



USFX®



## **Comité Editorial**

Palma Moreno-María Elena, PhD  
**Director Revista**

Palma Moreno-María Elena, PhD  
**Editora**

Gonzales Ortiz –Carlos Fernando, Ing.  
**Traducción**

Mendez Ramos-Rosbeli Alizol, Ing.  
**Diseño, Maquetación**

Mendez Ramos-Rosbeli Alizol, Ing.  
**Marcación electrónica**

La **Revista Ingeniería Sostenible Ambiental** Volumen 2, Número 4, enero a junio de 2025, es una revista editada por la Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca

## **Misión**

Somos un medio de difusión de conocimiento científico multidisciplinario cuyo objetivo es promover y facilitar la transferencia de resultados de investigaciones académicas originales e inéditas, tanto locales como nacionales e internacionales. Nuestro enfoque está dirigido a las comunidades científicas relacionadas con la gestión de recursos naturales, los procesos de descontaminación ambiental, la gestión ambiental y energética.

Dirección: Calle Regimiento Campos 180,  
Teléfono:591-464-53488, Web:

<https://revistas.usfx.bo/index.php/ingsostenibleambiental> Correo electrónico:  
[revista.ambiental@usfx.bo](mailto:revista.ambiental@usfx.bo)

La revista fue instituida mediante la Resolución de Consejo de Carrera N°001/2023

Editora: Palma Moreno-María Elena

ISSN-Impreso:3080-6704

ISSN-Virtual:3080-6712

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan las de los editores de la publicación.

## **Comité Científico**

Ayaviri Panozo - Alberto, PhD.  
*Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca – Bolivia*

Arenas Martínez - René, PhD.  
*Universidad Autónoma Juan Misael Saracho – Bolivia*

Guerrero Saldes - Lorna, PhD.  
*Universidad Técnica Federico Santa María-Chile*

Hernandez Tapia – Silvana Maricruz, MsC.  
*Colegio de Ingenieros Químicos, Ambientales y Petroquímicos de Pichincha (Ecuador)*

Lopez Ortiz - Albina, Lic.  
*Universidad de San Carlos – Guatemala (USAC)*

Molina Baspineiro - Rolando, PhD.  
*Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca – Bolivia*

Montero- Torres Julio, PhD.  
*Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca - Bolivia*

Pino – Ana Laura, MsC.  
*Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca – Bolivia*

Rodríguez Gonzales - Apolonia, PhD.  
*Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca – Bolivia*

## **Comité Arbitral**

*Universidad Mayor, Real y Pontificia de San  
Francisco Xavier de Chuquisaca – Bolivia*

PMME, PhD.

RGA, PhD.

PPC, PhD.

DCLM, MsC.

CYW, Ing.

GOCF, Ing.

HSLI, Ing.

MRRA, Ing.

MSMC, Ing.

RZBA, Ing.

SMA, Ing.

TSM, Ing.

VPM, Ing.

## Presentación

La Revista Ingeniería Sostenible Ambiental, es una revista que publica artículos originales en las áreas de la gestión de recursos naturales, procesos de descontaminación ambiental, gestión ambiental y energética. Es editada semestralmente por la Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca.

El contenido de los artículos que aparecen en cada edición, expresan la opinión de los autores y no necesariamente de los editores.

El Volumen 2, Número 4 presenta los siguientes artículos: *Aprovechamiento de fuentes de agua y recarga hídrica, aplicando medidas de adaptación a riesgos de sequía en la comunidad de Santa Rosalía, del distrito 6 del municipio de Sucre*, por VILLALBA – Jhail, con adscripción en la Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Facultad de Ciencias y Tecnología, Carrera de Ingeniería Ambiental; *Gestión de lodos generados en la planta potabilizadora “El Rollo” de la ciudad de Sucre*, por TORRES – Alejandra, con adscripción en la Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Facultad de Ciencias y Tecnología, Carrera de Ingeniería Ambiental; *Sistema de Gestión Ambiental en la empresa “Plásticos Torres” basado en la norma ISO 14001:2015*, por SOLORZANO - Madia, con adscripción en la Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Facultad de Ciencias y Tecnología, Carrera de Ingeniería Ambiental; *Evaluación del riesgo de erosión mediante la integración del Proceso Analítico Jerárquico y Sistemas de Información Geográfica*, por VERA - Daniela, con adscripción en la Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Facultad de Ciencias y Tecnología, Carrera de Ingeniería Ambiental; *Modelación de dispersión de partículas suspendidas totales generado por fuentes fijas industriales en el municipio de Sucre mediante la herramienta Aermod View*, por CHAVARRÍA - Eymi con adscripción en la Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Facultad de Ciencias y Tecnología, Carrera de Ingeniería Ambiental.



## Contenido

Artículo	Página
Aprovechamiento de fuentes de agua y recarga hídrica, aplicando medidas de adaptación a riesgos de sequía en la comunidad de Santa Rosalía, del distrito 6 del municipio de Sucre Use of water sources and water recharge, applying adaptation measures to drought risks in the community of Santa Rosalía, district 6 of the municipality of Sucre VILLALBA – Jhail	95 – 104
Gestión de lodos generados en la planta potabilizadora “El Rollo” de la ciudad de Sucre Management of sludge generated at the "El Rollo" water treatment plant in the city of Sucre TORRES – Alejandra	105 – 112
Sistema de Gestión Ambiental en la empresa “Plásticos Torres” basado en la norma ISO 14001:2015 Environmental Management System at “Plásticos Torres” based on ISO 14001:2015 SOLORZANO – Nadia	113 – 120
Evaluación del riesgo de erosión mediante la integración del Proceso Analítico Jerárquico y Sistemas de Información Geográfica Erosion Risk Assessment Through the Integration of the Hierarchical Analysis Process and Geographic Information Systems VERA – Daniela	121 – 128
Modelación de dispersión de partículas suspendidas totales generado por fuentes fijas industriales en el municipio de Sucre mediante la herramienta Aermid View Modeling of the dispersion of total suspended particles generated by fixed industrial sources in the municipality of Sucre using the Aermid View tool CHAVARRÍA - Eymi	129 – 136
Instrucciones para Autores	



## Aprovechamiento de fuentes de agua y recarga hídrica, aplicando medidas de adaptación a riesgos de sequía en la comunidad de Santa Rosalía del distrito 6 del municipio de Sucre

### Use of water sources and water recharge, applying adaptation measures to drought risks in the community of Santa Rosalía, district 6 of the municipality of Sucre

Villalba, Jhail Fernando<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Carrera de Ingeniería Ambiental.

Recibido diciembre, 2024; Aceptado marzo, 21, 2025

#### Resumen

Este estudio analiza estrategias de uso de fuentes hídricas y recarga hídrica como medidas de adaptación al riesgo de sequía en la comunidad de Santa Rosalía, Distrito 6 del Municipio de Sucre. Se revisaron estudios recientes sobre gestión del agua, recarga de acuíferos y adaptación climática en comunidades rurales. La investigación utilizó un enfoque mixto, combinando análisis del agua, percepción de la comunidad y modelización climática. Los resultados muestran que la recolección de agua de lluvia y la recarga artificial de acuíferos son técnicas viables para mejorar la resiliencia del agua. Se concluye que la implementación de estas estrategias reduce la vulnerabilidad ante eventos de sequía y fortalece la seguridad hídrica de la comunidad.

La evaluación económica y técnica del PGA demostró su viabilidad y rentabilidad, validando su potencial para una implementación exitosa y la mejora continua del desempeño ambiental en el contexto específico de la formación artística universitaria. Se discuten las implicaciones de estos resultados para la sostenibilidad en instituciones de educación superior con actividades prácticas intensivas.

#### Palabras Clave

Gestión del agua, obras de captación, sequía, adaptación climática.

#### Abstract

This study analyzes strategies for water resource use and aquifer recharge as measures to adapt to drought risk in the community of Santa Rosalía, District 6 of the Municipality of Sucre. Recent studies on water management, aquifer recharge, and climate adaptation in rural communities were reviewed. The research employed a mixed-methods approach, combining water analysis, community perceptions, and climate modeling. The results show that rainwater harvesting and artificial aquifer recharge are viable techniques for improving water resilience. It is concluded that the implementation of these strategies reduces vulnerability to drought events and strengthens the community's water security.

The economic and technical evaluation of the PGA demonstrated its feasibility and cost-effectiveness, validating its potential for successful implementation and continuous improvement of environmental performance within the specific context of university arts education. The implications of these results for sustainability in higher education institutions with intensive practical activities are discussed.

#### Keywords

Water management, water harvesting structures, drought, climate adaptation.

**Citación:** Villalba J. (2025). Aprovechamiento de fuentes de agua y recarga hídrica, aplicando medidas de adaptación a riesgos de sequía en la comunidad de Santa Rosalía del distrito 6 del municipio de Sucre. *Revista Ingeniería Sostenible Ambiental*, 2(4), 95-104

## Introducción

A nivel global, el agua dulce representa solo el 2.5 % de las reservas hídricas, de las cuales el 68.9 % se halla en glaciares y el 30.8 % en acuíferos, dejando menos del 0.3 % disponible en fuentes superficiales (CONAGUA, 2015). Esta limitada distribución, sumada a una gestión ineficiente y a la sobreexplotación antropogénica, ha superado las tasas de recarga natural, provocando un deterioro crítico en la disponibilidad del recurso. Ante este escenario, la administración bajo un enfoque de desarrollo sustentable es imperativa para equilibrar el crecimiento económico, la equidad social y la integridad ambiental. En contextos de alta vulnerabilidad y conflictos socio ambientales, las aguas subterráneas específicamente los manantiales emergen como la alternativa más viable y rentable para el suministro de agua segura. Investigaciones previas demuestran que la caracterización hidrogeológica y el aprovechamiento de manantiales permiten implementar sistemas de captación directa y distribución domiciliaria con tratamientos mínimos, dada la calidad físico-química intrínseca de estas fuentes (Moreno et al., 2014; NNUU, 2022).

En Bolivia, la heterogeneidad edafológica condiciona la disponibilidad de recursos; mientras las tierras bajas poseen suelos fértiles, las zonas altas se caracterizan por condiciones áridas y semiáridas (Ibáñez, 2008).

En el distrito 6 del municipio de Sucre se sitúa la comunidad de Santa Rosalía, la cual presenta un marcado déficit hídrico exacerbado por su aislamiento geográfico y la ausencia de infraestructura de captación técnica.

El presente estudio plantea el diseño de medidas de aprovechamiento y recarga hídrica basadas en un diagnóstico biofísico integral. El objetivo es mitigar la escasez y prevenir conflictos derivados de la competencia por el recurso, promoviendo una gestión que garantice la seguridad hídrica y mejore la calidad de vida de los pobladores de Santa Rosalía bajo principios de uso racional y conservación.

## Materiales y métodos

### Encuestas y tabulación de datos

En el marco del estudio sobre la captación de agua por gravedad en la comunidad de Santa Rosalía, se realizaron diversas actividades con el objetivo de recopilar información cuantitativa y cualitativa relevante. Estas incluyeron la aplicación de encuestas a la población local, visitas de campo para la observación directa del entorno y el análisis de datos mediante herramientas informáticas, principalmente microsoft excel.

Para conocer las necesidades hídricas y la percepción de la población sobre el acceso al agua, se diseñó y aplicó un cuestionario estructurado dirigido a los habitantes de la comunidad.

El cuestionario fue elaborado con base en parámetros técnicos y sociales, contemplando preguntas cerradas y abiertas que permitieran evaluar aspectos clave como:

Disponibilidad de agua: Frecuencia y cantidad de acceso al recurso.

Uso del agua: Consumo doméstico, agrícola y ganadero.

Percepción de calidad del agua: Opinión sobre la potabilidad y condiciones del agua utilizada.

Problemas asociados: Falta de infraestructura, acceso limitado, contaminación, entre otros.

Las encuestas fueron realizadas de manera presencial, entrevistando a los jefes de familia en cada vivienda visitada. La muestra de la población fue seleccionada considerando los hogares que dependen del manantial como fuente principal de abastecimiento. Se realizó una estrategia de muestreo intencional, priorizando familias residentes permanentes en la comunidad, usuarios del sistema de captación de agua propuesto y representantes de sectores productivos que dependen del agua.

Los datos obtenidos de las encuestas y las visitas de campo, fueron organizados y analizados en Microsoft Excel, utilizando herramientas estadísticas básicas para su interpretación.

## **Diseño de la propuesta**

### ***Evaluación del manantial***

Se realizó un análisis teórico e in-situ para caracterizar el manantial y su capacidad de suministro. Para calcular el caudal de un manantial estancado utilizando el método volumétrico, es necesario medir la cantidad de agua que fluye o se acumula en un período determinado. Este método puede ser útil si el manantial es pequeño o si el agua se acumula en una zona concreta, como un pozo o un estanque. El principio detrás del método volumétrico es calcular el volumen de agua que se acumula o que se mueve a través de un área durante un tiempo específico.

### ***Estimación de la demanda de agua***

Se calculó la demanda de agua para los residentes de la comunidad y las actividades productivas, aplicando:

- Proyección poblacional basada en la Norma Boliviana NB 689.
- Cálculo de caudales de diseño, considerando (Caudal medio diario, caudal máximo diario y caudal máximo horario)
- Dimensionamiento del volumen de almacenamiento con base en el periodo de sequía (mínimo de 4 meses).

### ***Diseño del sistema de captación***

Se optó por una galería filtrante tipo dren, diseñada con las siguientes características

- Tubería PVC ranurada de 8 pulgadas
- Longitud efectiva de drenado: 60 cm
- Pendiente de tuberías entre 0,1% y 0,5%
- Material de filtrado compuesto por capas de grava y arena

El caudal de infiltración se determinó mediante la ecuación de Darcy como también valores de permeabilidad del terreno.

### ***Diseño del tanque de almacenamiento***

El tanque fue dimensionado en función del volumen mínimo necesario para garantizar el suministro de agua destinada al consumo humano, riego y ganadería. La estructura se propone construir con hormigón ciclópeo, con una base diseñada para soportar de manera segura las cargas hidráulicas y asegurar la estabilidad del sistema. El tiempo de llenado se calculó considerando el caudal disponible del manantial, lo que permite estimar la eficiencia operativa y la capacidad de respuesta del sistema frente a la demanda hídrica de la comunidad.

### ***Diseño del muro de contención***

Se diseñó un muro de hormigón ciclópeo de 2 metros de altura, con cálculos estructurales para resistencia al empuje del agua y estabilidad ante deslizamientos.

### ***Métodos de construcción***

Se proponen técnicas convencionales de construcción:

- Excavación del área para la galería filtrante y el tanque.
- Colocación de tuberías y material filtrante siguiendo las recomendaciones de diseño hidráulico.
- Construcción del tanque y el muro de contención con compactación del suelo y refuerzo estructural.
- Instalación de tuberías y válvulas de control para regular el flujo de agua hacia los consumidores.

### **Forestación como estrategia de recarga hídrica**

Para garantizar la sostenibilidad del manantial, se propone un programa de forestación con especies como *Pinus radiata*, *Schinus molle*, con el objetivo de aumentar la infiltración del agua de lluvia y reducir la erosión del suelo en la zona de captación. El diseño de plantación siguió el método de Tres Bolillos, con cálculos de densidad Procedimientos de análisis

$$\frac{Np}{ha} = \frac{ha}{d^2 * 0.866}$$

Donde:

ha = Área en m<sup>2</sup> o hectáreas

d = distancia entre arboles

0.866 = Valor de la tangente trigonométrica

Np = Número de árboles por hectárea

### **Resultados**

A partir del diagnóstico territorial realizado en la comunidad de Santa Rosalía, se identificaron diversos problemas relacionados con la disponibilidad de recursos hídricos, las condiciones productivas y el acceso a servicios básicos. Las encuestas aplicadas a los comunarios, junto con las observaciones de campo, permitieron obtener información clave para diseñar estrategias de captación de agua por gravedad y mejorar la calidad de vida de los habitantes.

### **Disponibilidad y uso del agua**

El 100% de las familias encuestadas carecen de acceso a agua potable, dependiendo de pequeños manantiales situados a una considerable distancia de sus hogares. De estos, el 83% utiliza el agua únicamente para consumo humano, mientras que solo una familia (17%) la destina al riego agrícola.

La falta de infraestructura adecuada dificulta tanto la potabilización como el almacenamiento eficiente del agua, exponiendo a la comunidad a riesgos sanitarios. Además, la ausencia de sistemas de cosecha de agua eficientes limita el aprovechamiento del recurso hídrico, resultando en un uso mínimo de este vital elemento.

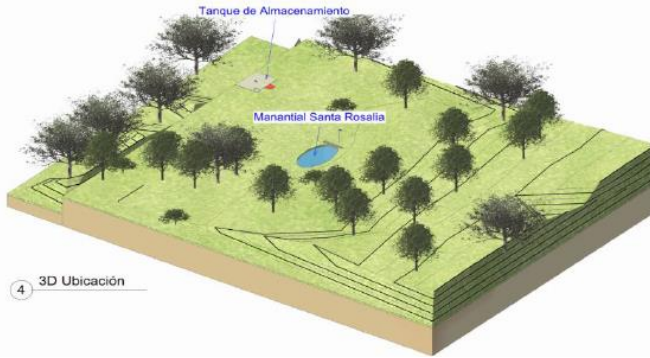
### **Condiciones de vida y acceso a servicios básicos**

La comunidad enfrenta severas carencias, ya que el 100% de las viviendas carece de electricidad y alcantarillado, y todas las familias valoran negativamente su acceso al agua potable, otorgándole la puntuación más baja en una escala del 1 al 5. Aunque dispone de una escuela primaria, no cuenta con servicios de salud, lo que obliga a los habitantes a desplazarse a otras localidades para recibir atención médica. Este contexto de deterioro ha llevado a una crisis demográfica alarmante, evidenciada por el drástico descenso de su población, que pasó de 144 habitantes en el censo de 2012 a solo 16 en la actualidad, lo que representa una disminución de más del 88%.

