  - C= caudal concentrado
4. Para lograr una conversión óptima, se debe utilizar el regulador de frecuencia, la válvula del concentrado y su manómetro para regular las presiones y obtener los caudales requeridos.
  5. La última lectura será la correspondiente a la máxima presión que soporta la membrana y carcasa, en este caso, la membrana tiene una capacidad de 30 bares, sin embargo, la carcasa solo llega a 20, por lo que se trabajó hasta 15 bares de presión.
  6. Finalmente, efectuar el apagado de la planta.

La siguiente figura se muestra la gráfica de permeabilidad de la planta.



## **2.2. Factor de corrección de temperatura.**

Para obtener un factor que permite un ajuste de los datos obtenidos durante la experimentación y evitar una manipulación de la temperatura, se debe calcular el factor de temperatura considerando las mínimas temperaturas que alcanza en la zona de estudio, para esto se sigue el siguiente procedimiento:

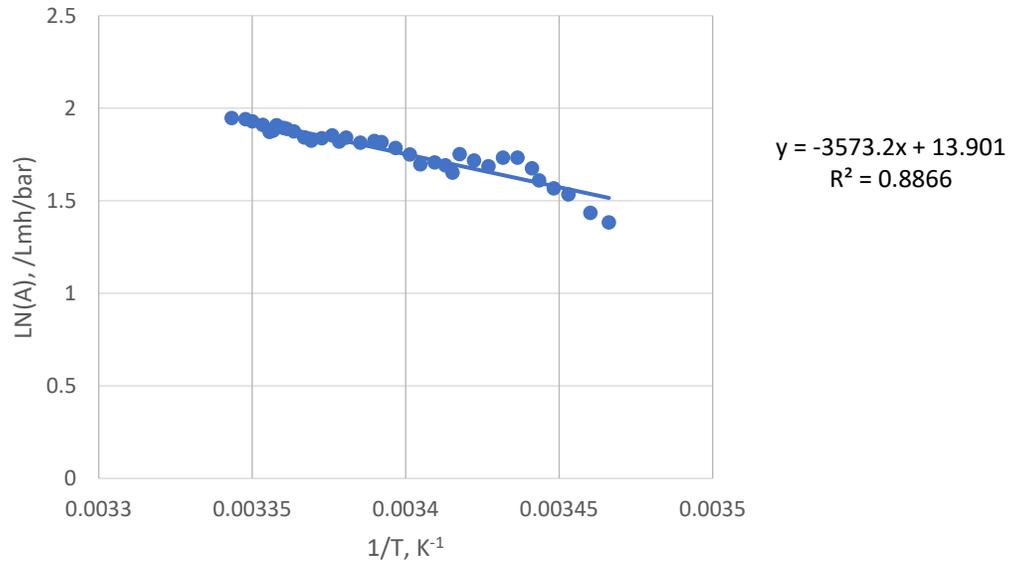
1. Prender la Bomba verificando que el regulador de frecuencia esté en cero y que la presión indicada en el manómetro no esté más de 5 bares.
2. Registrar la temperatura de inicio (ambiente) e iniciar con la observación de la presión (5 bares) y anotar los caudales de permeado y concentrado que registran los sensores.
3. En cada aumento, recomendado cada 0.1 °C de incremento de temperatura, registrar y anotar el permeado y concentrado, siempre verificando que tanto la presión (5 bares) y la conversión (20%) se mantengan constantes.
4. La presión se mantiene constante manipulando el regulador de frecuencia y la válvula ubicada a la salida del concentrado.
5. Para lograr una conversión óptima, se debe utilizar el regulador de frecuencia, la válvula del concentrado y su manómetro para regular las presiones y obtener los caudales requeridos.
6. Luego de registrar, bajar a cero el regulador de frecuencia, bajar la presión con la válvula y proceder a apagar la planta.

En la siguiente tabla se muestra un modelo para el registro de los datos y cálculo del factor de temperatura.

Tabla 2.1. Datos para el factor de temperatura

Permeado P (l/hr)	Concentrado C (l/hr)	Caudal ingreso F (l/hr)	Conversión Y=P/F	Presion Entrada (bar)	Tempe- ratura T (°C)	Tempe- ratura T (K)	1/T, K-1	Flux (L/m <sup>2</sup> *h)	A (L/m <sup>2</sup> hbar)	LN(A)	1/T-1/T0
47,8	194,36	242,16	0,19739016	5	15,5	288,5	0,0034662	19,12	3,98333333	1,38211899	5,3235E-05
50,34	201,56	251,9	0,19984121	5	16	289	0,00346021	20,14	4,195	1,43389334	4,7238E-05
55,65	225,15	280,8	0,19818376	5	16,6	289,6	0,00345304	22,26	4,6375	1,53417543	4,0069E-05
57,46	226,75	284,21	0,20217445	5	17	290	0,00344828	22,98	4,78833333	1,5661824	3,5307E-05
60	237,55	297,55	0,20164678	5	17,4	290,4	0,00344353	24,00	5	1,60943791	3,0557E-05
64,07	241,15	305,22	0,20991416	5	17,6	290,6	0,00344116	25,63	5,33916667	1,67506959	2,8187E-05
67,12	244,15	311,27	0,21563273	5	18	291	0,00343643	26,85	5,65221053	1,73204671	2,3457E-05
67,12	241,15	308,27	0,21773121	5	18,4	291,4	0,00343171	26,85	5,65221053	1,73204671	1,874E-05
64,07	237,55	301,62	0,2124196	5	18,8	291,8	0,003427	25,63	5,39536842	1,68554089	1,4036E-05
66,1	241,15	307,25	0,21513426	5	19,2	292,2	0,00342231	26,44	5,56631579	1,7167334	9,3442E-06
69,15	244,15	313,3	0,22071497	5	19,6	292,6	0,00341763	27,66	5,7625	1,75137141	4,6657E-06
62,58	241,15	303,73	0,20603826	5	19,8	292,8	0,0034153	25,03	5,215	1,65153909	2,3313E-06
65,08	244,75	309,83	0,21005067	5	20	293	0,00341297	26,03	5,42333333	1,69071063	0
66,1	244,75	310,85	0,21264275	5	20,3	293,3	0,00340948	26,44	5,50833333	1,7062621	-3,491E-06
65,45	242,95	308,4	0,21222438	5	20,7	293,7	0,00340483	26,18	5,45416667	1,69637984	-8,134E-06
66,15	244,95	311,1	0,21263259	5	21	294	0,00340136	26,46	5,75217391	1,74957786	-1,161E-05
68,5	242,45	310,95	0,22029265	5	21,4	294,4	0,00339674	27,40	5,95652174	1,78448671	-1,623E-05
70,75	241,15	311,9	0,22683552	5	21,8	294,8	0,00339213	28,30	6,15217391	1,8168055	-2,084E-05
71,15	242,75	313,9	0,22666454	5	22	295	0,00338983	28,46	6,18695652	1,82244329	-2,314E-05
70,5	244,45	314,95	0,22384505	5	22,4	295,4	0,00338524	28,20	6,13043478	1,81326567	-2,773E-05
72,45	242,45	314,9	0,23007304	5	22,8	295,8	0,00338066	28,98	6,3	1,84054963	-3,231E-05
74,78	241,15	315,93	0,236698	5	23	296	0,00337838	29,91	6,16742268	1,81928103	-3,459E-05
77,29	244,75	322,04	0,24000124	5	23,2	296,2	0,0033761	30,92	6,37443299	1,85229514	-3,687E-05
76,15	245,25	321,4	0,23693217	5	23,5	296,5	0,00337268	30,46	6,28041237	1,83743564	-4,029E-05
75,15	245,95	321,1	0,23403924	5	23,8	296,8	0,00336927	30,06	6,19793814	1,82421668	-4,37E-05
76,45	245,5	321,95	0,23745923	5	24	297	0,003367	30,58	6,30515464	1,8413675	-4,597E-05
75,75	246,25	322	0,23524845	5	24,3	297,3	0,00336361	30,30	6,51612903	1,87428049	-4,936E-05
76,78	246,75	323,53	0,23731957	5	24,5	297,5	0,00336134	30,71	6,60473118	1,88778624	-5,162E-05
77,15	247,5	324,65	0,23764054	5	24,6	297,6	0,00336022	30,86	6,63655914	1,89259363	-5,275E-05
78,31	247,15	325,46	0,24061329	5	24,8	297,8	0,00335796	31,32	6,73634409	1,90751736	-5,501E-05
79,32	244,75	324,07	0,24476193	5	24,9	297,9	0,00335683	31,73	6,54185567	1,87822087	-5,614E-05
78,81	245,15	323,96	0,24327077	5	25	298	0,0033557	31,52	6,49979381	1,87177046	-5,726E-05
81,86	244,15	326,01	0,25109659	5	25,2	298,2	0,00335345	32,74	6,75134021	1,90974103	-5,952E-05
83,39	248,25	331,64	0,25144735	5	25,5	298,5	0,00335008	33,36	6,87752577	1,92825896	-6,289E-05
84,41	250,45	334,86	0,25207549	5	25,7	298,7	0,00334784	33,76	6,96164948	1,94041644	-6,513E-05
84,92	253,15	338,07	0,25119058	5	26,1	299,1	0,00334336	33,97	7,00371134	1,9464402	-6,961E-05

Con los datos anteriores se grafica el LN de A vs. 1/T,



## Anexo 3. Datos históricos del monitoreo de Milluni

Tabla 3.1. Datos Punto 1 – Naciente sistema de lagunas Milluni

AÑO	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	COORDENADA E	COORDENADA N	CONSTITUYENTES INORGÁNICOS METÁLICOS Y METALOIDES																
					Al mg/L	Sb mg/L	As mg/L	B mg/L	Ca mg/L	Cd mg/L	Cu mg/L	Cr VI mg/L	CrIII mg/L	Fe mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Hg mg/L	Ni mg/L	Pb mg/L	Na mg/L	Zn mg/L
2011a	SEK_2	R. S. Milluni Nacientes	592840	8198196			0,005	0,24	49,19		0,007	0,033			8,24	0,06		0,025	0,01	40,35	0,152
2011b	SEK_2	R. S. Milluni Nacientes	592840	8198196			0,028		12,2	0,002	0,005	0,005		0,06	1,1	0,005			0,02	0,6	0,01
2012	SEK_2	R. S. Milluni Nacientes	592840	8198196					13,63		0,003	0,005		0,015	0,97	0,004				1	0,005
2014	SEK_2	R. S. Milluni Nacientes	592841	8198194	0,1		0,181		12,96	0,001				0,2			2E-04		0,009	3,05	
2015a	SEK_2	R. S. Milluni Nacientes	592844	8198192	0		0,04	0,18	11,6	0,01				1,030			6E-04		0,02	0,7	
2015b	SEK_2	R. S. Milluni Nacientes	592800	8198217	0,128		0,002	0,17	5,36	0,001	0,002	0,005		0,4	0,27	0,005	8E-05	0,012	0,004	0,7	0,005
2016	MRM-1	Nacientes subcuenca Milluni	592899	8199168		0,002	0,086		6,15	6E-05	0,03	5E-04		0,009	0,2	0,02	0,001	0,002	0,007	1,676	0,01
2017	LRM-02	Laguna Zongo	592549	8197635	0,34		0,004	3,4	9,3	0,001				0,2		0,02	1E-04		0,02	3,8	0,1
2018	LRM-02	Final canalización	579401	8173739	0,02		0	0,16	10,27	0,004	0,72		0,05	0,208	0,52	0,008			0,026	1,08	0,03

Tabla 3.2. Datos Punto 2 – Efluente Milluni Chico

AÑO	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	COORDENADA E	COORDENADA N	CONSTITUYENTES INORGÁNICOS METÁLICOS Y METALOIDES																	
					Al mg/L	As mg/L	B mg/L	Ca mg/L	Cd mg/L	Cu mg/L	Cr VI mg/L	CrIII mg/L	Fe mg/L	Li mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Hg mg/L	Ni mg/L	Pb mg/L	Na mg/L	Zn mg/L	
2016	MRM-8	Salida vertedero Milluni chico, Afluente Milluni Grande	589910	8192774		0,049		5,89	0,063	0,082	0,001			73,67		2,16	3,38	0,001	0,06	0,007	3,228	14,97
2017	CRM-08	Salida vertedero Milluni chico	589902	8192758	0,32	2,7	0,38	294	0,128					375			17	1E-05		0,07	3,5	8,5
2018	CRM-08	Salida de la laguna Milluni Chico	589887	8193022	3	1,34	0,57	42,5	0,237	0,02		0,092	121		2,94	4,9				0,068	4,17	10,85

Tabla 3.3. Datos Punto 3 – Represa de Almacenamiento Milluni Grande

AÑO	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	COORDENADA E	COORDENADA N	CONSTITUYENTES INORGÁNICOS METÁLICOS Y METALOIDES																
					Al mg/L	As mg/L	B mg/L	Ca mg/L	Cd mg/L	Cu mg/L	Cr VI mg/L	CrIII mg/L	Fe mg/L	Li mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Hg mg/L	Ni mg/L	Pb mg/L	Na mg/L	Zn mg/L
2006	SEK_3	R. Seke desp represa M.	588665	8188883		0,191		13,94			11,99		25,74							2,7	7,16
2007a	SEK_3	R. Seke desp represa M.	588644	8188862		0,242			18.250	0,355	0,16		26,72		2,78	0,12		2,53			18,07
2007b	SEK_3	R. Seke desp represa M.	588644	8188862		0,022			0,062	0,172			0,36		6,05	9.064		0,038			15,31
2008	SEK_3	R. Seke desp represa M.	588644	8188862		0			0	0,061	0		4,58		0,06	0,617		0			0,54
2009	SEK_3	R. Seke desp represa M.	588644	8188862																	
2011a	SEK_3	R. Seke desp represa M.	588448	8188491		0,005	0,2	39,06		0,011	0,039			8,58	0,09		0,023	0,01	32,05		0,28
2011b	SEK_3	R. Seke desp represa M.	588448	8188491		0,041		35,1	0,019	0,051	0,005		0,03	9,3	0,04			0,04	8,7		0,48
2014	SEK_3	R. Seke desp represa M.	588448	8188491		5,58	0,18	70,21	0,023				0,14			2E-04		0,009	7,7		
2016	MRM-10	Salida represa Milluni grande	588974	8190315		0,119		6,15	0,063	0,334	0,003		103,5	1,18	6,66	0,001	0,07	0,042	3.238		27,23
2017	CRM-11	Salida canal mezcla M. y J. K.	589150	8190341		0,1	0,108	0,55	103	0,034			39			5	4E-05		0,03	2,4	21
2018	CRM-11	Represa (Laguna Milluni chico)	589147	8190424		1	0,04	0,49	18,47	0,065	0,03	0,053	44,4	13,9	3,67			0,043	2,98		16,95

## Anexo 4. Datos de precipitación y evapotranspiración 1999 -2018.

Tabla 4.1. Datos precipitación 1999-2018.

AÑO	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	ANUAL
1999-2000	0	3,4	30,9	50	28,4	93,9	90,1	98,2	73,8	33,2	2	10,5	514,4
2000-2001	0	28,1	0	70,2	13	113,9	209,7	96	130,3	37,6	32,1	4,3	735,2
2001-2002	2	12,6	8,3	30,1	21,1	76,3	59,1	86,3	102,8	18	6,8	33,4	456,8
2002-2003	21,3	15,1	23,6	68,6	58,6	49,8	195,8	99,2	102,8	15,6	1,9	1	653,3
2003-2004	18,2	8,1	20,6	8,9	48,1	119,1	117,3	83,4	65,4	21,4	3,6	4	518,1
2004-2005	8,4	12,8	****	****	34,6	55,6	142,8	101,7	16,3	16,1	1,3	0	****
2005-2006	0	2,3	25,5	78,6	79,2	113	174,2	75,2	45,5	23,9	4,8	1,7	623,9
2006-2007	0	21,6	22,7	38,3	78,3	119,2	108,5	107,7	60,1	56,9	7,8	0	621,1
2007-2008	9,2	2,9	52	33,5	16,3	148,9	192,8	79,6	84,9	10,7	10,1	7,5	648,4
2008-2009	0	7,9	4,9	39,8	26,9	87,9	87,8	85,3	52,7	27,1	6,2	0	426,5
2009-2010	18,7	0	15,8	51,2	37,7	61,8	132,5	100,3	48,7	10,5	19,8	0,5	497,5
2010-2011	3,5	3,4	15,7	24,4	5,6	40,6	66,9	199,8	57	17,8	2,5	0	437,2
2011-2012	6,8	2,8	40,1	13	25,3	95	93,8	103,7	49,8	57,6	0	13,8	501,7
2012-2013	5,2	0,8	4,5	26,9	100,5	158,1	71,2	138,8	94,1	17,7	39,2	47,2	704,2
2013-2014	15,5	46,7	9,5	50,4	30,9	84,9	138,8	78,4	85,1	51,4	12,4	2,3	606,3
2014-2015	19,3	32,8	85,4	14,7	27,3	97,1	225	83,3	141,5	122	6,6	0	855
2015-2016	4,2	21,9	42,9	54	82,5	67,5	87,5	121,1	10,8	98	1,2	10	601,6
2016-2017	9,8	6,7	8,1	22,9	35,4	114,5	197,5	132,5	264,4	76,6	101,9	0	970,3
2017-2018	1,2	0	42,3	97	31	101,7	41,8	214	103,7	8,4	4,8	44,6	690,5
TOTAL	143,30	229,90	452,80	772,50	780,70	1798,80	2433,10	2084,50	1589,70	720,50	265,00	180,80	11062,00
TOTAL DATOS	19,00	19,00	18,00	18,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	18,00
PROMEDIO	7,54	12,10	25,16	42,92	41,09	94,67	128,06	109,71	83,67	37,92	13,95	9,52	614,56

Fuente: Elaboración propia, 2021.

