



Assessment of the Environmental Load in the Trophic System of the Huanuni Sub-Basin, Oruro Department

Evaluación de la carga ambiental en el sistema trófico de la subcuenca Huanuni, departamento de Oruro

Milton Robert Pérez Lovera¹  

Juan Carlos Montoya Choque²  

Fernando Álvarez Rivero¹  

Natalia Huanca Cabezas²  

Jaime Huanca Mendoza³  

¹ Laboratorio de Monitoreo y Calidad Ambiental, Facultad de Ciencias Agrarias y Naturales, Universidad Técnica de Oruro. Bolivia.

² Centro Agua, Facultad de Ciencias Agrarias y Naturales, Universidad Técnica de Oruro. Bolivia.

³ Cuencas de Altura, Facultad de Ciencias Agrarias y Naturales, Universidad Técnica de Oruro. Bolivia.

Recibido: 15-01-2026 | Revisado: 10-03-2026 | Aceptado: 09-04-2026 | Publicado: 10-04-2026

Autor de correspondencia: Milton Robert Pérez Lovera 

ABSTRACT

The study in the Huanuni sub-basin, agricultural area (Pacopampa – Sora Sora), had the objective of “Evaluating the environmental load of the trophic system of heavy metals (As, Sn, Pb, Cd, Zn)”. The results in the study waters (M2-2 and M3-1, irrigation system), have high concentrations of Cd (greater than maximum permissible limits, class C, Law 1333), and Na. As for the soils, Na, Zn and Cd (M1-1), the last two metals are above the Common Range (RC), proposed by Kloeke, Critical Concentration proposed by the EC (2002). The plant part (Vicia Faba, Medicago sativa, and Distichlis humilis –the last two of forage interest–), the elements As, Cd, Pb, Zn, exceed the maximum allowable, being progressive the accumulation, which induces a biomagnification process, demonstrated in the environmental load in cattle, highlighting more than 15 g/day; 110g/week and 400 g/month of heavy metals that enter an animal unit (cattle). Apart from the fact that the body has routes of expulsion and/or counteracting the entry of foreign substances into its metabolism, the reality is undeniable in Pacopampa - Sora Sora, the presence of heavy metals in the food chain, a risk factor in the area, the existing mining activity.

Keywords: pollution, heavy metals, bioaccumulation, environmental load.

RESUMEN

El estudio en la subcuenca Huanuni, zona agropecuaria (Pacopampa – Sora Sora), tuvo el objetivo de “Evaluar la carga ambiental del sistema trófico de metales pesados (As, Sn, Pb, Cd, Zn)”. Los resultados en las aguas de estudio (M2-2 y M3-1, sistema de riego), tiene concentraciones elevadas de Cd (mayor a límites máximos permisibles, clase C, Ley 1333), y de Na. En cuanto a los suelos, el Na, Zn y Cd (M1-1), los dos últimos metales están por encima del Rango Común (RC), propuesto por Kloeke, Concentración Crítica propuesta por la CE (2002). La parte vegetal (Vicia Faba, Medicago sativa, y Distichlis humilis –los dos últimos de interés forrajero–), los elementos As, Cd, Pb, Zn, exceden los máximos permisibles, siendo progresivo la acumulación, lo cual induce a un proceso de biomagnificación, demostrado en la carga ambiental en ganado vacuno, resaltando más de 15 g/día; 110g/semana y 400 g/mes de metales pesados que ingresa a una unidad animal (vacuno). Al margen que el organismo tiene vías de expulsión y/o contrarrestar el ingreso de sustancias extrañas a su metabolismo, la realidad es innegable en Pacopampa - Sora Sora, la presencia de metales pesados en la cadena trófica, un factor de riesgo en la zona, la actividad minera existente.

Palabras clave: Palabras claves: contaminación, metales pesados, bioacumulación, carga ambiental.

INTRODUCCIÓN

La minería es uno de los principales problemas de contaminación, residuos generados que contienen metales pesados Rebollo (2022), la intensificación de las actividades antropogénicas a lo largo del último siglo impulsada por la industrialización, la minería a gran escala, la agricultura intensiva y el crecimiento urbano ha provocado una liberación acelerada de estos contaminantes, superando en muchos casos los niveles de fondo geoquímico natural Leañó (2025) como lo demuestran los envenenamientos por Cd y Hg en Japón, los metales pesados se encuentran entre los contaminantes ambientales más tóxicos Förstner, & Müller (1973), o el estudio de la contaminación por metales pesados, como Hg, As, Pb y Cd, representa un grave riesgo para la salud humana, así como para animales y ecosistemas Robles (2024), la presencia de metales en suelos y sedimentos del altiplano, estudios realizados por (Orsa et al.,²⁰¹³ y 2004; Zamora G.,²⁰⁰⁸; Swedish Geological AB Environmental Services,¹⁹⁹⁶; Zapata y Fernández 1994; Noras,¹⁹⁹²), muestran resultados variados y dispersos en el tiempo, y dependen en gran manera de actividades humanas (minero-metalúrgicas), tipos de material parental (rocas) y su ubicación en el paisaje. Mostrando una diferenciación de metales pesados, principalmente en la biota acuática, aunque sus concentraciones son muy bajas pueden ser tóxicos como cualquier otro elemento (Calcina R.L. y Huaraya Ch.Fr., 2018; Molina C.I., et al.,²⁰¹²; Montoya y Pérez 2009; Calcina L.,²⁰⁰⁵⁻²⁰⁰⁶; Swedish Geological AB Environmental Services,¹⁹⁹⁶) y pudiendo acumularse en especies vegetales como lo demuestra el estudio donde se determinó la presencia de metales pesados (Pb, Cd y As) en suelos agrícolas y suelos para cultivo de *Solanum tuberosum* de la Bahía Interior de Puno Linarez et. al. (2020). El creciente impacto de la contaminación por metales pesados, representa una amenaza significativa para ecosistemas acuáticos y la salud humana, como se evaluó en peces de la Presa de Hatillo – República Dominicana (Altagracia M.M. y Altagracia U.Y. 2024), la peligrosidad de metales pesados es mayor al no ser química ni biológicamente degradables; su concentración en los seres vivos aumenta a medida que son ingeridos por otros; por lo que la ingesta de plantas o animales contaminados puede provocar síntomas de intoxicación Plumlee et al. (1999), siendo una amenaza para la biodiversidad y la salud humana, como se evidenció en la evaluación del grado de contaminación por metales pesados en la Ciénaga de Mallorquín, situada en la costa Caribe de Colombia Ojeda y Rhénals Quintana (2025).

Los organismos tienen mecanismos bien desarrollados para absorber, metabolizar y excretar diferentes elementos, incluso metales en concentraciones que se encuentran naturalmente (Sánchez, 2025; Jarrín,²⁰²³; Curtisy Barnes, 2001). Estos mecanismos, pueden saturarse a altas concentraciones de metales; y el índice de absorción puede exceder al índice de pérdidas, proceso que exige más gasto de energía. La actividad minera arroja al ambiente metales tóxicos; para la mayoría de formas de vida, acumulándose en plantas y tejidos orgánicos, el flujo anual de metales pesados en los ríos Santa Fé y Huanuni de la subcuenca Huanuni promedio de 1900 tn/año Swedish Geological AB Environmental Services (1996), principalmente Zn, Cu, Pb, As, Sb y Cd. En este contexto, la Empresa Minera Huanuni realiza la mayor cantidad de descargas de efluentes al río del mismo nombre sin previo tratamiento, cuyas aguas tienen elevada acidez, alto contenido de metales pesados. El río Huanuni pasa por vertientes de agua (sector de Pacopampa), a 60 m del río Huanuni. Una de las vertientes de agua más importante tiene un caudal que llega a 18 l/s en época seca, afectado por el río Huanuni. El agua de esta vertiente abastece al ingenio de Machacamarcas para operaciones metalúrgicas durante todo el año. Existe un canal que se desplaza desde Pacopampa, pasa por Sora Sora y llega hasta el ingenio. En el trayecto del canal de riego existen cultivos de alfalfa, cebada, haba, también praderas nativas que son regados con aguas de la vertiente. Existe actividad ganadera (ovino, vacuno, llamuno y porcino), se alimentan de los forrajes cultivados en la zona. En muchos casos los animales consumen el agua de la vertiente y del canal. Es importante evaluar la carga ambiental progresiva o regresiva en el sistema trófico, principalmente el de metales pesados. Para evidenciar que en Pacopampa - Sora Sora, está condicionada por los efectos de la actividad minera, parte alta de la subcuenca, principalmente el del río Huanuni, de tal forma que la carga ambiental existe principalmente metales pesados (As, Sn, Pb, Cd, Zn).