### **Diseño de galería filtrante para captación de aguas subterráneas**

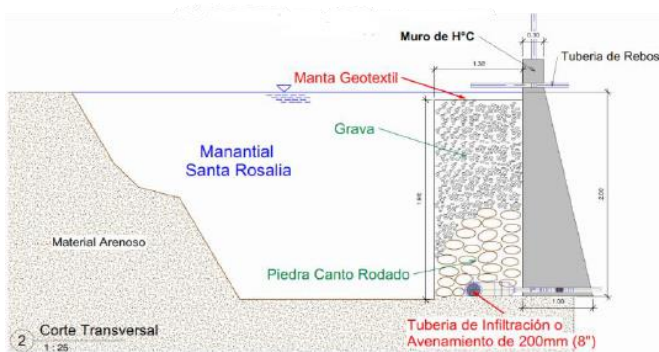
Para el proyecto, se opta por el diseño de una galería filtrante tipo dren, la cual consiste en perforaciones horizontales o excavaciones tipo zanja. En el fondo de estas se colocan tuberías perforadas o ranuradas, conocidas como drenes, las cuales se ubican estratégicamente en la zona húmeda del acuífero para captar el agua subterránea (Figura 1). Estos drenes están cubiertos con un material seleccionado, lo que permite optimizar el rendimiento del sistema y facilita la filtración del agua sin que se obstruya el flujo.

**Figura 1 Reconocimiento de campo**



Para asegurar un flujo constante, el diseño de estos drenes generalmente incluye tuberías con diámetros superiores a 200 mm y una pendiente que varía entre el 0,1% y el 0,5% (uno a cinco por mil). Esta pendiente facilita el movimiento del agua captada a lo largo de la tubería hasta el punto de recolección, contribuyendo a la eficiencia del sistema de captación en el proyecto. Además, debido a las características del manantial, el acuífero en estudio cuenta con una recarga superficial. Esto significa que la galería filtrante diseñada no solo captará los flujos subterráneos del propio acuífero, sino que también interceptará y recolectará escurrimientos provenientes de un curso o cuerpo de agua superficial cercano. (Figura 2). Este tipo de recarga contribuye a mantener un nivel estable de agua en el acuífero, asegurando un suministro continuo y suficiente para la galería incluso en épocas de menor precipitación.

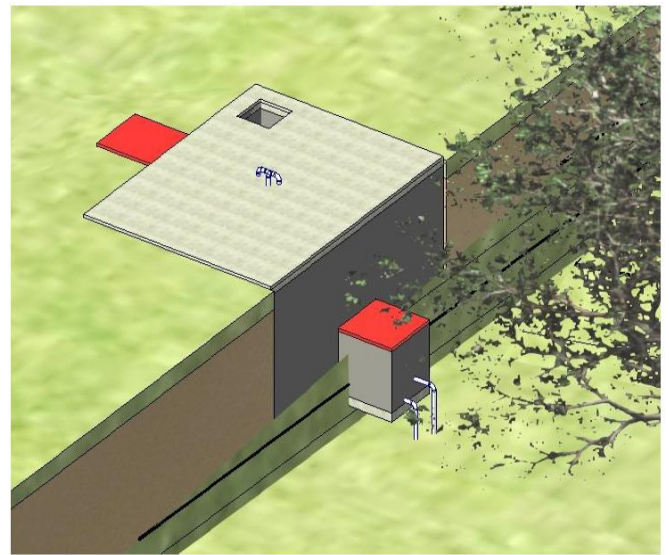
**Figura 2 Captación subterránea**



**Diseño de tanque de almacenamiento**

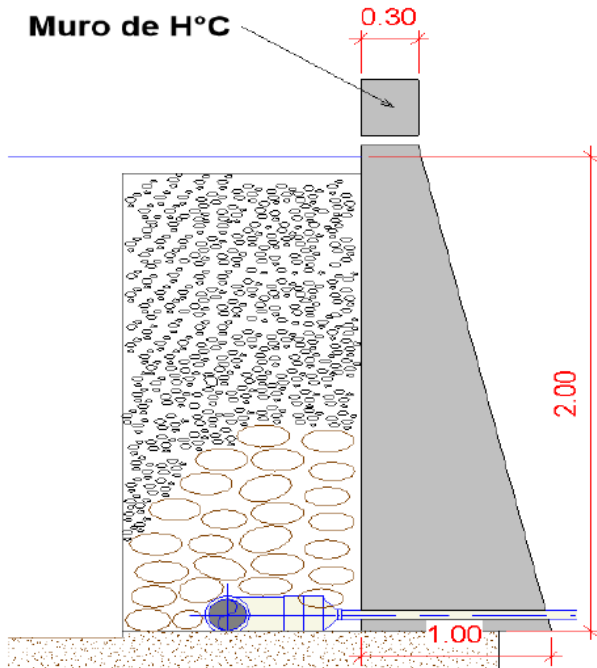
El hormigón ciclópeo se emplea de manera frecuente en la construcción de tanques de agua debido a su resistencia mecánica, durabilidad y bajo costo. Este material consiste en una mezcla de concreto reforzada con piedras de gran tamaño, generalmente entre 10 y 30 cm de diámetro, lo que permite reducir la cantidad de cemento utilizado y, al mismo tiempo, incrementar la estabilidad estructural del tanque (Figura 3).

**Figura 3 Tanque de almacenamiento**



**Diseño estructural muro de contención.**

Este muro es diseñado para soportar las presiones hidráulicas y el peso del material filtrante, garantizando estabilidad y durabilidad a largo plazo. El diseño incluye el cálculo de cargas, elección de materiales adecuados y consideraciones de impermeabilización para evitar filtraciones indeseadas y asegurar una estructura eficiente y segura para el sistema de captación de agua (Figura 4)

**Figura 4** Diseño del muro de contención

### Propuesta de forestación como estrategia para la recarga hídrica

**Identificación del área prioritaria:** Se identificó mediante un estudio detallado el área más favorable para forestar significativamente en ayuda a la recarga hídrica. (Figura 5)

**Selección de especies:** Investigando y consultando con expertos se define que las plantas de pino *Pinus radiata* y molle *Schinus molle* son especies arbóreas adaptadas a las condiciones climáticas y edáficas locales. Estas especies tienen raíces profundas y son capaces de retener el suelo, favoreciendo así la infiltración del agua de lluvia.

**Plantación y mantenimiento:** Se propone organizar jornadas de plantación participativa con la comunidad local y voluntarios. Establecer un plan de mantenimiento a largo plazo para garantizar la supervivencia y el crecimiento saludable de las plantas.

**Monitoreo y evaluación:** Implementar un sistema de monitoreo regular para evaluar el éxito de la reforestación en términos de incremento en la cobertura vegetal, mejoría en la calidad del agua y aumento en la infiltración hacia los acuíferos.

**Figura 5** Zona prioritaria para la forestación

### Proyecciones de los beneficios esperados con la implementación del proyecto

La implementación del sistema de captación de agua por gravedad traerá beneficios significativos a la comunidad, mejorando tanto el acceso al agua como el desarrollo económico-productivo.

**Mejora en el acceso y disponibilidad del agua:** Se garantizará un suministro continuo de agua para las 5 familias residentes, reduciendo la distancia y el tiempo que actualmente invierten en la recolección de agua. La construcción del tanque de almacenamiento de 30 m<sup>3</sup> permitirá contar con una reserva suficiente para el consumo humano, agrícola y ganadero durante la época de sequía. Se reducirá la contaminación del agua, ya que el sistema de filtración de la galería impedirá el contacto con agentes contaminantes. Se impulsará la capacitación de los comunarios en manejo sostenible del agua y estrategias de conservación del recurso hídrico.

**Incremento en la producción agrícola y ganadera:**

Con la disponibilidad de agua regulada, se prevé un aumento del 30% en la producción de cultivos como papa, maíz, quinua y trigo. Se podrá implementar pequeñas huertas familiares, diversificando la alimentación de los comunarios y reduciendo su dependencia de alimentos comprados en otras localidades. Se fortalecerá la ganadería, asegurando una dotación mínima de agua para el ganado y reduciendo su mortalidad en periodos de sequía. La reforestación con especies como *Schinus molle* y *Pinus radiata* contribuirá a mejorar la infiltración del agua y a reducir la erosión del suelo.

**Impacto en la calidad de vida de la comunidad:**

Mejora en la salud de los comunarios al reducir el consumo de agua no tratada, disminuyendo enfermedades gastrointestinales. Disminución del estrés hídrico, permitiendo que las familias enfoquen sus esfuerzos en la producción agrícola y ganadera. Reducción de la migración, al ofrecer mejores condiciones de vida y oportunidades económicas en la comunidad.

**Discusión**

La precariedad en el acceso al recurso hídrico en la comunidad de Santa Rosalía trasciende la carencia de infraestructura, configurándose como un estado de estrés hídrico estructural. El hallazgo de que el 100 % de la población carece de una fuente segura de agua potable evidencia una brecha crítica en la seguridad hídrica, donde la dependencia de manantiales de bajo caudal sin tecnificación expone a la comunidad a riesgos sanitarios y a una vulnerabilidad extrema frente a la variabilidad climática. Desde una perspectiva hidrológica y ambiental, el diagnóstico territorial revela una sinergia negativa entre la aridez de los suelos y los procesos de erosión activa. La reducida cobertura vegetal, sumada a regímenes de precipitación irregulares, compromete la tasa de recarga de los acuíferos, por lo que el balance hidrológico local se encuentra en un equilibrio precario.

Este déficit hídrico actúa como un limitante determinante para el desarrollo socioeconómico; la transición forzada hacia la agricultura de secano y la ganadería de subsistencia (especies menores como ovinos y caprinos) no es una elección productiva, sino una respuesta adaptativa a la escasez, lo que coincide con lo expuesto por Ibañez (2008) sobre las limitaciones de las zonas altas en Bolivia. La implementación de un sistema de captación por gravedad, mediante una galería filtrante y un volumen de regulación de 30 m<sup>3</sup> se fundamenta como una solución técnica óptima para la zona. A diferencia de los sistemas de bombeo, la gravedad minimiza los costos operativos y la dependencia energética, factores críticos en comunidades con nulo acceso a servicios básicos. La capacidad de almacenamiento proyectada no solo garantiza la continuidad del suministro doméstico, sino que introduce un margen de maniobra para la estabilización de las actividades agropecuarias, reduciendo la presión migratoria al fortalecer el arraigo territorial a través de la autosuficiencia. Finalmente, la sostenibilidad del proyecto debe entenderse desde la gestión integral de cuencas. La propuesta de forestación es fundamental para restaurar los servicios ecosistémicos de regulación hídrica y protección del suelo. Esta medida, complementada con programas de gobernanza del agua y capacitación técnica, asegura que la infraestructura se traduzca en una mejora resiliente de la calidad de vida. La integración de soluciones basadas en la naturaleza con infraestructura constituye, por tanto, el eje central para transformar la vulnerabilidad de Santa Rosalía en un modelo de desarrollo rural sustentable.

**Conclusiones**

La investigación confirma que la comunidad de Santa Rosalía se encuentra en un estado de vulnerabilidad hídrica crítica, donde la ausencia de infraestructura de captación y regulación actúa como el principal factor limitante del desarrollo socioeconómico y la estabilidad demográfica.

Los hallazgos demuestran que el déficit hídrico estructural no solo restringe la seguridad alimentaria al condicionar la producción agrícola y ganadera a la variabilidad pluviométrica, sino que también impulsa procesos migratorios que debilitan el tejido social rural.

La implementación del sistema de captación por gravedad, diseñado bajo criterios de eficiencia técnica y sostenibilidad económica, se posiciona como una solución robusta para cerrar las brechas de acceso al recurso.

La integración de una galería filtrante y almacenamiento centralizado garantiza la provisión de agua segura, permitiendo la transición desde una economía de subsistencia hacia un sistema productivo resiliente. Asimismo, la incorporación de estrategias de reforestación, promoviendo la restauración de los servicios ecosistémicos y la protección de las zonas de recarga hídrica.

En definitiva, este estudio establece que la autosuficiencia de la comunidad depende de una gestión integral del recurso hídrico que armonice la infraestructura técnica con la gobernanza local. La participación activa de los usuarios en el ciclo de vida del proyecto y el respaldo institucional son determinantes para garantizar la durabilidad de las intervenciones. Este modelo de gestión propuesto no solo mitiga la crisis hídrica actual, sino que fortalece la resiliencia de la comunidad frente a los escenarios de cambio climático, sirviendo como referente para la planificación de proyectos de desarrollo rural sustentable en zonas áridas y semiáridas de la región andina.

## Referencias

Angulo, A. O., Prins, C., Faustino, J., & Madrigal, B. R. (2008). *La gestión del agua en Valle de Ángeles, Honduras: Elementos claves para la protección y buen aprovechamiento del agua*. CATIE.  
<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/2682>

Bates, B., Kundzewicz, Z., Wu, S., & Palutikof, J. (2008). *El cambio climático y el agua*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.  
<https://archive.ipcc.ch/pdf/technical-papers/ccw/climate-change-water-sp.pdf>

Estado Plurinacional de Bolivia. (2012, octubre 15). *Ley Marco de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien (Ley 300)*.  
<http://siarh.gob.bo/wp-content/uploads/2018/11/Ley-No-300.pdf>

Estado Plurinacional de Bolivia. (2014, noviembre 14). *Ley de Gestión de Riesgos (Ley 602)*.  
<http://www.defensacivil.gob.bo/web/uploads/pdfs/ley602.pdf>

Bustos, J., Limón, G., & Sandoval, C. G. (2017, septiembre). *Gobernanza de los recursos hídricos locales: Implicancias conductuales y cognitivas*. Encuentros Multidisciplinares.  
[http://www.encuentros-multidisciplinares.org/revista-57/jos%C3%A9\\_gerardo\\_fco\\_cruz.pdf](http://www.encuentros-multidisciplinares.org/revista-57/jos%C3%A9_gerardo_fco_cruz.pdf)

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2002). *Manual de diseño de galerías filtrantes*.

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2003). *Manual de galería filtrante*. Lima, Perú.

Comisión Nacional del Agua. (2015, diciembre). *Situación del subsector agua potable, drenaje y saneamiento*. México, D.F., México.

Comisión Nacional Forestal. (2010). *Prácticas de reforestación: Manual básico*. México.

Comisión Nacional Forestal [@CONAFOR]. (2017, mayo 4). CONAFOR promueve la reforestación con participación comunitaria en México.  
<https://x.com/CONAFOR/status/900085952927989760>

- Delgado, L. E., & Sepúlveda, M. B. (2013). *Provisión de servicios ecosistémicos de la cuenca de Aysén, Patagonia chilena, a hogares rurales*. *Ecosystem Services*, 5, 1–10. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212041613000284>
- Dirección Nacional de Cambio Climático. (2023). *Sequía*. Argentina.gob.ar. . <https://www.argentina.gob.ar/sinagir/riesgos-frecuentes/sequia>
- Durán, D. (2010, abril 25). *Las sequías como riesgo natural*. Ecoportal. [https://www.ecoportal.net/temas-especiales/agua/las\\_sequias\\_como\\_riesgo\\_natural/](https://www.ecoportal.net/temas-especiales/agua/las_sequias_como_riesgo_natural/)
- Ibañez, J. J. (2008, marzo 15). *Suelos de Bolivia y Paraguay (El Mundo Guaraní y Más...): Un universo invisible en nuestros pies*. Madrimasd. <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2008/03/15/86707>
- Javier, T., & Viviana, Z. (2020). *Plan de contingencia alimentaria: Estrategias para facilitar el abastecimiento de alimentos en el municipio de Sucre*. Bolivia. [https://alternativascc.org/wp-content/uploads/2020/12/PCA-Sucre\\_FINAL.pdf](https://alternativascc.org/wp-content/uploads/2020/12/PCA-Sucre_FINAL.pdf)
- Parsi, J., Godio, L., Miazzi, R., Maffioli, R., Echevarría, A., & Provencal, P. (2001). *Nutrient requirements of swine*. [https://www.produccion-animal.com.ar/informacion\\_tecnica/manejo\\_de\\_l\\_alimento/16-valoracion\\_nutritiva\\_de\\_los\\_alimentos.pdf](https://www.produccion-animal.com.ar/informacion_tecnica/manejo_de_l_alimento/16-valoracion_nutritiva_de_los_alimentos.pdf)
- Locatelli, B., & Kanninen, M. (2010). *Servicios ecosistémicos y adaptación al cambio climático*. Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Manos Unidas. (2023). *Cambio climático*. Manos Unidas. <https://www.manosunidas.org/observatorio/cambio-climatico>
- Martínez, Y., & Villalejo, V. (2017). La gestión integrada de los recursos hídricos: Una necesidad de estos tiempos. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 51–58. <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v39n1/riha05118.pdf>
- Méndez, R., Rodríguez, A., Gonzales, C., Radón, K. y Solís, MT (2024). *Evaluación de Riesgo de Sequía en Unidades Educativas del Municipio de Sucre, Bolivia*.
- Ministerio de Agricultura (MINAGRI). (2013). *Plan de adaptación al cambio climático del sector silvoagropecuario: Propuesta ministerial elaborada en el marco del Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2008–2012*. Chile. [http://www.mma.gob.cl/1304/articulos-55242Plan\\_Adaptacion\\_CC\\_S\\_Silvoagropecuario.pdf](http://www.mma.gob.cl/1304/articulos-55242Plan_Adaptacion_CC_S_Silvoagropecuario.pdf)
- Moreno, H. J., Peña, L. F., Cutipa, W. L., & Navarro, C. P. (2014). *Evaluación hidrogeológica para el aprovechamiento de las aguas subterráneas en la microcuenca Lauricocha - Huánuco*. INGEMMET. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2705>
- Naciones Unidas (NNUU). (2022). *Informe mundial sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2022: Aguas subterráneas*. LATIN WASH+. <https://www.latinwash.org/post/informe-mundial-de-nnuu-sobre-el-desarrollo-de-los-recursos-h%C3%AAdricos-2022-aguas-subterr%C3%A1neas>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). (2013). *Estudios económicos de la OCDE: Chile*. <http://www.oecd.org/eco/surveys/Overview%20Chile%20spanish.pdf>

- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2015). *El papel de los bosques en la gestión del agua en las zonas áridas*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2015). *Generalidades sobre pesca y acuicultura*. [https://www.fao.org/fishery/static/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6705s/x6705s01.htm#top](https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6705s/x6705s01.htm#top)
- Organización Mundial de la Salud. (2018). *Guías para la calidad del agua de consumo humano* (4ª ed.). Ginebra. <https://doi.org/978-92-4-354995-8>
- Gobierno Autónomo Municipal de Sucre. (2016–2020). *Plan Territorial de Desarrollo Integral (PTDI)*. Sucre, Bolivia.
- Reed, M. S., & Stringer, L. C. (2016). Land degradation, desertification and the role of reforestation in mitigating climate change in dryland regions. *Global Environmental Change*, 37, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.01.001>
- Rodríguez, L., & Gómez, J. (2019). Impacto de la recarga hídrica en los ecosistemas y la agricultura. *Revista de Ciencias Ambientales*, 53(2), 45–60.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). (2024). *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología*. <https://senamhi.gob.bo/index.php/inicio>
- Tirado, B. M. (2010). Cambio climático y salud. *Informe SESPAS 2010*. España. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213911110002578>

## Gestión de lodos generados en la planta potabilizadora “El Rollo” de la ciudad de Sucre

### Management of sludge generated at the "El Rollo" water treatment plant in the city of Sucre

TORRES– Alejandra<sup>1\*</sup>, ZAMORA– Jorge<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Carrera de Ingeniería Ambiental.