**Tabla 4.2. Datos evapotranspiración 1999-2018.**

AÑO	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	ANUAL
1999-2000	0	3,4	30,9	50	28,4	93,9	90,1	98,2	73,8	33,2	2	10,5	514,4
2000-2001	0	28,1	0	70,2	13	113,9	209,7	96	130,3	37,6	32,1	4,3	735,2
2001-2002	2	12,6	8,3	30,1	21,1	76,3	59,1	86,3	102,8	18	6,8	33,4	456,8
2002-2003	21,3	15,1	23,6	68,6	58,6	49,8	195,8	99,2	102,8	15,6	1,9	1	653,3
2003-2004	18,2	8,1	20,6	8,9	48,1	119,1	117,3	83,4	65,4	21,4	3,6	4	518,1
2004-2005	8,4	12,8	****	****	34,6	55,6	142,8	101,7	16,3	16,1	1,3	0	****
2005-2006	0	2,3	25,5	78,6	79,2	113	174,2	75,2	45,5	23,9	4,8	1,7	623,9
2006-2007	0	21,6	22,7	38,3	78,3	119,2	108,5	107,7	60,1	56,9	7,8	0	621,1
2007-2008	9,2	2,9	52	33,5	16,3	148,9	192,8	79,6	84,9	10,7	10,1	7,5	648,4
2008-2009	0	7,9	4,9	39,8	26,9	87,9	87,8	85,3	52,7	27,1	6,2	0	426,5
2009-2010	18,7	0	15,8	51,2	37,7	61,8	132,5	100,3	48,7	10,5	19,8	0,5	497,5
2010-2011	3,5	3,4	15,7	24,4	5,6	40,6	66,9	199,8	57	17,8	2,5	0	437,2
2011-2012	6,8	2,8	40,1	13	25,3	95	93,8	103,7	49,8	57,6	0	13,8	501,7
2012-2013	5,2	0,8	4,5	26,9	100,5	158,1	71,2	138,8	94,1	17,7	39,2	47,2	704,2
2013-2014	15,5	46,7	9,5	50,4	30,9	84,9	138,8	78,4	85,1	51,4	12,4	2,3	606,3
2014-2015	19,3	32,8	85,4	14,7	27,3	97,1	225	83,3	141,5	122	6,6	0	855
2015-2016	4,2	21,9	42,9	54	82,5	67,5	87,5	121,1	10,8	98	1,2	10	601,6
2016-2017	9,8	6,7	8,1	22,9	35,4	114,5	197,5	132,5	264,4	76,6	101,9	0	970,3
2017-2018	1,2	0	42,3	97	31	101,7	41,8	214	103,7	8,4	4,8	44,6	690,5
TOTAL	143,30	229,90	452,80	772,50	780,70	1798,80	2433,10	2084,50	1589,70	720,50	265,00	180,80	11062,00
TOTAL DATOS	19,00	19,00	18,00	18,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	18,00
PROMEDIO	7,54	12,10	25,16	42,92	41,09	94,67	128,06	109,71	83,67	37,92	13,95	9,52	614,56

Fuente: Elaboración propia, 2021.

## Anexo 5. Detalle extendido de los componentes del programa de monitoreo de Milluni

**Tablas 5.1. Componentes del programa de monitoreo de la calidad del agua: caso de estudio Milluni, Bolivia**

No.	Componente	Resumen del resultado por componente
1	Definir los objetivos y el propósito del programa.	Inicialmente se caracterizará el área de estudio con el objetivo de determinar la calidad del agua de la zona Milluni. Al cabo de 1 año, el programa se convertirá en un programa de control de calidad de agua en la parte alta de la Microcuenca Milluni para incorporarse a la gestión hídrica de la zona y generar datos.
2	Encuestas preliminares	Esta parte tendrá una duración de 1 año, donde considerando experiencias previas de monitoreo en la zona, se obtendrán lineamientos para optimizar el programa de monitoreo para los demás años en caso de ser requerido.
3	Delimitación del área cubierta por el programa de monitoreo	El área cubierta por el programa de monitoreo es importante porque el agua después de la represa Milluni Grande es utilizada para consumo humano. La parte alta de Milluni incluye las siguientes cuatro lagunas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pata Khota: Laguna natural de forma irregular que recibe agua del deshielo del Huayna Potosí. Se encuentra a 4665 m.s.n.m..</li> <li>• Jankho Khota: Laguna natural de forma irregular que recibe agua de la Laguna Pata Khota. Se encuentra a 4560 m.s.n.m..</li> <li>• Milluni Chico: Laguna artificial, a una altura de 4550 m.s.n.m., de forma irregular que recibe agua de manantiales y minas naturales. La laguna artificial tiene como objetivo captar el drenaje de las minas para evitar que ingrese a la Laguna Milluni Grande.</li> <li>• Milluni Grande: Ubicada a 4530 m.s.n.m., la Laguna Milluni Grande recibe efluentes de manantiales naturales, Laguna Milluni Chico y drenaje de minas. También recibe agua de la Laguna Jankho Khota a través de un sistema de derivación, que consiste en una bomba que extrae agua de la Laguna Jankho Khota, a través de un canal abierto de cemento hacia la represa Milluni Grande.</li> </ul>
4	Determinación de puntos de muestreo	Los puntos de muestreo fueron identificados de acuerdo al protocolo “Guía Práctica para el Diseño e Implementación de Estudios y Programas de Monitoreo de la Calidad del Agua Dulce”. Los cuatro puntos son los siguientes: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Punto 1: Este punto tiene como objetivo identificar las condiciones de referencia en el sistema del curso de agua. Está ubicado en la cabecera de la Laguna Pata Khota.</li> <li>• Punto 2: Este punto está ubicado después del efluente de la Laguna Milluni Chico, y tiene como objetivo identificar cualquier signo de deterioro en la calidad del agua.</li> <li>• Punto 3: Este punto busca identificar si el cuerpo de agua en el sistema de curso de agua cumple con los estándares de calidad de agua deseados. Está ubicado en la presa de almacenamiento a la salida de la Laguna Milluni Grande.</li> </ul>

- Punto 4: Este punto se ubica después del pretratamiento donde se aplica cal al agua, y tiene como objetivo evaluar la efectividad de la intervención de gestión de la calidad del agua.
  
- 5 Definir la frecuencia y la duración del muestreo.
 

Para identificar la frecuencia de monitoreo para el año piloto, se utilizó un análisis de monitoreo previo en el área tal como lo recomienda la norma ISO 5667-1. Se pudo identificar que, al ser una zona con importantes variaciones estacionales, es necesario contemplar dos estaciones importantes del año, a saber, la estación lluviosa y la estación seca. Se realizarán muestreos tres veces en época seca y tres veces en época lluviosa con intervalos de 1 mes entre muestreos con el objetivo de identificar si existe variación en los contaminantes durante los meses de estas épocas.

Después de terminar la caracterización o año piloto, se debe definir la frecuencia de acuerdo a los objetivos del programa de control de calidad del agua teniendo en cuenta las limitaciones de tiempo y dinero de la entidad que está a cargo del monitoreo general del área.
  
- 6 Definir los parámetros de calidad del agua a medir
 

Los parámetros básicos de la calidad del agua serán determinados *in situ* por estándares internacionales que son: pH, OD, Conductividad, Turbidez y Temperatura. Considerando que la actividad predominante en la zona es la minería, se realizará el control de iones metálicos y se analizarán los iones en laboratorios de servicio certificados.
  
- 7 Definir los protocolos de muestreo, incluida la toma de muestras, el transporte y el almacenamiento, para evitar la contaminación de las muestras.
 

Se seguirán los protocolos establecidos en “ISO 5667-4: 2016 Calidad del agua - Muestreo - Parte 4: Orientación sobre el muestreo de lagos, naturales y artificiales”.
  
- 8 Determinar los recursos necesarios para la implementación del programa.
 

Este es un componente muy importante. Se debe considerar que tanto los recursos económicos como el personal capacitado son limitados debido a que el área de Milluni pertenece al sistema de gestión de la Macrocuenca Katari, la cual cuenta con recursos limitados.
  
- 9 Establecer un plan para el control y seguimiento de la calidad del programa
 

Inicialmente, el plan se enfoca en evaluar los resultados del piloto, es decir, el primer año del programa, para redefinir los siguientes componentes importantes:

  - Puntos de muestreo
  - Frecuencia de muestreo

---

Fuente: Alvizuri et al., 2020.

Anexo 6. Analíticas del monitoreo de metales pesados en Milluni.

Tabla 6.1. Analíticas del monitoreo de metales pesados

Nombre de la muestra	7 Li	9 Be	11 B	23 Na	24 Mg	27 Al	39 K	43 Ca	47 Ti	51 V	52 Cr	55 Mn	59 Co	60 Ni	63 Cu	66 Zn	75 As	78 Se	85 Rb	88 Sr	95 Mo	107 Ag	118 Sn	121 Sb	137 Ba	139 La	140 Ce	202 Hg	208 Pb	209 Bi	238 U
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Enero P1	0,0027	<0,000	<0,000	1,0392	0,579	0,0502	0,3181	1,722	0,0021	0,0003	0,0003	0,0032	0,0001	0,0006	0,0008	0,0036	0,0217	<0,000	0,0008	0,0240	0,0006	0,0268	0,0000	0,0000	0,0004	0,0014	0,0001	0,0001	0,0002	0,0000	0,0041
Enero P2	0,0238	0,0018	<0,000	1,6999	12,048	0,2458	0,4990	2,640	0,0025	0,0005	0,0011	4,8232	0,0305	0,0579	0,6174	25,6835	0,4751	0,0004	0,0017	0,0547	0,0002	0,0316	0,0146	0,0004	0,0004	0,0039	0,0010	0,0026	0,0071	0,0001	0,0010
Enero P3	0,0307	0,0025	<0,000	2,0937	16,537	0,0034	0,7795	3,017	0,0016	0,0002	0,0015	6,0094	0,0429	0,0475	0,4176	25,8778	0,0551	0,0006	0,0028	0,0632	0,0000	0,0520	0,0085	0,0001	0,0001	0,0091	0,0014	0,0038	0,0156	0,0000	0,0009
Enero P4	0,0113	0,0005	<0,000	1,6345	7,601	0,0584	0,6178	4,844	0,0083	0,0017	0,0010	1,7325	0,0129	0,0206	0,1190	7,3571	0,0170	0,0002	0,0017	0,0832	0,0002	0,0677	0,0022	0,0000	0,0001	0,0328	0,0011	0,0023	0,0049	0,0000	0,0011
Marzo P1	<0,000	<0,000	<0,000	1,0379	0,690	0,0800	0,3371	1,780	0,0023	0,0004	0,0006	0,0100	0,0001	<0,000	0,0007	0,0132	0,0209	<0,000	0,0008	0,0250	0,0009	0,0427	<0,000	0,0006	0,0015	0,0001	0,0001	<0,000	0,0004	<0,000	0,0040
Marzo P2	0,0403	0,0037	<0,000	2,1410	25,370	0,0900	0,5976	3,160	0,0007	0,0006	0,0023	10,7900	0,0693	0,1118	0,9057	42,0757	0,5479	0,0003	0,0022	0,0619	0,0001	0,0542	0,0009	0,0004	0,0058	0,0017	0,0048	<0,000	0,0094	0,0002	0,0012
Marzo P3	0,0293	0,0026	<0,000	2,2644	14,630	0,1900	0,8127	2,400	0,0008	0,0001	0,0015	5,4200	0,0422	0,0483	0,4632	24,2634	0,0306	0,0002	0,0023	0,0566	<0,000	0,0522	0,0002	0,0000	0,0085	0,0013	0,0034	<0,000	0,0126	0,0000	0,0008
Marzo P4	0,0179	0,0009	<0,000	1,8339	10,310	0,0700	0,6799	5,330	0,0039	0,0017	0,0014	2,7200	0,0211	0,0343	0,2291	11,9861	0,0144	0,0001	0,0016	0,1048	0,0003	0,0538	0,0000	0,0002	0,0425	0,0009	0,0022	<0,000	0,0053	0,0000	0,0010
Mayo P1	<0,000	<0,000	<0,000	0,8370	1,160	0,0800	0,3996	0,610	0,0013	0,0001	0,0002	0,0400	0,0004	0,0011	0,0029	0,0326	0,0015	<0,000	0,0005	0,0173	0,0001	0,0235	<0,000	0,0001	0,0023	0,0000	0,0001	<0,000	0,0005	0,0000	0,0000
Mayo P2	0,0602	0,0070	<0,000	2,4828	33,820	0,2600	0,7884	4,060	0,0010	0,0004	0,0022	14,4800	0,0995	0,1594	0,8992	54,8533	0,6382	0,0007	0,0031	0,0871	0,0000	0,0233	0,0002	0,0002	0,0064	0,0023	0,0060	<0,000	0,0073	0,0001	0,0010
Mayo P3	0,0337	0,0034	<0,000	2,0419	15,150	0,2200	0,7588	2,280	0,0005	0,0001	0,0014	5,7000	0,0454	0,0440	0,4890	25,7124	0,0407	0,0003	0,0025	0,0557	<0,000	0,0262	0,0000	0,0001	0,0077	0,0013	0,0034	<0,000	0,0122	0,0000	0,0008
Mayo P4	0,0275	0,0019	<0,000	2,0102	14,780	0,0500	0,7196	3,250	0,0013	0,0005	0,0015	5,3200	0,0431	0,0408	0,4678	24,6047	0,0359	0,0002	0,0023	0,0757	0,0000	0,0258	<0,000	0,0003	0,0365	0,0013	0,0035	<0,000	0,0121	0,0000	0,0008
Agosto P1	0,0016	0,0000	<0,000	1,2037	0,5562	0,0775	0,2617	13,127	0,0020	0,0004	0,0003	0,0032	0,0000	0,0005	0,0007	0,0050	0,0252	<0,000		0,03262	0,0013		0,0000	0,0006	0,00126	0,0001	<0,000	0,0023	<0,000		
Agosto P2	0,0731	0,0071	<0,000	2,3403	39,3084	0,1460	0,7132	37,594	0,0008	0,0005	0,0017	17,1147	0,1178	0,1900	0,6041	69,9066	0,8037	0,0008		0,12432	0,0002		0,0001	0,0005	0,00464	0,0023	<0,000	0,0111	0,0000		
Agosto P3	0,0422	0,0035	<0,000	2,0377	18,1623	0,0411	0,8354	20,109	0,0009	0,0001	0,0017	7,0084	0,0541	0,0450	0,5429	34,0626	0,0494	0,0005		0,07226	0,0002		0,0001	0,0001	0,00951	0,0017	<0,000	0,0165	0,0000		
Agosto P4	0,0394	0,0027	<0,000	1,9497	22,1244	0,0871	0,7592	79,407	0,0076	0,0035	0,0017	6,5047	0,0503	0,0482	0,4967	31,9892	0,0500	0,0007		0,26013	0,0002		0,0001	0,0003	0,04560	0,0022	<0,000	0,0099	<0,000		
Octubre P1	0,0020	<0,000	<0,000	1,0016	0,5720	0,0797	0,3179	11,225	0,0028	0,0004	0,0003	0,0050	<0,000	0,0005	0,0009	0,0133	0,0228	<0,000		0,02696	0,0013		0,0000	0,0008	0,00167	0,0001	<0,000	0,0014	<0,000		
Octubre P2	0,0589	0,0047	<0,000	2,5844	34,8548	0,0854	0,7430	32,990	0,0010	0,0006	0,0015	14,7433	0,1019	0,1629	0,3686	58,0552	1,1380	0,0003		0,10530	0,0003		0,0006	0,0007	0,00481	0,0016	<0,000	0,0089	0,0002		
Octubre P3	0,0473	0,0035	<0,000	2,2614	20,8233	0,0740	0,6887	21,988	0,0026	0,0004	0,0023	7,9232	0,0607	0,0443	0,5420	37,2120	0,0898	0,0005		0,07684	0,0002		0,0001	0,0002	0,00985	0,0027	<0,000	0,0161	0,0000		
Octubre P4	0,0275	0,0020	<0,000	2,0821	12,6596	0,0424	1,1128	37,221	0,0048	0,0012	0,0014	3,9766	0,0292	0,0485	0,2738	19,0916	0,0328	0,0004		0,11013	0,0003		0,0000	0,0003	0,05055	0,0011	<0,000	0,0086	0,0000		
Diciembre P1	0,0009	0,0000	<0,000	0,9899	0,5675	0,0855	0,3387	10,475	0,0036	0,0005	0,0004	0,0064	0,0000	0,0009	0,0009	0,0178	0,0231	<0,000		0,02391	0,0008		0,0001	0,0006	0,00138	0,0001	<0,000	0,0011	<0,000		
Diciembre P2	0,0362	0,0034	<0,000	2,0244	20,9806	0,0868	0,5916	22,405	0,0035	0,0007	0,0014	8,5903	0,0607	0,0988	0,5583	41,4666	0,7782	0,0004		0,07662	0,0004		0,0002	0,0005	0,00437	0,0013	<0,000	0,0091	0,0001		
Diciembre P3	0,0382	0,0031	<0,000	2,1189	18,0725	0,0164	0,4255	19,720	0,0028	0,0003	0,0018	6,6381	0,0523	0,0400	0,4912	32,6211	0,0699	0,0006		0,07002	0,0000		0,0000	0,0002	0,00938	0,0020	<0,000	0,0176	0,0000		
Diciembre P4	0,0196	0,0010	<0,000	1,7903	9,4907	0,0213	0,8356	31,911	0,0112	0,0019	0,0015	2,5048	0,0192	0,0322	0,1832	12,1439	0,0233	0,0004		0,09305	0,0001		0,0000	0,0002	0,06164	0,0012	<0,000	0,0086	<0,000		
LP NB 512	NE	NE	0,3	200	150	0,1	NE	200	NE	NE	0,05	0,1	NE	0,05	1	5	0,01	0,01	NE	NE	NE	NE	NE	0,005	0,7	NE	NE	0,001	0,01	NE	NE
Norma española	NE	NE	1	200	NE	0,2	NE	NE	NE	NE	0,05	0,05	NE	0,05	2	NE	0,01	0,01	NE	NE	NE	NE	NE	0,005	NE	NE	NE	0,001	0,01	NE	NE
EPA	NE	0,004	NE	NE	NE	0,05-0,2	NE	NE	NE	NE	0,1	0,05	NE	NE	1	5	0,01	0,05	NE	NE	NE	0,1	NE	0,006	2	NE	NE	0,002	0,015	NE	NE