METODOLOGÍA

Bolivia cuenta con recursos hídricos –Cuencas Hidrográficas–, del Amazonas, del Plata y Cerrada del Altiplano. Este último de interés para el estudio, se encuentra la subcuenca Huanuni, (734,56 km²), alimentada por el río del mismo nombre, a la altura de la comunidad de Aco Aco recibe los aportes del río Santa Fe, y este recolecta las aguas de los tributarios de Japo y Morococala (zonas de actividad minera); también los aportes de las pequeñas vertientes que riegan las zonas de Pacopampa, Sora Sora; estas vertientes y otras, son las que han generado actividad agrícola y pecuaria, sin embargo se ve afectada por las aguas del río Huanuni, proveniente de localidades mineras, generando contaminación ambiental por metales pesados, como indica Leaño (2025), constituye una amenaza global para la salud humana y ecosistemas, agravada por la urbanización e industrialización. La temperatura promedio anual de 8,1 °C en la zona, siendo la amplitud térmica media, el mes más frío (junio-julio) y el más cálido (diciembre-enero) de 11,4 a 13,4 °C. La diferencia significativa, radica en los meses de agosto a diciembre ($F_{11,539}=7619,234$; $p<0,001$). El incremento de temperatura, provoca un déficit hídrico durante todos los meses del año. El área de estudio (figura 1), geográficamente está ubicada a 18°09'44" LS y 66°58'24" LW, a 18°12'30" LS y 66°56'08" LW, 3780 msnm. Se realizó los muestreos de agua, suelo, especies vegetales en las comunidades de Pacopampa y Sora Sora (tabla 1).

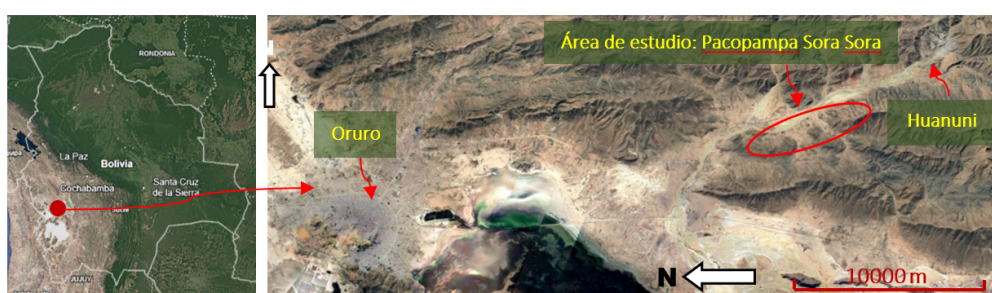


Figura 1. Ubicación área de estudio

Tabla 1. Puntos de muestreo de aguas, suelos y especies vegetales

Muestra	Coordenadas		Altura msnm	Fecha de muestreo	Características de la zona
	LS	LW			
M2-1	18°11'29.7"	66°56'32.4"	3743	10/09/2024	Vertiente de agua, Pacopampa
M1-1	18°11'26.9"	66°56'29.7"	3780	10/09/2024	Aguas arriba Sora Sora
M2-2	18°11'26.8"	66°56'30.4"	3785	10/09/2024	Sistema de riego Sora Sora
M3-1	18°11'09.4"	66°56'43.7"	3745	15/04/2025	Sistema de riego Sora Sora, cultivos de alfalfa

En el estudio de aguas se tomó muestras superficiales analizadas en SPECTROLAB (tabla 2). Los elementos estudiados: As, Cd, Sn, Pb, Zn elementos muy tóxicos, y entre elementos No críticos, se tiene Ca, Mg, K y Na, otros parámetros físicos y químicos, el pH, Ce, carbonatos, bicarbonatos, cloruros y sulfatos (2024 y 2025). Se comparó con límites máximo permisible, Ley 1333 (1992) y su reglamento en contaminación hídrica (1995). En los suelos se evaluó el contenido de metales pesados (As, Cd, Sn, Pb), bases intercambiables (Ca, Mg, K, Na), Zn y S (tabla 2), los resultados se compararon con parámetros internacionales: Rango Común y Máxima Concentración Tolerable para Agricultura (MC) según Klokke; Niveles Críticos (NC) de Kabata - Pendias (1995); Concentración Total Crítica (CTC) de Rams y Steines (1994) y Concentración Crítica (CC) de la Comisión Europea (2002). En flora se estudió los metales pesados (tabla 2) en tres especies vegetales ("ch'iji" *Distichlis humilis*, "alfalfa" *Medicago sativa* y "haba" *Vicia Faba*), siendo las dos primeras de uso forrajero (nativo e introducido, respectivamente) y el último para consumo humano en Sora. Los resultados se compararon con parámetros de Niveles en plantas PPO 9612 (1996); LPS Chapman (1995); OMS (1977).

Tabla 2. Análisis de agua, suelo, vegetal

Parámetros	Agua	Unidad	Norma/ Método	Suelo	Unidad	Norma/ Método	Vegetal	Unidad	Norma/ Método
Arsénico	As	mg/l	ASTM D 2972-03B	As	mg/kg	EPA 7062	As	mg/kg	EPA 7062
Estaño	Sn	mg/l	ASTM D 5185-18	Sn	mg/kg	EPA 3050B	Sn	mg/kg	EPA 3050B
Cadmio	Cd	mg/l	ASTM D 3557-02 ^a	Cd	mg/kg	EPA 7130	Cd	mg/kg	EPA 7130
Plomo	Pb	mg/l	ASTM D 3559-03 ^a	Pb	mg/kg	EPA 7420	Pb	mg/kg	EPA 7420
Zinc	Zn	mg/l	ASTM D 1691-02 ^a	Zn	mg/kg	EPA 7951	Zn	mg/kg	EPA 7951
pH			ASTM D 1293-99						
Conductividad	Ce	uS/cm	ASTM D 1125-95						
Calcio	Ca	mg/l	ASTM D 511-03	Ca	meq/100g	AAS			
Magnesio	Mg	mg/l	ASTM D 511-03	Mg	meq/100g	AAS			
Sodio	Na	mg/l	ASTM D 3561-02	Na	meq/100g	AAS			
Potasio	K	mg/l	ASTM D 4191-03	K	meq/100g	AAS			
Cloruro	Cl-	mg/l	ASTM D 512-04						
Carbonatos	CO ₃ =	mg/l	ASTM D 3875-03						
Bicarbonatos	HCO ₃ -	mg/l	ASTM D 3875-03						
Sulfatos	SO ₄ =	mg/l	ASTM D 516-02	SO ₄ =	mg/kg	Fotometría			

Fuente: SPECTROLAB, 2024

La bioacumulación de metales pesados en el sistema agua – suelo – planta, en cuanto a su similitud, se estudió con análisis de conglomerados (algoritmos matemáticos que buscan la similitud de características de las variables –As, Sn, Cd, Pb y Zn–), la organización de datos se trabajó en una matriz (tabla 3) con n filas (compartimentos) conteniendo las p características (variables).

Tabla 3. Organización de datos en la bioacumulación de metales pesados

Individuos	V1	V2		Vj		Vp
1	X11	X12	...	X1j	...	X1p
2	X21	X22	...	X2j	...	X2p
n	Xn1	Xn2	...	Xnj	...	Xnp

Para analizar la interdependencia de las variables (As, Sn, Cd, Pb y Zn) y encontrar una representación gráfica óptima de la variabilidad de los datos –diferenciación de compartimentos: agua, suelo, planta–se utilizó el análisis de componentes principales (ACP) que muestra la estructura de variación en los compartimentos agua, suelo, especie vegetal –tallo+hojas y raíz–, a través de gráfico de dispersión de los datos –variables– con propiedades óptimas para la interpretación de la variabilidad y covariabilidad subyacente.

Para el estudio de la carga ambiental (cantidad de contaminantes que ingresa a un sistema) en ganado vacuno, para estudios de nutrición animal, se consideró el 10% de peso vivo de consumo de alimento diario, el consumo de agua en ganado se considera ad libitum, sin embargo, estudios realizados indican que una unidad animal de ganado vacuno promedio consume 50 l/agua diaria (una unidad animal de 250 kg/PV). Los forrajes principales de la zona son Medicago sativa y Distichlis humilis.

RESULTADOS

Evaluación de aguas

Los elementos químicos se agruparon por su solubilidad, frecuencia y toxicidad para el ambiente (tabla 4). En la zona de Pacopampa y Sora Sora (2024-2025), se tomó 4 muestras (M2-1, M1-1, M2-2, M3-1; tabla 1).

Las celdas que están marcados en la tabla 5, son sustancias que sobrepasan límites máximos permisibles, clase B y C, ley 1333 (1992). El As en los puntos de muestreo M2-1, M1-1, M2-2 y M3-1, no supera la concentración máximo permisible (0,05 mg/l; clase C, ley 1333), (tabla 5, figura 3), registrando valores muy por debajo de 0,002 mg/l.