<sup>2</sup> Consultor en Línea responsable de Medio Ambiente de ELAPAS (Empresa Local de Agua Potable y Alcantarillado de Sucre, Bolivia)

Recibido marzo, 2025; Aceptado mayo, 16, 2025

#### Resumen

Este estudio tuvo como propósito evaluar el impacto ambiental de los lodos con aluminio generados en la planta potabilizadora "El Rollo" y proponer alternativas de manejo sostenible. Se realizó un diagnóstico ambiental mediante muestreos de agua y suelo en cinco puntos estratégicos alrededor del punto de descarga. Los resultados revelaron que, si bien la concentración de aluminio en el suelo (inferior a 18.000 mg/Kg) no supera los estándares internacionales, existe un riesgo potencial de acumulación. En el agua, se detectaron concentraciones de 0,259 mg/l y 0,219 mg/l en el punto de contacto y a 50 m aguas abajo, respectivamente, valores que excedían el límite normativo vigente.

Frente a esto, se evaluaron tres alternativas: lechos de secado, recuperación de aluminio con ácido y la sustitución del coagulante por polvo de *Moringa oleifera*. Esta última opción se identificó como la más viable técnica y ambientalmente, al eliminar la generación de lodos con aluminio en origen, evitar la necesidad de su tratamiento posterior y reducir la carga química, a pesar de representar un costo operativo.

**Palabras Clave** Lodos residuales, aluminio, potabilización, impacto ambiental, *Moringa oleifera*.

#### Abstract

The purpose of this study was to assess the environmental impact of the aluminum-containing sludge generated at the “El Rollo” water treatment plant and to propose sustainable management alternatives. An environmental assessment was conducted through water and soil sampling at five strategic points around the discharge site. The results revealed that, although the concentration of aluminum in the soil (less than 18,000 mg/kg) does not exceed international standards, there is a potential risk of accumulation. In the water, concentrations of 0.259 mg/L and 0.219 mg/L were detected at the discharge point and 50 m downstream, respectively—values that exceeded the current regulatory limit.

In response, three alternatives were evaluated: drying beds, aluminum recovery with acid, and replacing the coagulant with *Moringa oleifera* powder. The latter option was identified as the most technically and environmentally viable, as it eliminates the generation of aluminum-containing sludge at the source, avoids the need for subsequent treatment, and reduces the chemical load, despite representing an operational cost

#### Keywords

Residual sludge, aluminum, water treatment, environmental impact, *Moringa oleifera*.

**Citación:** Torres A. (2025). Gestión de lodos generados en la planta potabilizadora “El Rollo” de la ciudad de Sucre. *Revista Ingeniería Sostenible Ambiental*, 2(4), 105-112

## Introducción

El acceso seguro al agua potable constituye un requisito esencial para la salud pública y el bienestar humano. En este contexto, las plantas potabilizadoras desempeñan un papel estratégico al garantizar la calidad del recurso hídrico. Entre los procesos más utilizados se encuentra la coagulación-floculación, en el cual se emplean sales de aluminio para remover partículas suspendidas y otras impurezas (Torres-Mendoza et al., 2023). No obstante, este tratamiento genera volúmenes significativos de lodos residuales con alto contenido de aluminio, cuya disposición inadecuada representa un desafío ambiental y sanitario de creciente preocupación (Pinaya Soliz, 2023).

En la ciudad de Sucre (Bolivia), esta problemática se evidencia en la planta potabilizadora El Rollo, que descarga directamente los lodos hacia una quebrada adyacente. Tal práctica constituye una fuente potencial de contaminación de agua y suelos, con implicaciones para los ecosistemas locales y la seguridad hídrica de la población. Frente a esta situación, se han explorado alternativas de gestión como la recuperación de aluminio y el secado de lodos (Pinaya Soliz, 2023). Sin embargo, aún persiste la necesidad de una evaluación integral que permita diagnosticar el impacto ambiental actual y comparar de manera sistemática la viabilidad de dichas opciones en el contexto específico de la planta El Rollo.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el impacto ambiental derivado de la disposición de lodos residuales, cuantificando la concentración de aluminio en el agua y el suelo de la quebrada receptora. Asimismo, se analizan y contrastan diferentes alternativas de tratamiento con el propósito de proponer una solución sostenible, orientada a mitigar este pasivo ambiental y contribuir a una gestión más responsable de los recursos hídricos y de los residuos generados por el proceso de potabilización.

## Materiales y métodos

El presente estudio evaluó el impacto ambiental del vertido de lodos con aluminio en la quebrada Awiriwa, provenientes de la planta potabilizadora "El Rollo" en Sucre, Bolivia (Coordenadas: 259416,39 X, 7895145,30 Y, 2923 m de altitud). El diseño de la investigación es de tipo mixto, cualitativo y cuantitativo.

## Evaluación de impacto ambiental

Se aplicó la matriz de evaluación de impacto ambiental de Vicente Conesa Fernández-Vitora para identificar y calificar los impactos generados por el vertido de los lodos residuales. Esta metodología considera diversos factores para determinar la importancia de cada impacto. Se identificaron como moderados los impactos en la calidad del agua y el suelo por la presencia de aluminio. A partir de esta identificación, se definieron las variables de respuesta del estudio: la concentración de aluminio en ambos medios.

## Muestreo y diseño experimental

Se realizó un muestreo de tipo puntual para determinar el área de influencia de la descarga. Posteriormente, se llevaron a cabo muestreos puntuales secuenciales promediados en los cinco puntos identificados como representativos (Tabla 1) El objetivo era verificar la concentración de aluminio y su dispersión en la quebrada Awiriwa

**Tabla 1 Puntos de muestreo del área de influencia**

Ubicación	Nombre
Quebrada donde desembocan las aguas.	Punto 1
Punto de encuentro de las aguas de la planta con la quebrada Awiriwa.	Punto 2
20 metros antes del punto de contacto de las aguas de la planta con la quebrada Awiriwa.	Punto 3
50 metros después del punto de contacto de las aguas de la planta con la quebrada Awiriwa.	Punto 4
100 metros después del punto de contacto de las aguas de la planta con la quebrada Awiriwa.	Punto 5

Tamaño de la muestra: Se tomaron 9 muestras puntuales iniciales para delimitar el área, y posteriormente se realizaron muestreos puntuales secuenciales promediados en los 5 puntos definidos. La campaña de muestreo abarcó un total de 6 eventos en diferentes fechas y épocas del año (estiaje y lluvia), como se detalla en la Tabla 2.

**Tabla 2 Muestreos realizados**

Número de muestreo	Cantidad de muestras	Fecha	Época	Tipo de muestreo
1	9	06/09/2024	Estiaje	Puntual
2	6	25/09/2024	Estiaje	Puntual
3	6	03/10/2024	Lluvia	Puntual
4	9	10/10/2024	Lluvia	Puntual
5	3	17/02/2025	Lluvia	Puntual
6	2	18/02/2025	Lluvia	Puntual

El muestreo de agua y suelo siguió protocolos estandarizados de campo para garantizar la representatividad de las muestras y su adecuada preservación antes del análisis de laboratorio.

### Determinación de caudal

Para estimar el caudal en los puntos de muestreo, se utilizó el método del flotador, una técnica validada y recomendada por la FAO para cuerpos de agua de bajo caudal. Este método permite calcular la velocidad media de la corriente y, a partir de ella, el caudal volumétrico en cada punto.

### Análisis de laboratorio

El análisis de la concentración de aluminio en las muestras de agua y suelo se llevó a cabo mediante espectrofotometría, técnica reconocida por su sensibilidad y confiabilidad en la cuantificación de metales a bajas concentraciones. Las muestras fueron previamente acondicionadas siguiendo protocolos estandarizados de conservación y transporte, con el fin de garantizar la representatividad y evitar alteraciones químicas. Posteriormente, se realizó un análisis observacional con enfoque descriptivo, orientado a caracterizar los valores obtenidos en el muestreo.

### Resultados

La investigación se inició con un análisis diagnóstico de la quebrada Awiriwa el 13 de agosto de 2024, que reveló la presencia de múltiples fuentes de contaminación, incluyendo descargas de aguas residuales domésticas e industriales. Estas observaciones sirvieron como contexto para delimitar el enfoque del estudio en el impacto específico de los lodos de la planta potabilizadora.

### Resultados de las pruebas de laboratorio

Los análisis de laboratorio de las muestras de lodos confirmaron la presencia de aluminio. Una prueba preliminar de lodos secos en la planta mostró una concentración de 2.149,62 mg/Kg, mientras que una muestra de lodo a la salida de la planta registró 0,547 mg/l. Estos valores comprueban la presencia de aluminio en los lodos generados en la planta.

El análisis del rebalse de agua proveniente del lavado de filtros evidenció concentraciones de aluminio en el rango de 0,197 a 0,25 mg/L. Estos valores indican que una fracción del aluminio no es retenida en las etapas iniciales del tratamiento y, en consecuencia, se transfiere hacia el tanque de lodos, que constituye el destino final del efluente.

### Concentración de aluminio en agua y suelo

Se determinó la concentración de aluminio en el área de influencia, comparando los datos obtenidos en las épocas de estiaje y lluvia.

En agua: La Tabla 3 muestra las concentraciones de aluminio en los puntos de muestreo. En la época de lluvias (muestreos 5 y 6), se registraron los valores más altos, alcanzando 0,259 mg/l en el punto 2 (punto de contacto de la descarga con la quebrada) y 0,219 mg/l en el punto 4 (50 metros aguas abajo). Estos valores son superiores a los de la época de estiaje (muestreos 1 y 2) y confirman que el incremento en el uso de sulfato de aluminio en temporadas de lluvia genera una mayor concentración en las descargas. Los datos también sugieren una fuente adicional de aluminio aguas abajo a partir del punto 6 (Tabla 3).

**Tabla 3 Concentración de aluminio en agua en los muestreos 1, 2, 4, 5 y 6**

Pto	Muestreo 1 (mg Al/l)	Muestreo 2 (mg Al/l)	Muestreo 4 (mg Al/l)	Muestreo 5 y 6 (mg Al/l)
1	0,057	0,027	0,064	0,292
2	0,042	0,014	0,056	0,259
4	0,024	0,001	0,058	0,219
5	0,018	0,002	0,037	0,122
6	0,03	0,074	0,030	--
7	0,66	--	0,060	--
8	0,28	--	0,056	--
9	0,19	--	0,073	--

En suelo: La Tabla 4 presenta las concentraciones de aluminio en el suelo. Los valores variaron en los diferentes puntos y muestreos, pero se mantuvieron consistentemente por debajo de 6.000 mg/Kg.

**Tabla 4 Concentración de aluminio en suelo en los muestreos 1, 2 y 4**

P t	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 4	
	mg/Kg	ppm	mg/Kg	ppm	mg/Kg	ppm
1	5.535	5.5	5.737	5.7	5.649	5.649
2	5.690	5.7	5.444	5.4	4.569	4.569
3	2.864	2.8	4.011	4.01	4.283	4.283
4	5.028	5.0	6.750	6.7	3.405	3.406
5	4.342	4.3	5.058	5.1	4.342	4.342
6	2.083	2.1	2243	2.2	3.800	3.800
7	3.731	3.7	--	--	3.329	3.330
8	4.744	4.7	--	--	2.802	2.802
9	5.171	5.1	--	--	4.818	4.819

### Opciones de tratamiento de lodos residuales

Se evaluaron tres alternativas para el manejo de los lodos.

Lechos de secado: Son una solución de bajo costo operativo, pero su eficacia es lenta y depende de las condiciones climáticas.

Recuperación de sulfato de aluminio con medio ácido: Este método puede recuperar entre el 60-80% del aluminio, pero requiere una inversión inicial alta y una infraestructura especializada.

Cambio de floculante por *Moringa oleifera*: Esta opción ofrece un equilibrio entre sostenibilidad y eficacia.

### Propuesta de cambio por *Moringa oleifera*

El análisis técnico y económico sugiere que la *Moringa oleifera* es la alternativa más viable. Se propuso un modelo de dosificación basado en la turbidez y el pH del agua cruda. Los cálculos indicaron una dosis promedio de 1,95 g por litro, lo que se traduce en una necesidad anual de aproximadamente 22.550 Kg de *Moringa oleifera* y 225,5 Kg de NaCl (Tabla 5).

**Tabla 5 Cantidad de *Moringa oleifera* y NaCl**

Mes	<i>Moringa oleifera</i> (Kg)	NaCl (Kg)
Ene	1.932,33	19,32
Feb	1.849,69	18,50
Mar	2.020,55	20,21
Abr	1.945,09	19,45
May	1.898,66	18,99
Jun	1.809,68	18,10
Jul	1.846,22	18,46
Ago	1.842,17	18,42
Sep	1.802,91	18,03
Oct	1.905,03	19,05
Nov	1.853,61	18,54
Dic	1.843,22	18,43
Anual	22.549,16	225,49

El costo anual estimado para la compra de *Moringa oleifera* de productores locales, que es la opción más económica (Tabla 6 y 7), es de Bs. 1.134.847,12, lo que incluye la materia prima, el NaCl.

**Tabla 1 Costo CIF anual de reactivos**

Insumo	Cantidad Anual (Kg)	Costo Unitario (Bs/Kg)	Costo Total (Bs)	Origen
<i>Moringa oleifera</i> molida	22.550	94,18	2.123,7	Perú
<i>Moringa oleifera</i> molida Proveedores	22.550	130	2.931,5	Bolivia
Locales	22.550	50	1.127,5	Bolivia
NaCl (grado industrial)	255,5	2,80	715,4	Bolivia

**Tabla 7 Comparación de costos anuales**

Proveedores	<i>Moringa</i> + NaCl+Costos Operativos (Bs)
Aprofe	2.941.062,52
Productores Locales	1.134.847,12

### Discusión

La detección de concentraciones de aluminio en el agua superiores al límite normativo vigente, particularmente durante la temporada de lluvias (muestras 5 y 6), se asocia directamente con el incremento en el uso de sulfato de aluminio en el proceso de potabilización, empleado para contrarrestar la elevada turbidez del agua cruda. Este resultado respalda la hipótesis de que una mayor dosificación de coagulante conduce a la formación de cantidades más significativas de hidróxido de aluminio residual, el cual es posteriormente arrastrado hacia la descarga.

El patrón observado refleja una relación consistente entre la variabilidad estacional de la calidad del agua y la eficiencia del tratamiento convencional, evidenciando una vulnerabilidad inherente del sistema frente a condiciones hidrológicas extremas.

En este contexto, la sustitución del sulfato de aluminio por polvo de *Moringa oleifera* se perfila como una alternativa tecnológica de alto potencial. A diferencia de los coagulantes inorgánicos, su aplicación elimina desde el origen la generación de lodos con contenido de aluminio, reduciendo así la necesidad de tratamientos posteriores y disminuyendo la carga química vertida al ambiente. Aunque su implementación implica un costo operativo superior respecto a los coagulantes tradicionales, esta inversión se justifica plenamente por los beneficios ambientales, la reducción de riesgos asociados a la exposición al aluminio y la contribución a la sostenibilidad del sistema de potabilización en el largo plazo.

La propuesta se alinea con investigaciones previas que han demostrado la eficacia de *Moringa oleifera* como coagulante natural, alcanzando desempeños comparables a los coagulantes químicos inorgánicos en la remoción de turbidez y sólidos suspendidos. Estos resultados consolidan la pertinencia de explorar alternativas basadas en recursos biológicos locales, capaces de integrar criterios de eficiencia técnica, seguridad sanitaria y sostenibilidad ambiental en los procesos de tratamiento de agua.