NE= No Especificado

Los valores de arsénico que excedentes a las normativas están en rojo

Anexo 7. Informe de la determinación de la frecuencia de muestreo

**Index**

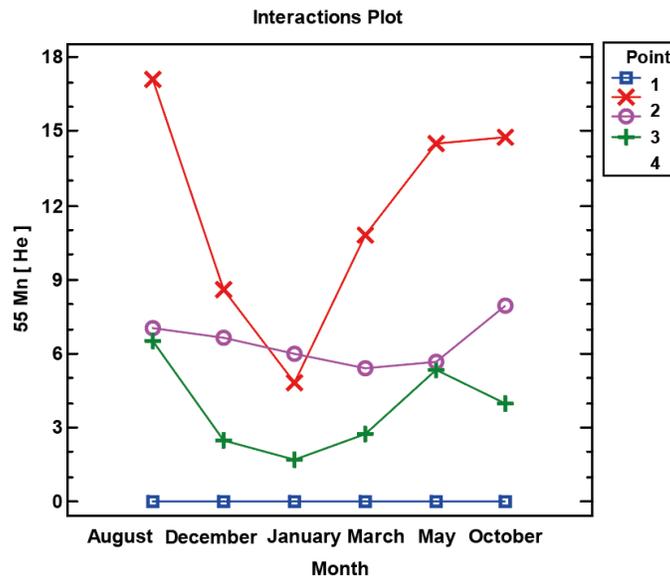
7.1. Manganese

7.2. Zinc

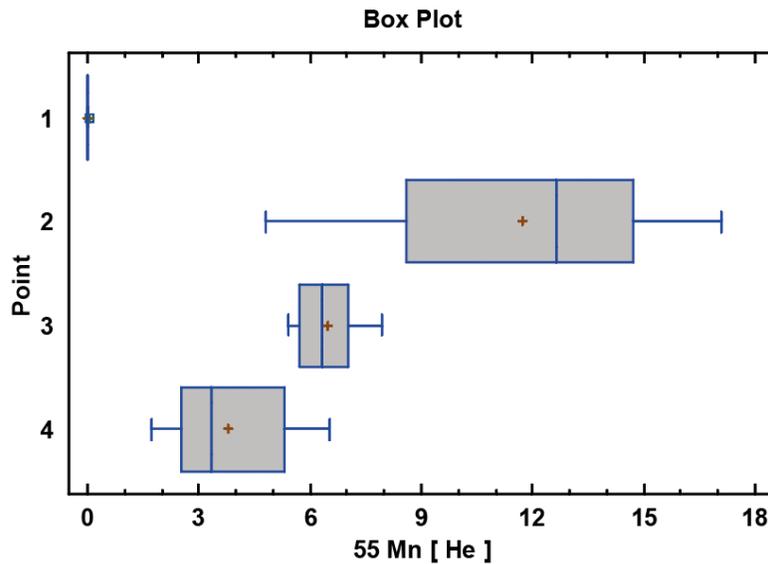
7.3. Arsenic

**7.1. Manganese**

MANOVA: Point and month interaction



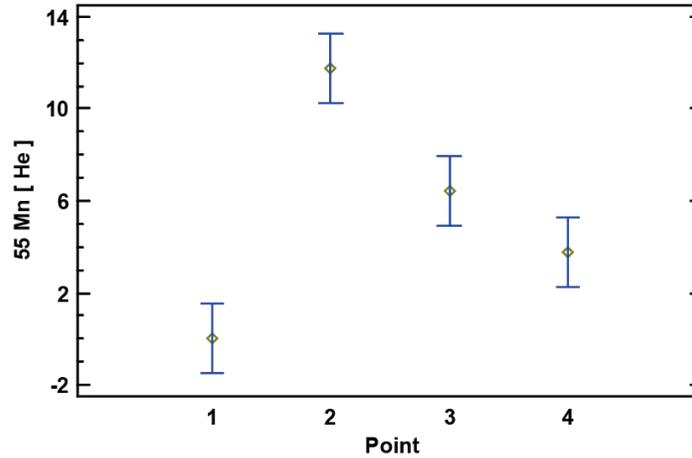
ANOVA: point



**ANOVA table for 55 Mn [ He ] by Point**

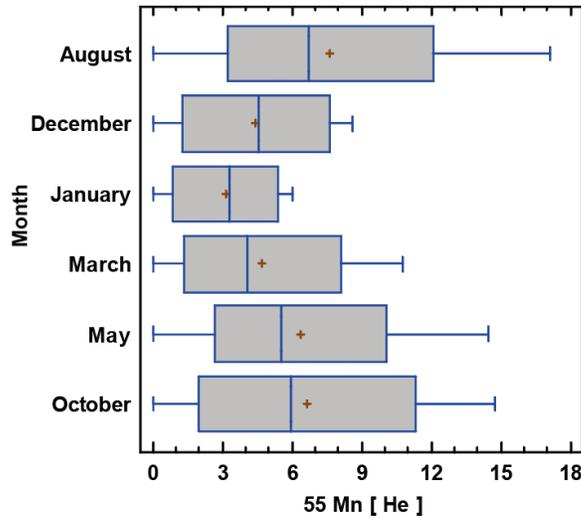
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between gorups	438.543	3	146.181	23.35	0.0000
Within groups	125.19	20	6.25948		
Total (Corr.)	563.733	23			

Median Plot with 95% Confidence Intervals



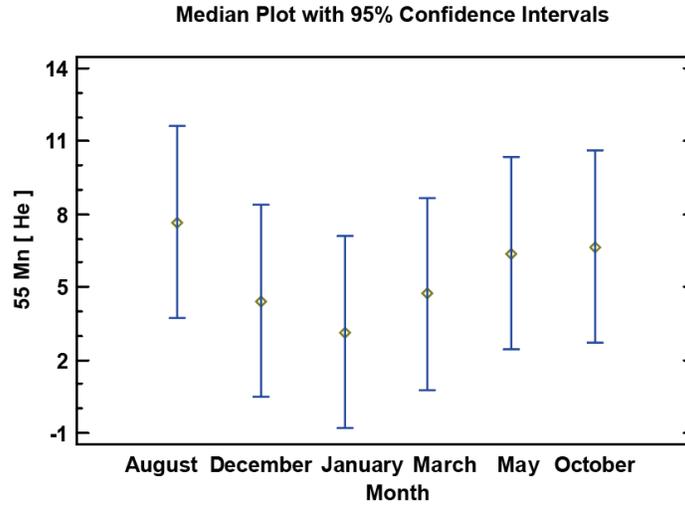
ANOVA: month

Box Plot



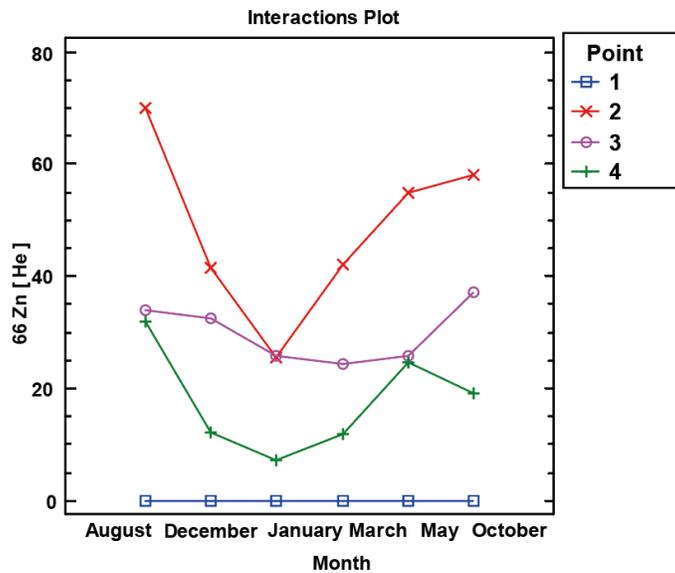
**ANOVA table for 55 Mn [ He ] by Month**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between gorups	56.2754	5	11.2551	0.40	0.8429
Within groups	507.457	18	28.1921		
Total (Corr.)	563.733	23			



### 7.2. Zinc

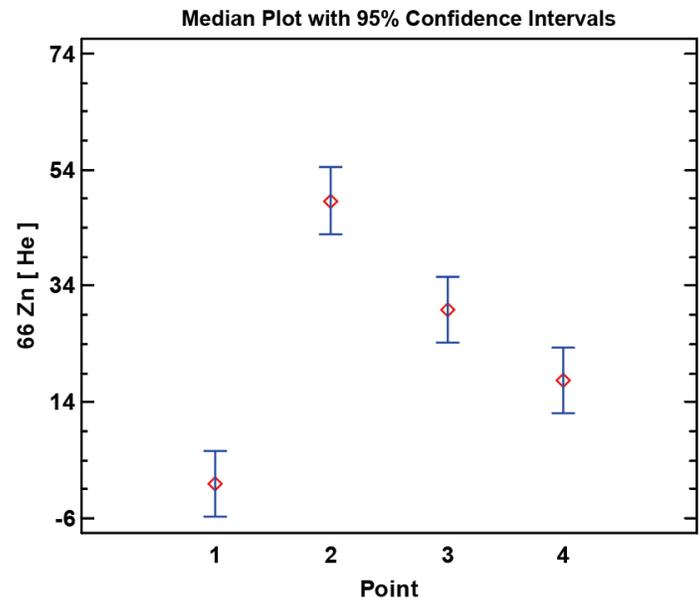
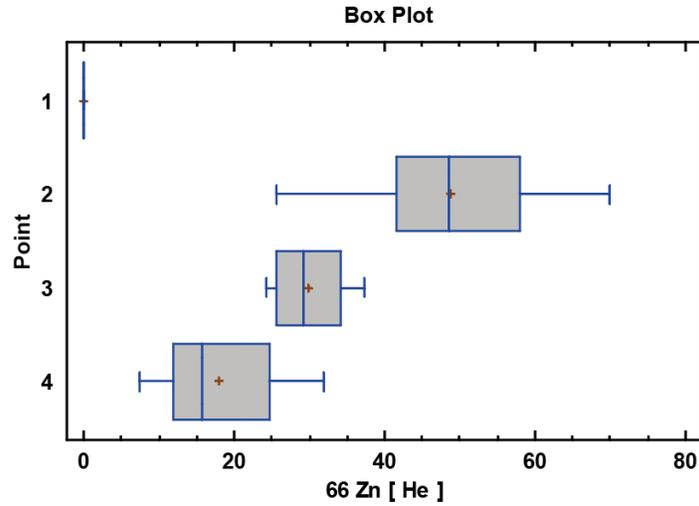
MANOVA: Point and month interaction



ANOVA: point

**ANOVA Table for 66 Zn [ He ] by Point**

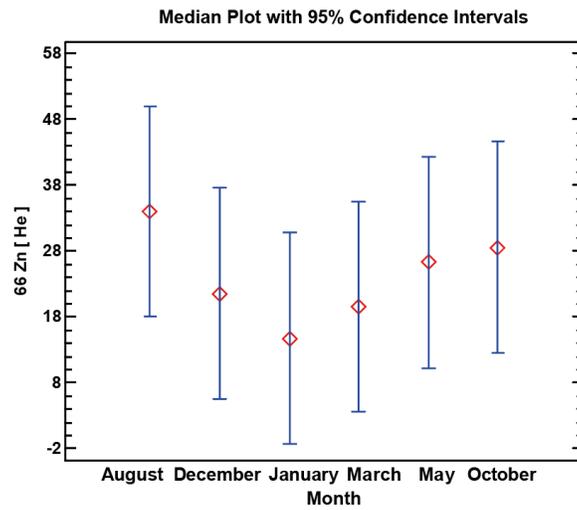
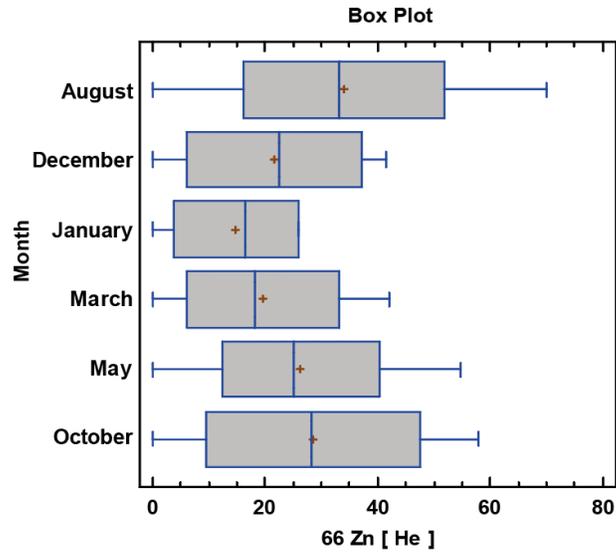
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	7543.24	3	2514.41	28.43	0.0000
Within groups	1768.85	20	88.4427		
Total (Corr.)	9312.09	23			



ANOVA: month

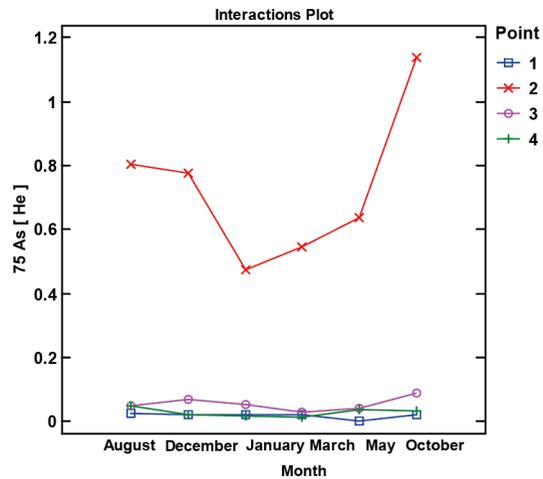
**ANOVA Table for  $^{66}\text{Zn}$  [ He ] by Mont**

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
Between gorups	949.885	5	189.977	0.41	0.8363
Within groups	8362.21	18	464.567		
Total (Corr.)	9312.09	23			



### 7.3. Arsenic

MANOVA: Point and month interaction



ANOVA: point

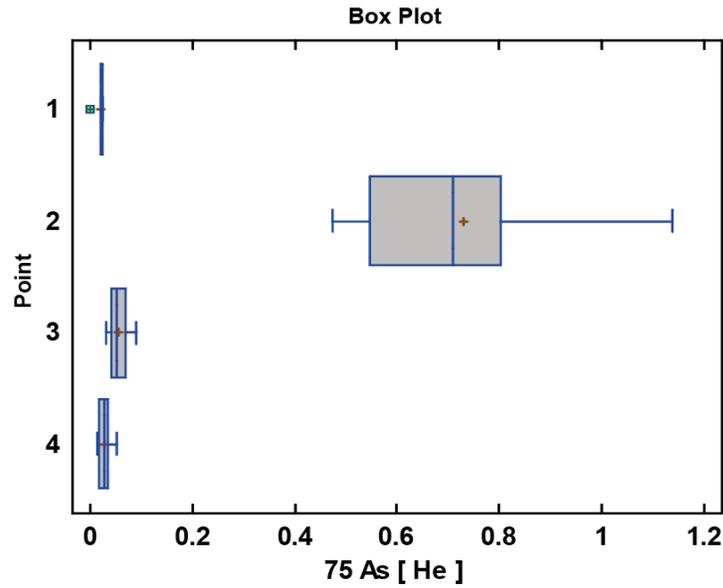
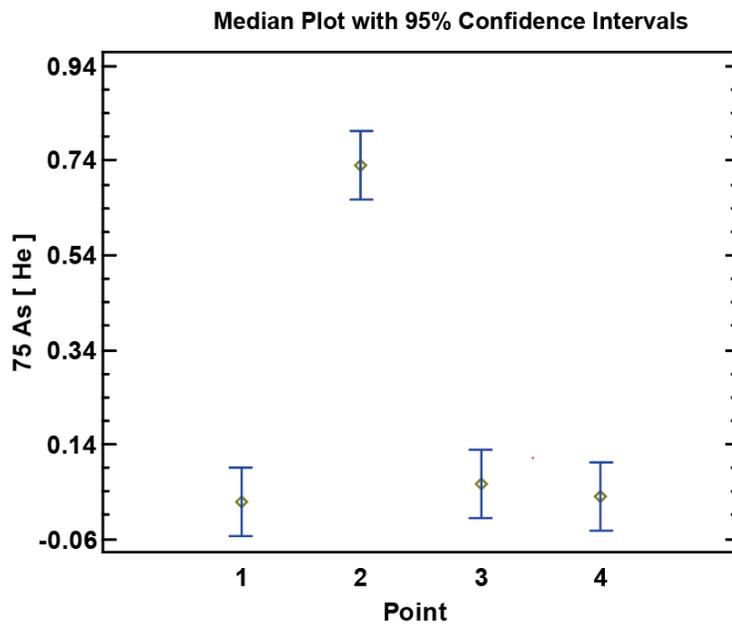
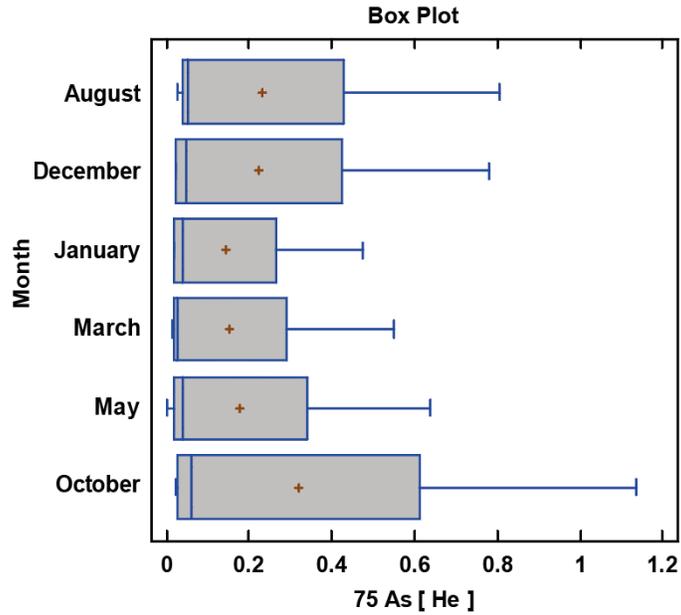


Tabla ANOVA para 75 As [ He ] por Parcela

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between gorups	2.18115	3	0.727052	51.14	0.0000
Within groups	0.284319	20	0.0142159		
Total (Corr.)	2.46547	23			

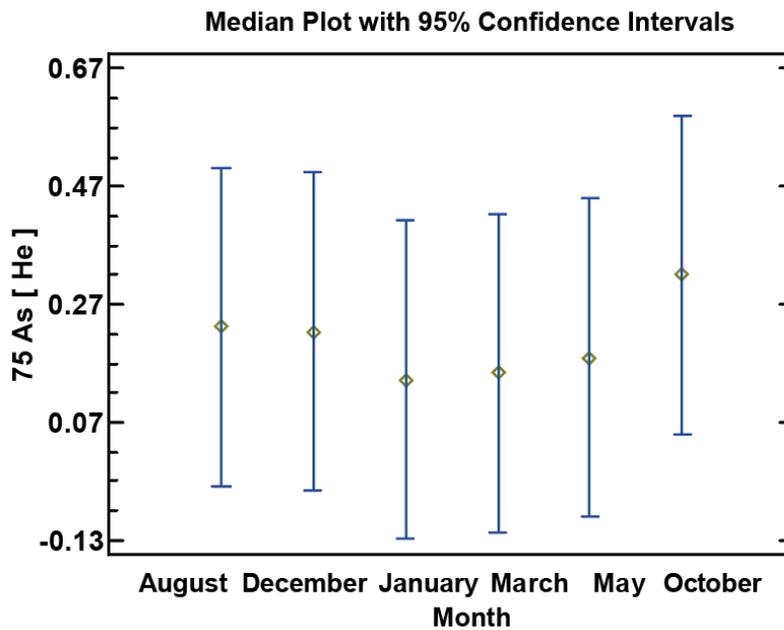


ANOVA: month



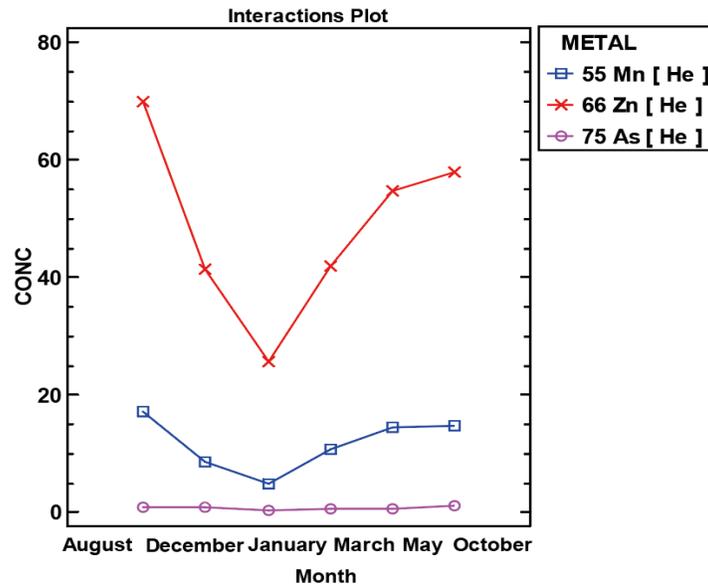
**Tabla ANOVA para 75 As [ He ] por Mes**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	0.086783	5	0.0173566	0.13	0.9831
Within groups	2.37869	18	0.132149		
Total (Corr.)	2.46547	23			