En la zona de Pacopampa, los elementos As, Sn y Pb, sus valores <0,002; 0,5; y 0,03 mg/l respectivamente, están por debajo de la concentración máximo permisible (As = 0,05, Sn = 2, Pb = 0,05 mg/l), clase C, Ley 1333, (tabla 5, figura 3). Sin embargo, mencionar que las concentraciones registradas de metales pesados pueden tener una acumulación en los organismos vivos de la zona en el tiempo y provocar daños en especial el As que es un elemento potencialmente cancerígeno. Con respecto al Cd, el valor registrado (1,89 mg/l), sobrepasa la concentración máximo permisible (Cd = 0,005 mg/l), clase C, Ley 1333, existiendo el riesgo de acumulación en organismos vivos (flora y fauna).

Tabla 4. Agrupación de elementos químicos según su solubilidad, frecuencia y toxicidad para el medio ambiente

No críticos			Tóxicos pero insolubles o no frecuentes			Muy tóxicos y relativamente disponibles		
Na	C	F	Ti	Ga	Be	As	Au	
K	P	Li	Hf	La	Co	Se	Hg	
Mg	Fe	Rb	Zr	Os	Ni	Te	Tl	
Ca	S	Sr	W	Rh	Cu	Pd	Pb	
H	Cl	(Al)*	Nb	Ir	Zn	Ag	Sb	
O	Br	Si	Ta	Ru	Sn	Cd	Bi	
	N		Re	Ba		Cr	Pt	

Fuente: Franken Margot (2005), Laboratorio de Limnología - UMSA. Aluminio tóxico para organismos de suelos y aguas

En la localidad de Sora Sora se realizó tres muestreos(dos en el año 2024 y una en el año 2025), en ambos años, los elementos As, Sn y Pb, tienen valores por debajo de la concentración máximo permisible, clase C, Ley 1333, (tabla 5, figura 3). El Cd en ambas zonas Pacopampa y Sora Sora, excede la concentración máximo permisible, clase C, Ley 1333, teniendo variaciones de 0,79 mg/l en el 2024 (M1-1) a 1,04 mg/l en el mismo año (M2-2) y rebajando a 0,36 mg/l en el año 2025 (M3-1).

Parámetro	Unidades	Pacopampa	Sora Sora		
		2024, M"-1	2024 M1-1	2024 M2-2	2025, M3-1
Arsénico	mg/l	<0,002	<0,002	<0,002	0,002
Cadmio	mg/l	1,89	0,79	1,04	0,36
Calcio	mg/l	163,5	201,2	143,1	145,1
Estaño	mg/l	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Magnesio	mg/l	89,98	82,06	69,04	63,77
Plomo	mg/l	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Potasio	mg/l	12,13	10,62	10,47	13,03
Sodio	mg/l	22,7	62,1	84,7	102,7
Zinc	mg/l		75,43		10,36
pH	mg/l	4,42 - 6,06	3,8 - 7,5		
Ce	µS/cm	1706	1375	1313	1283
Carbonatos	mg/l	<3	<3	6	<3
Bicarbonatos	mg/l	6	24	46	37
Cloruros	mg/l	100	98	80	73,5
Sulfatos	mg/l	784,6	260,8	216,4	490,5

Fuente: SPECTROLAB, 2024

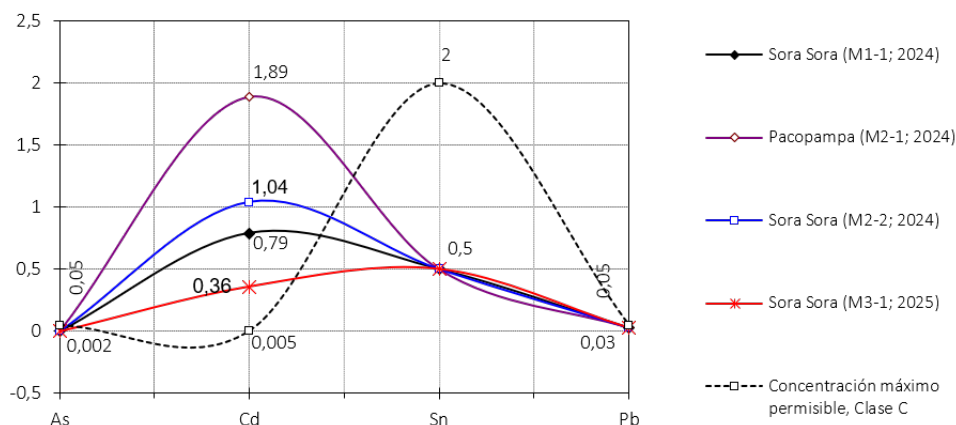


Figura 3. Metales pesados (As, Cd, Sn, Pb; mg/l)

Los elementos Ca, Mg, Na, tienen valores por debajo de la concentración máxima permisible (Ca = 300, Mg = 150, Na = 200 mg/l), clase C, Ley 1333, (tabla 5, figura 4), en Sora Sora. El K en Pacopampa, y Sora Sora, tiene una relación de 1:15 ([K]agua : [K]suelo), considerado como nivel medio. El Na registra 22,7 mg/l en M2-1 y 62,1 mg/l en M1-1; a 84,7 mg/l, el mismo año en M2-2; aumentando a 102,7 mg/l en M3-1, lo que implica un incremento del 40% en concentración de Na.

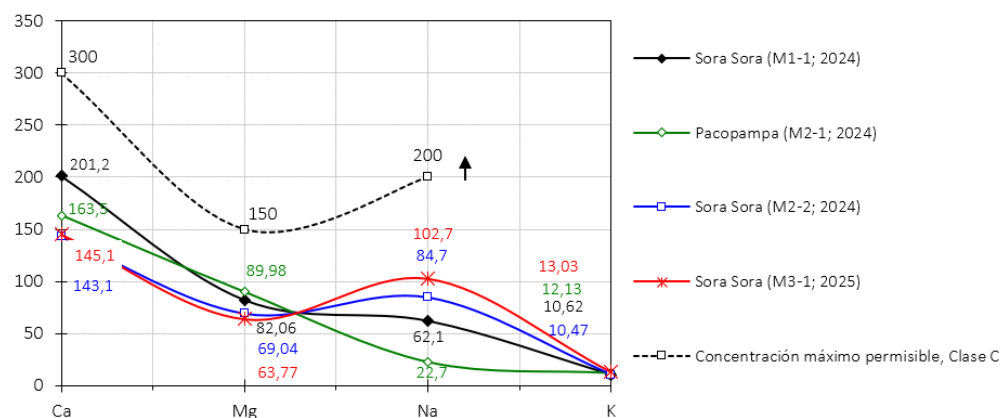
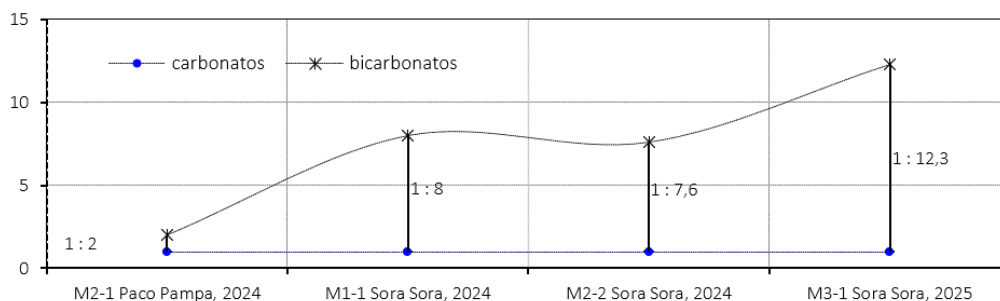


Figura 4. Elementos No críticos (Ca, Mg, Na, K; mg/l)

Respecto a la concentración de CO_3^{2-} y HCO_3^- , tiene una relación de 1:2 en M2-1, 1:8 en M1-1, 1:7,6 en M2-2 y 1:12,3 en M3-1. Existiendo mayor diferencia en Sora Sora con relación a Pacopampa (figura 5). Con respecto al análisis de SO_4^{2-} excede el límite máximo permisible en M2-1 y M3-1 (figura 6).

Figura 5. Carbonatos: Bicarbonatos ($\text{CO}_3^{2-} : \text{HCO}_3^-$)

Evaluación de suelos

El contenido de metales pesados (As, Cd, Pb), bases intercambiables (Ca, Mg, K, Na), Zn y S (tabla 6), se comparó con parámetros internacionales.