## Conclusiones

Este estudio evaluó de manera integral el impacto ambiental de los lodos con contenido de aluminio generados en la planta potabilizadora El Rollo y propuso alternativas de manejo orientadas a la sostenibilidad.

La aplicación de la matriz de impacto de Conesa Fernández-Vitora permitió confirmar que el vertido de estos residuos afecta significativamente tanto a los cuerpos de agua como al suelo, evidenciado por concentraciones de aluminio superiores a los límites normativos en las descargas y por el potencial de acumulación en los sedimentos circundantes.

El análisis teórico se centró en la valorización de residuos mediante prácticas sostenibles, identificando tres enfoques principales: reciclaje de coagulantes químicos, secado térmico y sustitución por alternativas naturales. Entre ellos, la sustitución del sulfato de aluminio por polvo de *Moringa oleifera* se destacó como la opción más viable desde el punto de vista técnico, ambiental y social.

A diferencia de los métodos de recuperación o secado, esta alternativa aborda el problema desde su origen, evitando la generación de lodos con alto contenido de aluminio y reduciendo la carga química vertida al ambiente.

Si bien el costo operativo anual de la *Moringa oleifera* resulta superior al de los coagulantes tradicionales, su implementación se considera factible y estratégica debido a su valor integral: mejora la eficiencia en la clarificación del agua, disminuye la dependencia de insumos químicos, genera residuos más manejables y aporta beneficios sociales al dinamizar la economía local. En consecuencia, la adopción de este coagulante natural no solo contribuiría a mejorar la calidad del agua tratada, sino que también posicionaría a la planta El Rollo como un referente regional en la incorporación de tecnologías sostenibles para la gestión del recurso hídrico.

## Referencias

- Almora-Hernández, E., Campa-Huergo, C., & Rodríguez-Jiménez, E. (2022). Correlación granulometría-densidad de los polvos de hojas secas de *Moringa oleifera* de diferentes tamices. *RTQ*, 42(1), 131–141. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852022000100131](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852022000100131)
- Casierra, F., & Aguilar, O. (2007). Estrés por aluminio en las plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 1(2), 246–256.

- Conesa Fernández-Vitora, V. (1993). *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental* (2ª ed.). Mundi-Prensa.
- Ferranti, P., Berry, E., & Anderson, J. (2019). *Encyclopedia of food security and sustainability* (Vol. 1, pp. 6–8). Book Aid International. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22063>
- Garrido, A. (2019). Coagulación y floculación en el tratamiento de aguas residuales. *Revista de Tecnología del Agua*, 12(2), 45–59. <https://doi.org/10.1234/rtaw.2019.045>
- González, J., & Pérez, M. (2023). Análisis de generación: características tóxicas y biológico-infecciosas de lodos de la potabilizadora Los Álamos. *Revista FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*. <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG/article/view/57/5535>
- Gutiérrez-Rosero, J. A., Ramírez-Fajardo, Á. I., Rivas, R., Linares, B., & Paredes, D. (2014). Tratamiento de lodos generados en el proceso convencional de potabilización de agua. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(25), 13–27.
- Instituto Boliviano de Normalización y Calidad. (2021). *NB-ISO 5667-1:2021. Calidad del agua. Muestreo. Parte 1: Guía para el diseño de programas y técnicas de muestreo*. IBNORCA.
- Martín, C., Martín, G., García, A., Fernández, T., Hernández, E., & Puls, J. (2013). Potenciales aplicaciones de *Moringa oleifera*: Una revisión crítica. *Pastos y Forrajes*, 36(2), 137–149.
- Martínez D., W. (2014). Evaluación del impacto ambiental en obras viales. *Negocio*, 10(29), 5–21.
- Mendoza, R. B., & Espinoza, A. (2017). *Guía técnica para muestreo de suelos*. Universidad Nacional Agraria y Catholic Relief Services. <https://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>
- Nuñez Zarur, J. R., & Peña Castro, M. (2011). *Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en la planta potabilizadora de la empresa Aguas de Cartagena S.A.E.S.P. y estudio de viabilidad económica de su reutilización como coagulante* [Trabajo de grado, Universidad de Cartagena, Facultad de Ciencias e Ingeniería].
- Okuda, T., Baes, A. U., Nishijima, W., & Okada, M. (2001). Isolation and characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seed by saline solution. *Water Research*, 35(2), 405–410. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00290-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00290-6)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (n.d.). *Capítulo 3: Estimaciones del caudal del agua*. FAO. [https://www.fao.org/fishery/static/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6705s/x6705s03.htm](https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6705s/x6705s03.htm)
- Pinaya Soliz, E. M. (2023). *Estudio de un lecho secado piloto para el tratamiento de lodos generados en la planta potabilizadora El Rollo de ELAPAS* [Proyecto de grado, Universidad Mayor Real y Pontificia San Francisco Xavier de Chuquisaca].
- Raigosa Restrepo, M. (2012). *Evaluación de alternativas para el manejo de lodos provenientes de las plantas de potabilización de agua de los municipios del departamento de Risaralda mediante el análisis costo-beneficio* [Tesis de maestría, Universidad Tecnológica de Pereira].
- Torres-Mendoza, K., Lara Tambaco, M., & León Araujo, M. (2023). Estudio para la recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en floculadores y sedimentadores.

Véliz, E., Llanes, J. G., Fernández, L. A., & Bataller, M. (2016). Coagulación-floculación, filtración y ozonización de aguas residuales para su reutilización en riego agrícola. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(1), 17–34. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222016000100017&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000100017&lng=es&tlng=es)

Villegas G., J. D., Castaño R., J. M., & Paredes Cuervo, D. (2005). Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en plantas de potabilización de agua. *Scientia et Technica*, 11(28), 223–228.

Weather Spark. (2024). *Sucre, Bolivia: Clima anual*. Weather Spark. <https://es.weatherspark.com/y/90031/Clima-anual-en-Sucre-Bolivia>

## Sistema de Gestión Ambiental en la empresa “Plásticos Torres” basado en la norma ISO 14001:2015

### Environmental Management System at “Plásticos Torres” based on ISO 14001:2015

SOLORZANO – Nadia <sup>1\*</sup> & ESPINDOLA– Micaela<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Carrera de Ingeniería Ambiental*

<sup>2</sup> *Consultor Ambiental*

Recibido mayo,06, 2025; Aceptado mayo, 30, 2025

#### Resumen

El presente trabajo tiene como propósito diseñar un Sistema de Gestión Ambiental (SGA) para la empresa Plásticos Torres, en cumplimiento de los lineamientos de la norma ISO 14001:2015. Este sistema busca gestionar, controlar y mitigar los impactos ambientales derivados de las actividades productivas de la empresa.

Como parte del diagnóstico ambiental, se realizaron evaluaciones del desempeño de la empresa Plásticos Torres mediante monitoreos de ruido en áreas internas y perimetrales durante cuatro días, mediciones de partículas suspendidas (PST y PM10) y análisis de agua residual. En este último, se evaluaron parámetros como DBO5, DQO, pH y sólidos suspendidos totales. Los resultados señalaron la necesidad de aplicar acciones correctivas para mejorar el control de emisiones y la gestión de efluentes.

También se desarrolló una auditoría ambiental interna, involucrando tanto al personal operativo como administrativo, con el fin de identificar fortalezas y debilidades en la gestión actual de los aspectos ambientales.

Esta información fue fundamental para el diseño de un manual de gestión ambiental que establece políticas, procedimientos y responsabilidades claras para mitigar y prevenir los impactos ambientales asociados a las actividades de la empresa.

#### Palabras Clave

Certificación ambiental, Sostenibilidad empresarial, diagnóstico ambiental, mejora continua

#### Abstract

Environmental Management System (EMS) for Plásticos Torres, in compliance with the guidelines of the ISO 14001:2015 standard. This system aims to manage, control, and mitigate the environmental impacts resulting from the company's production activities.

As part of the environmental assessment, evaluations of Plásticos Torres' performance were conducted through noise monitoring in internal and perimeter areas over four days, measurements of suspended particulate matter (PST and PM10), and wastewater analysis. In the latter, parameters such as BOD5, COD, pH, and total suspended solids were evaluated. The results indicated the need to implement corrective actions to improve emissions control and effluent management.

An internal environmental audit was also conducted, involving both operational and administrative staff, to identify strengths and weaknesses in the current management of environmental aspects.

This information was essential for the design of an environmental management manual that establishes clear policies, procedures, and responsibilities to mitigate and prevent environmental impacts associated with the company's activities.

#### Keywords:

Environmental certification; corporate sustainability; environmental assessment; continuous improvement

**Citación:** Solorzano N. (2025). Sistema de Gestión Ambiental en la empresa “Plásticos Torres” basado en la norma ISO 14001:2015 *Revista Ingeniería Sostenible Ambiental*, 2(4), 113-120

## Introducción

Hoy en día, en todas las industrias, incluida la de plásticos, la sostenibilidad ambiental se ha convertido en una de las principales preocupaciones. La producción y el manejo de residuos plásticos en la actualidad implican impactos ambientales severos, por lo que dentro del sector han surgido nuevas prácticas responsables y sostenibles. En este contexto, la adopción de un Sistema de Gestión Ambiental (SGA) se rige como uno más de los medios para minimizar impactos negativos, optimizar el rendimiento ambiental y promover la gestión responsable de las prácticas empresariales. (Gupta. Agrawal, 2019).

En la actualidad, resulta evidente que las empresas no pueden limitarse a maximizar sus beneficios económicos sin tener en cuenta el impacto ambiental de sus actividades. Cada vez más, se espera que las industrias combinen sus objetivos financieros con un compromiso hacia la protección del medio ambiente. Esta transición responde a una mayor conciencia global sobre la importancia de la preservación ambiental y a la aplicación de normativas más estrictas que buscan garantizar la sostenibilidad de los recursos y la mitigación de los impactos negativos en el entorno. (Adams, 2019). El cumplimiento de estas normas ambientales se ha convertido en una prioridad para las empresas, ya que se reconoce la necesidad de operar de manera sostenible. Esto implica no solo respetar la legislación vigente, sino también adoptar prácticas que minimicen el impacto ambiental de sus actividades.

La empresa Plásticos Torres, dedicada a la producción de productos plásticos, enfrenta el desafío de mejorar su desempeño ambiental y alinearse con las exigencias contemporáneas en materia de sostenibilidad. Este trabajo tiene como objetivo el diseño de un sistema de gestión ambiental, orientado a gestionar adecuadamente sus aspectos ambientales y a fomentar una cultura organizacional comprometida con el medio ambiente

## Materiales y métodos

Se emplearon técnicas de investigación sustentadas en procedimientos teóricos y empíricos. Se adoptó un enfoque mixto (cuali-cuantitativo), que integró el análisis descriptivo con la recolección y medición sistemática de datos ambientales en campo.

**Diagnóstico ambiental preliminar.** - Se realizó una auditoría ambiental mediante observación directa en las instalaciones de la empresa, complementada con listas de verificación basadas en los requisitos de la norma ISO 14001:2015 y la normativa nacional vigente. Este procedimiento permitió identificar y caracterizar los aspectos e impactos ambientales asociados a las operaciones unitarias de la organización.

**Evaluación de condiciones ambientales.**- La evaluación cuantitativa se efectuó mediante monitoreos técnicos específicos:

**Ruido ambiental:** Se efectuaron mediciones con un sonómetro en cinco puntos estratégicos (internos y perimetrales) durante cuatro días consecutivos.

**Calidad del aire:** Se utilizó el equipo EVM-3 para determinar concentraciones de PM10 y partículas suspendidas totales (PST) en el área de aglutinado.

**Efluentes líquidos:** Se recolectaron muestras de agua residual, analizadas posteriormente en laboratorio mediante métodos estándar para determinar DBO5, DQO, pH y sólidos suspendidos totales (SST).

**Análisis de cumplimiento normativo.**- Se aplicó la técnica de revisión documental, contrastando los resultados obtenidos con los límites establecidos en la legislación ambiental vigente. Este análisis permitió evaluar el grado de conformidad de las operaciones con los marcos regulatorios aplicables.

## Resultados

### Diagnóstico ambiental

El diagnóstico ambiental realizado en la empresa Plásticos Torres evidenció diversas deficiencias relacionadas con el control de sus aspectos e impactos ambientales. A través del monitoreo de ruido, partículas suspendidas (PST y  $PM_{10}$ ) y análisis de agua, se identificaron niveles de contaminación que en algunos casos superan los límites permisibles establecidos por la normativa ambiental boliviana. Asimismo, se constató la falta de procedimientos formales para la gestión de residuos, la atención de emergencias y el cumplimiento de regulaciones específicas. Las condiciones observadas indican la necesidad de implementar un Sistema de Gestión Ambiental que permita prevenir, controlar y mitigar los impactos generados por los procesos productivos de la empresa.

### Resultados de monitoreo de ruido

Se realizaron mediciones en cinco puntos (tres en el perímetro exterior y dos en maquinaria interna) durante cuatro días. Los valores promedios obtenidos fueron:

- Punto 1 (exterior): 71,4 dB(A)
- Punto 2 (exterior): 63,6 dB(A)
- Punto 3 (exterior): 60,9 dB(A)
- Punto 4 (Trituradora gruesa): 80,7 dB(A)
- Punto 5 (Trituradora fina): 90,5 dB(A)

Los puntos 1 y 5 superaron los límites permisibles establecidos por el RASIM y la OMS (70 dB(A) para exteriores y 85 dB(A) para interiores). Se calculó el promedio y la desviación estándar para cada punto, identificando variaciones significativas en el caso de la trituradora fina, con un nivel de exposición auditiva crítico para el personal.

### Monitoreo de calidad del aire

En el área de aglutinado se midió la concentración de material particulado, obteniéndose los siguientes resultados:

- $PM_{10}$ : 111,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (límite: 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
- PST: 87,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (límite: 260  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Ambos valores se encontraron dentro de los límites establecidos por el reglamento de contaminación atmosférica, aunque se observó que durante la medición hubo paradas intermitentes de la máquina, lo cual puede haber influido en los niveles registrados.

### Análisis de agua residual

Las muestras de agua residual se analizaron en laboratorio para los siguientes parámetros:

- DBO5: 150 mg/L (límite: 80 mg/L).
- DQO: 553 mg/L (límite: 250 mg/L).
- SST: 18282 mg/L (límite: 60 mg/L).
- pH: 7,14 (dentro del rango permitido de 6,5).

Los resultados indican un incumplimiento significativo en los valores de carga orgánica y sólidos suspendidos, lo cual evidencia la necesidad de implementar un sistema de tratamiento adecuado para los efluentes generados.

### Auditoría ambiental

Se llevó a cabo una auditoría interna que permitió identificar el grado de cumplimiento de los requisitos ambientales aplicables y evaluar las condiciones actuales de la empresa respecto a la gestión ambiental. La auditoría evidenció la ausencia de procedimientos documentados para el manejo de residuos, la atención de emergencias ambientales, y la evaluación de aspectos e impactos ambientales (Tabla 1). Se detectó también una limitada concienciación del personal sobre prácticas ambientales responsables, así como deficiencias en el almacenamiento temporal de residuos, lo que podría representar riesgos para el entorno y la salud ocupacional.

**Tabla 1 Matriz de caracterización de importancia de los impactos**

Nº	Aspecto ambiental	Impacto ambiental	Factor	Signo	Intensidad (I)	Extensión (EX)	Momento (MO)	Persistencia (PE)	Reversibilidad (RV)	Recuperabilidad (M)	Sinergia (SI)	Acumulación (AC)	Efecto (EF)	Periodicidad (PR)	Importancia	Relevancia
1	Flujo vehicular por el área de influencia.	Deterioro de la calidad del aire	Aire	-	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	48	Moderado
2	Efluentes líquidos	Generación de riesgo a los operadores durante la manipulación	suelo	-	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	42	Moderado
3	Consumo de recursos naturales	Reducción de los recursos naturales	Suelo Ecología	-	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	37	Moderado
4	Riesgos ambientales y seguridad	Exposición de trabajadores a partículas y vapores	Socioeconómico	-	4	1	4	4	4	4	1	1	4	4	40	Moderado
5	Efluentes líquidos	Contaminación de aguas subterráneas.	Agua suelo	-	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	46	Moderado
6	Generación de ruido	Daño psicomotriz	Ruido	-	4	4	4	4		4	4	1	4	4	49	Moderado
7	Emisiones atmosféricas	Contaminación del aire	aire	-	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	52	Severo
8	Generación de gases tóxicos	Generación de gases tóxicos por calentamiento de plásticos	aire	-	4	1	4	4	4	4	4	4	4	4	46	Moderado

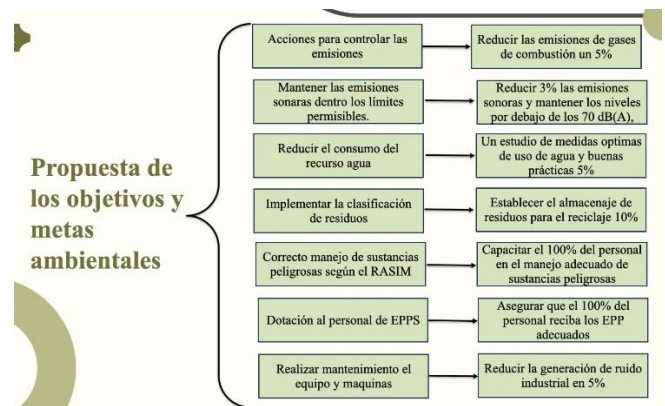
## Manual de gestión ambiental

El manual del Sistema de Gestión Ambiental (SGA) diseñado para la empresa Plásticos Torres constituye un documento normativo clave que formaliza el compromiso de la organización con la sostenibilidad ambiental y el cumplimiento de la norma ISO 14001:2015. A través de este instrumento, se establece un marco organizacional para identificar, evaluar, controlar y mitigar los aspectos e impactos ambientales derivados de las operaciones productivas de la empresa.