Anexo 8. Informe de la identificación de indicadores de alta concentración de metales

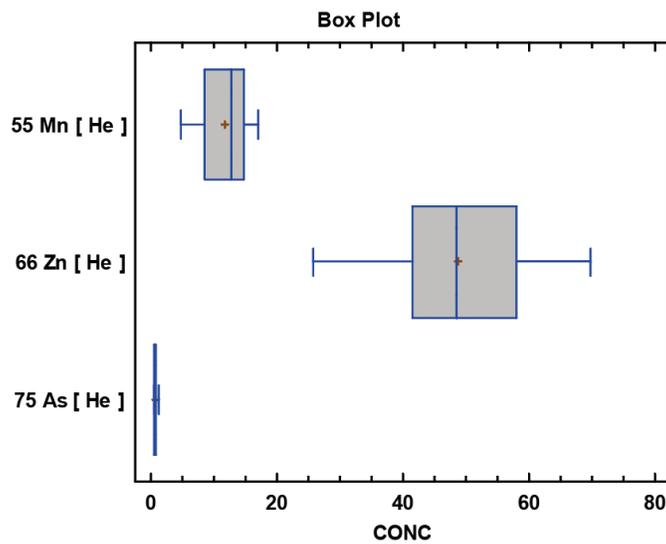
MANOVA: metal and month interaction

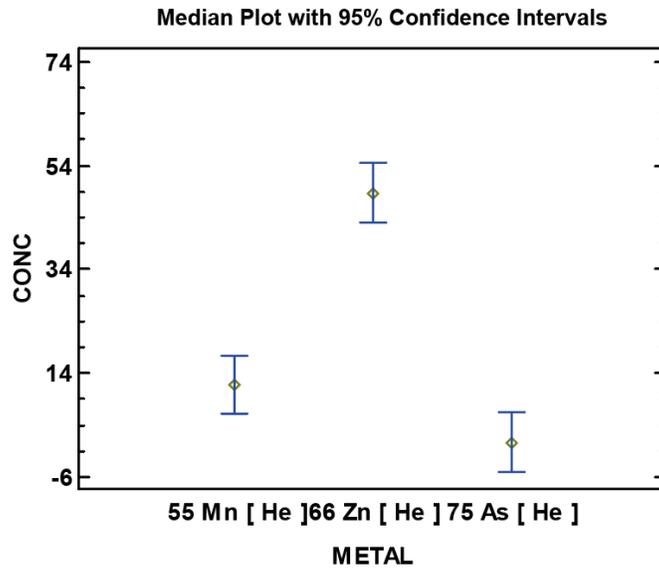


ANOVA: metal

ANOVA Table for CONC by METAL

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between gorups	7565.96	2	3782.98	43.47	0.0000
Within groups	1305.42	15	87.0279		
Total (Corr.)	8871.38	17			

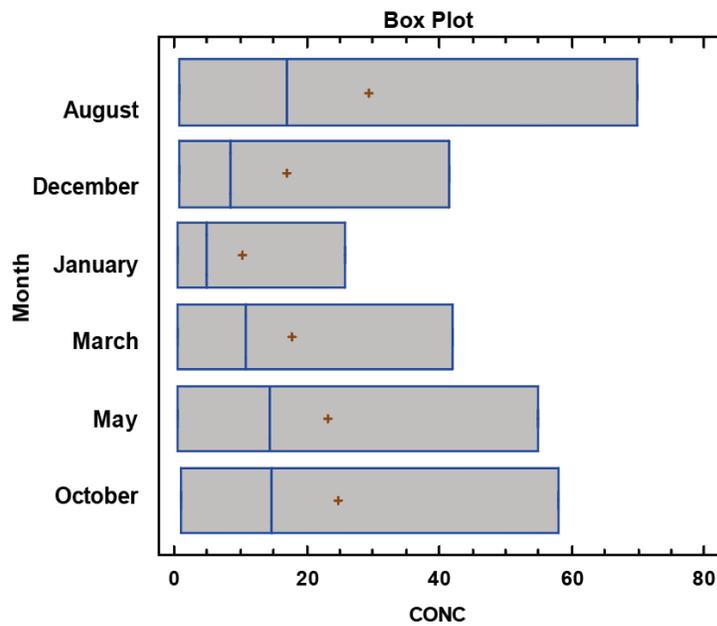


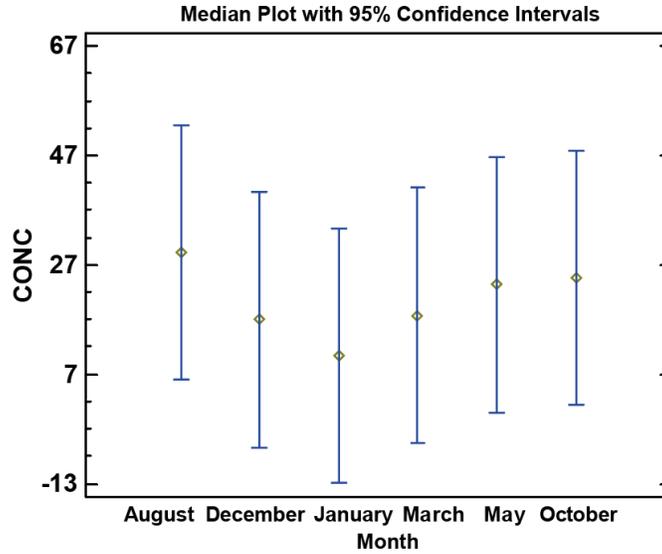


ANOVA: month

**ANOVA table for CONC by Month**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between gorups	676.41	5	135.282	0.20	0.9572
Within groups	8194.97	12	682.914		
Total (Corr.)	8871.38	17			

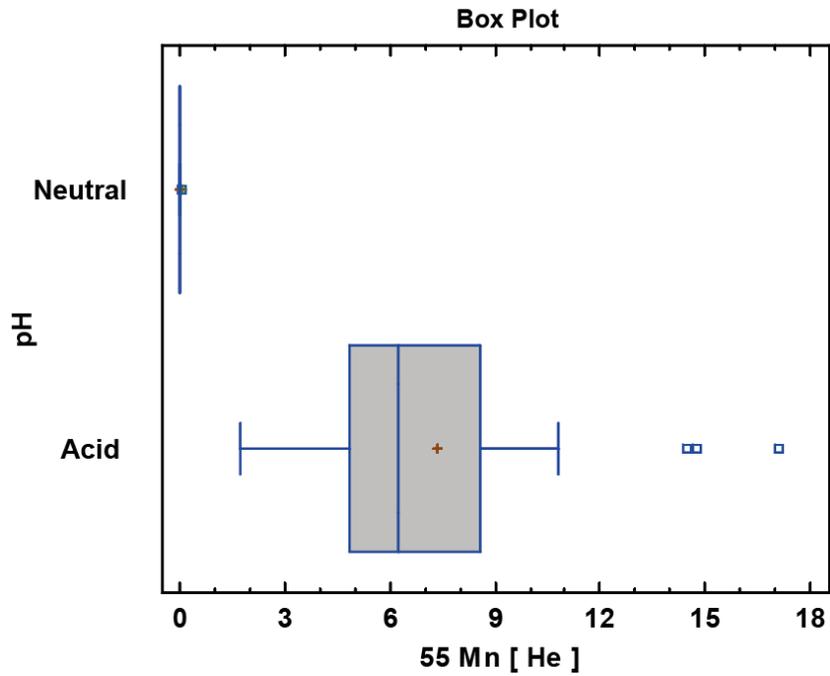


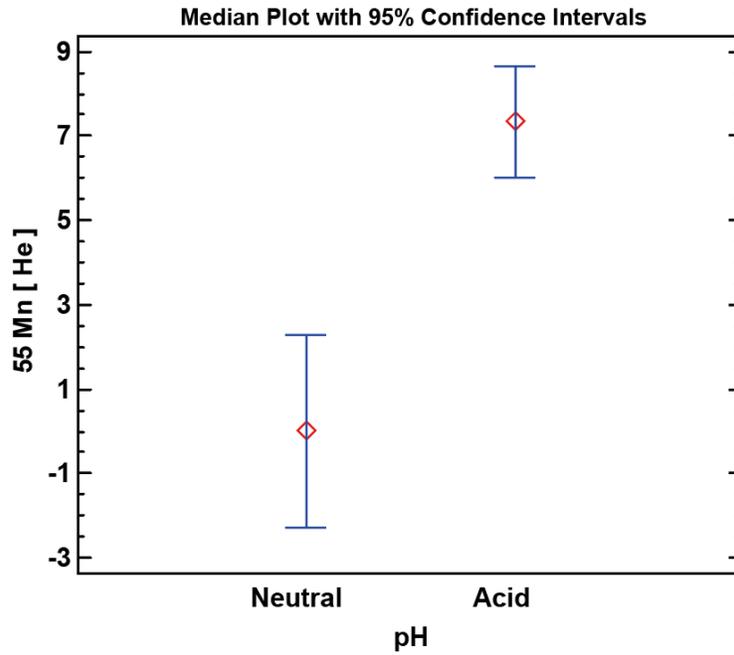


ANOVA: pH

ANOVA Table by 55 Mn [ He ] by pH

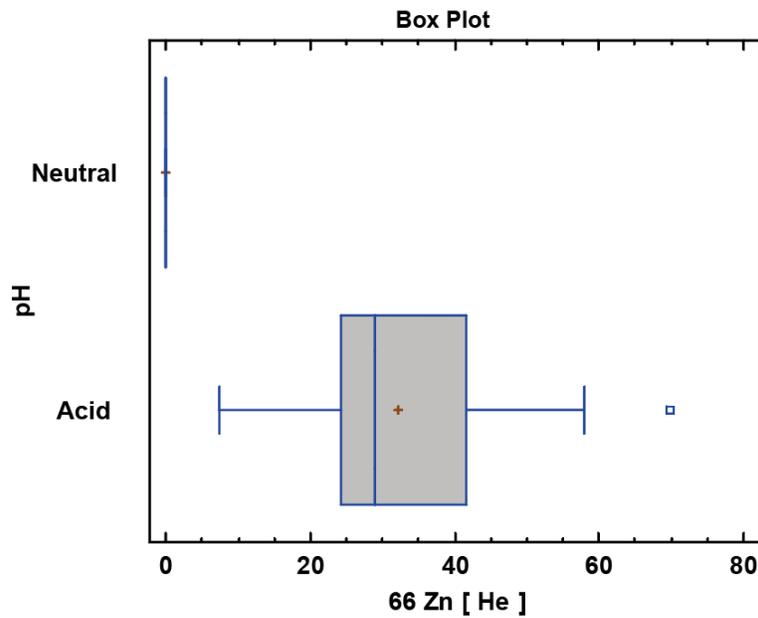
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between gorups	241.252	1	241.252	16.46	0.0005
Within groups	322.481	22	14.6582		
Total (Corr.)	563.733	23			

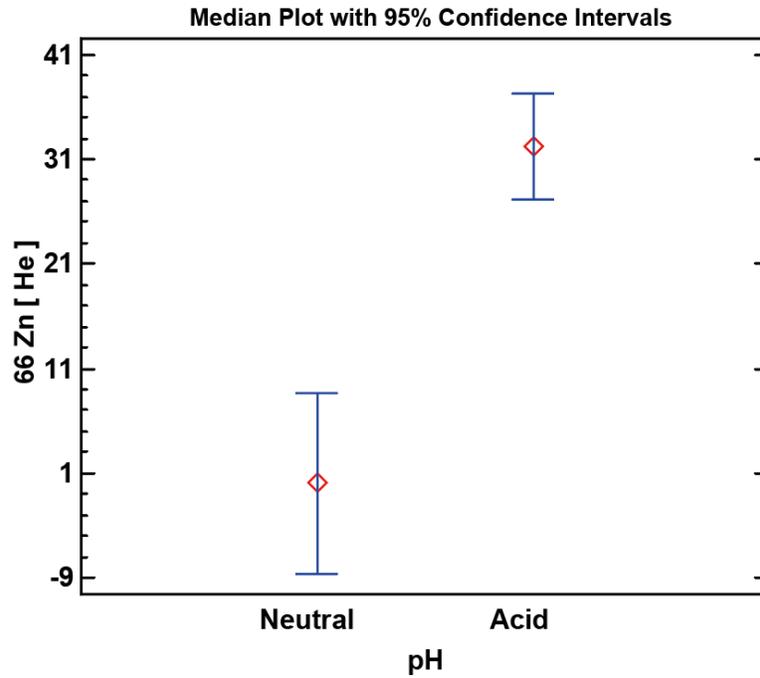




**ANOVA Table for <sup>66</sup>Zn [ He ] by pH**

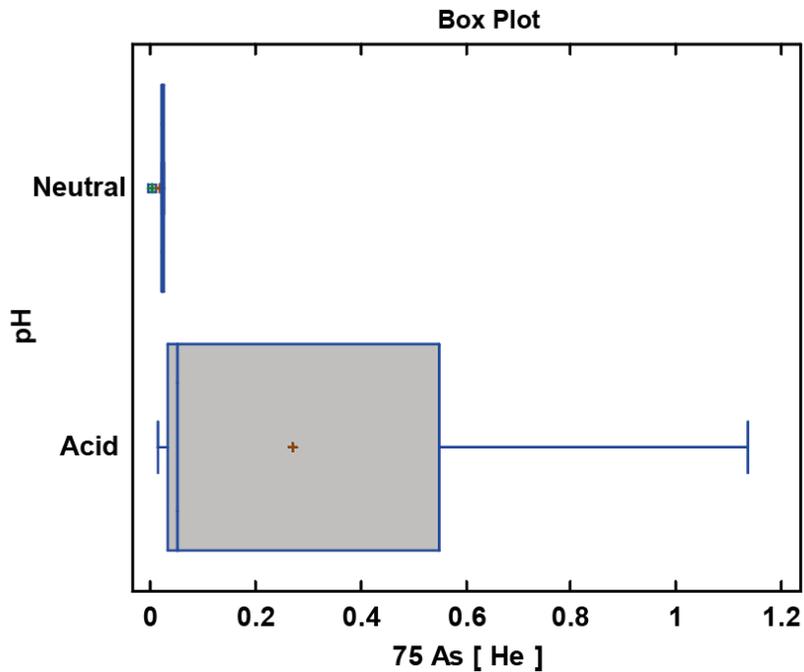
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between gorups	4651.4	1	4651.4	21.96	0.0001
Within groups	4660.69	22	211.85		
Total (Corr.)	9312.09	23			

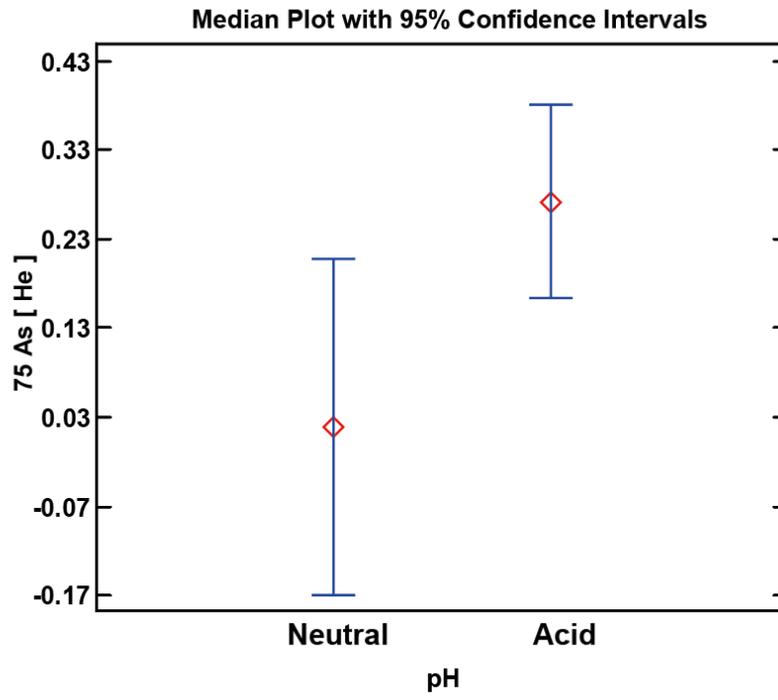




**ANOVA Table for 75 As [ He ] by pH**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between gorups	0.286827	1	0.286827	2.90	0.1029
Within groups	2.17865	22	0.0990294		
Total (Corr.)	2.46547	23			