Con respecto al contenido de As = <0,003 ppm en M2-1, As = 4,602 en M1-1, As = <0,003 en M2-2 y As = 0,042 en M3-1, está por debajo del Rango Común (RC, As = 2 a 20 ppm), Kloke, (figura 7). Respecto al Cd en la zona de estudio, en todos los puntos de muestreo está por encima del Rango Común (RC, Cd = 0,1 a 1 ppm) y Máximo Tolerable (MT, Cd = 3 ppm), propuesto por Kloke, y de la Concentración Crítica (CC, Cd = 3 ppm), propuesta por la Comisión Europea (2002). Según la Concentración Total Crítica (CTC, Cd = 8 ppm) propuesto por Rams y Steines (1994), la zona M3-1 el contenido de Cd, está por debajo de esta norma, sin embargo, las demás zonas de estudio (M2-1, M1-1, M2-2) están por encima del valor referencial (figura 8).

Tabla 6. Análisis físico y químico de suelos

Parámetro	Unidades	Pacopampa	Sora Sora		
		2024	2024		2025
		M2-1	M1-1	M2-2	M3-1
Arsénico	ppm	<0,003	4,602	<0,003	0,042
Cadmio	ppm	8,3	13,9	16	3,87
Estaño	ppm	< 10	10	<10	<1
Plomo	ppm	21	8	4	2,8
Calcio	meq/100 g	4,7	5	21,5	4,7
Magnesio	meq/100 g				1,4
Sodio	meq/100 g	0,9	0,4	2,8	0,6
Potasio	meq/100 g				0,9
Zinc	ppm		195,87		32,43
Azufre	ppm			1,95	0,01

Fuente: SPECTROLAB, 2024

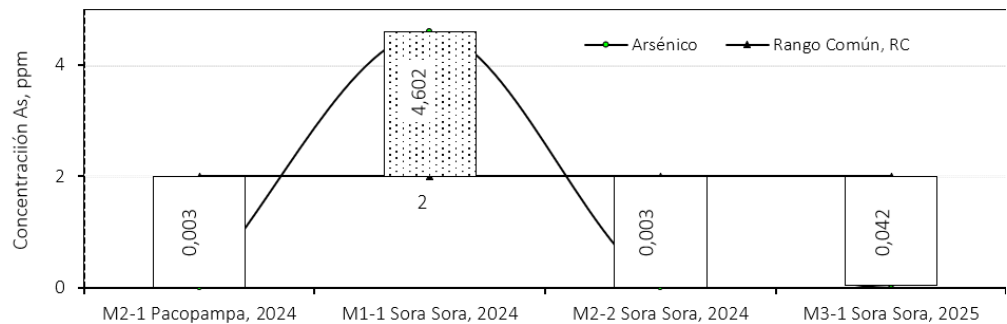


Figura 7. Variación de As (mg/l), en la zona de estudio

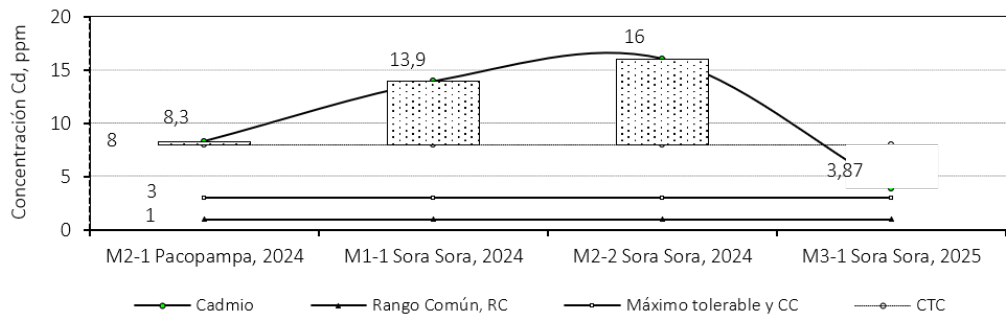


Figura 8. Variación de Cd (mg/l), en la zona de estudio

El contenido de Sn (tabla 6) en las zonas M2-1, M1-1, M2-2 presentan valores similares con excepción de la zona M3-1, que tiene menor que los anteriores. Lastimosamente para el contenido de Sn y otros elementos no se cuenta con valores de referencia. Los contenidos de Pb en todas las zonas de estudio están por debajo de la Concentración Crítica (CC, Pb = 50 a 300 ppm), Comisión Europea (2002) y por debajo de la Concentración Total Crítica (CTC, Pb = 200 ppm), Rams y Steines (1994). Respecto al calcio (tabla 6) en las zonas M2-1, M1-1, y M3-1, presentan valores similares con excepción de M2-2, que tiene valor 4 veces mayor. El contenido de Na en M2-1, M1-1, y M3-1, presentan valores similares con excepción de M2-2, que tiene valor de 3 a 7 veces mayor que las otras zonas.

Con respecto al contenido de K (tabla 6), solo se tiene un valor en M3-1 ($K = 0,9 \text{ meq/100 g}$), siendo por encima del valor obtenido por el Na, en el mismo punto de muestreo, teniendo un comportamiento de suelo alcalino. El contenido de Zn = 195,87 ppm en M1-1, está por encima del Rango Común (RC, Zn = 3 a 50 ppm), Kloke, Concentración Crítica (CC, Zn = 150 a 300 ppm), Comisión Europea (2002) y por debajo de la Concentración Total Crítica (CTC, Zn = 400 ppm), Rams y Steines, (1994), Máximo Tolerable (MT, Zn = 300 ppm), Kloke. Por el contrario, el contenido de Zn = 32,43 ppm en M3-1 está por debajo del Rango Común, RC y Máximo Tolerable, MT, Kloke, de la misma forma está por debajo de la Concentración Crítica, CC, Comisión Europea (2022) y Concentración Total Crítica, CTC, Rams y Steines (1994). El contenido de S en M2-2, presenta valores de 1,95 ppm, muy por encima de M3-1 (0,01 mg/l).

Análisis de metales pesados en especies vegetales

El contenido de metales pesados (As, Cd, Sn, Pb, Zn), en especies vegetales ("ch'iji" *Distichlis humilis*, "alfalfa" *Medicago sativa* y "haba" *Vicia Faba*), (tabla 7) se comparó con parámetros de referencia y estudios realizados por autores e instituciones. Con relación al contenido de As, de las 3 especies vegetales evaluadas ("alfalfa" *Medicago sativa*, "haba" *Vicia Faba* y "ch'iji" *Distichlis humilis*), en la parte de hojas+tallo *Distichlis humilis*, es el que acumula mayor As = 5,137 ppm, seguido por *Medicago sativa* y *Vicia Faba* ambos con 4,667 ppm. Viendo el tamaño y área foliar de cada especie vegetal estudiada *Distichlis humilis*, muestra clara evidencia de una adaptación a mayores contenidos de As en sus tejidos vegetales, obviamente es una especie del lugar (autóctona) y no introducida como *Medicago sativa* y *Vicia Faba*, también podemos indicar que ninguno de las especies evaluadas supera el Límite Permisible Superior (As = 10 ppm), considerado por Chapman (1995). Sin embargo, estudios realizados en el altiplano boliviano por el PPO 9612 (1996), los niveles comunes en especies vegetales tendrían que estar en un rango de As = 0,5 a 1,5 ppm, siendo muy por debajo de los valores encontrados en el presente estudio.

Tabla 7. Contenido de metales pesados en especies vegetales, Sora Sora

Parámetro	Unidades	Sora Sora			
		2024			2025
		alfalfa (hojas+tallo)	haba (hojas+tallo)	ch'iji (hojas+tallo)	alfalfa (raíz)
Arsénico	ppm	4,667	4,667	5,137	4,042
Cadmio	ppm	4,7	25,2	27,2	0,78
Estaño	ppm	<10	<10	<10	<1
Plomo	ppm	18	27	15	80,3
Zinc	ppm	162,27	1064,39	830,75	320,24

Con respecto al Cd, tiene el mismo comportamiento que el As en la acumulación en hojas+tallo, de las especies vegetales en estudio, el ch'iji, el de > concentración (27,2 ppm), seguido del haba (25,2 ppm) y alfalfa (4,7 ppm), con excepción del último, los demás exceden el valor mencionado por AAFCO, el valor máximo de Cd = 10 ppm. Respecto al Sn los valores encontrados en alfalfa, haba y ch'iji, muestran contenidos similares en hojas+tallo (< 10 ppm), (tabla 7, figura 9).

La concentración de Pb, en hoja y tallo, *Vicia faba*, es la que tiene mayor concentración (27 ppm), seguido de *Medicago sativa* (18 ppm) y *Distichlis humilis* (15 ppm), (tabla 7, figura 9), superando los valores máximos permitidos por la OMS (1977) ($Pb < 1,3 \text{ ppm}$), de la FAO ($Pb = 2 \text{ ppm}$) y valores comunes en plantas recomendados por el PPO 9612 (1996), ($Pb = 0,07 - 5,4 \text{ ppm}$). Respecto al contenido del Pb en raíces de *Medicago sativa* ($Pb = 80,3 \text{ ppm}$), está muy por encima de los límites mencionados anteriormente.