Entre los principales resultados del manual se destaca la formulación de una política ambiental clara, alineada con los principios de prevención de la contaminación, cumplimiento de la legislación aplicable y mejora continua. Asimismo, se definieron objetivos y metas ambientales específicos, acompañados de indicadores para su seguimiento y evaluación.

El manual describe detalladamente los procedimientos operativos ambientales que deben seguirse en cada etapa del proceso productivo, incluyendo la gestión de residuos, el uso eficiente de recursos, el manejo de sustancias peligrosas y la prevención de emergencias ambientales. Se establece también la estructura organizativa para la implementación del SGA, definiendo funciones, responsabilidades y niveles de autoridad, con énfasis en la capacitación del personal y su participación activa. Otro resultado importante es la inclusión de herramientas de seguimiento, como auditorías internas, revisión por la dirección y mecanismos de retroalimentación, que garantizan la eficacia del sistema y permiten su ajuste continuo en función de los resultados obtenidos y los cambios en el entorno normativo o productivo. En conjunto, este manual constituye una guía fundamental para que *Plásticos Torres* transite hacia una producción más limpia, fortaleciendo su desempeño ambiental, su imagen institucional y su competitividad en el sector industrial

**Figura 1 Planificación, objetivos y metas ambientales**



**Figura 2 Programas de gestión ambiental**



## Discusión

El diseño del Sistema de Gestión Ambiental (SGA) propuesto para la empresa Plásticos Torres representa una estrategia integral para afrontar los desafíos ambientales propios de una industria recicladora de plásticos tipo 4. La empresa, aunque contribuye positivamente al reciclaje y reducción de residuos urbanos, también genera impactos ambientales significativos, que fueron abordados de manera técnica en este trabajo.

Durante el desarrollo del diagnóstico inicial, se evidenció que los procesos de aglutinado generan altas concentraciones de material particulado, ruido constante, y emisiones que podrían ser perjudiciales tanto para el personal como para el entorno inmediato. A través del uso del equipo EVM-3, se cuantificaron estas emisiones, revelando la necesidad urgente de sistemas de ventilación adecuados y controles en la fuente.

La metodología empleada que combinó observación directa, análisis normativo y levantamiento de información primaria fue efectiva para determinar los aspectos ambientales significativos y sus impactos asociados. Esta información fue clave para establecer objetivos ambientales concretos y prioritarios, como: reducción de partículas, manejo responsable de residuos peligrosos (lubricantes, tintas), y cumplimiento normativo con la Ley 1333 de Medio Ambiente y el Reglamento de Gestión Ambiental.

Uno de los principales aportes de este trabajo es el desarrollo de documentos operativos clave, como el Manual Ambiental, procedimientos específicos para el manejo de residuos, planes de emergencia ambiental, y registros que facilitan la trazabilidad. Además, se diseñó un cronograma de implementación de 12 meses, realista y adaptable a los recursos de la empresa.

La propuesta también reconoce los retos que podrían surgir en la implementación, como la resistencia al cambio, la necesidad de financiamiento para mejoras técnicas, y la falta de personal especializado. No obstante, plantea soluciones prácticas como alianzas con instituciones ambientales, apoyo de universidades, y capacitaciones internas progresivas.

Desde un enfoque técnico y académico, este proyecto demuestra cómo una microempresa puede transitar hacia la sostenibilidad ambiental sin comprometer su rentabilidad, incorporando prácticas de gestión reconocidas internacionalmente. Asimismo, refuerza el rol del ingeniero ambiental como agente de cambio que vincula conocimiento técnico con acción concreta.

## Conclusiones

El presente estudio permitió diseñar un Sistema de Gestión Ambiental (SGA) específico para la empresa Plásticos Torres, lo cual representa un aporte relevante en el contexto de pequeñas industrias recicladoras que aún no cuentan con estructuras formales de gestión ambiental. El enfoque aplicado, basado en la norma ISO 14001:2015, permitió integrar criterios técnicos, normativos y operativos para abordar de manera sistemática los aspectos e impactos identificados.

Una de las contribuciones más significativas del estudio fue la aplicación de herramientas de diagnóstico ambiental adaptadas a las condiciones reales de la empresa, lo que facilitó la identificación de áreas críticas como la gestión de emisiones acústicas y efluentes líquidos. A partir de estos hallazgos, se establecieron lineamientos claros para el diseño del sistema, incorporando procedimientos de control operacional, planes de emergencia, programas de capacitación y seguimiento mediante indicadores ambientales

El estudio también evidenció la importancia de vincular el cumplimiento legal con la mejora continua, permitiendo que el SGA no solo funcione como una herramienta de control, sino como una plataforma para la sostenibilidad operativa.

En relación con los objetivos planteados, se logró caracterizar el desempeño ambiental de la empresa, identificar sus principales deficiencias y proponer un sistema coherente, viable y adaptable a su estructura.

## Referencias

Adams, J. (2019). Responsabilidad social empresarial y medio ambiente. *Revista de Economía Ambiental*, 45–62.

Asamblea Legislativa Plurinacional de Bolivia. (1992). *Ley 1333 del Medio Ambiente*. *Gaceta Oficial de Bolivia*. <https://www.lexivox.org/norms/BO-L-1333.xhtml> (lexivox.org in Bing)

Comité Técnico de Normalización ISO/TC 207/SCI. (2015). *Aspecto ambiental*.

Dow Chemical Company. (2020). *Sustainability at Dow*. Dow Chemical Company.

Escalier, N. C. (2021). *Plan de producción más limpia en la empresa Plásticos Torres* [Tesis de licenciatura, Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca].

Gupta, S., & Agrawal, R. (2019). Environmental management practices and their effects on the cost competitiveness of firms: The role of collaborative capability. *Production Planning & Control*, 30(9), 735–747. <https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1582106> (doi.org in Bing)

International Organization for Standardization. (2004). *ISO 14001:2004 Environmental management systems—Requirements with guidance for use*. International Organization for Standardization.

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 14001:2015 Environmental management systems—Requirements with guidance for use*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/60857.html>

ISO. (2023). *Historia de la ISO 14001. Environmental, social and governance (ESG) implementation principles*.

Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia. (1992). *Reglamento Ambiental para el Sector Manufacturero Industrial (RASIM)*. *Gaceta Oficial de Bolivia*. <https://www.mmaya.gob.bo/normativa/>

Organización Internacional de Normalización (ISO). (2022). *Organización Internacional de Normalización (ISO)*.

Ortiz, C. F. (2018). *Diseño de un sistema de gestión ambiental para la empresa I.M.E.T. basado en la norma ISO 14001:2015* [Tesis de licenciatura, Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca].

Plásticos Torres. (2018). *Manual de Plásticos Torres*. Sucre.

Robertson, G. L. (2013). *Food packaging: Principles and practice* (3rd ed.). CRC Press.

Rodríguez, J., & Pérez, M. (2020). Gestión ambiental en la industria. *Técnica Ambiental*, 46(3).

Sistema de Gestión Ambiental. (2022). *Sistema de Gestión Ambiental*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo.

Velasco, M. S. (2016). *Diseño de un sistema de gestión ambiental para la empresa Cerámica Yacambe SRL, Tarabuco* [Tesis de licenciatura, Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca].

Vítora, F. (2000). *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*. España: Ediciones Mundi-Prensa.

## Evaluación del riesgo de erosión mediante la integración del Proceso Analítico Jerárquico y Sistemas de Información Geográfica

### Erosion Risk Assessment Through the Integration of the Hierarchical Analysis Process and Geographic Information Systems

VERA – Daniela<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Carrera de Ingeniería Ambiental.

Recibido diciembre, 02, 2024; Aceptado mayo, 28, 2025

#### Resumen

Este estudio presenta la integración del Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) y la matriz de Saaty con la aplicación de los sistemas de información geográfica (SIG), orientada a optimizar la toma de decisiones espaciales en escenarios complejos. El objetivo principal fue diseñar una metodología robusta para la evaluación multicriterio de factores geográficos, incrementando la precisión y objetividad en la selección de ubicaciones y la priorización de áreas. El PAJ se aplicó para estructurar los criterios de decisión y determinar su importancia relativa mediante matrices de comparación pareada de Saaty, fundamentadas en juicios lógicos. Los pesos obtenidos se integraron en ArcGIS, donde se realizaron análisis de superposición ponderada para generar un mapa de riesgos de erosión de suelos. La aplicación de esta metodología en la comunidad de Cachimayu, Yotala, evidenció que más de la mitad de su territorio (6,19 km<sup>2</sup>) presenta alto riesgo de erosión. Este hallazgo no solo cuantifica la magnitud del problema, sino que también permite delimitar con precisión zonas de riesgo alto, moderado y bajo, lo cual resulta esencial para la planificación de intervenciones diferenciadas y efectivas.

Los resultados demuestran que la combinación del PAJ y SIG constituye una herramienta sistemática y transparente para evaluar escenarios ambientales complejos, facilitando la identificación de áreas prioritarias según criterios definidos. En consecuencia, la metodología propuesta ofrece una solución eficaz para la gestión sostenible de recursos naturales, la planificación territorial y la evaluación de riesgos, aportando una base sólida para la toma de decisiones informadas sustentadas en datos espaciales.

#### Palabras Clave

Evaluación multicriterio, conservación de suelos, superposición ponderada.

#### Abstract

This study presents the integration of the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Saaty's priority matrix with Geographic Information Systems (GIS), aimed at optimizing spatial decision-making in complex scenarios. The primary objective was to design a robust methodology for multi-criteria evaluation (MCE) of geographic factors, thereby enhancing precision and objectivity in site selection and land prioritization. The AHP was employed to structure decision criteria and determine their relative importance through Saaty's pairwise comparison matrices, based on logical judgments. The resulting weights were integrated into ArcGIS to perform weighted overlay analyses, generating a comprehensive soil erosion risk map. The application of this methodology in the community of Cachimayu, Yotala, revealed that more than half of its territory (6.19 km<sup>2</sup>) is under high erosion risk. This finding not only quantifies the magnitude of the environmental challenge but also enables the precise delimitation of high, moderate, and low-risk zones, which is essential for planning differentiated and effective interventions.

The results demonstrate that the synergy between AHP and GIS constitutes a systematic and transparent framework for assessing complex environmental scenarios, facilitating the identification of priority areas based on predefined criteria. Consequently, the proposed methodology offers an efficient solution for sustainable natural resource management, land-use planning, and risk assessment, providing a rigorous foundation for informed, data-driven spatial decision-making.

#### Keywords

Multicriteria assessment, soil conservation, weighted overlay

**Citación:** Vera D. (2025). Evaluación del riesgo de erosión mediante la integración del Proceso Analítico Jerárquico y Sistemas de Información Geográfica, *Revista Ingeniería Sostenible Ambiental*, 2(4), 121-128

## Introducción

La erosión del suelo representa una amenaza global creciente, con consecuencias devastadoras para la productividad agrícola y la sostenibilidad ambiental. Un estudio reciente de (Bezak et al., 2024) revela que América del Sur ostenta la segunda tasa de erosión bruta más alta a nivel mundial, alcanzando un promedio de 7,8 t/ha.año, solo superada por Australia y Oceanía. Esta cifra subraya la urgencia de abordar la degradación del suelo en la región. En Bolivia, los registros de degradación se remontan a antes de 1999, cuando se celebró el Congreso de Suelos (Orsag C., 1999) con el fin de proponer medidas de conservación; sin embargo, su implementación ha sido limitada.

Este estudio surge de la necesidad de identificar medidas de conservación del suelo adaptadas a regiones específicas. Para lograrlo, aplicamos un enfoque innovador de evaluación multicriterio utilizando la matriz de Saaty. A diferencia de los métodos tradicionales (Rengifo-Rengifo et al., 2022), como la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), nuestra metodología incorpora un criterio de expertos para ponderar la importancia de variables esenciales en la determinación de la erosión del suelo en una región dada.

El Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ), central en la matriz de Saaty, permite comparar variables entre sí y consigo mismas (Romero, 2016). Esto facilita la inclusión de un rango flexible de variables (de dos a 'n') y la asignación de pesos lógicos que resultan en una jerarquía robusta y bien fundamentada. Estos pesos se integrarán posteriormente en un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS 10.5), utilizando su herramienta Weighted Overlay, que trabaja con capas ráster de las variables. Según ESRI (2025), la herramienta permite aplicar los valores derivados de la matriz de Saaty a cada capa ráster, generando como resultado un mapa cualitativo del nivel de erosión del suelo. Este estudio se focaliza en la comunidad de Cachimayu, municipio de Yotala, Chuquisaca (Bolivia), aportando una solución localizada a un problema de alcance global, como es la degradación de suelos.

## Materiales y métodos

### Materiales

Los materiales clave requeridos para este estudio son:

### Información geográfica y satelital

Se emplearon mapas temáticos de precipitación, pendientes, uso de suelos y zonificación del área de estudio como insumos fundamentales para el análisis. Además, se utilizó un Modelo Digital de Elevación (MDE) con resolución espacial de 5 m, orientado específicamente al cálculo de pendientes y a la derivación de variables topográficas. De manera complementaria, se integraron datos georreferenciados que permitieron delimitar con alta precisión la zona de estudio, asegurando la coherencia espacial de los análisis y fortaleciendo la confiabilidad de los resultados obtenidos.

### Herramientas de análisis:

La implementación del Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ) se llevó a cabo mediante una matriz de Saaty automatizada en Microsoft Excel, lo que permitió calcular de manera sistemática los pesos ponderados de las variables consideradas en el estudio. Estos valores fueron posteriormente integrados en el software ArcGIS, plataforma de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la cual se aplicó la técnica de superposición ponderada (Weighted Overlay) para la generación de mapas de riesgo de erosión. Este procedimiento aseguró un análisis espacial robusto, coherente y reproducible.

### Métodos

### Recopilación y análisis de información previa

Se realizó una indagación documental exhaustiva para comprender la historia de la comunidad de Cachimayu, incluyendo su contexto ambiental, social y las medidas de conservación de suelos aplicadas anteriormente.

## Trabajo de campo y percepción local

Se llevó a cabo visitas directas a la comunidad de Cachimayu para observar y registrar las condiciones actuales de los suelos, verificar el uso del suelo y la cobertura vegetal, e identificar indicios de erosión.

Se realizaron entrevistas con pobladores clave de la comunidad. Estas entrevistas, basadas en un cuestionario estructurado, buscarán comprender la percepción local sobre la realidad de la degradación de los suelos, las prácticas agrícolas, y el conocimiento empírico sobre la erosión y su manejo. Esta información cualitativa fue crucial para complementar los datos espaciales y contextualizar los hallazgos.

## Preparación y ponderación de variables para la evaluación multicriterio

Con base en la revisión bibliográfica especializada en procesos de erosión de suelos y considerando la disponibilidad de información específica para la comunidad de Cachimayu, se identificaron las variables críticas que determinan la susceptibilidad a la erosión. Entre ellas destacan la pendiente del terreno, el uso del suelo y la precipitación. La toma de decisiones contó con el respaldo del proyecto Jalda (Arteaga & Prefectura del Departamento de Chuquisaca, 2002), a partir del cual se establecieron criterios técnicos fundamentados en juicio experto. Dichos juicios se plasmaron en la matriz de Saaty, automatizada en Excel, lo que permitió calcular los pesos de ponderación de cada variable y verificar la consistencia de los datos ingresados. Estos pesos reflejaron la importancia relativa de cada factor en la determinación del riesgo de erosión en la región, constituyendo la base metodológica para el análisis multicriterio.

## Modelado geoespacial de la erosión

El procesamiento de datos se realizó en el software ArcGIS. Todas las capas de información sobre precipitación, pendientes y uso de suelos fueron transformadas a formato

ráster, homogeneizando su resolución espacial y sistema de coordenadas para garantizar la compatibilidad en el análisis.

Posteriormente, cada capa ráster fue reclasificada de acuerdo con su contribución relativa a la erosión, asignando valores más altos a las categorías con mayor susceptibilidad. La integración de estas capas se efectuó mediante la herramienta *weighted overlay* de ArcGIS, aplicando los pesos derivados de la matriz de Saaty. Este procedimiento permitió generar un mapa de riesgo de erosión que describe cualitativamente los niveles de susceptibilidad presentes en la comunidad de Cachimayu, diferenciando áreas de riesgo alto, moderado y bajo.

## Análisis y determinación de áreas de conservación

El mapa ráster de riesgo de erosión fue convertido a formato vectorial (*shapefile*, SHP), lo que permitió realizar un análisis más detallado y preciso de las áreas afectadas. A partir de esta conversión se identificaron las zonas prioritarias con mayor susceptibilidad a la erosión, cuantificando su extensión y delimitando espacialmente los sectores críticos. Con base en los niveles de riesgo obtenidos, así como en la información recopilada mediante trabajo de campo y revisión documental, se formularon propuestas de conservación de suelos específicas para cada zona. Estas medidas fueron diseñadas considerando las particularidades biofísicas y socioeconómicas de la comunidad de Cachimayu, con el fin de garantizar intervenciones diferenciadas y efectivas orientadas a la mitigación del riesgo de erosión.