## Anexo 9. Análisis de Partes Interesadas

**Tabla 9.1. Clasificación de Partes Interesadas de Milluni basada en atributos y escalas**

Parte Interesadas	Poder	Legitimidad	Urgencia	Proximidad	Escala final	Clasificación	Intervención
<b>MMAyA</b>	5	4	3	2.5	4	Definitivo	Colaborativo
<b>MMM</b>	3	3.5	3	2.5	3	Expectante	Pensamiento
<b>VRHR</b>	4.5	3.5	3.5	3	4	Definitivo	Colaborativo
<b>VAPSB</b>	4	3	3.5	3	3	Expectante	Pensamiento
<b>VMABCCGDF</b>	4	3	3	2.5	3	Expectante	Pensamiento
<b>AAPS</b>	4	3.5	3.5	3	3.5	Definitivo	Colaborativo
<b>ALP</b>	4	3	3	3	3	Definitivo	Colaborativo
<b>GADLP</b>	4	4	3	3	3.5	Definitivo	Colaborativo
<b>UGCK</b>	4	4	3.5	4	4	Definitivo	Colaborativo
<b>PDCKyLMT</b>	4	3	3	4	3.5	Definitivo	Colaborativo
<b>EPSAS</b>	4	3	3	4	3.5	Definitivo	Colaborativo
<b>SIB</b>	1	2	1	1	1	Latente	Conocimiento
<b>FEJUVE</b>	4	3.5	3	3.5	3.5	Definitivo	Colaborativo
<b>UMSA</b>	1	3	2	3	2	Latente	Conocimiento
<b>UCB</b>	1	3	2	3	2	Latente	Conocimiento
<b>UPEA</b>	1	3	2	3	2	Latente	Conocimiento
<b>GAMLP</b>	3.5	3.5	3	4	3.5	Definitivo	Colaborativo
<b>GAMEA</b>	3.5	3.5	3	4	3.5	Definitivo	Colaborativo
<b>GAML</b>	3.5	3.5	3	4	3.5	Definitivo	Colaborativo
<b>Cooperativas mineras</b>	3	3	3.	5	3.5	Definitivo	Colaborativo
<b>Comunidades campesinas</b>	3	3	3	5	3.5	Definitivo	Colaborativo
<b>Directivas Barriales</b>	3	3	3	5	3.5	Definitivo	Colaborativo
<b>ONGs</b>	1	2	2	2.5	2	Latente	Conocimiento
<b>OINT</b>	1	2	2	1	1.5	Latente	Conocimiento

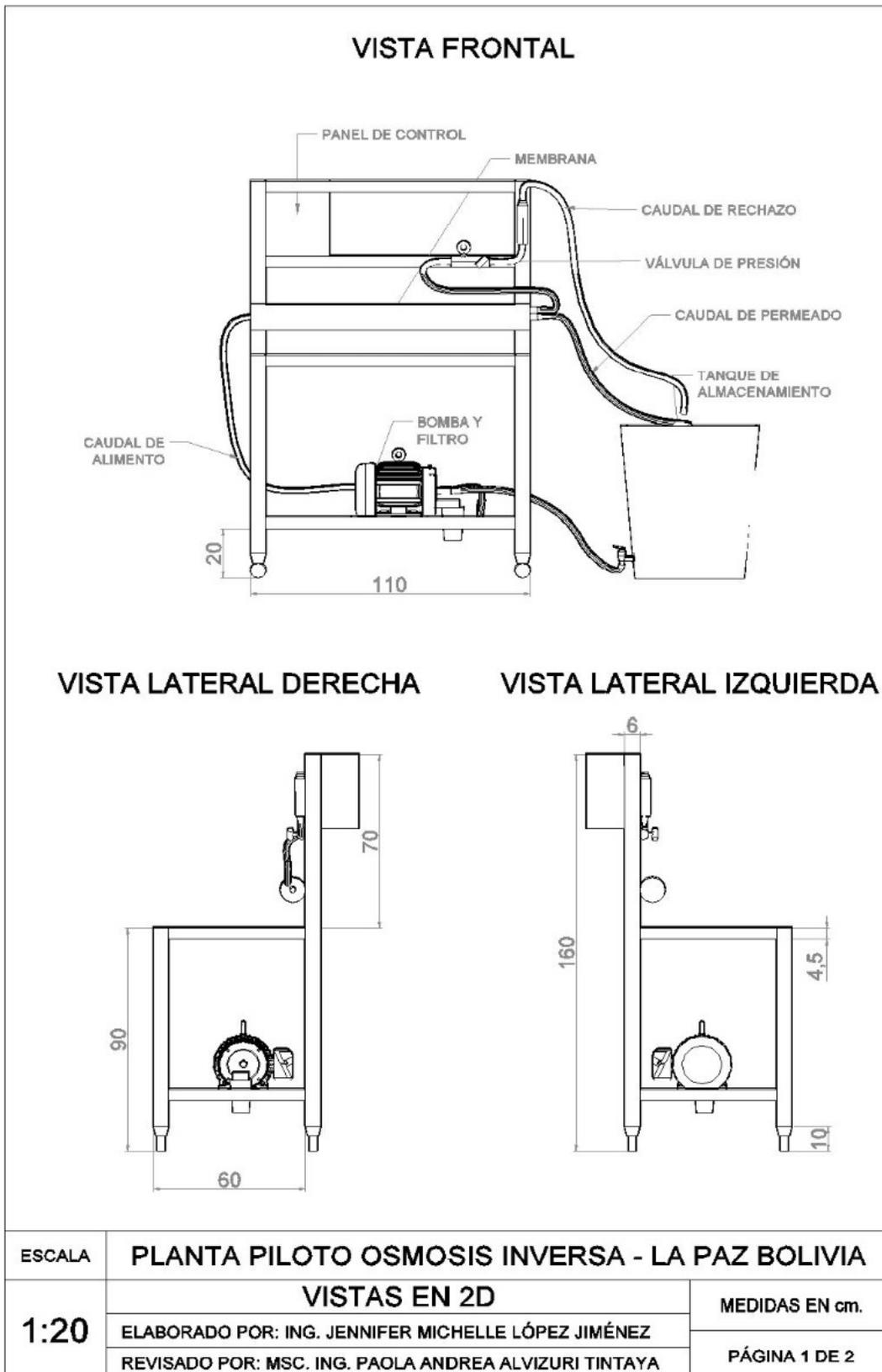
Fuente: Elaboración propia, 2021.

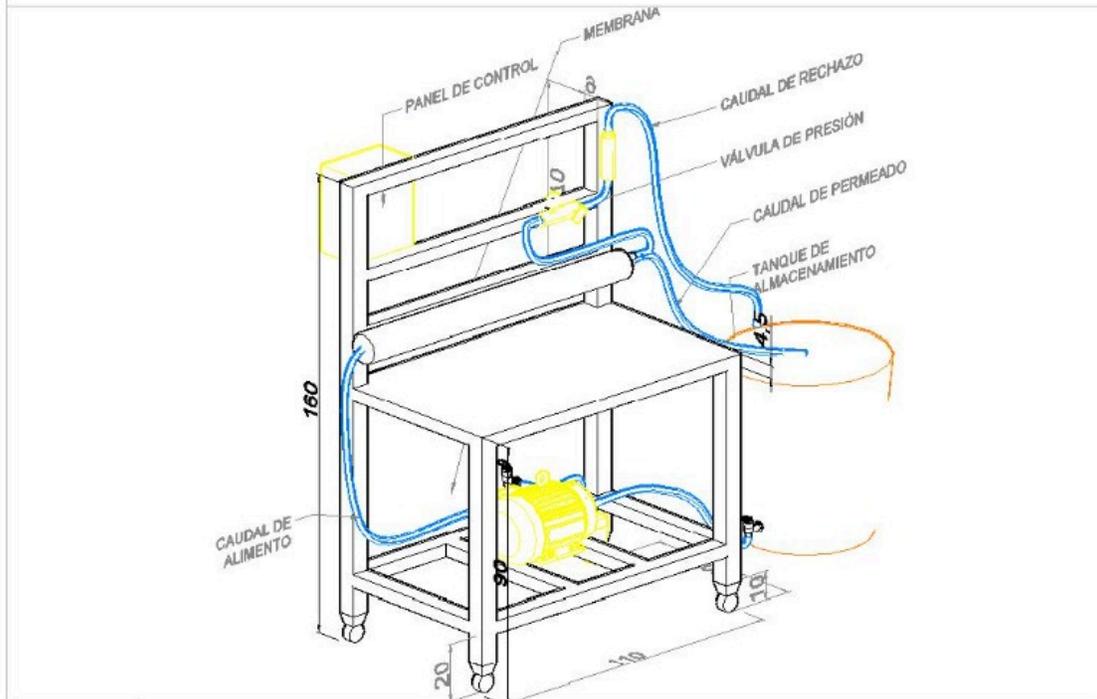
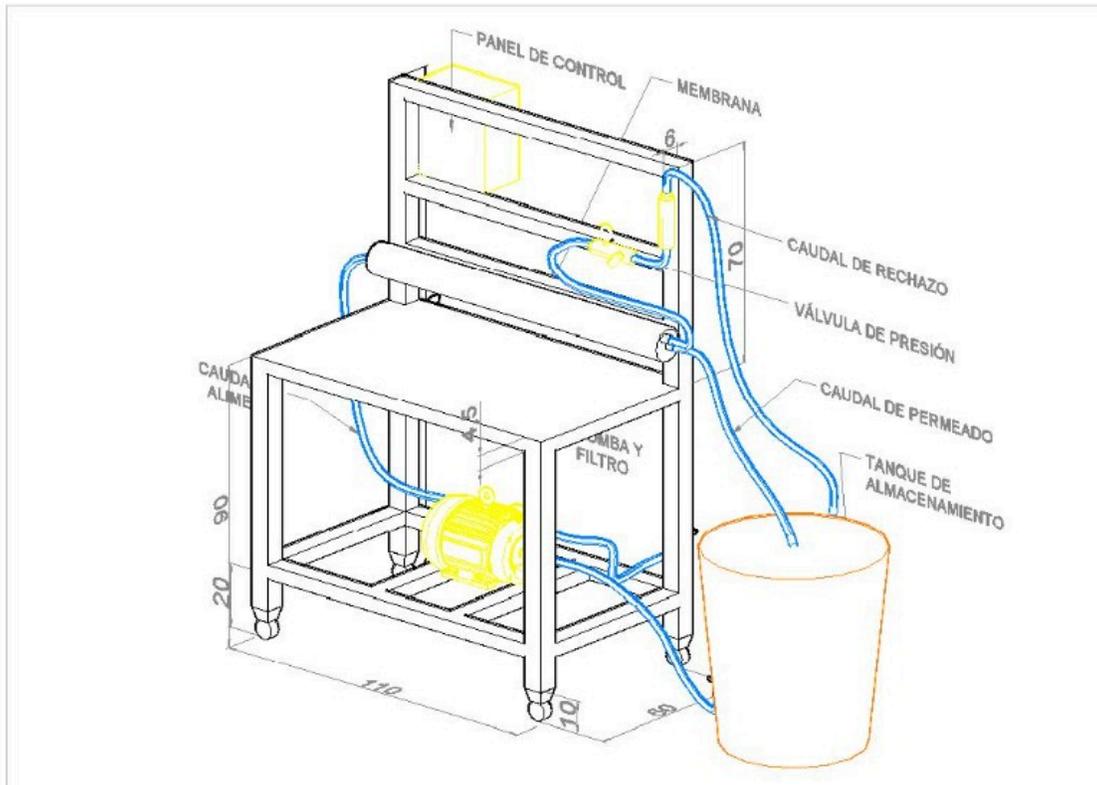
**Tabla 9.2. Interés-Influencia y relación entre las Partes Interesadas de Milluni**

Parte Interesadas	Interés	Influencia en el uso del agua	Percepción y acercamiento al proyecto	Relación clave con otras partes interesadas	Cargos de contacto
<b>MMAyA</b>	Medio	Alto	Medio	MMM-VH's	Ministro
<b>MMM</b>	Medio	Medio	Bajo	MMAyA-VH's	Ministro
<b>VRHR</b>	Medio	Alto	Medio	EPSAS-GADLP-GM's	Vice Ministro
<b>VAPSB</b>	Medio	Alto	Medio	EPSAS-GADLP-GM's	Vice Ministro
<b>VMABCCGDF</b>	Medio	Medio	Bajo	EPSAS-GADLP-GM's	Vice Ministro
<b>AAPS</b>	Medio	Alto	Medio	MMAyA-VH's-GADLP-GM's	Director
<b>ALP</b>	Medio	Medio	Bajo	MMAyA-VH's-GADLP-GM's	Director
<b>GADLP</b>	Alto	Alto	Medio	EPSAS-UGCK-PDCKyLMT	Gobernador
<b>UGCK</b>	Alto	Alto	Alto	VH's-GADLP-GM's-PDCKyLMT	Director
<b>PDCKyLMT</b>	Alto	Alto	Alto	VH's-GADLP-GM's-UGCK	Director
<b>EPSAS</b>	Medio	Medio	Alto	VH's-GADLP-GM's-UGCK	Gerente
<b>SIB</b>	Bajo	Bajo	Bajo	VH's-GADLP-GM's	Director
<b>FEJUVE</b>	High	Medio	Alto	VH's-GADLP-GM's-UGCK	Presidente
<b>UMSA</b>	Medio	Bajo	Medio	UGCK-PDCKyLMT	Rector
<b>UCB</b>	Medio	Bajo	Medio	UGCK-PDCKyLMT	Rector
<b>UPEA</b>	Medio	Bajo	Medio	UGCK-PDCKyLMT	Rector
<b>GAMLP</b>	Alto	Medio	Medio	UGCK-PDCKyLMT	Alcalde
<b>GAMEA</b>	Alto	Medio	Medio	UGCK-PDCKyLMT	Alcalde
<b>GAML</b>	Alto	Medio	Medio	UGCK-PDCKyLMT	Alcalde
<b>Coperativas mineras</b>	Bajo	Medio	Medio	UGCK-PDCKyLMT	Representante legal
<b>Comunidades Campesinas</b>	Bajo	Alto	Alto	UGCK-PDCKyLMT	Presidente
<b>Directivas Barriales</b>	Bajo	Alto	Alto	UGCK-PDCKyLMT	Presidente
<b>ONGs</b>	Alto	Bajo	Medio	VH's-UGCK-PDCKyLMT	Gerente
<b>OINT</b>	Alto	Bajo	Medio	VH's-UGCK-PDCKyLMT	Director

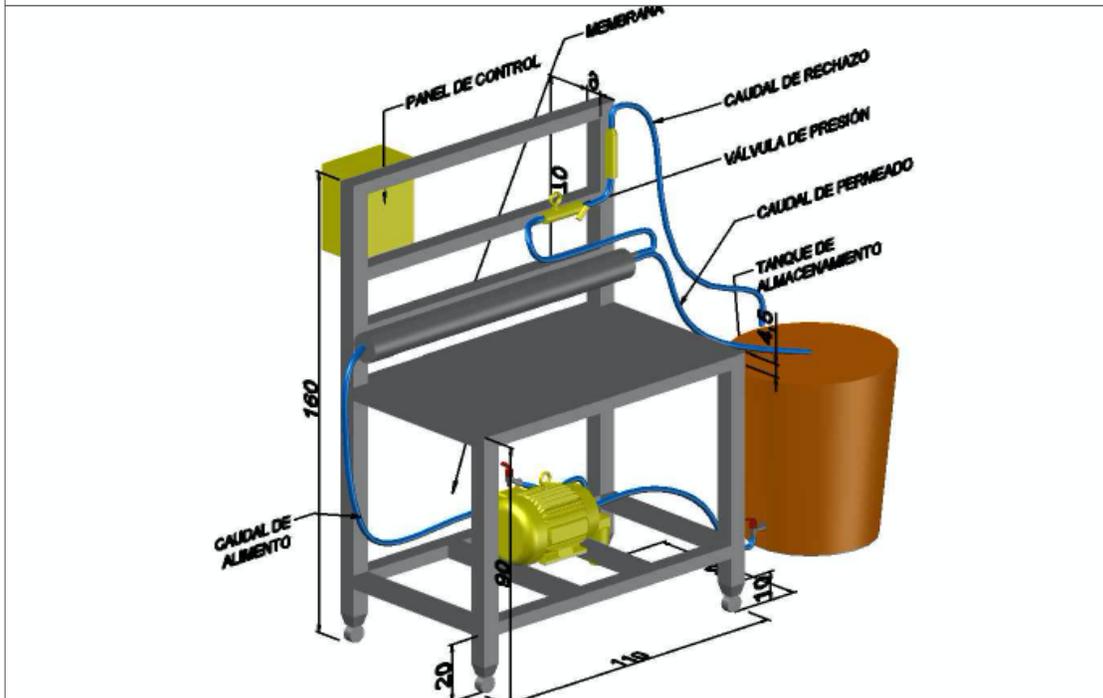
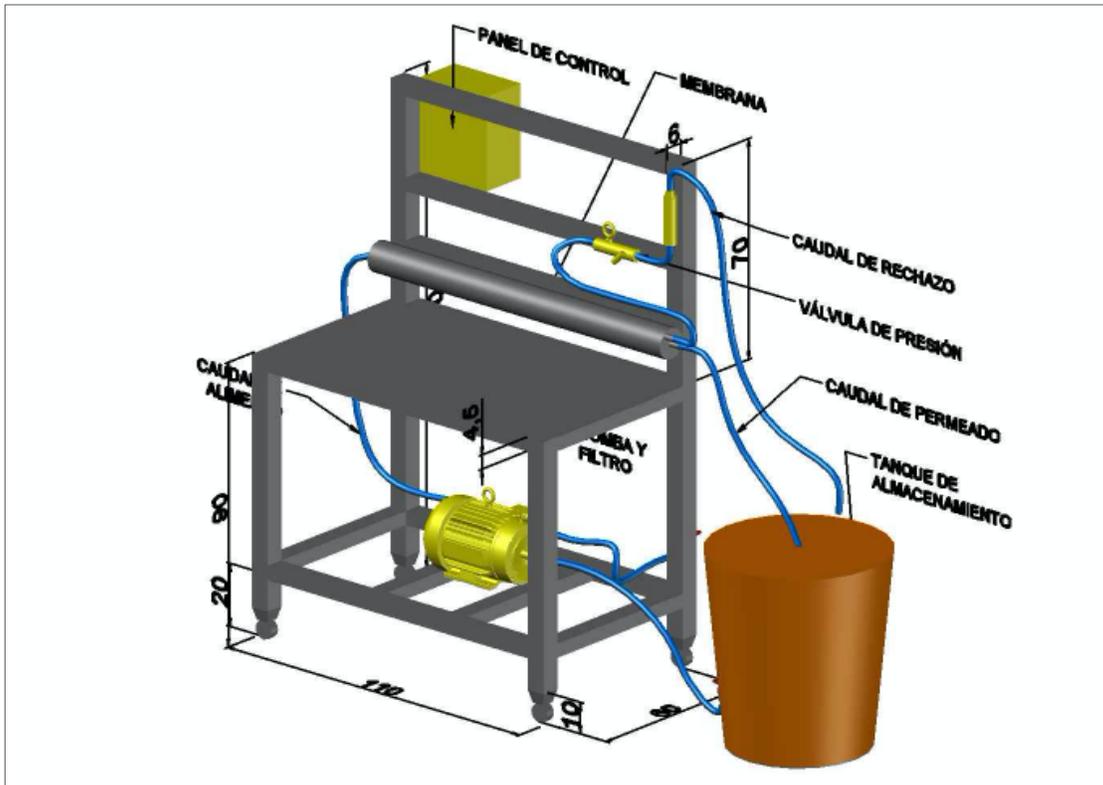
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Anexo 10. Vistas 2D y 3D de la planta piloto de OI





ESCALA	<b>PLANTA PILOTO OSMOSIS INVERSA - LA PAZ BOLIVIA</b>	
<b>1:20</b>	<b>VISTAS EN 3D</b>	
	ELABORADO POR: ING. JENNIFER MICHELLE LÓPEZ JIMÉNEZ	MEDIDAS EN cm.
	REVISADO POR: MSC. ING. PAOLA ANDREA ALVIZURI TINTAYA	PÁGINA 2 DE 2



ESCALA	PLANTA PILOTO OSMOSIS INVERSA - LA PAZ BOLIVIA	
1:20	VISTAS EN 3D	
	ELABORADO POR: ING. JENNIFER MICHELLE LÓPEZ JIMÉNEZ	MEDIDAS EN cm.
	REVISADO POR: MSC. ING. PAOLA ANDREA ALVIZURI TINTAYA	PÁGINA 2 DE 2

## Anexo 11. Protocolo de limpieza del módulo de membrana

Lora, et al. (2002) indica que como norma general se considera que una membrana está sucia y debe pararse el proceso de separación para efectuar el protocolo de limpieza cuando se produce alguna de las siguientes condiciones:

- Disminución del flujo de permeado en un 10-15%
- Aumento de la concentración de sal en el permeado en un 10-15%
- Aumento de la pérdida de carga en el tubo de presión en un 15-20%

Para esta investigación se tomó la permeabilidad como parámetro de control de ensuciamiento. Siguiendo con los criterios de evaluación del ensuciamiento de las membranas se aplicó una limpieza suave después de finalizar cada ensayo, el protocolo para esto se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 11.1. Pasos protocolo de limpieza

Nº Pasos	Detalle	Medición y análisis
1	Enjuague con agua destilada durante 30 minutos a 4 bares de presión	Se mide la permeabilidad del agua. Si la recuperación de la permeabilidad al agua es del orden del 95% se termina la limpieza y se puede comenzar el próximo ensayo, si no se debe continuar con el paso 2.
2	Limpieza con ácido débil, se usó ácido cítrico al 0.5% en peso. durante unos 30 minutos	No se realiza ninguna medición y se continua con el paso 3.
3	Enjuague con agua destilada durante 30 minutos a 4 bares de presión, para eliminar los restos del ácido del paso 2	Se mide la permeabilidad del agua. Si la recuperación de la permeabilidad al agua es del orden del 95% se termina la limpieza y se puede continuar con el siguiente ensayo, y si no se repite el ciclo de limpieza con ácido débil.