El Zn en hojas+tallo, *Vicia faba* tiene mayor contenido (1064,39 ppm), seguido de *Distichlis humilis* (830,75 ppm), siendo *Medicago sativa* menor en contenido de Zn (162,27 ppm), (tabla 7, figura 9), están por encima de estudios realizados por el PPO 9612 (1996), que mencionan niveles comunes de Zn (20 - 150 ppm) en especies vegetales.

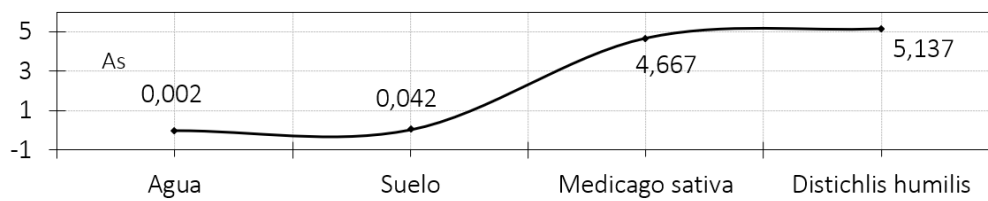


Figura 9. Metales pesados (As, Cd, Sn, Pb, Zn; ppm), en agua-suelo-plantas

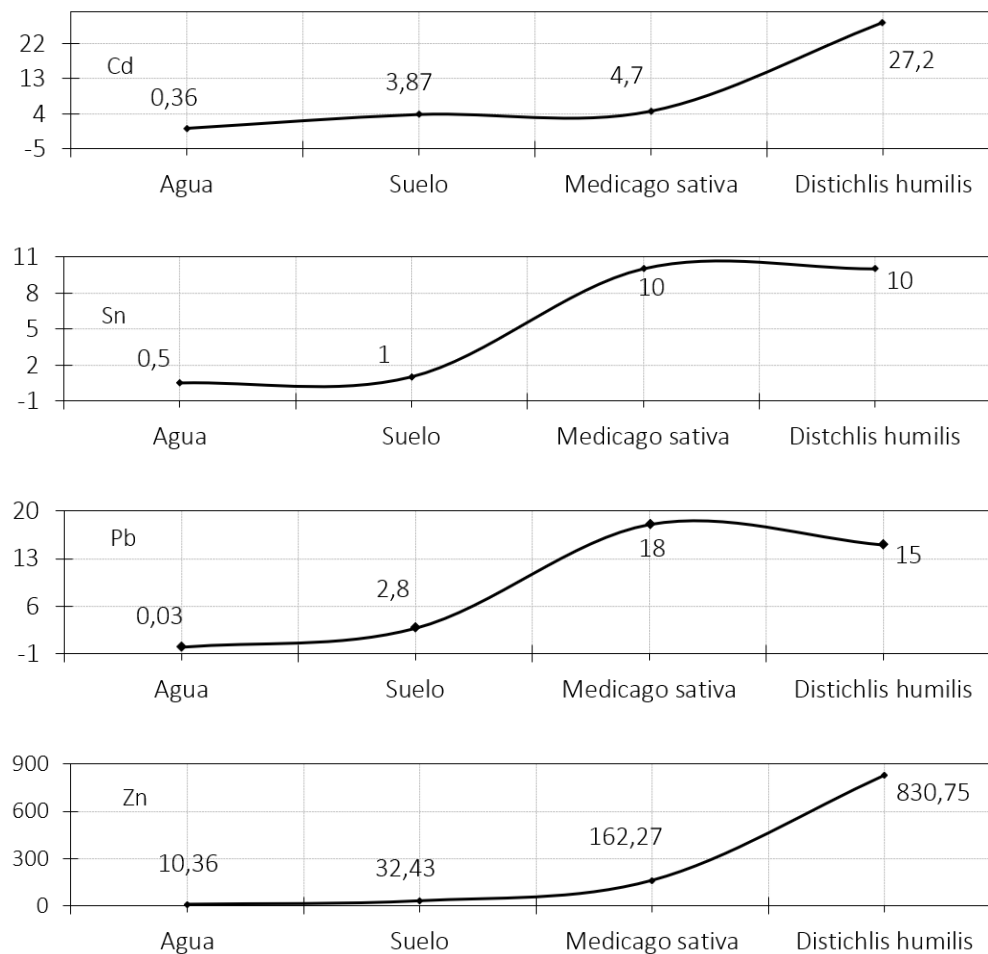


Figura 10. Conglomerados en agua-suelo-plantas de metales pesados (As, Cd, Sn, Pb, Zn; ppm)

También se realizó el análisis de contenido de metales pesados en la alfalfa (raíz), con el objeto de evaluar la diferencia de acumulación de metales pesados (As, Cd, Sn, Pb, Zn), tanto en hojas+tallo y raíz. Con respecto al As, *Medicago sativa*, acumula > concentración en hojas+tallo (4,667 ppm) con respecto a la raíz (4,042 ppm); de la misma forma y con mayor preocupación se observa que el Cd, acumula más en hojas+tallo (4,7 ppm) con respecto a la raíz (0,78 ppm). *Medicago sativa* es una especie forrajera de importancia, principalmente el área foliar, fuente de alimento para el ganado, el As y Cd tienen mayor acumulación en hojas+tallo (tabla 7, figura 9). El As, Cd, Sn, Pb y Zn, muestran un comportamiento progresivo en el sistema agua-suelo-plantas (figura 9).

A través del análisis de conglomerados, se observa una clara diferencia entre los compartimentos agua y suelo con los de las especies vegetales, siendo estas últimas de riesgo para el consumo principalmente como recurso forrajero para la actividad ganadera (figura 10). Por otra, el análisis de componentes principales, a través de la figura 11, evidencia el proceso de bioacumulación con mayor predominancia en *Distichlis humilis* que en *Medicago sativa* en hojas+tallo, siendo mucho menor en la raíz de esta última especie vegetal, siendo el riesgo mucho mayor por la presencia de Cd.

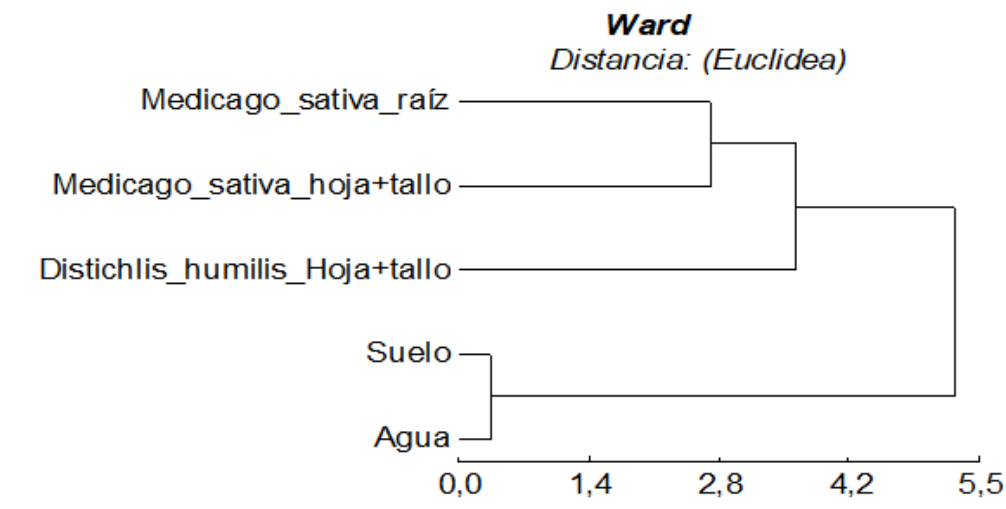


Figura 11. Conglomerados en agua-suelo-plantas de metales pesados (As, Cd, Sn, Pb, Zn; ppm)

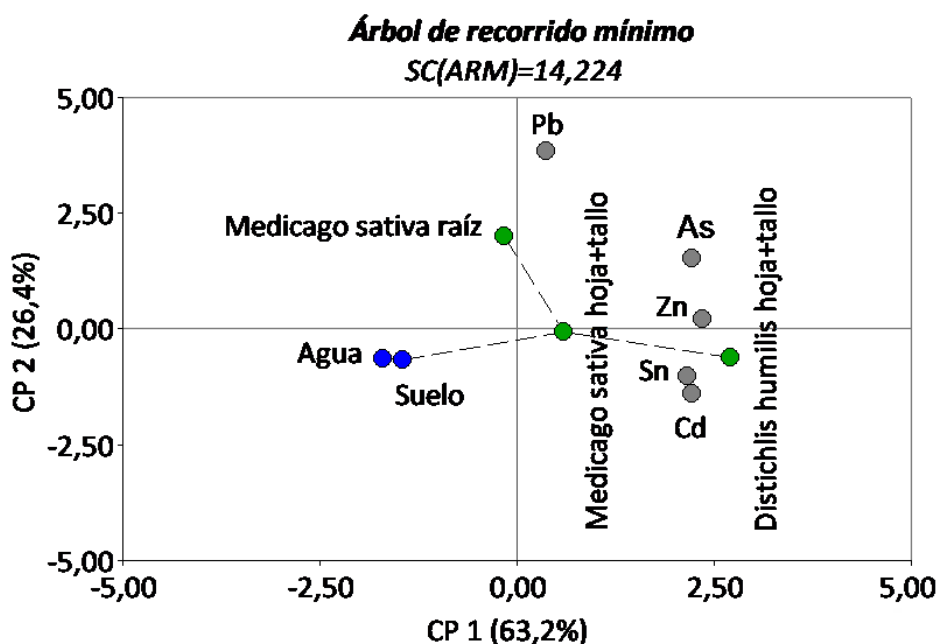


Figura 12. Carga ambiental en ganado vacuno (As, Cd, Sn, Pb, Zn), en la zona de estudio (Pacopampa - Sora Sora)