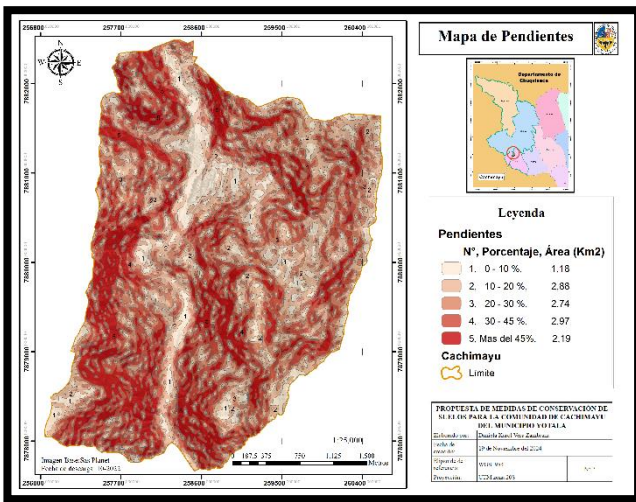
## Resultados

Los resultados de esta investigación se derivan de un proceso geoespacial y de análisis multicriterio que permitió caracterizar los niveles de erosión del suelo en la comunidad de Cachimayu.

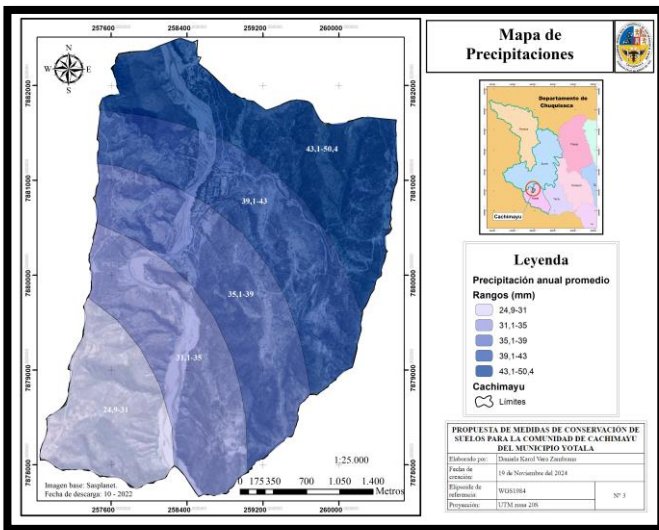
**Elaboración de mapas base y unidades de terreno**

Inicialmente, y dado que solo se disponía de los límites geográficos de la comunidad, se procedió a generar los mapas temáticos esenciales utilizando ArcGIS. Esto incluyó la creación de mapas de precipitación, uso de suelo, pendientes y unidades de terreno. Estos mapas constituyen la base espacial para el estudio (Szemerédi & Remsei, 2024).

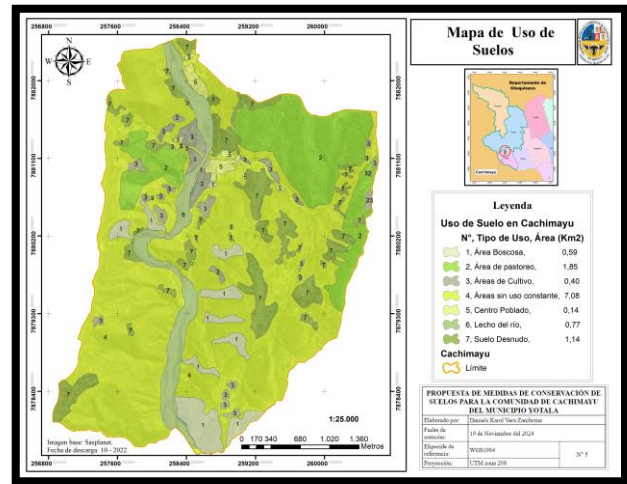
**Figura 1 Mapa de pendientes**



**Figura 2 Mapa de precipitaciones**



**Figura 3 Mapa de uso de suelos**



Se aplicó un análisis multicriterio a cada unidad de terreno definida en el mapa de zonificación de la comunidad, con el fin de precisar las medidas de conservación de suelos. Para consolidar la información, los resultados de las variables se integraron en una tabla única, en la que se calcularon los valores promedio de cada variable por unidad de terreno.

**Tabla 1. Valores finales de la matriz de Saaty, por unidad de terreno en la comunidad de Cachimayu.**

Nota. Las unidades de terreno pertenecen a la zonificación de la comunidad de Cachimayu donde: Z1= Zona 1= Serranía baja Moderada; Z2= Zona 2=

Importancia de las variables respecto a la influencia de estas según la matriz de "Saaty"				
Unidades de terreno Variables	Pen-diente	Preci-pitación	Uso de suelos	Consistencia
Z1	0,43	0,47	0,10	0,004
Z2	0,43	0,43	0,14	0,000
Z3	0,55	0,24	0,21	0,014
Z4	0,07	0,35	0,58	0,024
Z5	0,43	0,43	0,14	0,000
Z6	0,41	0,48	0,11	0,022
<b>Importancia Total de variables</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>	

Serranía Media fuerte; Z3=Zona 3=Serranía baja moderada con pocas áreas planas; Z4= Zona 4= Terrazas Aluviales; Z5=Zona 5= Serranía baja moderada con áreas planas; Z 6=Zona 6= Lecho del Río

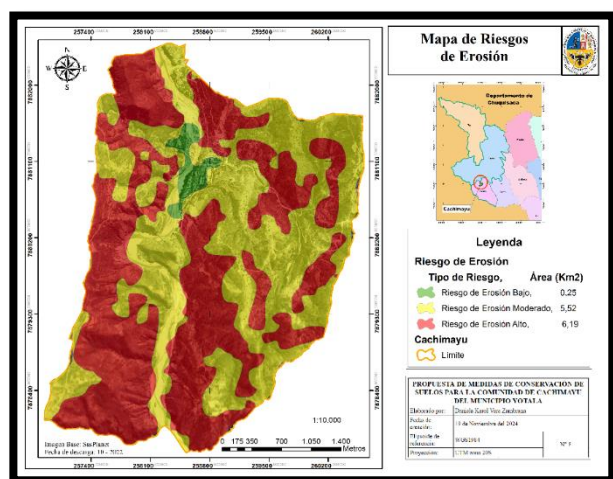
## Mapa de riesgo de erosión y cuantificación de áreas

Empleando las herramientas de ArcGIS y los datos ponderados de las variables, se generó el mapa de erosión de suelos de la comunidad de Cachimayu. Este mapa se obtuvo inicialmente en formato ráster y fue posteriormente convertido a formato vectorial (shapefile), lo que facilitó la cuantificación de las áreas con diferentes niveles de riesgo.

El análisis reveló la presencia de tres niveles de riesgo de erosión:

- Riesgo de erosión alto: Abarca 6.19 km<sup>2</sup>, lo que representa más del 50% de los 11.97 km<sup>2</sup> totales de la comunidad de Cachimayu.
- Riesgo de erosión moderado: Cubre 5.52 km<sup>2</sup>.
- Riesgo de erosión bajo: Se limita a 0.25 km<sup>2</sup>.

**Figura 4** Mapa de riesgos de erosión



Los resultados evidencian una situación crítica, más de la mitad del territorio presenta un riesgo alto de erosión, lo que subraya la gravedad del problema en la comunidad de Cachimayu.

## Implicaciones de los niveles de riesgo para la conservación

La distribución de los niveles de riesgo de erosión permite delinear estrategias de conservación específicas para cada zona:

- Las áreas con alto riesgo de erosión serán priorizadas para la protección y restauración de la vegetación nativa, mediante la implementación de medidas que reduzcan la alteración del suelo y favorezcan la recuperación de la cobertura vegetal.
- En las zonas con riesgo de erosión moderado, se enfocarán en la aplicación de estrategias de protección de suelos que sean compatibles con las actividades económicas de los pobladores, buscando un equilibrio entre la producción y la conservación.
- Para las áreas con riesgo de erosión bajo, el énfasis recaerá en la protección de los cultivos agrícolas existentes, mediante prácticas de manejo sostenible que prevengan el inicio o la intensificación de la erosión.

Estos hallazgos proporcionan una base sólida para la planificación y la implementación de acciones de manejo del suelo dirigidas y efectivas en la comunidad de Cachimayu.

## Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio revelan que más del 50% de la comunidad de Cachimayu presenta un riesgo alto de erosión (6,19 km<sup>2</sup> de un total de 11,97 km<sup>2</sup>). Este hallazgo no solo valida la pertinencia de la investigación, sino que también proporciona una base sólida para la implementación de estrategias de conservación focalizadas. Aunque la matriz de Saaty permitió integrar la experiencia técnica en la ponderación de variables, es necesario reconocer que los resultados están sujetos a la subjetividad del experto consultado. Sin embargo, al contrastar los resultados con la realidad de Cachimayu, el modelo logra identificar zonas críticas que coinciden con las pendientes más pronunciadas, lo que sugiere una alta fidelidad para la planificación territorial inmediata.

El escenario identificado es crítico: el 51,7% del territorio (6,19 km<sup>2</sup>) se encuentra en riesgo alto de erosión, concentrado principalmente en áreas con pendientes pronunciadas y escasa cobertura vegetal.

El aporte fundamental de este trabajo no radica únicamente en la identificación del riesgo, sino en la incorporación del criterio experto. A diferencia de los métodos puramente matemáticos, la integración de la matriz de Saaty permitió priorizar la pendiente y la precipitación (40% de peso cada una) como factores determinantes de la degradación, generando un producto cartográfico (archivo SHP) que constituye una herramienta directa para la toma de decisiones en planificación territorial.

Al comparar estos hallazgos con estudios regionales en los valles de Chuquisaca, como los realizados por Orsag (2010) sobre la degradación de suelos en Bolivia, se confirma una correlación directa entre la topografía accidentada y la vulnerabilidad hídrica. Mientras que muchos estudios locales se limitan a descripciones cualitativas, esta investigación cuantitativa mediante Evaluación Multicriterio (EMC) se alinea con la tendencia global de emplear el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) para reducir la incertidumbre en territorios áridos y semiáridos (Arabameri et al., 2019). La prevalencia de riesgo alto en más de la mitad del área de estudio es consistente con la clasificación de “tierras de protección” observada en cuencas similares de la región andina, donde la presión antrópica acelera procesos naturales (Herbas Baeny & Linera Canedo, 2023).

Asimismo, se identificaron áreas de pendiente moderada que, aunque presentan menor inclinación, exhiben signos evidentes de erosión superficial. Esta discrepancia sugiere que el peso asignado al factor “Uso de Suelos” (20 %) podría estar subestimando el impacto de prácticas agrícolas inadecuadas en ciertas zonas específicas. El modelo muestra alta sensibilidad a la topografía; sin embargo, la evidencia de campo indica que la pérdida de cobertura vegetal por sobrepastoreo puede transformar rápidamente zonas clasificadas como de “Riesgo Moderado” en áreas de degradación activa, superando así las predicciones del modelo.

Es importante reconocer dos limitaciones de esta investigación:

Subjetividad del modelo: La construcción de la matriz de comparación pareada se basó en el juicio técnico de un único evaluador. Aunque el índice de consistencia fue aceptable, los pesos de Saaty reflejan una percepción que podría variar si se incluyera un panel multidisciplinario de expertos (Herbas Baeny & Linera Canedo, 2023).

Temporalidad de los datos: Los registros de precipitación utilizados corresponden a datos históricos desde 2013. Ante la creciente variabilidad climática y el incremento de eventos de lluvia extrema en la región (Seiler et al., 2013), existe el riesgo de que el modelo no capture la intensidad real de la erosión hídrica contemporánea.

Para fortalecer la robustez del modelo propuesto, se plantean las siguientes líneas de investigación:

Validación con parcelas de escorrentía: Realizar mediciones experimentales directas en la comunidad para cuantificar la pérdida de suelo por hectárea (Wang et al., 2023) y contrastarlas con las categorías de riesgo del mapa.

Actualización climática: Incorporar datos satelitales recientes para evaluar la evolución del factor de agresividad de la lluvia en la última década, siguiendo experiencias internacionales en estudios de erosión (Lin et al., 2025).

Participación comunitaria: Integrar la percepción de riesgo de los comunarios en la matriz de Saaty, con el fin de construir un modelo de gestión territorial más participativo y socialmente aceptado.

## Conclusión

Este estudio demuestra que la evaluación multicriterio mediante la matriz de Saaty, combinada con las capacidades geoespaciales de ArcGIS, constituye una metodología sólida y eficaz para abordar la compleja problemática de la erosión del suelo.

La incorporación del criterio experto en la ponderación de factores clave como la pendiente, el uso del suelo y la precipitación permite superar las limitaciones de los enfoques tradicionales y aporta una interpretación más profunda y contextualizada de la susceptibilidad a la erosión.

La aplicación de esta metodología en la comunidad de Cachimayu, Yotala, reveló que más de la mitad de su territorio (6,19 km<sup>2</sup> de un total de 11,97 km<sup>2</sup>) se encuentra en alto riesgo de erosión. Este hallazgo crítico no solo muestra la magnitud del problema, sino que también posibilita la delimitación precisa de zonas con diferentes niveles de riesgo (alto, moderado y bajo). Tal precisión resulta esencial para la toma de decisiones, ya que facilita la planificación de intervenciones espacialmente diferenciadas y altamente efectivas.

En particular, la capacidad de identificar y mapear estas áreas permitió proponer estrategias de uso sostenible del suelo adaptadas a las condiciones específicas de la comunidad:

**Zonas de alto riesgo:** Priorizar la protección y restauración de la vegetación nativa, reconociendo su papel insustituible en la estabilización del suelo

**Zonas de riesgo moderado:** Implementar un enfoque integrado que combine prácticas de apicultura para fomentar la polinización y la cobertura vegetal, junto con la creación de zonas de camping seguras que promuevan un turismo sostenible, generando beneficios económicos locales sin comprometer la integridad del suelo.

**Zonas de riesgo bajo:** Proteger terrazas aluviales y cultivos agrícolas mediante la instalación estratégica de barreras vivas, asegurando la productividad a largo plazo y la seguridad alimentaria.

En definitiva, la combinación del rigor analítico de la matriz de Saaty y la potencia cartográfica de ArcGIS no solo constituye una herramienta robusta para el diagnóstico de la susceptibilidad a la erosión, sino que también se erige como un pilar fundamental para el manejo sostenible del territorio. Esta metodología capacita a comunidades como Cachimayu para abordar los desafíos de la degradación del suelo de manera informada y proactiva, contribuyendo así a consolidar un futuro territorial más resiliente.

## Referencias

- Arabameri, A., Cerda, A., Rodrigo-Comino, J., Pradhan, B., Sohrabi, M., Blaschke, T., & Tien Bui, D. (2019). Proposing a Novel Predictive Technique for Gully Erosion Susceptibility Mapping in Arid and Semi-arid Regions (Iran). *Remote Sensing*, *11*(21), 2577. <https://doi.org/10.3390/rs11212577>
- Arteaga, E., & Prefectura del Departamento de Chuquisaca. (2002). *Prácticas de Conservación de Suelos y Aguas Validadas por el Proyecto Jalda*. <https://1library.co/document/zlvvj72y-practicas-de-conservacion-de-suelos-y-aguas-validadas-por-el-proyecto-jalda.html>
- Bezák, N., Borrelli, P., Mikoš, M., Jemec Auflič, M., & Panagos, P. (2024). Towards multi-model soil erosion modelling: An evaluation of the erosion potential method (EPM) for global soil erosion assessments. *CATENA*, *234*, 107596. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107596>
- ESRI. (2025). *Superposición ponderada (Spatial Analyst)—ArcMap | Documentación*. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/weighted-overlay.htm>
- Fan, C.-C., & Chen, Y.-W. (2010). The effect of root architecture on the shearing resistance of root-permeated soils. *Ecological Engineering*, *36*(6), 813-826. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.03.003>

- Herbas Baeny, E., & Linera Canedo, C. del R. (2023). Análisis multicriterio para la evaluación integrada de impactos sociales y ambientales en proyectos hidroeléctricos en Bolivia: Bases conceptuales y metodológicas. *Acta Nova*, 11(2), 209-226.
- Lin, S., Zou, Y., He, Y., Xue, S., Zhu, L., & Ye, C. (2025). A Spatiotemporal Dynamic Evaluation of Soil Erosion at a Monthly Scale and the Identification of Driving Factors in Hainan Island Based on the Chinese Soil Loss Equation Model. *Sustainability*, 17(6), 2361. <https://doi.org/10.3390/su17062361>
- Orsag C., V. (1999). *Memorias del primer congreso boliviano de la ciencia del suelo*. 28 - 31 de junio 1999.
- Rengifo-Rengifo, I.-Y., Muñoz-Gomez, F.-A., Toro-Trochez, O.-A., Rengifo-Rengifo, I.-Y., Muñoz-Gomez, F.-A., & Toro-Trochez, O.-A. (2022). Modelo USLE para estimar la erosión hídrica en siete municipios de la zona andina colombiana. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 20(2), 29-44. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v20.n2.2022.1738>
- Romero, D. (2016, mayo). (PDF) *Aplicación de los métodos de toma de decisiones LP-GW-AHP y lógica difusa para la selección de una electiva académica en la Universidad del Atlántico, Colombia*. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/311762234\\_Aplicacion\\_de\\_los\\_metodos\\_de\\_toma\\_de\\_decisiones\\_LP-GW-AHP\\_y\\_logica\\_difusa\\_para\\_la\\_seleccion\\_de\\_una\\_electiva\\_academica\\_en\\_la\\_Universidad\\_del\\_Atlantico\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/311762234_Aplicacion_de_los_metodos_de_toma_de_decisiones_LP-GW-AHP_y_logica_difusa_para_la_seleccion_de_una_electiva_academica_en_la_Universidad_del_Atlantico_Colombia)
- Saikia, A., & Goswami, C. (2018). *Estimating Peoples' Willingness To Pay For Ecotourism Resources Using Contingent Valuation Method: A Review Of Existing Literature*. 11, 235-251.
- Seiler, C., Hutjes, R. W. A., & Kabat, P. (2013). *Climate Variability and Trends in Bolivia*. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0105.1>
- Senamhi. (2024, septiembre 22). *Datos de estación Yotala, Cachimayu*. Senamhi-Bolivia. <https://senamhi.gob.bo/index.php/sysparametros>
- Szemerédi, E., & Remsei, S. (2024). Disproportionate exposure to urban heat island intensity – The case study of Győr, Hungary. *Hungarian Geographical Bulletin*, 73(1), 17-33. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.73.1.2>
- Wang, W., Yin, S., Yu, J., He, Z., & Xie, Y. (2023). Long-term trends of precipitation and erosivity over Northeast China during 1961–2020. *International Soil and Water Conservation Research*, 11(4), 743-754. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.04.002>