Elaborado en base a Fritzmann et al., (2007), García-Fayos et al. (2014), Ruiz et al. (2016,).

Si a pesar de realizar los tres pasos del protocolo de limpieza la permeabilidad no recobraba las condiciones buscadas se tendría que dejar la disolución en el interior del módulo de membrana durante 1-15 horas, esto variaría en función del tipo y grado de ensuciamiento (Fritzmann et al., 2007).

## Anexo 12. Datos de la parte experimental con la planta piloto de OI

Tabla 12.1. Datos de la experimentación.

Concentraciones (mol/m <sup>3</sup> )	Presiones (bar)	Presiones (Pa)	Flux medio (con corrección de temperatura) (l/ hr* m <sup>2</sup> )	Flux medio (con corrección de temperatura) (m <sup>3</sup> /s* m <sup>2</sup> )	Arsénico			Conductividad (μs/cm)		
					Cf (mg/l)	Cp (mg/l)	R1 (%)	Cf (μs/cm)	Cp (μs/cm)	R2 (%)
Baja	5	5,00E+05	2,93E+01	8,1E-06	0,01	0,00018659	98,637814	349	2,23	99,36103152
	7,5	7,50E+05	4,18E+01	1,2E-05	0,01	0,00014034	98,6244956	353	2,3	99,34844193
	10	1,00E+06	5,25E+01	1,5E-05	0,01	0,00020230	97,6091484	348	2,19	99,37068966
Media	5	5,00E+05	2,58E+01	7,2E-06	0,05	0,00136926	96,7602665	1783	12,83	99,28042625
	7,5	7,50E+05	3,38E+01	9,4E-06	0,05	0,00132351	96,5004939	1787	12,84	99,28147734
	10	1,00E+06	4,66E+01	1,3E-05	0,05	0,00122713	96,1397222	1789	7,24	99,59530464
Alta	5	5,00E+05	2,18E+01	6,1E-06	0,1	0,00350366	95,2679959	3520	31,2	99,11363636
	7,5	7,50E+05	3,10E+01	8,6E-06	0,1	0,00333725	95,3239253	3520	28,4	99,19318182
	10	1,00E+06	3,69E+01	1,0E-05	0,1	0,00356973	94,1341712	3525	30,8	99,12624113

## Anexo 13. Análisis estadístico completo de los resultados experimentales

## Index

12.1. Variable de salida R1

12.2. Variable de salida R2

12.3. Variable de salida Flux

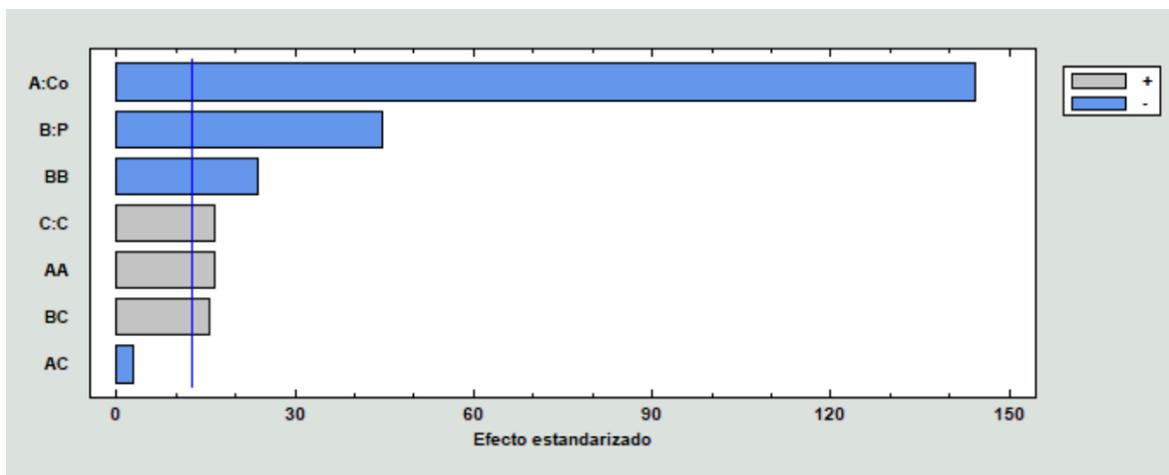
## 12.1. Variable de salida R1

En la evaluación de efectos simples se observa el diagrama de Pareto (Figura 10.1), el cual exponen todos los efectos simples, componentes cuadráticos e interacciones que fueron significativos para el R1, es decir obtuvieron un  $p < 0,05$ , los cuales se presentan en la Tabla 10.1.

Tabla 12.1. Análisis de Varianza para R1

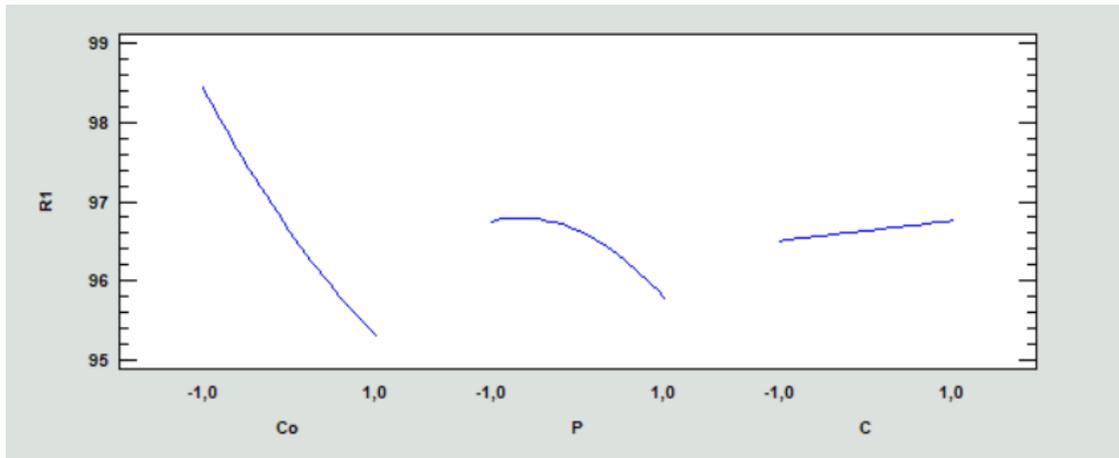
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Co	7,41041	1	7,41041	20841,77	0,0044
B:P	0,710533	1	0,710533	1998,37	0,0142
C:C	0,0962667	1	0,0962667	270,75	0,0386
AA	0,0950042	1	0,0950042	267,20	0,0389
AC	0,00281667	1	0,00281667	7,92	0,2173
BB	0,201667	1	0,201667	567,19	0,0267
BC	0,0864	1	0,0864	243,00	0,0408
Error total	0,000355556	1	0,000355556		
Total (corr.)	18,9988	8			

Figura 12.1. Diagrama de Pareto para R1



De la figura anterior se observa que para R1 el efecto simple del factor concentración (Co) es negativo, lo cual quiere decir que cuanto más alta es la concentración más bajo es el porcentaje de remoción teóricamente. Esto se corrobora, en la Figura 10.2 donde se muestra que existe una caída en la respuesta R1 con concentraciones muy altas y que el punto óptimo se encontraría en el rango bajo.

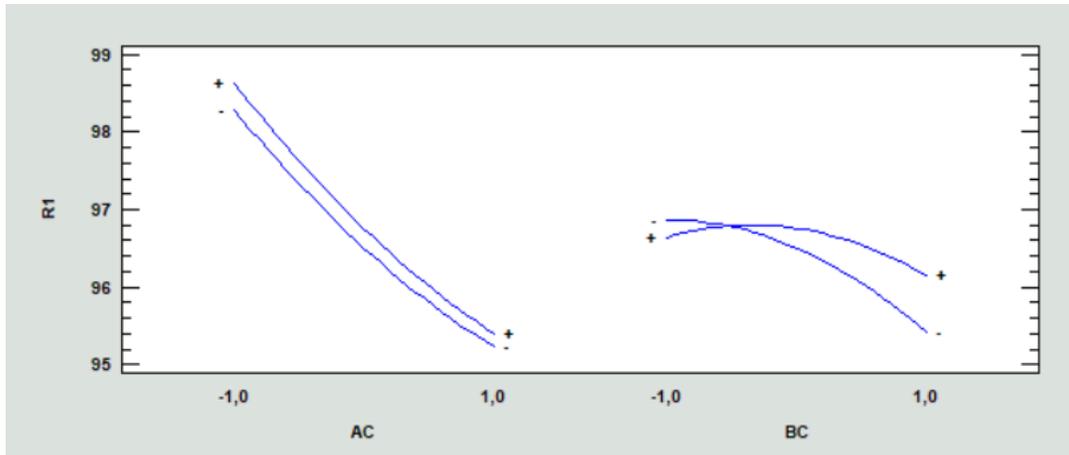
Figura 12.2. Efectos Principales para R1



Para maximizar el R1 se tiene dos consideraciones. Primero, para el factor caudal (C) se puede dejar de lado el nivel bajo y solo trabajar con niveles medios y altos, ya que R1 no se vería afectada al prescindir del nivel bajo. Segundo, para el factor presión (P) se puede prescindir del nivel alto y solo trabajar con los niveles bajos y medios. Específicamente para el factor presión el trabajar con una presión baja o media significa un ahorro energético y esto se alcanzaría sin disminuir la eficiencia de remoción en 0.05 %.

Para el análisis de interacciones se presenta la Figura 10.3.

Figura 12.3. Interacciones para R1



De la figura anterior se puede observar que, para la interacción AC (concentración - caudal) cuando la concentración y el caudal aumentan existe una caída en la respuesta R1, esta caída no desciende del 95%. Un comportamiento similar se observa en la interacción BC (presión - caudal), por lo tanto, trabajar con un caudal en el rango bajo - medio y una presión baja sería lo óptimo.

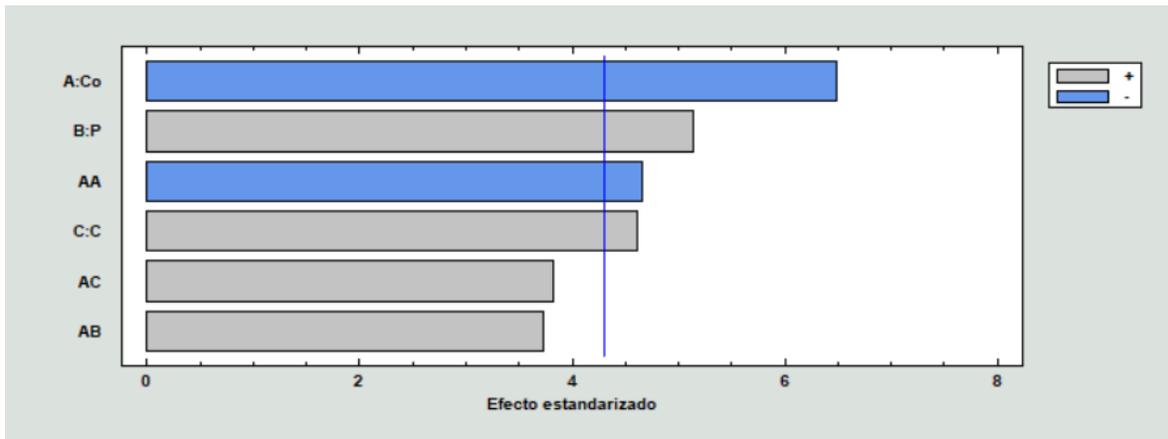
## 12.2. Variable de salida R2

En la Tabla 2 se exponen todos los efectos simples, componentes cuadráticos e interacciones que fueron significativos para el R1, es decir obtuvieron un  $p < 0,05$ .

Tabla 12.2. Análisis de Varianza para R2

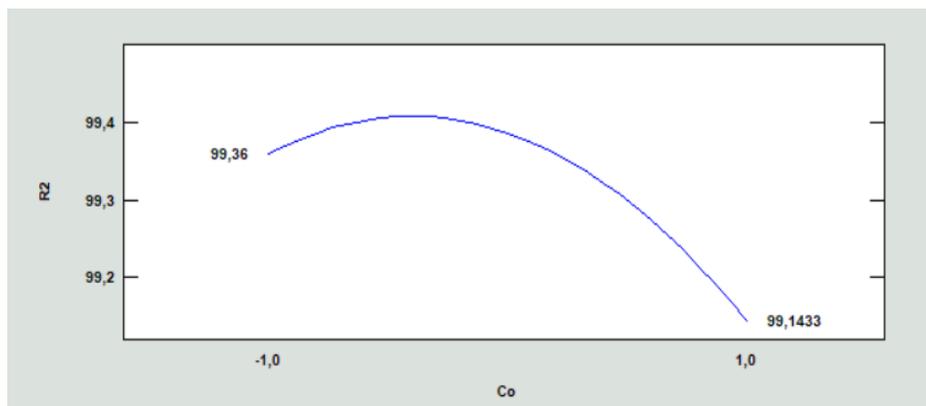
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Co	0,0704167	1	0,0704167	42,01	0,0230
B:P	0,0442032	1	0,0442032	26,37	0,0359
C:C	0,0356698	1	0,0356698	21,28	0,0439
AA	0,03645	1	0,03645	21,75	0,0430
AB	0,0232576	1	0,0232576	13,88	0,0651
AC	0,0245376	1	0,0245376	14,64	0,0620
Error total	0,00335238	2	0,00167619		
Total (corr.)	0,1788	8			

Figura 12.4. Diagrama de Pareto para R2



En el diagrama de Pareto se ve que, para R2 el efecto simple del factor concentración (Co) es negativo, lo cual quiere decir que cuanto más alta es la concentración más baja es el porcentaje de remoción de la conductividad, en este caso R2. Esto puede corroborarse en la Figura 10.5.

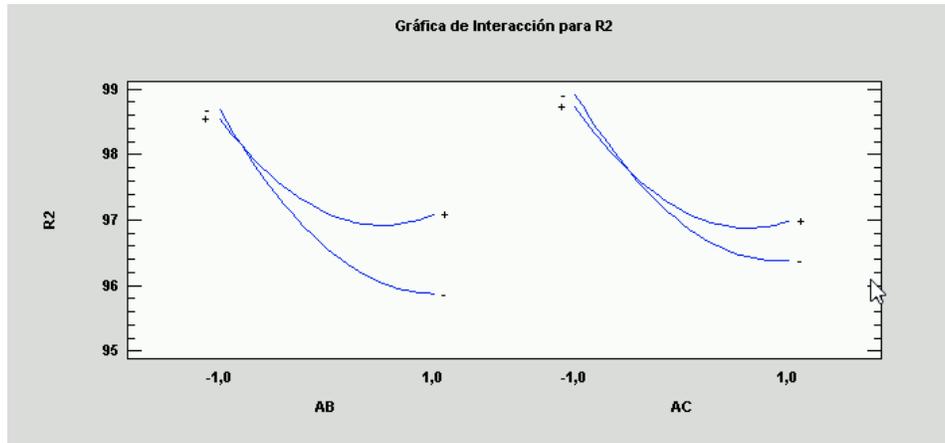
Figura 12.5. Efectos Principales para R2



Para el análisis de interacciones se presenta la Figura 10.6. se puede observar que, para la interacción AB (concentración - presión) cuando la concentración aumenta existe una caída en la respuesta R2, pero existe una menor caída a presiones bajas que en presiones altas. Con lo visto anteriormente, una presión baja -alta seguiría siendo una buena opción de trabajo que no afectaría a la respuesta. Un comportamiento similar se observa en la interacción AC

(concentración - caudal), por lo tanto, trabajar con un caudal en el rango bajo-medio sería lo óptimo.

Figura 12.6. Interacciones para R2



### 12.3. Variable del Flux

La Tabla 10.3 expone todos los efectos simples, componentes cuadráticos e interacciones que fueron significativos para el R1, es decir obtuvieron un  $p < 0,05$ .

Tabla 12.3. Análisis de Varianza para FLUX

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Co	49,5237	1	49,5237	76,16	0,0129
B:P	241,086	1	241,086	370,78	0,0027
AA	2,38768	1	2,38768	3,67	0,1954
AB	20,394	1	20,394	31,36	0,0304
AC	2,33586	1	2,33586	3,59	0,1985
BC	5,7772	1	5,7772	8,89	0,0965
Error total	1,30044	2	0,650219		
Total (corr.)	796,795	8			

Continuando con la evaluación de efectos simples se observa el diagrama de Pareto en la Figura 10.7. Se observa que para FLUX el efecto simple del factor presión (P) es positivo, lo cual quiere decir que cuanto más alta es la presión más alto es el FLUX. Esto también puede observarse en la Figura 10.8.