Carga ambiental en el ganado vacuno

Se estudió la carga ambiental en ganado vacuno; tomando en cuenta estudios de nutrición animal, que considera el 10% de peso vivo de consumo en alimentación al día, por otra parte, el consumo de agua a través de estudios realizados indica que una unidad animal de ganado vacuno promedio consume 50 l/agua diaria (250 kg/PV), el cual se tomó en cuenta para el estudio. Los forrajes principales de la zona son *Medicago sativa* y *Distichlis humilis*, se observa en la figura 12 la carga ambiental de 5 metales pesados en estudio (As, Cd, Sn, Pb, Zn) diario, semanal y mensual.

Arsénico

0,123 g/día
0,861 g/semana
3,69 g/mes

Cadmio

0,435 g/día
3,045 g/semana
13,05 g/mes

Zinc

14,558 g/día
101,906 g/semana
436,74 g/mes

**Estaño**

0,275 g/día
1,925 g/semana
8,25 g/mes

Plomo

0,414 g/día
2,898 g/semana
12,42 g/mes

**Total, ingreso
de metales pesados**
15,804 g/día
110,635 g/semana
474,15 g/mes

De la carga ambiental, principalmente metales pesados (As, Cd, Pb, Sn y Zn), resalta con mayor ingreso al organismo animal el Zn. Lo que se toma en cuenta es el total que ingresa al ganado vacuno por el consumo de forraje, en este caso *Medicago sativa* y *Distichlis humilis* (considerado solo la parte foliar y tallo) y el consumo de agua de la zona de estudio, resaltando más de 15 gramos de metales pesados que ingresa diario a una unidad animal (vacuno), más de 110 g /semana y más de 400 g/ mes.

DISCUSIÓN

Evaluación de aguas

En la evaluación de aguas en Pacopampa – Sora Sora, la concentración de As = 0,002 mg/l, si bien está por debajo de los límites permisibles, existen estudios como el que realizó Toledo Q.L.M. (2021) donde menciona que la concentración de As = 0,0082 a 0,0427 mg/l en agua se relaciona significativamente con los efectos sobre la salud en la comunidad de Chacaconiza – Corani. Estos efectos podrían ser similares en la zona de estudio, como sustenta Nina A.J. (2025) en su estudio con valores de As = 0,006648 mg/l, restringe el consumo de agua en el río Río Cuchumbaya Distrito Cuchumbaya – Moquegua, mucho más siendo el As un elemento muy móvil, que puede circular y recircular en aire, agua y suelos varias veces.

Con relación a los valores registrados de Cd = 0,79 a 1,89 mg/l en la zona de estudio (supera los máximos permisibles), es un metal muy móvil y biodisponible, muy tóxico en pequeñas concentraciones, una característica particular del Cd es la asociación que tiene con el Pb y el Zn en la naturaleza Montoya y Pérez (2009). El Cd, tiene la característica de bioacumularse en la fauna acuática, puede variar ampliamente entre organismos acuáticos, estudios realizados por Jacho-Lugmaña, A.Y., et al (2025) concluyeron que con valores de Cd = 0,000538 a 0,0550 mg/l en los cuerpos hídricos, estos son mala calidad de agua, evidenciándose que solo se observó macroinvertebrados (organismos acuáticos), tolerantes a la contaminación.

Por otra, considerando que el K = 10,47 a 13,03 mg/l, junto al Na = 10,36 a 75,43 mg/l son elementos fuertemente alcalinizantes y teniendo ventajas en cuanto al proceso de absorción con relación al Mg, es importante regular el balance nutricional (macro y micronutrientes), en la actividad ganadera y mucho más importante en el consumo humano en la zona de estudio, para evitar problemas posteriores, como indica Mamani Cori Y.C. (2025), en el estudio de concentración de sales disueltas como sodio, potasio, magnesio, bicarbonatos en aguas contaminada. Si este comportamiento se mantiene en el tiempo, existe la posibilidad de un proceso de sodificación en Sora Sora por medio de los cuerpos de agua, lo que implicaría problemas en los procesos naturales agua-suelo-planta.

La concentración de CO_3^{2-} y HCO_3^- , muestra si son aguas no duras o duras (término utilizado con criterios de riego). Donde exista mayor concentración de CO_3^{2-} y HCO_3^- , serán aguas duras y lo contrario si tienen menores concentraciones. En este caso las aguas de Sora Sora, son aguas aptas para riego con relación a las aguas de Pacopampa. Sin embargo, no olvidemos que no es el único parámetro con fines de riego. A esto tenemos que mencionar la concentración de SO_4^{2-} con relación a S^{2-} (figura 6). Las actividades mineras en sus aguas ácidas sueltan altas cantidades de S^{2-} , esto es incorporado al río. Los S^{2-} en su recorrido por el río son parte de un sistema de oxidación natural, proceso de S^{2-} a SO_4^{2-} , de esta forma incorporando cantidades elevadas de SO_4^{2-} a cuerpos de agua. Si observamos la figura 6, vemos en los puntos de muestreo M2-1 = 784,6 mg/l (Pacopampa) y M3-1 = 490,5 mg/l (Sora Sora), sus concentraciones de SO_4^{2-} son superiores a la concentración máximo permisible, clase C, Ley 1333 (1992), estos puntos son una vertiente y aguas de canal de riego respectivamente, lo que supone que las aguas de la vertiente (Pacopampa), los SO_4^{2-} son producto de la oxidación de S^{2-} , esto implica que por movimiento subterráneo de aguas podría estar ingresando aguas contaminadas producto de la actividad minera, como evidencio en estudios Villamar M. y Valverde A., (2025), indicando que la contaminación de SO_4^{2-} en ambientes acuáticos, es por la oxidación de S^{2-} , por influencia minera.

Evaluación de suelos

Al igual que el contenido de Cd en los cuerpos de agua estudiados, este elemento presenta concentraciones fuera de lo normal en los suelos en estudio (Cd = 3,87 a 13,9 ppm), sobrepasando parámetros de referencia a nivel mundial, teniendo riesgo de acumulación en organismos vivos y provocando problemas en el sistema trófico por proceso de contaminación. Al igual como manifiesta Ojeda J.W.C. (2025) en el estudio que realizó en suelos y su bioacumulación en pastos irrigados con aguas contaminadas de minería, concluye que valores de Cd = 13,563 y 13,115 ppm, generan procesos de bioacumulación en los pastos irrigados.

El comportamiento de Ca = 21,5 meq/100 g, en Sora Sora hace que pueda existir un proceso de alcalinización, debido a la topografía (plana a casi plana) y el tipo de sustrato existente (arcilla y limo), como se manifiesta en estudios realizados por Montoya Ch. y Pérez L. (2009). Asimismo, el comportamiento del Na = 2,8 meq/100 g., en Sora Sora, hace que pueda existir un proceso de sodificación, sumado un efecto desfloculante lo que afecta a la estructura del suelo y con este la movilidad normal de varios nutrientes, en especial el nitrógeno.