## Modelación de dispersión de partículas suspendidas totales generado por fuentes fijas industriales en el municipio de Sucre mediante la herramienta Aermod View

### Modeling of the dispersion of total suspended particles generated by fixed industrial sources in the municipality of Sucre using the Aermod View tool

CHAVARRÍA - Eymi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Carrera de Ingeniería Ambiental.*

Recibido abril,20, 2025 Aceptado mayo,30,2025

#### Resumen

La contaminación atmosférica es uno de los mayores problemas ambientales que afectan a las ciudades, impactando directamente en la salud de la población. En Sucre, aunque se han realizado esfuerzos para monitorear la calidad del aire, la información sobre las emisiones provenientes de fuentes industriales fijas sigue siendo insuficiente. Este estudio tiene como objetivo modelar la dispersión de partículas suspendidas totales (PST) en la ciudad mediante la herramienta AERMOD View, utilizando datos meteorológicos procesados con AERMET y datos topográficos obtenidos con AERMAP. Se identificaron 20 industrias representativas, clasificadas en sectores como industrias que utilizan calderos, ladrilleras, yeserías, caleras y cementeras, aplicando los factores de emisión de la EPA (AP-42). Los resultados muestran que las mayores concentraciones de PST se originan en las yeserías y la cementera, alcanzando picos de hasta 218  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  durante 24 horas, sin superar los límites establecidos por el Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica. Sin embargo, estos valores evidencian episodios críticos en áreas urbanas cercanas a las fuentes emisoras. Ante esta situación, se recomienda ampliar la red de monitoreo continuo y establecer un protocolo de alerta temprana que permita mitigar los efectos de la contaminación sobre la salud pública y fortalecer la gestión ambiental en Sucre.

**Palabras clave:** Calidad del aire, contaminantes atmosféricos, gestión ambiental, red de monitoreo, alertas sanitarias.

#### Abstract

Air pollution is one of the major environmental problems affecting cities, directly impacting public health. In Sucre, although efforts have been made to monitor air quality, information regarding emissions from fixed industrial sources remains insufficient. This study aims to model the dispersion of total suspended particles (TSP) in the city using the AERMOD View modeling tool, incorporating meteorological data processed with AERMET and topographic data obtained through AERMAP. A total of 20 representative industries were identified and classified into sectors such as boiler-based industries, brick kilns, gypsum plants, lime kilns, and a cement plant, applying EPA (AP-42) emission factors. The results indicate that the highest TSP concentrations originate mainly from gypsum plants and the cement industry, reaching peak values of up to 218  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  over a 24-hour period, without exceeding the limits established by the Atmospheric Pollution Regulation. However, these values reveal critical episodes in urban areas located near emission sources. In response, it is recommended to expand the continuous air quality monitoring network and to establish an early warning protocol aimed at mitigating the effects of air pollution on public health and strengthening environmental management in Sucre.

**Keywords:** Air quality, atmospheric pollutants, environmental management, monitoring network, health alerts.

**Citación:** Chavarría E. (2025). Modelación de dispersión de partículas suspendidas totales generado por fuentes fijas industriales en el municipio de Sucre mediante la herramienta Aermod View, *Revista Ingeniería Sostenible Ambiental*, 2(4), 129-136

## Introducción

La calidad del aire es un factor determinante para la salud de la población y para el mantenimiento de condiciones ambientales adecuadas en las ciudades. En los últimos años, la contaminación atmosférica se ha consolidado como una de las principales problemáticas ambientales a nivel mundial, debido a su relación directa con el incremento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares y al deterioro de la calidad de vida (Jasarevic, 2014). En América Latina, esta situación se ve intensificada por el crecimiento urbano e industrial y por la limitada implementación de mecanismos efectivos de control ambiental (Ocampo & Martínez, 2020).

En la ciudad de Sucre, la contaminación atmosférica se ha vuelto un problema cada vez más visible. Si bien el municipio cuenta con una Red de Monitoreo de la Calidad del Aire, la información disponible presenta limitaciones en cuanto a cobertura y representatividad, lo que dificulta comprender la distribución espacial de los contaminantes y evaluar el impacto de las fuentes fijas industriales (Informe Anual, 2023). Además, la ausencia de inventarios de emisiones y de estudios de modelación de dispersión restringe la formulación de medidas preventivas y de políticas públicas orientadas a la gestión de la calidad del aire (Compendio Normativo de Gestión Ambiental, 2021).

En este contexto, los modelos de dispersión atmosférica se han consolidado como herramientas clave para evaluar el comportamiento de los contaminantes, integrando información de emisiones, meteorología y topografía. El modelo AERMOD View ha sido ampliamente aplicado en estudios desarrollados en ciudades de Latinoamérica para identificar zonas de mayor impacto ambiental y analizar la influencia de las condiciones meteorológicas en la dispersión del material particulado (Reyes Ureta, 2020; Rodríguez & Guerrero, 2022; Vera & Quispe Chávez, 2023).

En ese marco, el presente estudio tiene como objetivo modelar la dispersión de partículas suspendidas totales (PST) generadas por fuentes fijas industriales en el municipio de Sucre mediante AERMOD View, comparar los resultados con la normativa nacional vigente y aportar información técnica que contribuya al fortalecimiento de la gestión ambiental y a la protección de la salud de la población.

## Materiales y métodos

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado, con un diseño no experimental de corte transversal y un alcance descriptivo–explicativo. El área de estudio correspondió al municipio de Sucre, Bolivia, considerando zonas urbanas y periurbanas con presencia de fuentes fijas industriales.

La población estuvo conformada por todas las fuentes fijas industriales con potencial de emisión de partículas suspendidas totales (PST) en el municipio. La muestra se seleccionó mediante un muestreo no probabilístico por criterio e incluyó 20 establecimientos industriales, priorizando aquellos con información técnica completa y confiable. La muestra estuvo conformada por ocho industrias que utilizan calderos a gas natural, tres ladrilleras, siete fábricas artesanales de cal y yeso, una calera y una cementera.

La información primaria se obtuvo mediante entrevistas estructuradas dirigidas a los responsables de las industrias, complementadas con revisión documental de registros ambientales e informes técnicos. Se recopilaron datos sobre consumo de combustible, horas de operación, procesos productivos y características de las chimeneas, tales como altura y diámetro.

Las emisiones de PST se estimaron aplicando los factores de emisión de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), establecidos en el compendio AP-42.

Los datos meteorológicos utilizados correspondieron a registros del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y fueron procesados mediante el preprocesador AERMET. La información topográfica se procesó utilizando AERMAP.

La modelación de la dispersión de PST se realizó con el software AERMOD View, generando concentraciones horarias, promedios de 24 horas y promedios anuales, así como mapas de isoconcentraciones. Los resultados obtenidos se compararon con los límites establecidos en el Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica vigente, con el fin de evaluar el cumplimiento normativo y proponer lineamientos preventivos para la gestión ambiental en la ciudad de Sucre

**Resultados**

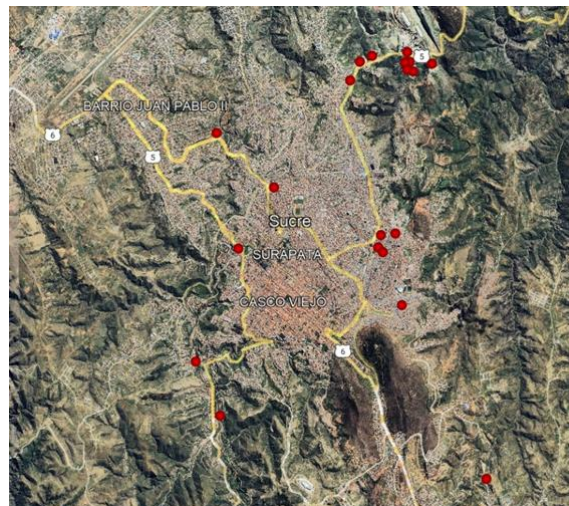
**Inventario y distribución espacial de las fuentes fijas industriales**

Se identificaron 20 fuentes fijas industriales con potencial de emisión de partículas suspendidas totales (PST) en el municipio de Sucre. Las fuentes fueron clasificadas en puntuales y de área, en función del tipo de proceso productivo y del mecanismo de liberación de emisiones a la atmósfera.

Las fuentes puntuales incluyeron ocho industrias con calderos a gas natural, tres ladrilleras y una industria cementera, cuyas emisiones se canalizan principalmente a través de chimeneas. Las fuentes de área correspondieron a siete yeserías artesanales y una calera, caracterizadas por emisiones difusas asociadas a procesos de cocción, molienda y manipulación de materiales a cielo abierto.

La ubicación espacial de las fuentes industriales consideradas se presenta en la Figura 1, mientras que el inventario codificado de las industrias se resume en la Tabla 1.

**Figura 1. Ubicación geográfica de las fuentes fijas industriales consideradas en el estudio.**



**Tabla 1. Fuentes fijas industriales consideradas en la modelación de PST.**

Código	Nombre de la empresa	Tipo de fuente
CAL-01	Empresa 1	Puntual
CAL-02	Empresa 2	Puntual
CAL-03	Empresa 3	Puntual
CAL-04	Empresa 4	Puntual
CAL-05		
CAL-06	Empresa 5	Puntual
CAL-07		
CAL-08	Empresa 6	Puntual
CAL-09		
CAL-10	Empresa 7	Puntual
CAL-11		
CAL-12	Empresa 8	Puntual
LAD-01	Empresa 9	Puntual
LAD-02	Empresa 10	Puntual
LAD-03	Empresa 11	Puntual
YES-01	Empresa 12	Área
YES-02	Empresa 13	Área
YES-03	Empresa 14	Área
YES-04	Empresa 15	Área
YES-05	Empresa 16	Área
YES-06	Empresa 17	Área
YES-07	Empresa 18	Área
CA-01	Empresa 19	Área
CEM-01		
CEM-02		
CEM-03		
CEM-04		
CEM-05	Empresa 20	Puntual
CEM-06		
CEM-07		
CEM-08		

## Parámetros operativos y estimación de emisiones

Los parámetros técnicos de las fuentes fueron obtenidos mediante entrevistas estructuradas a los responsables de las industrias y verificación documental. La información recopilada incluyó coordenadas geográficas, altura y diámetro de las fuentes, tipo y consumo de combustible, horas de operación, velocidad de salida de los gases y temperatura, constituyendo la base de entrada para el modelo AERMOD View.

La estimación de emisiones de PST se realizó aplicando los factores de emisión AP-42 de la EPA, relacionando el nivel de actividad con el factor de emisión correspondiente. Debido a la ausencia de información confiable sobre sistemas de control de emisiones, se asumió una eficiencia de control nula. Los parámetros representativos utilizados en la modelación se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2. Parámetros operativos representativos de las fuentes fijas industriales.**

Cód	Tipo de fuente	A*	D*	Vs* (m/s)	Temp (°K)
CAL-01	Caldera	8	0,4	6,12	328,2
LAD-01	Ladrillera	3,7	0,4	3,50	1173,1
YES-01	Yesería	3,5	2,5	2,50	1173,1

A\*: Altura de la fuente (m)

D\*: Diámetro de la fuente (m)

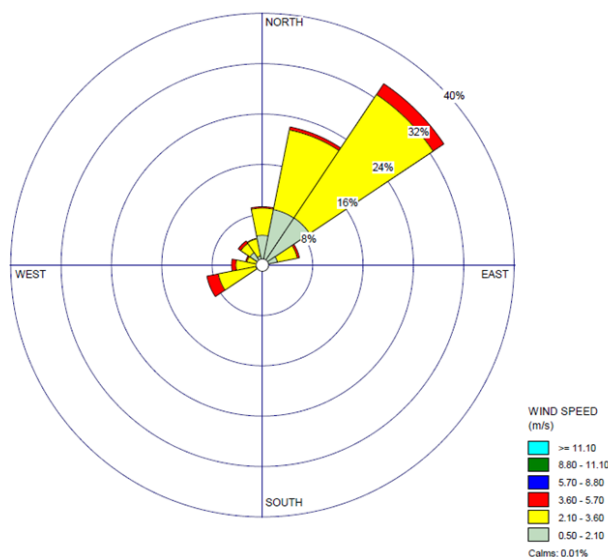
Vs\*: Velocidad de salida de gases

## Condiciones meteorológicas y patrón de dispersión

Los datos meteorológicos correspondientes al periodo enero–diciembre de 2024 fueron procesados mediante el programa AERMET. El análisis evidenció un predominio de vientos provenientes del noreste (NE), seguido por direcciones NNE y N, concentrando aproximadamente el 70 % de los registros horarios anuales.

Las velocidades predominantes se ubicaron en el rango de 2,10 a 3,60 m/s, lo que indica un régimen de viento moderado y relativamente estable. Este patrón condiciona la dispersión de contaminantes hacia los sectores sur y suroeste del área urbana de Sucre. La caracterización del viento se presenta en la Figura 2.

**Figura 2. Rosa de vientos del municipio de Sucre (enero–diciembre 2024).**



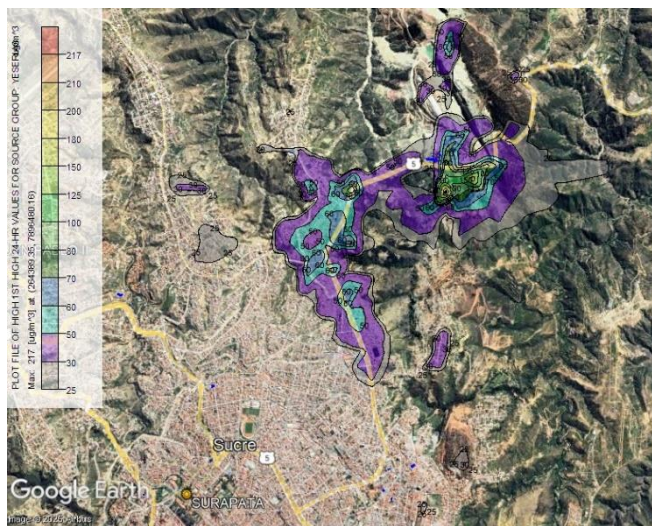
La rosa de vientos muestra la frecuencia y dirección predominante del viento durante el periodo analizado.

### Modelación de la dispersión de PST

La modelación de la dispersión de PST se realizó con el software AERMOD View, integrando datos de emisiones, meteorología y topografía. Se evaluaron escenarios de promedio de 24 horas y promedio anual, tanto por tipo de fuente como de forma conjunta.

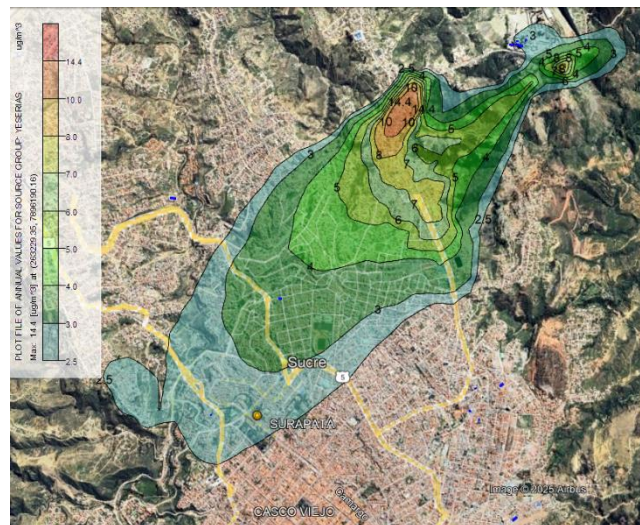
Las yaserías y la calera presentaron los valores más elevados de concentración. En el escenario de 24 horas, las concentraciones máximas alcanzaron 217  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , localizadas principalmente en áreas cercanas a las zonas de producción, con una dispersión amplia hacia sectores urbanos. En el escenario anual, las concentraciones máximas se redujeron a 14,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , manteniéndose de forma persistente sobre áreas pobladas. Estos resultados se presentan en las Figuras 3 y 4.

**Figura 3. Concentración de partículas suspendidas totales (PST) modelada para yaserías y calera (promedio 24 h).**



Las concentraciones se expresan en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . El valor máximo modelado fue de 217  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , con dispersión predominante hacia el sur y suroeste del municipio. PST: partículas suspendidas totales.