Figura 12.7. Diagrama de Pareto para FLUX

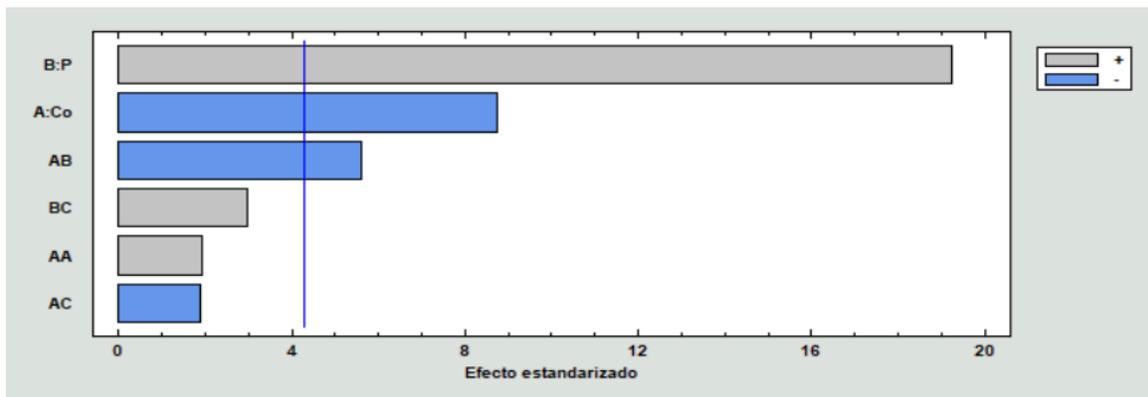
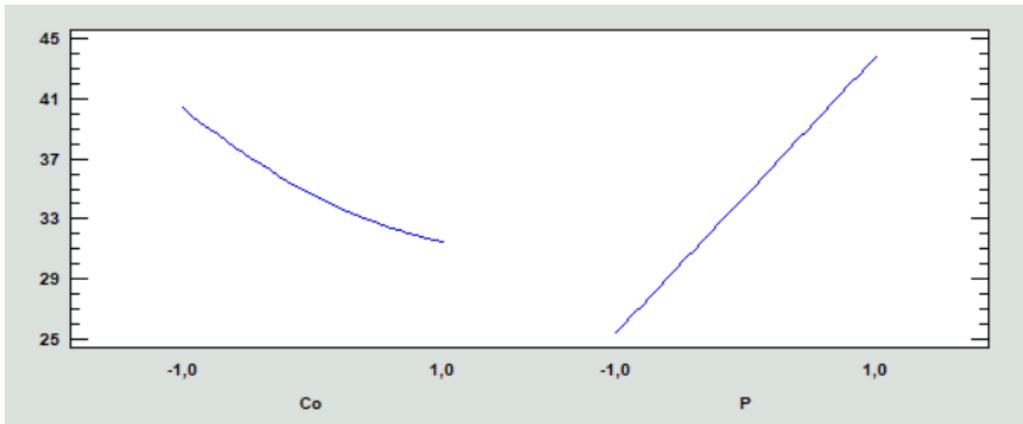


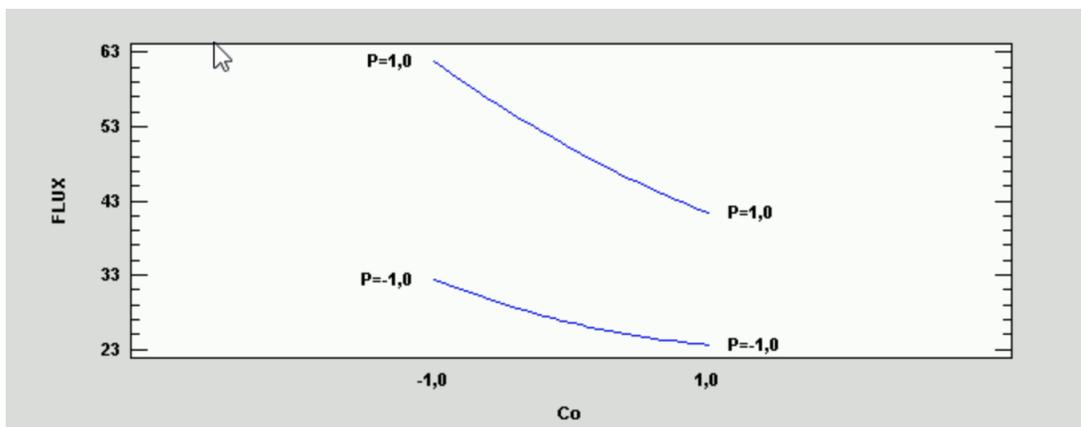
Figura 12.8. Efectos Principales para FLUX



De la figura anterior, por un lado se denota que, el factor concentración (Co) se podría trabajar en el rango bajo- medio para hallar el punto óptimo de la respuesta FLUX. Por otro lado, en la presión (P) el rango óptimo de operación sería medio- alto, considerando maximizar el FLUX. Específicamente para el factor presión el trabajar con una presión media significa un ahorro energético y esto se alcanzaría sin disminuir el FLUX.

Para el análisis de interacciones se presenta la Figura 10.9. Observando la interacción Concentración - Presión se puede decir que, cuando la concentración aumenta existe una disminución en la respuesta “FLUX”, tanto para presiones altas como bajas. Sin embargo, existe una menor caída del Flux a presiones bajas.

Figura 12.9. Interacciones para FLUX



## Anexo 14. Scripts Matlab

```

%ARSENICO (As) - CONCENTRACION BAJA
%CALCULO DE LOS PARAMENTROS LP Y k DEL ARSENICO PARA LA CONCENTRACION
BAJA de
%la sal de metal+NaCl
clear all
clc
load PBBAJOFAT
dp = PBBAJOFAT(:,3);
R = PBBAJOFAT(:,4);
T = PBBAJOFAT(:,5);
Cf = PBBAJOFAT(:,6);
Cp = PBBAJOFAT(:,7);
Jv = PBBAJOFAT(:,8);
FaT = PBBAJOFAT(:,10);
S=0.99;
x1 = dp.*FaT;
x2 = S.*R.*T.*(Cf-Cp).*FaT;
x3 = Jv;
X = [x1, x2, x3];
Y = x3;
modelfun = @(b,x) (b(1)*x(:,1) - b(1)*x(:,2).*exp(x(:,3)/b(2)));
beta0 = [0.001;0.00001];%%
beta = nlinfit(X,Y,modelfun,beta0);
format long
disp(beta)
%ARSENICO (As) - CONCENTRACION BAJA
%CALCULO DEL Jv (TEORICO) Y GRAFICAS COMPARATIVAS ENRE EL Jv(Teórico) y
el
%Jv(experimental)PARA EL ARSENICO EN LA CONCENTRACION BAJA de metal+NaCl
clear all
clc
load PBBAJOFAT
t = PBBAJOFAT(:,2);
dp = PBBAJOFAT(:,3);
R = PBBAJOFAT(:,4);
T = PBBAJOFAT(:,5);
Cf = PBBAJOFAT(:,6);

```

```
Cp = PBBAJOFAT(:,7);  
Jv = PBBAJOFAT(:,8);  
FaT = PBBAJOFAT(:,10);  
% probando  
Lp =0.000000000017218;  
S =0.9935;  
k =0.0000056115205;  
x=t;  
y = Lp*(dp.*FaT-S.*FaT.*R.*T.*(Cf-Cp).*exp(Jv/k));  
plot(x,y,'r'), hold  
plot(x,Jv, 'b')  
legend('Jv Theoretical', 'Jv Experimental')
```

```

%ARSENICO (AS) - CONCENTRACION MEDIA
%CALCULO DE LOS PARAMENTROS LP Y k DEL ARSENICO PARA LA CONCENTRACION
MEDIA de
%la sal de metal+NaCl
clear all
clc
load PBMEDIOFAT
dp = PBMEDIOFAT(:,3);
R = PBMEDIOFAT(:,4);
T = PBMEDIOFAT(:,5);
Cf = PBMEDIOFAT(:,6);
Cp = PBMEDIOFAT(:,7);
Jv = PBMEDIOFAT(:,8);
FaT = PBMEDIOFAT(:,10);
S=0.9917;
x1 = dp.*FaT;
x2 = S.*R.*T.*(Cf-Cp).*FaT;
x3 = Jv;
X = [x1, x2, x3];
Y = x3;
modelfun = @(b,x) (b(1)*x(:,1) - b(1)*x(:,2).*exp(x(:,3)/b(2)));
beta0 = [0.019;0.000003];%%%
beta = nlinfit(X,Y,modelfun,beta0);
format long
disp(beta)

%ARSENICO (As) - CONCENTRACION MEDIO
%CALCULO DEL Jv (TEORICO) Y GRAFICAS COMPARATIVAS ENTRE EL Jv(Teórico) y
el
%Jv(experimental)PARA EL ARSENICO EN LA CONCENTRACION MEDIA de metal+NaCl
clear all
clc
load PBMEDIOFAT
t = PBMEDIOFAT(:,2);
dp = PBMEDIOFAT(:,3);
R = PBMEDIOFAT(:,4);
T = PBMEDIOFAT(:,5);
Cf = PBMEDIOFAT(:,6);

```

```
Cp = PBMEDIOFAT(:,7);  
Jv = PBMEDIOFAT(:,8);  
FaT = PBMEDIOFAT(:,10);  
% probando  
Lp =0.000000000021166;  
S =0.9890;  
k =0.0000058315516460;  
x=t;  
y = Lp*(dp.*FaT-S.*FaT.*R.*T.*(Cf-Cp).*exp(Jv/k));  
plot(x,y,'r'), hold  
plot(x,Jv, 'b')  
legend('Jv Theoretical', 'Jv Experimental')
```

```

%ARSENICO (AS) - CONCENTRACION ALTA
%CALCULO DE LOS PARAMENTROS LP Y k DEL ARSENICO PARA LA CONCENTRACION
ALTA de
%la sal de metal+NaCl
clear all
clc
load PBALTOFAT
dp = PBALTOFAT(:,3);
R = PBALTOFAT(:,4);
T = PBALTOFAT(:,5);
Cf = PBALTOFAT(:,6);
Cp = PBALTOFAT(:,7);
Jv = PBALTOFAT(:,8);
FaT = PBALTOFAT(:,10);
S=0.9921;
x1 = dp.*FaT;
x2 = S.*R.*T.*(Cf-Cp).*FaT;
x3 = Jv;
X = [x1, x2, x3];
Y = x3;
modelfun = @(b,x) (b(1)*x(:,1) - b(1)*x(:,2).*exp(x(:,3)/b(2)));
beta0 = [0.00001;0.0000101];%%
beta = nlinfit(X,Y,modelfun,beta0);
format long
disp(beta)

%ARSENICO (As) - CONCENTRACION ALTA
%CALCULO DEL Jv (TEORICO) Y GRAFICAS COMPARATIVAS ENTRE EL Jv(Teórico) y
el
%Jv(experimental)PARA EL ARSENICO EN LA CONCENTRACION ALTA de metal+NaCl
clear all
clc
load PBALTOFAT
t = PBALTOFAT(:,2);
dp = PBALTOFAT(:,3);
R = PBALTOFAT(:,4);
T = PBALTOFAT(:,5);
Cf = PBALTOFAT(:,6);

```

```
Cp = PBALTOFAT(:,7);
Jv = PBALTOFAT(:,8);
FaT = PBALTOFAT(:,10);
% probando
Lp =0.000000000019043;
S =0.9912;
k =0.000007491296584;
y = Lp*(dp.*FaT-S.*FaT.*R.*T.*(Cf-Cp).*exp(Jv/k));
x=t;
plot(x,y,'r'), hold
plot(x,Jv, 'b')
legend('Jv Theoretical', 'Jv Experimental')
```

## Anexo 15. Experiencia docente - estudiantil: trabajo en una planta piloto de OI.

25<sup>th</sup> International Congress on Project Management and Engineering Alcoi,  
6th – 9th July 2021

### TEACHER- STUDENT EXPERIENCE: WORK IN A PILOT PLANT OF REVERSE OSMOSIS.

Alvizuri Tintaya, Paola Andrea <sup>(1)(2)</sup>; Ballivián Torrez, Luciana Grace <sup>(3)</sup>; Torregrosa López, Juan Ignacio <sup>(4)</sup>; Lo Iacono Ferreira, Vanesa Gladys <sup>(4)</sup>; Lora Gracia, Jaime <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup>Universitat Politècnica De València, <sup>(2)</sup> Centro de Investigación en Agua, Energía y Sostenibilidad, Universidad Católica Boliviana San Pablo, <sup>(3)</sup> Universidad Católica Boliviana San Pablo, <sup>(4)</sup> Universitat Politècnica De València.

Some Higher Education systems incorporate innovation in their training structure, prioritizing project based learning (PBL), reverse teaching or the Learning by Doing method. Knowing the good results of these methodologies, the Universidad Católica Boliviana San Pablo ventures into the application of the Learning by Doing methodology. This article exposes the work in a reverse osmosis pilot plant, where young undergraduate researchers from the Environmental Engineering Career are involved, seeking to complement their academic training. The development of the practices will be presented, as well as the evaluation of the experience of the teacher and the students who participated in the project.

Keywords: Learning;by;doing;reverse;osmosis

### EXPERIENCIA DOCENTE - ESTUDIANTIL: TRABAJO EN UNA PLANTA PILOTO DE ÓSMOSIS INVERSA.

Algunos sistemas de Educación Superior incorporan la innovación en su estructura formativa, priorizando el aprendizaje basado en proyectos (ABP), la docencia inversa o el método Aprender-Haciendo. Conociendo los buenos resultados de estas metodologías, la Universidad Católica Boliviana San Pablo incursiona en la aplicación de la metodología Aprender-Haciendo. Este artículo expone el trabajo en una planta piloto de ósmosis inversa, donde se involucra a jóvenes investigadores pre grado de la Carrera de Ingeniería Ambiental, buscando complementar su formación académica. Se presentará el desarrollo de las prácticas, como también la evaluación de la experiencia del docente y de las estudiantes que participaron en el proyecto.

Palabras claves: Aprender; haciendo; ósmosis; inversa

Correspondencia: Paola Andrea Alvarez Tintaya paoaltin@upvnet.upv.es

Agradecimientos: Los autores agradecen a la Universidad Católica Boliviana "San Pablo" - Unidad Académica de La Paz, por la financiación de la formación doctoral de su docente investigadora del Centro de Investigación en Agua, Energía y Sostenibilidad (CINAES) perteneciente a la Carrera de Ingeniería Ambiental de la UPV.



© 2021 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## **1. Introduction**

The European Higher Education Area (EHEA) introduces the change in conventional teaching processes towards active methodologies, through innovative strategies to evaluate the effort of students together with the knowledge acquired. With the aim of linking teachers and students during the training process (UMA, 2021). The teaching model is at a key moment of transition for change, the new academic organization must consider modalities beyond the simple theory and practice dichotomy and incorporate active methodologies (De Miguel, 2006).

We learn by interrelating action, theory and experience. What has been learned is consolidated, expanded and generalized through theory, which corresponds to accumulated knowledge that is not very efficient without action. Therefore, an active methodology is the process by which you learn by doing (Gamboa & Garcia, 2012). Among the active methodologies we can mention the methodology of Learning by Doing. This practice supposes the stake of knowledge in action, reflection in the action and by default it requires a reflection on the action. The Learning by Doing methodology is useful as a training for real professional practice, based on principles of analysis, reflection, planning and evaluation (Schön, 1992, Vargas & Rodriguez, 2012). With this methodology, group and individual works are promoted in which students have opportunities to generate their own knowledge and apply it (Águeda & Cruz, 2005, Rodriguez & Ramirez, 2014).

Within the Learning by Doing methodologies there is a subtype that is also gaining strength in its application, it is called Project Based Learning (PBL). When carrying out this methodology, a project is assigned, within which students must participate in both the theoretical and practical parts (Moreno, Pavon & Rincón, 2017). This teaching methodology focuses on students as protagonists of their own research-based learning (Bradley-Levine & Mosier 2014).

One of the main problems in Latin American higher education is that its focus is on the formation of theoretical skills and active methodologies are neglected (Aboites, 2010). There is a conventional structure in the study plans focused on passive teaching methods, which implies little attention to the practical part and with evaluation procedures aimed at measuring theoretical competences (Fernandez & Perez, 2016). In Bolivia, higher education has the need to reform conventional teaching-learning methodologies in order to address the challenges derived from innovation that active methodologies entail.

This work presents the results of the teaching-student experience based on the Learning by Doing methodology, through work in a Reverse Osmosis pilot plant. This study was carried out with students in the last semesters of the Environmental Engineering career at the Bolivian Catholic University in La Paz - Bolivia.

## **2. Goal**

Apply the Learning by Doing methodology, seeking those young undergraduate researchers from the Environmental Engineering Career at the Bolivian Catholic University "San Pablo" complement their academic training, and thus be able to cross the barrier from the theoretical to the practical.

## **3. Methodology**

In the nineteenth century, pragmatism establishes that "theories, experiences and any learning have value, if they are applicable to real life and ultimately, if they are practical" (Putnam, 1992). The methodology of Learning by Doing that will be implemented is based on learning against the approaches based on traditional teaching (Rodriguez & Ramirez, 2014). Therefore, this pedagogical methodology moves away from the didactic techniques based on memorization and approaches the techniques of knowing through experiences (Moerbeke, 1982, Wompner, 2007). Studies have denoted that 21st century learning is linked to teaching through experiences, this to improve critical thinking in professional education (Pamungkas, Widiastuti, & Suharno, 2020). Learning by Doing is the educational experience where more than knowledge, skills, abilities, attitudes and habits of thought and action are generated with the purpose of expanding the frontiers of knowledge and know-how (Herrera, 2005). Universities such as the Massachusetts Institute of Technology, North Carolina State University, and Aalborg University are implementing active learning methodologies. In the specific area of engineering education, Tecnológico de Monterrey had interesting results, such as: development of teamwork skills, creativity in problem solving, and increased analytical skills (Hernandez-de-Menéndez. Et al., 2019). The teacher-student experience presented in this study, oriented to work in a reverse osmosis pilot plant, was developed to achieve specific personal skills, which were abstracted from previous studies. These skills are observed in Table 1.