Análisis de metales pesados en especies vegetales

Las especies vegetales e, incluso, las variedades difieren, entre sí, en su capacidad para absorber metales, acumularlos y tolerarlos (Alloway y Jackson, 1991; Angelova et al., 2004). Es en este sentido que las especies vegetales *Medicago sativa* y *Distichlis humilis* en el presente estudio tiene su comportamiento a los metales pesados (As, Cd, Sn, Pb, Zn), diferenciados, siendo este último el que bioacumula con mayor preferencia, como lo sostiene Alejos-Patiño et al. (2026), en su estudio de metales pesados en el suelo, el agua y plantas cultivadas, concluyendo que los metales pesados (Cd, Pb y Zn), generan contaminación, manifestándose en las plantas con un índice de carga de contaminación (ICC = 1,70), muy por encima del agua y suelo, siendo un proceso que fomenta la acumulación progresiva de metales, lo que supone un riesgo potencial para el medio ambiente. Por otra, se han desarrollado trabajos que analizan las relaciones entre las fracciones de los metales en el suelo y su contenido en los cultivos (p. ej. Yanqui J.F.O. et al. 2025; Lago V. 2019) o las relaciones de metales pesados de sedimentos de cuerpos de agua y especies vegetales Montoya Ch. y Pérez L. (2009), o las interacciones entre distintos elementos que modifican la absorción de los metales (p. ej. Montoya Ch. y Pérez L., 2009; Khan et al., 1998). El riesgo que conlleva realizar actividades ganaderas en zonas con perturbación antropógenas, mucho más si son de origen minero metalúrgicos ponen de manifiesto exceso de los metales pesados en los suelos y aguas, representando una fuente principalmente de sustancias tóxicas para las plantas, provocando sinergismos y/o antagonismos negativos para el crecimiento y desarrollo de especies vegetales. Sin embargo, la bioacumulación de metales pesados en los tejidos vegetales representan un peligro para los consumidores, principalmente herbívoros (vacuno, llamuno, ovino, otros), teniendo como consumidor final a los humanos.

La bioacumulación de metales pesados en especies vegetales, genera efectos negativos p.ej., el As puede presentar niveles de toxicidad, tal como se evidencio en estudios realizados por García A.L. y Vilca L.Z. (2025) demostraron que el As tiene un factor de bioconcentración (BCF) de 0,018, indicando una absorción considerable, con un contenido de As = 0,05 +/- 0,028 ppm, en la parte de tubérculos, que presenta niveles de toxicidad en alimentos de origen vegetal. Los contenidos de As en las especies vegetales analizadas en el presente estudio son muy por encima del valor antes indicado *Medicago sativa* As = 4,667 ppm, *Distichlis humilis* As = 5,137 y *Vicia faba* As = 4,667 ppm (tabla 7). De la misma forma podemos indicar que según el PPO 9612 (1996), el contenido de As en las tres especies vegetales en estudio, supera el nivel común de As en plantas (0,5-1,5 ppm). El As es un elemento que compone la parte mineralógica de las rocas, teniendo concentraciones elevadas en la zona de estudio con respecto a otros lugares, también mencionar que los sistemas hídricos, en especial los ríos son un medio de transporte de este elemento (0,56 mg/l en el río Desaguadero y 1,1 mg/l en el río Mauri; PPO⁹⁶¹², 1996), convirtiéndose en un potencial riesgo de acumulación en organismos vivos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En los cuerpos de agua de Pacopampa y Sora Sora muestran una tendencia de perturbación con mayor probabilidad en Sora Sora (M2-2 y M3-1, sistema de riego), un factor importante son las actividades mineras, producto de esto se tiene concentraciones elevadas de Cd = 0,36 a 1,04 mg/l, por encima de los límites máximos permisibles, clase C, Ley 1333 (1992).

El contenido de metales pesados (As, Cd, Sn, Pb), bases intercambiables (Ca, Mg, K, Na), Zn y S, en suelos, muestran tres elementos de preocupación. El comportamiento del Na = 0,6 meq/100 g en Sora Sora hace que pueda existir un proceso de sodificación. Por otra parte, el Zn = 195,87 ppm en M1-1 (Sora Sora) está por encima del Rango Común (RC), Klope, de la misma forma está por encima de la Concentración Crítica, Comisión Europea (2002) y debajo de Concentración Total Crítica (CTC) Rams y Steines (1994) y el Máximo Tolerable (MT), Klope. De la misma forma, el contenido de Cd en la zona de estudio está por encima del Rango Común (RC) y Máximo Tolerable (MT), Klope, Concentración Crítica Comisión Europea (2002) y debajo de la Concentración Total Crítica (CTC) Rams y Steines (1994).

Los elementos As, Cd, Pb, Zn, exceden los límites máximos permisibles, en especies vegetales ("alfalfa" *Medicago sativa*, "haba" *Vicia Faba* y "ch'iji" *Distichlis humilis*). Con respecto a la carga ambiental en el ganado vacuno ingresa más de 15 g de metales pesados diario a una unidad animal (vacuno), más de 110 g a la semana y más de 400 g al mes. Por último, la realidad es innegable al observar que en la zona de estudio (Pacopampa y Sora Sora), un proceso progresivo de carga ambiental de metales pesados en la cadena trófica teniendo como consumo final a la población de la zona. Poder recomendar que no es suficiente realizar un estudio desde el punto de vista físico - químico.

Referencias

1. Alloway, B. J., & Jackson, A. P. (1991). The behaviour of heavy metals in sewage sludge-amended soils. *Science of the Total Environment*, 100, 151–176. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(91\)90377-Q](https://doi.org/10.1016/0048-9697(91)90377-Q)
2. Alejos-Patiño, I. W., Briceño-Yen, H., Campos-Felix, U., & Figueroa-Ramírez, J. (2026). Evaluación de metales pesados en suelo, agua y plantas cultivadas en un agroecosistema periurbano de un valle interandino del Perú. *Bioagro*, 38(1), 509–522. <https://doi.org/10.51372/bioagro381.10>
3. Altagracia Marte, M., & Altagracia Ureña, Y. (2024). Identificación de cadmio en peces de la presa de Hatillo: Un enfoque analítico para la evaluación ambiental. Universidad Tecnológica del Cibao Oriental. <https://repositorio.uteco.edu.do/handle/123456789/253>
4. Angelova, V., Ivanova, R., Delibaltova, V., & Ivanov, K. (2004). Bioaccumulation and distribution of heavy metals in fibre crops: Flax, cotton and hemp. *Industrial Crops and Products*, 19(3), 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2003.10.001>
5. Calcina, R. L. (2006). Presencia de metales pesados en la biota acuática (*Orestias* sp. y *Schoenoplectus tatora*) de la desembocadura del río Ramis, lago Titicaca, Puno, Perú [Proyecto de investigación, 2005–2006].
6. Calcina, R. L., & Huaraya, C. F. (2018). Presencia de metales pesados en la biota acuática (*Schoenoplectus tatora* y *Orestias* sp.) en las desembocaduras de los ríos Ramis e Illpa de la Reserva Nacional del Titicaca. *Revista de Postgrado Scientiarvm*, 4(2), 47–51. <https://doi.org/10.26696/sci.epg.0084>
7. Chapman, P. M. (1995). Extrapolating laboratory toxicity results to the field. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 14(6), 927–930. <https://doi.org/10.1002/etc.5620140601>
8. Comisión Europea. (2002). Decisión de la Comisión de 12 de agosto de 2002 por la que se aplica la Directiva 96/23/CEE en lo que respecta al rendimiento de métodos analíticos y a la interpretación de los resultados (2002/657/CE). *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L 221. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=celex:32002D0657>
9. Curtis, H., & Barnes, N. S. (2001). *Biología* (6.ª ed.). Editorial Médica Panamericana. <https://books.google.es/books?id=mGadUVpdTLsC>
10. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2009). Guía para la descripción de perfiles de suelo (2.ª ed.). <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/a0541s>
11. Förstner, U., & Müller, G. (1973). Heavy metal accumulation in river sediments: A response to environmental pollution. *Geoforum*, 4(2), 53–61. [https://doi.org/10.1016/0016-7185\(73\)90006-7](https://doi.org/10.1016/0016-7185(73)90006-7)
12. Franken, M. (2005). *Calidad ambiental: Conceptos generales* (E. Kalkowski, Trad.) [Documento inédito].
13. García Alejandría, L., & Vilca Jara, Z. (2025). Análisis de metales pesados en la planta *Solanum tuberosum* (papa) para garantizar la seguridad alimentaria y la salud pública de la población de la zona rural de Paríamarca del distrito de Yanacancha, Pasco-2024. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/6167>
14. Gonzales Sanchez, J. L. E. (2025). Bioacumulación de metales pesados tóxicos en tres especies vegetales emergentes en los pasivos mineros del Sinchao, Cajamarca, 2021–2022. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/9044>
15. Jacho-Lugmaña, A. Y., Riofrío-Guevara, M. A., Toaza-Iza, J. X., & Giler-Ormaza, A. M. (2025). Análisis de plomo, cadmio y su relación con macroinvertebrados en los ríos Cutuchi y Pumacunchi de la provincia de Cotopaxi en el año 2025. *Innova Science Journal*, 3(3), 573–586. <https://doi.org/10.63618/omd/isj/v3/n3/102>
16. Jarrín Orozco, M. P. (2023). *Arthrocaulon macrostachyum: Características nutricionales y su uso como planta fitorremediadora* [Tesis de maestría, Universidad Católica de Murcia]. <https://repositorio.ucam.edu/bitstream/handle/10952/8270/TFM%20MARIA%20PAULA%20JARRIN%20OROZCO.pdf?sequence=1>
17. Khan, K. S., & Huang, H. Y. (1998). Effects of heavy metal pollution on soil microbiomass. *Environmental Sciences Online Journal*. [Datos editoriales incompletos].
18. Kabata-Pendias, A. (1995). Problemas de agricultura relacionados con el excesivo contenido de metales en el suelo. En [Datos de obra incompletos] (pp. 3–18).
19. Kloeke, A. (1980). *Mitteilungen des Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten* (pp. 1–3). VDLUFA. [Datos editoriales incompletos].
20. Lago Vila, M. (2019). Biodisponibilidad de metales pesados en suelos contaminados [Tesis doctoral, Universidade de Vigo]. <http://hdl.handle.net/11093/1123>
21. Leaño, J. (2025). Análisis de la contaminación por metales pesados desde la perspectiva teórica. *Esprint Investigación*, 4(4), 111–120. <https://doi.org/10.61347/ei.v4i4.190>
22. Ley N.º 1333 de 1992. Ley de Medio Ambiente y su Reglamentación, Decreto Supremo N.º 24176. 8 de diciembre de 1995. <https://www.lexivox.org/norms/BO-DS-24176.html>
23. Linarez, K. A., Castillo Coaquira, I., & Quispe Riquelme, R. (2020). Determinación de metales pesados en suelos agrícolas y suelos para cultivo de *Solanum tuberosum* de la bahía interior de Puno. *Investigación y Desarrollo*, 20(1), 147–153. <https://doi.org/10.23881/idupbo.020.1-11i>
24. Mamani Ccori, Y. C. (2025). Análisis de la calidad de agua del reservorio en el Centro Poblado de Millojachi, Puno-2025. <https://repositorio.upsc.edu.pe/handle/20.500.14891/1758>
25. Molina, C. I., Ibáñez, C., & Gibon, F.-M. (2012). Proceso de biomagnificación de metales pesados en un lago hiperhalino Poopó, Oruro, Bolivia: Posible riesgo en la salud de consumidores. *Ecología en Bolivia*, 47(2), 99–118. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1605-25282012000200003&lng=es&tlng=es
26. Montenegro Encalada, J. A. (2025). Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados: Estudio de laboratorio de la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio por medio de las especies *Beta vulgaris* var. *cicla* y *Mentha x piperita*. Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/26960>