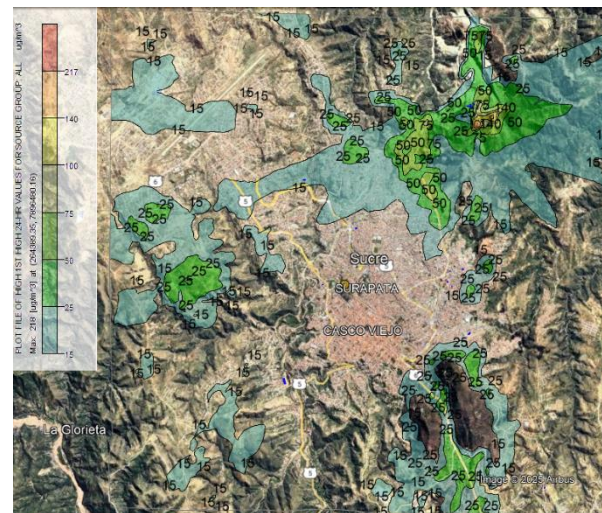
**Figura 4. Concentración anual de partículas suspendidas totales (PST) modelada para yaserías y calera.**



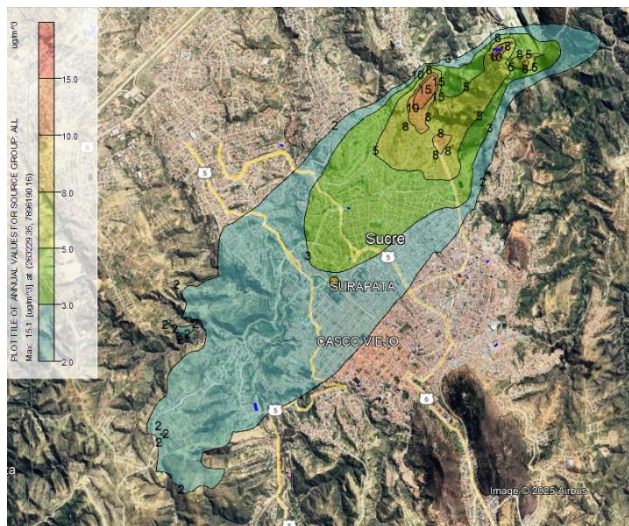
Las concentraciones corresponden al promedio anual, con valores máximos de 14,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  distribuidos sobre áreas urbanas del municipio. PST: partículas suspendidas totales.

En el escenario conjunto que integra todas las fuentes industriales, las concentraciones máximas alcanzaron 218  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para el promedio de 24 horas y 15,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para el promedio anual, con mayores niveles en el norte y noreste del municipio. La dispersión conjunta se presenta en las Figuras 5 y 6.

**Figura 5. Concentración de PST modelada para todas las fuentes industriales (promedio 24 h).**



**Figura 6. Concentración anual de PST modelada para todas las fuentes industriales.**



Las concentraciones anuales alcanzaron valores máximos de  $15,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , con dispersión hacia el sur del área urbana. PST: partículas suspendidas totales.

### Comparación con la normativa vigente

Las concentraciones modeladas fueron comparadas con los límites máximos permisibles establecidos por el Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica (RMCA), que fija valores de  $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el promedio de 24 horas y  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el promedio anual de PST. La comparación se presenta en la Tabla 4.

**Tabla 4. Comparación de concentraciones modeladas de PST con los límites máximos permisibles del RMCA.**

Fuente	T*	N*	Concentración según modelo	Cumplimiento
Calderos	24 horas	260	0,43	No excede
Ladrilleras			4,09	No excede
Yeserías			217	No excede
Cementera			35,8	No excede
Todas las fuentes			218	No excede
Calderos	Anual	75	No modelado	No excede
Ladrilleras			No modelado	No excede
Yeserías			14,4	No excede
Cementera			9,42	No excede
Todas las fuentes			15,1	No excede

T\* Tiempo de exposición

N\*Nivel máximo permisible

### Discusión

La modelación de partículas suspendidas totales (PST) en Sucre permitió identificar que las yeserías y la industria cementera son los principales focos de impacto sobre la calidad del aire.

Los resultados muestran picos de concentración de hasta  $218 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en periodos de 24 horas, localizados principalmente en las zonas norte y noreste de la ciudad. Aunque estos valores no superan el límite de  $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$  establecido en la normativa nacional (Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica, 2021), su proximidad al umbral confirma que estas son las áreas de mayor riesgo industrial. El aporte de este trabajo radica en que constituye una de las primeras aplicaciones del modelo AERMOD View en Sucre, utilizando datos procesados con AERMET y AERMAP para generar una línea base técnica sobre el comportamiento de contaminantes industriales (US EPA, 2024).

Estos resultados son consistentes con investigaciones realizadas en la región andina. En Cusco, Perú, se evidenció que las fuentes artesanales generaban concentraciones de PM10 condicionadas por la dirección y velocidad del viento (Vera & Quispe Chávez, 2023), un patrón idéntico al observado en Sucre. Asimismo, la relevancia de las industrias de materiales de construcción coincide con lo reportado en el Valle del Cauca (Ocampo & Martínez, 2020) y en Cúcuta (Rodríguez & Guerrero, 2022), donde las fuentes fijas mantienen un peso crítico en la degradación del aire urbano. Por otro lado, la problemática de las fuentes artesanales situadas cerca de áreas habitadas en Sucre refuerza lo observado en Cuenca, Ecuador, donde la falta de control en este sector aumenta la exposición directa de la población (Orellana, 2020).

Un resultado que se aparta de las expectativas iniciales fue el bajo aporte de las industrias que utilizan calderos a gas natural, cuyas emisiones resultaron mínimas ( $0.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en comparación con el resto de las fuentes analizadas.

En contraste, las yeserías artesanales mostraron un impacto significativamente mayor al previsto; a pesar de ser instalaciones de menor escala que la cementera, su contribución acumulada y su capacidad de dispersión hacia barrios urbanos las convierten en focos críticos de atención.

Este fenómeno de impacto elevado por fuentes pequeñas ya ha sido documentado en estudios similares donde las variaciones del viento jugaron un papel clave en el alcance de las emisiones (Ocampo & Martínez, 2020; Rodríguez & Guerrero, 2022).

La principal limitación del estudio fue la inexistencia de un inventario oficial de emisiones actualizado en el municipio de Sucre, lo que obligó al uso de factores de emisión AP-42 de la agencia estadounidense (US EPA, 2016). Aunque este es un recurso válido y aceptado en investigaciones de este tipo, puede introducir diferencias respecto a mediciones directas in situ. Asimismo, la falta de datos específicos sobre los ciclos operativos de los hornos artesanales obligó a trabajar con estimaciones promedio, lo cual simplifica la complejidad real de los procesos productivos locales.

Se recomienda que futuros estudios profundicen en la creación de inventarios detallados con mediciones directas en las chimeneas industriales. Es prioritario ampliar la red de monitoreo con sensores ópticos láser en las zonas críticas identificadas para medir partículas más finas como PM2.5. Finalmente, la implementación de un protocolo de alerta temprana, basado en las experiencias exitosas de ciudades con problemáticas similares (Rodríguez & Guerrero, 2022; Vera & Quispe Chávez, 2023), permitirá mitigar los impactos sanitarios y fortalecer la gestión de la calidad del aire en la ciudad de Sucre.

## Conclusiones

El estudio permitió identificar que las yeserías y la cementera representan las principales fuentes fijas de partículas suspendidas totales (PST) en la ciudad de Sucre, con concentraciones elevadas en periodos de 24 horas, aunque sin superar los límites establecidos por la normativa vigente. Las ladrilleras presentan un impacto localizado, mientras que los calderos a gas natural muestran una contribución mínima. La aplicación del modelo AERMOD View, integrando información meteorológica y topográfica, demostró ser una herramienta adecuada para evaluar la dispersión de contaminantes en el ámbito urbano. Los resultados alcanzados cumplen los objetivos del estudio y constituyen un aporte relevante para la comprensión de la contaminación atmosférica industrial en Sucre, sirviendo como base técnica para futuros trabajos y para el fortalecimiento de la gestión de la calidad del aire.

## Referencias

Gobierno Autónomo Municipal de Sucre. (2023). *Informe anual Red de Monitoreo de la Calidad del Aire Sucre (p. 34)*. <https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:US:29af4aba-50ad-484c-9eb9-99548237084a>

Jasarevic, T. (2014, marzo 25). 7 millones de muertes cada año debidas a la contaminación atmosférica. *Organización Mundial de la Salud*. <https://www.who.int/es/news/item/25-03-2014-7-million-premature-deaths-annually-linked-to-air-pollution>

Ocampo, M. M., & Martínez, A. M. O. (2020). *Implementación de un modelo de análisis de dispersión atmosférica de material particulado (PM10) a través de la herramienta AERMOD VIEW*. UNAD CEAD Palmira.

Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2021). *Reglamento en materia de contaminación atmosférica*. <https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:US:b58465af-76b0-4f26-a545-2cabf85c5325>

Orellana, J. E. O. (2020). *Inventario de emisiones atmosféricas provenientes de fuentes fijas de la zona urbana del cantón Chordeleg*.

Prashant, K., Morawska, L., & Martani, C. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment International*, 75, 199-205. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019>

Reyes Ureta, G. M. (2020). *Evaluación del Transporte y Dispersión de Contaminantes Atmosféricos Emitidos por la Refinería "La Libertad" Mediante el Modelo Aermod View*. <https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:US:8c8e6274-0675-4a6f-8578-ed7c36e1a9a0>

Rodríguez, J. T. Y., & Guerrero, S. S. (2022). *Plan de Prevención, Reducción y Control de la Contaminación del Aire Cúcuta-Región (p. 42)*. <https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:US:c8b58240-ee52-4395-809d-26cee45f1ea3>

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2016, septiembre 26). *AP-42: Recopilación de factores de emisión atmosférica de fuentes estacionarias* [Other Policies and Guidance]. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors-stationary-sources>

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2024). *Modelado de la dispersión de la calidad del aire* [Other Policies and Guidance]. <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling>

Vera, V., & Quispe Chávez, E. H. (2023). Modelamiento de la dispersión de PM10 de las ladrilleras del distrito de San Jerónimo, Cusco. *Revista de Ciencias Ambientales*, 40(5), 2. <https://doi.org/10.34098/2078-3949.40.5.2>

## INSTRUCCIONES PARA AUTORES

Los investigadores interesados deben tener en cuenta lo siguiente:

- Los proyectos deben ser originales y no estar bajo revisión en ninguna otra publicación.
- Se aceptarán proyectos escritos en español.
- Los proyectos deben seguir las normas de formato y estilo establecidas por la revista (Asentamiento bibliográfico APA – séptima edición)

### Proceso de presentación:

Los investigadores deben enviar sus trabajos de investigación a través del correo institucional de la Carrera de Ingeniería Ambiental [revista.ambiental@usfx.bo](mailto:revista.ambiental@usfx.bo) en el caso de los profesionales de ingeniería ambiental que han presentado proyecto de grado o trabajo dirigido, pueden escribir un artículo científico de su trabajo, los proyectos se deben presentar en formato WORD y deben incluir:

- **TÍTULO:**

El título del proyecto debe ser conciso e informativo, con una extensión máxima de 15 palabras y debe estar escrito en letras minúsculas, sin incluir abreviaciones.

- **AUTOR (ES) Y AFILIACIÓN:**

Deben figurar los nombres completos de los autores, en el orden de importancia de su contribución a la investigación. Se permite un mínimo de un autor y un máximo de cinco. Junto a los nombres de los autores, se debe indicar la institución de afiliación, en este caso, "Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca".

- **RESUMEN (en párrafos sin subtítulos):**

El resumen debe describir de manera clara y concisa todos los aspectos esenciales de la investigación y debe estar estructurado en párrafos sin subtítulos. Deberá incluir información sobre el propósito del estudio o investigación, los procedimientos básicos utilizados, los resultados relevantes con especificaciones de datos y significancia estadística, así como las principales conclusiones. El resumen no debe contener referencias bibliográficas y su extensión no debe superar las 200 palabras. También se deben incluir palabras clave.

- **PALABRAS CLAVE:**

Se deben proporcionar entre tres y cinco palabras clave que identifiquen las principales temáticas de la investigación.

- **ABSTRACT AND KEY WORDS:**

Deberá incluirse la traducción del resumen y las palabras clave del idioma inglés. Se recomienda evitar el uso de software traductor para la traducción, ya que puede generar incoherencias en el texto.

- **FORMATO DEL ARTÍCULO CIENTÍFICO:**

A continuación, se describen las secciones que debe contener el artículo científico:

**a) Introducción:** En esta sección, se debe proporcionar información adecuadamente redactada y contextualizada para guiar al lector hacia la pregunta o hipótesis de investigación. Cada oración, excepto las redactadas originalmente por el autor, debe llevar las correspondientes citas bibliográficas siguiendo el formato de asentamiento bibliográfico APA (séptima edición). En caso de citar múltiples referencias al final de una frase, estas deben ordenarse por año de publicación, desde la más antigua hasta la más reciente.

**b) Materiales y métodos:** En esta sección, se deben describir de manera concisa y clara, los materiales utilizados y centrarse en describir específicamente los métodos empleados. Debe evitarse la inclusión de descripciones poco claras o generales de las metodologías. Se debe respaldar el uso de las metodologías a través de literatura que las haya validado previamente, a menos que se trate de metodologías originales generadas durante la investigación. También se debe describir claramente los tipos de análisis, variables de respuesta e independientes, el tipo de diseño (experimental u observacional), tamaño de la muestra y métodos estadísticos utilizados.

**c) Resultados:** Esta sección debe describir los resultados relevantes en un orden similar al utilizado en la descripción de la metodología. Si se han utilizado herramientas estadísticas, se deben incluir los parámetros estadísticos apropiados de cada prueba aplicada.

**d) Discusión:** En esta sección, se deben discutir los resultados más destacados en relación con investigaciones previas que respalden o, en su caso, contradigan los hallazgos de la investigación. Debe evitarse la especulación y respaldar las afirmaciones con referencias bibliográficas. Generalmente, el último párrafo de la discusión se utiliza para incluir conclusiones y sugerencias relacionadas con el trabajo.

**e) Conclusiones:** Esta sección debe enfatizar los aspectos nuevos e importantes del estudio y las conclusiones deben relacionarse con los objetivos de la investigación. Debe evitarse la repetición de datos ya presentados en secciones anteriores.

**f) Agradecimientos (opcional):** En esta sección, los autores pueden expresar su agradecimiento a aquellos que hayan brindado apoyo logístico, financiero o académico a la investigación.

**g) Referencias:** Deben coincidir con las citas utilizadas en el artículo, siguiendo la norma APA (séptima edición). El número de referencias no debe exceder las 30 y deben ser de los últimos 5 años.

**h) Tablas y figuras:** Las tablas y figuras deben ser auto explicativas y contar con un índice que incluya la leyenda de la información proporcionada, el significado de las abreviaciones o acrónimos, y en algunos casos, la descripción de patrones destacados. Se recomienda que las figuras sean monocromáticas y generadas en programas adecuados para la publicación. Las tablas pueden ser generadas en programas como Word. Se debe evitar el uso de colores que dificulten la lectura en las figuras.

**i) Anexo I:** En este anexo, los autores pueden incluir material de apoyo necesario para la comprensión de su investigación, como fotografías o scripts.

**j) Anexo II:** Este anexo debe contener el formulario de registro del proyecto y copias de los documentos de identidad de los investigadores.

k) Cantidad de páginas, debe estar entre 8 a 12 páginas, incluida bibliografía

Siguiendo estas pautas, los autores podrán presentar sus proyectos de manera clara y organizada, lo que facilitará la revisión y evaluación por parte del comité de revisión de la revista científica.

### **Evaluación y selección:**

Todos los proyectos serán sometidos a un proceso de revisión por pares, en el que expertos en el campo evaluarán la calidad, la originalidad y la relevancia. Los autores serán notificados sobre los resultados de la revisión, en caso de aceptación, recibirán orientación para la preparación final del artículo.

### **Comité arbitral**

La revista cuenta con un comité arbitral conformado por expertos en las áreas mencionadas, provenientes de universidades nacionales e internacionales. Estos evaluadores realizarán una revisión imparcial y rigurosa de los artículos presentados, para garantizar la calidad, pertinencia y relevancia de los mismos.

### **Proceso de revisión por pares**

Todos los proyectos presentados serán sometidos a un proceso de revisión por pares, donde expertos en el campo evaluarán la calidad, originalidad y relevancia de los proyectos. Este proceso es esencial para garantizar la excelencia científica de la revista.

### **Comunicación de resultados**

Todos los investigadores recibirán una notificación sobre los resultados de la revisión a sus correos electrónicos. Los proyectos pueden ser aceptados, rechazados o requerir revisiones adicionales. Se proporcionará retroalimentación constructiva en caso de rechazo o necesidad de revisión.

### **Preparación para la publicación**

Los autores de proyectos aceptados trabajarán en colaboración con el equipo editorial de la revista para asegurar que sus proyectos cumplan con los requisitos de formato y contenido de la revista.

### **Publicación y difusión**

Los trabajos seleccionados serán publicados en la revista Ingeniería Sostenible Ambiental de la Universidad San Francisco Xavier (USFX). Esta publicación cuenta con ISSN tanto en formato digital como impreso, y está disponible en la plataforma oficial de la universidad. La revista se distribuye ampliamente en las comunidades académica y científica a nivel local, nacional e internacional, contribuyendo significativamente al avance y la difusión del conocimiento en el campo de la ingeniería ambiental.

### **Transparencia en el Proceso**

La prioridad de la revista es mantener un proceso de revisión y selección transparente y justo. Los investigadores pueden confiar en que sus proyectos serán evaluados de manera imparcial y recibirán comentarios constructivos para mejorar la calidad de sus investigaciones.

Cualquier información adicional será suministrada por el correo electrónico [revista.ambiental@usfx.bo](mailto:revista.ambiental@usfx.bo)  
Mayores referencias: página web: <https://revistas.usfx.bo/index.php/ingsostenibleambiental>