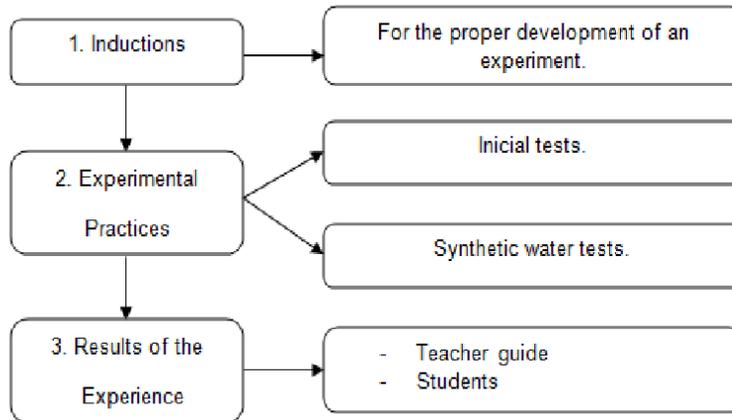
**Table 1. Specific Skills**

<b>Specific skills</b>	<b>Skill detail</b>	<b>Academic Study of Teaching - Learning</b>
Study in a self-taught way	People learn by themselves and are active during the construction of knowledge.	Shuell, 1986; Stern & Huber, 1997
Self-regulation	Create and perceive your own activities, evaluate the results of the activities and re-evaluate new activities yourself.	Kanfer, 1977
Construction of knowledge based on experience	Individual knowledge starts from a personal construction that is interpreted through perceptions or experiences, depending on their available knowledge or opinions.	Schön, 1991
Applicability of theoretical knowledge	The learning context offers or reflects real opportunities to experience and apply the knowledge acquired.	Jonassen, Mayes & McAleese, 1993
Group work ability	Learning is not an exclusively individual process, but a sociocultural interaction, since each one converts his internalized knowledge into a sequence of ideas to communicate them and vice versa, when he listens to ideas, opinions, and suggestions from others. The advantages of dealing with tasks and problems are experienced in teams willing to join forces to solve their tasks.	Wertsch, 1985; Vygotskij, 2002; Lave & Wenger, 1991.

Source: Own elaboration, 2021.

This study was structured in 3 phases, which are observed in Figure 1. In the first phase, inductions are developed for adequate experimental work. The second phase involves experimental work in a reverse osmosis pilot plant. Finally, in phase three, the results obtained are evaluated through surveys of students.

**Figure 1. Methodological diagram**



Source: Own elaboration, 2021.

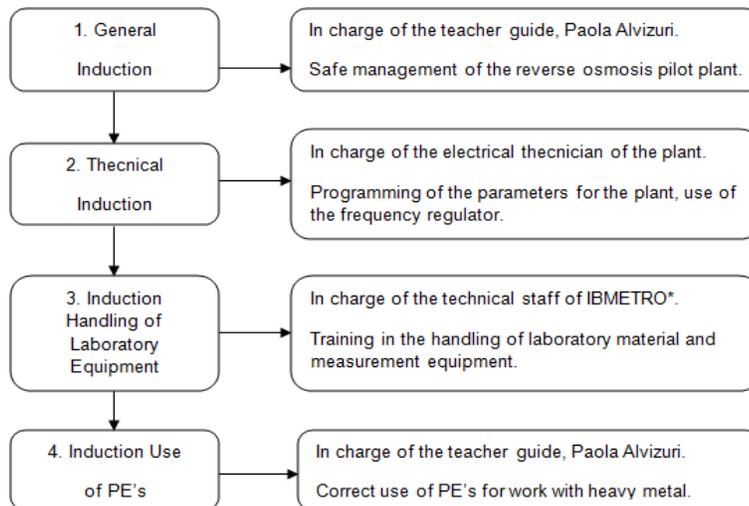
#### 4. Case study

The Bolivian Catholic University is always aligned with the process of continuous improvement, so it seeks to optimize its teaching-learning processes. The case study presented was proposed to translate the theoretical knowledge acquired by the students into practice. This complements the training of students with the acquisition of skills applicable to their professional performance. The steps that were followed in the experience of working with students in a pilot plant for reverse osmosis are detailed below.

##### 4.1. Induction for laboratory work and pilot plant management

To start with the experimental practices, different inductions were carried out, which are detailed in Figure 2. The inductions were carried out in a participatory workshop format by the project's teacher guide and personnel specialized in handling equipment.

**Figure 2. Induction's diagram**

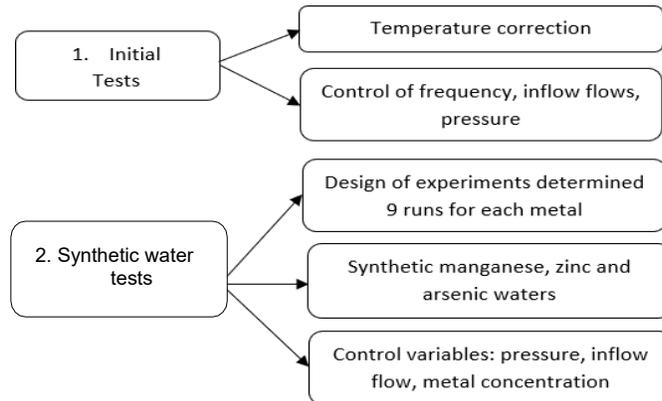


Source: Own elaboration, 2021.

## 4.2. Experimental practices

Figure 3 shows a diagram of the tests performed. The explanation of the objective of each of the tests is described in the following sections

Figure 3. Process diagram



Source: Own elaboration, 2021.

### 4.2.1. Initial tests

These tests were carried out to learn to control the different variables of the plant such as frequency, inflow flows and pressure. In addition, a temperature correction was made to standardize this variable and not have the need to work at a fixed temperature in the subsequent tests.

### 4.2.2. Synthetic water tests

These tests were carried out with synthetic manganese, zinc and arsenic waters. Nine runs were made for each metal. The number of runs was determined by means of a previously carried out design of experiments. For this, three control variables were taken (pressure, intake flow and metal concentration) and a response variable (percentage of removal of the metal ion).

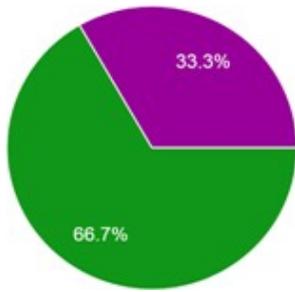
## 5. Results of the experience

The results of the experience will be presented below. In the first place, the student's perception of the performance of the leading teacher in the experience will be analyzed. Then, the competencies that students believe they have achieved through experience will be exposed.

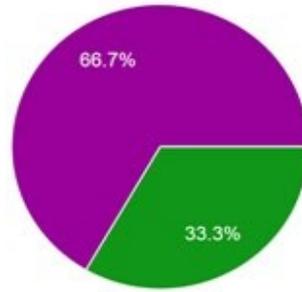
### 5.1. Results of the survey given to the students

The results of the survey that the students filled out anonymously to evaluate the guidance of the teacher in charge of the experience are presented below. The teaching evaluation instrument used is the official one from the Bolivian Catholic University "San Pablo". The survey is presented in the annex to this article.

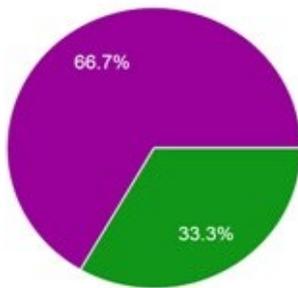
Figure 4. Results of the survey



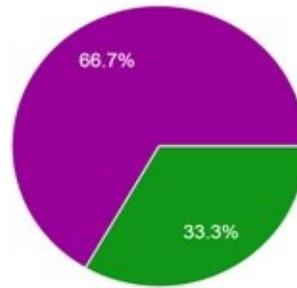
Question 1: Planning and organization conceptual of activities.



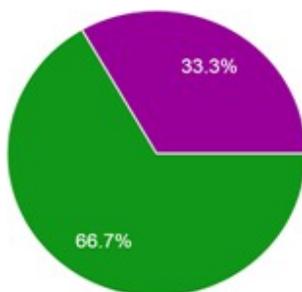
Question 2: Application of knowledge in the project.



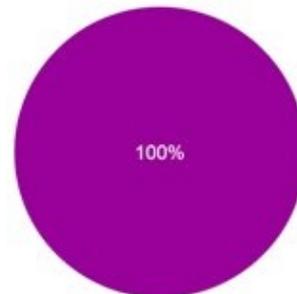
Question 3: Implementation of new spaces teaching strategies.



Question 4: Use of suitable didactic for the development of the project.



Question 5: Coherent teaching and inclusive and assessment system.



Question 6: Generation of a participatory climate.

● Bad ● Regular ● Good ● Very good ● Excellent

Source: Own elaboration, 2021.

Note: From questions 1 to 5 it is observed that the answers were very satisfactory, they were between "Very good" and "Excellent". It should be noted that the answer to question 6 shows that 100% consider that the climate generated during the project was excellent.

Observing the previous answers, it can be said that the appreciation of the students regarding the performance of the teacher guide in the experience was very good or even excellent. Also, the students were asked what specific personal skills they think they achieved through experience. The responses are shown in Table 2.

**Table 2. Specific skills developed**

<b>Specific Skills</b>	<b>Study in a self-taught way</b>	<b>Self-regulation</b>	<b>Construction of knowledge based on experience</b>	<b>Applicability of theoretical knowledge</b>	<b>Group work ability</b>
<b>Student 1</b>	X	X	X	X	X
<b>Student 2</b>		X	X	X	X
<b>Student 3</b>	X	X	X	X	X

Source: Own elaboration, 2021.

The favorable responses to the performance of the teacher guide and the different skills that the students consider to have achieved show us that the experience was developed successfully.

## **6. Discussion**

Previous studies denote those developing countries such as Bolivia require specialized training to meet the needs of the different emerging technological areas of the region (Lo Iacono, et al. 2018). In this sense, the implementation of technology management from undergraduate training is important. This type of experience linked to students, manages to reduce the gap between theory and practice. In addition to complementing the training of future engineers with useful practical skills for their future employment.

The implementation of active methodologies within a conventional teaching-learning format is always a challenge. But when you work with committed people, the result is always favorable. Students want to learn and it is the duty of the teacher to have the best strategies so that their training is complete and comprehensive.

Considering that many times the resources and equipment for experimentation and even space are limited in the University, forming a small group of 4 participants (3 students and 1 teaching guide) had favorable results. A greater number of students would have generated difficulties due to the economical limitation of having a single pilot plant, causing that not all the students could develop the full activities of the experience. In addition, due to the health emergency of Covid 19, restrictions for laboratory work arose, delimiting 4 people as the maximum capacity. Must stand out that working with a small group prioritizes personalized teaching in the experience, which enriches the training of students.

This experience gained attention and was published in the news of the Bolivian Catholic University "San Pablo". Demonstrating an innovation and an example to be followed by other academic departments.

## Figure 5. "Learning by Doing" Experience in Environmental Engineering

Source: Bolivian Catholic University "San Pablo", 2021.



Figure 5 shows the location where the tests were performed. This laboratory belongs to the Water, Energy and Sustainability Research Center (CINAES) of the Environmental Engineering Degree. The reverse osmosis plant was assembled within the doctoral project of the teacher guide Paola Alvizuri Ph.D.

## 7. Conclusions

The article presents the teacher-student experience at work in a reverse osmosis pilot plant, which complements the undergraduate training of the students involved. An active teaching-learning methodology was applied, "Learning by Doing". This methodology treats that the knowledge that a professional must acquire is achieved by interrelating theory, action, and experience.

Currently, higher education has had to accommodate to virtuality, due to the health emergency of COVID 19, this has caused that many practical skills are not fully achieved. Therefore, to adjust to the new normal, the implementation of short active experiences is the perfect complement that would reinforce the theoretical knowledge acquired in distance classes.

From the experience we can highlight the great interaction and co-responsibility achieved by the students and the teacher who participated in this project. With the results of the survey of the student body, we can conclude that the application of the Learning by Doing methodology, new for the students, was carried out in a successful manner. The responses regarding the assessment of the guide teacher and the competencies achieved are positive, so the three

participants were satisfied with the experience. Applying an active methodology, the training of the students is completed and above all it becomes more practical.

This experience showed that it is possible and favorable to change the conventional learning teaching methodology. If it is done in an organized and correct way, the barrier that exists between theory and practice is crossed. This enhances the learning experience for everyone involved. Finally, It is necessary to continue with the implementation of active methodologies in all areas, exploring other experiences that can continue to develop and strengthen the professional skills of students. For this to happen, the infrastructure and equipment limitations of the universities must be overcome.

If there are no space and equipment limitations, future studies should look to work with larger groups to see if the results remain positive. It should also be considered that the Learning by Doing methodology requires rigorous supervision and monitoring of the teacher guide, which is somewhat difficult in very large groups. This active methodology is also highly personalized, which could be a limitation in large groups.

## 8. Glossary

- **CINAES:** Water, Energy and Sustainability Research Center
- **IBMETRO:** Bolivian Institute of Meteorology.
- **PE's:** Protection equipment.
- **PBL:** Project Based Learning (PBL)

## 9. References

- Aboites, H. (2010). La educación superior latinoamericana y el proceso de Bolonia: de la comercialización al proyecto tuning de competencias. *Revista Cultura y Representaciones Sociales*.
- Beichner, R. Capítulo 29. Universidad Estatal de Carolina del Norte: Scale- Up. EDUCAUSE. <https://www.educause.edu/research-and-publications/books/learning-spaces/chapter-29-north-carolina-state-university-scale>
- Bradley-Levine, J. & Mosier, G. (2014). Literature Review on Project-Based Learning. University of Indianapolis Center of Excellence in Leadership of Learning.
- Chiyón, I., Palma, M., & Cazorla, A. (2011). Principios, objetivos e instrumentos de la educación superior universitaria en el Perú, para la convergencia Europea.
- Corral, M., Vergara, E.P., Alba, F. & Gonzales, A. (2010). Experiencia docente en prácticas de proyectos en ingeniería industrial.
- Cruz, A., Agueda, B.C. (2005). Nuevas claves para la docencia universitaria en el Espacio Europeo de Educación Superior.
- De Miguel Díaz, M. (2006). Metodologías para optimizar el aprendizaje. Segundo objetivo del Espacio Europeo de Educación Superior. *Revista Interuniversitaria de Formación del Profesorado*.

- Espacio Europeo de Educación Superior - Inicio. (2021). Recuperado de <https://www.uma.es/ees/>
- Fernández Lamarra, N.R. & Perez Centeno C.G. (2016). La educación superior latinoamericana en el inicio del nuevo siglo. Situación, principales problemas y perspectivas futuras. *Revista Española de Educación Comparada*.
- Gamboa Mora, M.C. & Garcia Sandoval, Y. (2012). Aprender haciendo en investigación como estrategia de aprendizaje. *Revista de Investigaciones UNAD*.
- Hernández-de-Menéndez, M., Vallejo Guevara, A., Tudón Martínez, J.C., Hernández Alcántara, D., & Morales-Menendez, R. (2019) Active learning in engineering education. A review of fundamentals, best practices and experiences. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 13 (3), pp. 909-922. doi: 10.1007/s12008-019-00557-8
- Herrera, G. (2005). *Curso: Trabajo Académico a Distancia*. Bogotá: Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD.
- Hildebrand, D. (2000). Putnam, Pragmatism, and Dewey. *Transactions of the Charles S. Peirce Society*.
- Instituto de Tecnología de Massachusetts. Aprendizaje activo mejorado con tecnología TEAL. <http://web.mit.edu/edtech/casestudies/teal.html> . Consultado el 7 de mayo de 2021.
- Jonassen, D.H., Mayes, T., & McAleese, R. (1993). “A manifest for constructivist approaches to uses of technology in higher education”. In: T.M. Duffy, J. Lowyck & D.H. Jonassen (eds.) *Designing environments for constructive learning*. Berlin: Springer.
- Kanfer, F.H. (1977). “Selbstmanagement-Methoden” [Métodos de ser gerente de sí-mismo]. En: F. H. Kanfer & A. P. Goldstein (Comps.), *Möglichkeiten der Verhaltensänderung*. Munchen: Urban & Schwarzenberg.
- Lave, J. & Wenger, E. (1991). *Situated learning. Legitimate peripheral participation*.  
Cambridge: Cambridge University Press.
- Lo-Iacono-Ferreira, V., Balderrama-Durán, I.M. & Torregrosa-López J.I. (2017). Experiences in the development and management of a technological master online: Master in Water Technology for Bolivia. XXI International Congress on Project Management and Engineering, Cádiz.
- Moerbeke, G. (1982) *Metafísica*. Trad. de Valentín García Yebra, *Metafísica de Aristóteles*, Edición trilingüe, Madrid, Gredos, 1982.
- Moreno Garcia, P., Pavón Dominguez, P. & Rincón Casado, A. (2017). Learning by doing applied to project engineering: an experience based on aircraft design.

- Pamungkas, S.F., Widiastuti, I., & Suharno. (2020). 21st century learning: Experiential learning to enhance critical thinking in vocational education. *Universal Journal of Educational Research*, 8 (4), pp. 1345-1355. doi: 10.13189/ujer.2020.080427
- Rodríguez García, A.B. & Ramírez López, L.J. (2014). Aprender haciendo-Investigar reflexionando: Caso de estudio paralelo en Colombia y Chile. *Revista Academia y Virtualidad*.
- Schön D.A. (1992). *La Formación de Profesionales Reflexivos. Hacia un Nuevo Diseño de la Enseñanza y el Aprendizaje en las Profesiones*. Barcelona.
- Stern, D. & Huber, G.L. (Eds.) (1997). *Active learning for students and teachers. Reports from eight countries*. Frankfurt A.M.: Peter Lang Verlag & OECD.
- Toledo Morales, P. & Sanchez Garcia, J.M. (2016). Aprendizaje basado en proyectos: Una experiencia universitaria. *Revista de Currículum y Formación del Profesorado*.
- Universidad Católica Boliviana “San Pablo”, (19 de enero 2021). Experiencia "Aprender - Haciendo" de Ingeniería Ambiental. Noticia publicada en: <https://www.facebook.com/UCB.BOLIVIA/photos/a.190858677601602/3976257825728316/>
- Universidad de Alabama. Estudio de física. <https://physics.ua.edu/undergraduate-program/resources-for-undergrads/studio-physics/>
- Vargas Vergara, M. & Rubio Cortadellas, F.R. (2012). Hacer para aprender y aprender haciendo. *Revista Pedagógica UNOCHAPECÓ*.
- Wompner F y Montt F. (2007). “Aprender a aprender. Un método valioso para la educación superior”. *Observatorio de la Economía Latinoamericana* 72.

**Communication aligned with the Sustainable  
Development Goals**



Annexes

Survey for the project participants

No.	Items	Performance grade				
		Bad	Regular	Good	Very good	Excellent
1	Planning and organization of activities					
2	Application of conceptual knowledge in the project					
3	Implementation of new teaching strategies.					
4	Use of suitable didactic spaces for the development of the project.					
5	Coherent teaching and assessment system					
6	Generation of an inclusive and participatory climate.					