27. Montoya Ch., J. C., & Pérez, L. M. R. (2009). Lago Uru Uru: Evaluación de la calidad del agua, sedimentos y totora (1.ª ed.). CEPA, LIDEMA, PS-Cáritas e Instituto de Desarrollo y Ambiente FCAV-UTO.
28. Nina Acero, J. (2025). Concentración de metales pesados en aguas del río Cuchumbaya, distrito Cuchumbaya-Moquegua, 2024. <https://repositorio.upsc.edu.pe/handle/20.500.14891/1556>
29. Noras, Solis, & Torrico. (1992). Impact of the minerals industry on the environment in some areas of the departments of Oruro and Potosí: A preliminary study of stream water and sediments. Ministerio de Minería y Metalurgia, Proyecto de Rehabilitación del Minero.
30. Ojeda Gutiérrez, S., & Rhénals Quintana, A. (2025). Evaluación de la contaminación por metales pesados en el ecosistema de la ciénaga de Mallorquín: Análisis de sedimentos y agua. Corporación Universidad de la Costa. <https://hdl.handle.net/11323/14205>
31. Ojeda, J. W. C. (2025). Metales pesados en suelos y su bioacumulación en pastos irrigados con aguas contaminadas por minería en la irrigación Canal N, Puno. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 23(2). <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v23.n2.2025.2403>
32. Organización Mundial de la Salud. (1977). Selección de medicamentos esenciales: Informe de un Comité de Expertos de la OMS (Serie de Informes Técnicos N.º 615). <https://iris.who.int/handle/10665/41169>
33. Orsag, C. V., León, P. L., Pacosaca, Y. O., & Castro, R. E. (2013). Evaluación de la fertilidad de los suelos para la producción sostenible de quinua. Tinkazos. *Revista Boliviana de Ciencias Sociales*. <https://www.redalyc.org/pdf/4261/426141576006.pdf>
34. Orsag, V., & Miranda, R. (2004). Evaluación del impacto de riego con aguas del río Desaguadero sobre la salinización, sodificación y acumulación de metales pesados en suelos y vegetación. ALT.
35. Plumlee, G. S., Logsdon, M. J., & Filipek, L. F. (1999). The environmental geochemistry of mineral deposits: Part A. Processes, techniques, and health issues; Part B. Case studies and research topics (Vol. 6). Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/Rev.06>
36. PPO 9612. (1996). Impacto de la minería y el procesamiento de minerales en cursos de agua y lagos. Secretaría Nacional de Minería, Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Swedish Geological AB Environmental Services. <https://observatorio.dicyt.uto.edu.bo/wp-content/uploads/2019/04/14-Impacto-del-procesamiento-de-minerales-en-agua-y-lagos.pdf>
37. Rams, E., & Steines, E. (1994). Heavy metals in soils. En B. Markert (Ed.), *Plants as bioindicators* [Páginas incompletas]. VCH Verlagsgesellschaft.
38. Rebollo Salinas, D. B. (2022). Biomagnificación de metales pesados a través de cadenas tri-tróficas [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de Morelos]. <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/3015>
39. República de Bolivia. (1995, 8 de diciembre). Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) de la Ley del Medio Ambiente N.º 1333, Decreto Supremo N.º 24176. <https://www.lexivox.org/norms/BO-DS-24176.html>
40. Robles Urgilez, M. D. (2024). Seguridad alimentaria: Riesgos asociados a metales pesados sobre la salud humana. *Journal of American Health*, 7(2). <https://www.jah-journal.com/index.php/jah/article/view/204>
41. Sánchez, M. M. (2025). Capacidad de fitoextracción de plomo (Pb) en *Phragmites australis* en un ambiente semicontrolado [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de San Luis Potosí]. https://www.researchgate.net/profile/Jose-Angel-Montes-Rocha/publication/397470800_Capacidad_de_Fitoextraccion_de_Plomo_en_Phragmites_australis
42. Swedish Geological AB Environmental Services, & Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. (1996a). Proyecto piloto Oruro: Impacto de la contaminación minera e industrial sobre aguas subterráneas [Documento de trabajo]. <https://www.pieb.org>
43. Swedish Geological AB Environmental Services, & Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. (1996b). Proyecto piloto Oruro: Estudio experimental de los factores que influyen en los niveles de metales en la quinua [Documento de trabajo]. <https://www.pieb.org>
44. Swedish Geological AB Environmental Services, & Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. (1996c). Aspectos ambientales de los metales y metaloides en el sistema hidrológico del Desaguadero [Documento de trabajo]. <https://www.pieb.org>
45. Toledo Quispe, L. M. (2021). Concentración de arsénico en agua y los efectos sobre la salud en la comunidad de Chacaconiza-Corani, 2020. <http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/118>
46. Villamar Marazita, K. M., & Valverde Armas, P. E. (2025). Caracterización hidroquímica e isotópica de los recursos hídricos en el área minera Santa Rosa, Ecuador [Tesis doctoral, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/68008>
47. Yanqui, J. F. O., Lema, H. M., & Carrión, R. F. C. (2025). Distribución y bioacumulación de metales pesados en suelos agrícolas: Una revisión breve. *Revista PRISMA Amazónico*, 2(2), 17–27. <https://doi.org/10.66586/frem1z90>
48. Zamora Echenique, G. (2008). Tecnologías limpias aplicables a la pequeña minería [Documento final]. Programa de Investigación Estratégica en Bolivia.
49. Zamora Echenique, G. (2009). Propuesta técnica, socioeconómica y ambiental de tratamiento de sedimentos de ríos contaminados como alternativa de remediación ambiental y desarrollo económico local. Programa de Investigación Ambiental PIEB y Dirección de Postgrado e Investigación Científica UTO.
50. Zapata, L., & Fernández, F. (1994). Evaluación de azufre, arsénico, plomo y antimonio en suelo y plantas de sus alrededores y la ciudad de Oruro. Empresa Metalúrgica de Vinto-Oruro.

Financiación

Ninguna.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Contribución de autoría

Conceptualización: Milton Robert Pérez Lovera, Juan Carlos Montoya Choque, Fernando Álvarez Rivero, Natalia Huanca Cabezas, Jaime Huanca Mendoza.

Redacción – Borrador original: Milton Robert Pérez Lovera, Juan Carlos Montoya Choque, Fernando Álvarez Rivero, Natalia Huanca Cabezas, Jaime Huanca Mendoza.

Redacción – Revisión y edición: Milton Robert Pérez Lovera, Juan Carlos Montoya Choque, Fernando Álvarez Rivero, Natalia Huanca Cabezas, Jaime Huanca Mendoza.