

Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Title Paper/Título del artículo:

Calidad del suelo, agua y forraje en zona agrícola impactada por actividades mineras en Zacatecas, México

Soil, water and forage quality in an agricultural area impacted by mining activities in Zacatecas, Mexico

Authors/Autores: Solís-Rodríguez, X., Espinoza-Canales, A., Gutiérrez-Bañuelos, H., Escot-Espinoza, V.M., Flores-De la Torre, J.A.

ID: e1950

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e1950>

Received/Fecha de recepción: May 21th 2025

Accepted /Fecha de aceptación: September 19th 2025

Available online/Fecha de publicación: October 13th 2025

Please cite this article as/Como citar este artículo: Solís-Rodríguez, X., Espinoza-Canales, A., Gutiérrez-Bañuelos, H., Escot-Espinoza, V.M., Flores-De la Torre, J.A. (2025). Soil, water and forage quality in an agricultural area impacted by mining activities in Zacatecas, Mexico. *Revista Bio Ciencias*, 13, e1950. <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e1950>

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Este archivo PDF es un manuscrito no editado que ha sido aceptado para publicación. Esto es parte de un servicio de Revista Bio Ciencias para proveer a los autores de una versión rápida del manuscrito. Sin embargo, el manuscrito ingresará a proceso de edición y corrección de estilo antes de publicar la versión final. Por favor note que la versión actual puede contener errores de forma.

Calidad del suelo, agua y forraje en zona agrícola impactada por actividades mineras en Zacatecas, México

Soil, water and forage quality in an agricultural area impacted by mining activities in Zacatecas, Mexico

Impacto de la minería en suelo, agua y forraje/

Impact of mining in soil, water and forage

Solís-Rodríguez, Xochitl¹. (0009-0007-9116-077X^{id}), Espinoza-Canales, Alejandro¹. (0000-0002-5031-4791^{id}), Gutiérrez-Bañuelos, Héctor¹. (0000-0002-9204-4291^{id}), Escot-Espinoza, Víctor Manuel² (0000-0002-5908-7978^{id}) y Flores-De la Torre, Juan Armando^{2*} (0000-0002-4660-5641^{id})

¹Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad Autónoma de Zacatecas. Carretera Panamericana, Zacatecas-Fresnillo Km 31.5, C.P. 98500, General Enrique Estrada, Zacatecas, México.

²Unidad Académica de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Zacatecas. Campus Universitario Siglo XXI, Carretera Zacatecas-Guadalajara Km 6, Colonia Ejido "La Escondida" C.P. 98160. Zacatecas, Zacatecas, México.

***Corresponding Author:**

[Juan Armando Flores-De la Torre](#). Unidad Académica de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Zacatecas. Campus Universitario Siglo XXI, Carretera Zacatecas-Guadalajara Km 6, Colonia Ejido "La Escondida" C.P. 98160. Zacatecas, Zacatecas, México. Teléfono: (449) 205 5221. E-mail: armando.flores@uaz.edu.mx

RESUMEN

La presencia y dispersión de elementos potencialmente tóxicos provenientes de residuos mineros puede afectar la calidad de los suelos utilizados en sistemas agropecuarios. En el presente trabajo se evaluó la presencia de metales pesados en suelo, agua y forrajes de uso agropecuario, así como la calidad nutricional de estos últimos en la comunidad de Valdecañas, Fresnillo, Zacatecas. Las concentraciones de metales pesados en las muestras fueron determinadas mediante espectrofotometría de absorción atómica de flama, asimismo, la calidad nutricional del forraje se determinó mediante un análisis proximal. En las muestras de agua analizadas se determinaron concentraciones máximas ($\mu\text{g L}^{-1}$) de plomo de 34.6 y cadmio de 4.25, los cuales superan los límites permisibles establecidos en la normativa nacional e internacional, siendo los cuerpos de agua cercanos a la comunidad los más afectados. En los suelos evaluados se determinaron concentraciones máximas (mg kg^{-1}) de 43.57 para plomo, 21.56 para cromo y 1.62 para cadmio, asociadas a procesos de biomagnificación en áreas usadas para pastoreo y como abrevaderos cerca del estanque de la comunidad. El análisis proximal indicó valores promedio de 14 % de proteína cruda, 37.5 % de fibra

detergente neutra y 34 % de fibra detergente ácida, con presencia de cromo en el 100 % de las muestras y una concentración máxima de 41.7 mg kg^{-1} . Los resultados reflejan la importancia de estudiar la presencia y movilidad de metales pesados en zonas agropecuarias cercanas a actividades mineras, así como evaluar la calidad de los productos alimenticios generados en la zona.

PALABRAS CLAVE:

Actividades agropecuarias, contaminación, minería, metales.

ABSTRACT

The presence and dispersion of potentially toxic elements from mining waste can affect the quality of soils used in agricultural systems. In the present work, the presence of heavy metals in soils, water, and forage from agricultural systems was evaluated, as well as the nutritional quality of the latter in the community of Valdecañas, Fresnillo, Zacatecas. Heavy metal concentrations in the samples were determined using flame atomic absorption spectrophotometry, and the nutritional quality of the forage was assessed through proximal analysis. Maximum concentrations ($\mu\text{g L}^{-1}$) of lead (34.6) and cadmium (4.25) were determined in the analyzed water samples, exceeding the limits established by national and international regulations, with water bodies in the community being the most affected. In the evaluated soils, maximum concentrations (mg kg^{-1}) of 43.57 for lead, 21.56 for chromium, and 1.62 for cadmium were determined, associated with biomagnification processes in areas used for grazing and as watering troughs near the community's pond. Proximal analysis indicated average values of 14 % crude protein, 37.5 % neutral detergent fiber, and 34 % acid detergent fiber, with chromium present in 100 % of the samples, with a maximum concentration of 41.7 mg kg^{-1} . The results reflect the importance of studying the presence and mobility of heavy metals in agricultural areas near mining activities, as well as evaluating the quality of food products produced in the area.

KEY WORDS

Agricultural activities, pollution, mining, metals.

Introducción

La minería es una de las actividades económicas más importantes en México y el estado de Zacatecas forma parte de las principales regiones mineras del país (SE, 2016c). El estado se divide en 17 regiones mineras de acuerdo a su localización y tipo de mineralización, una de las regiones más importantes es el distrito minero de Fresnillo (FMD), el cual se encuentra ubicado en el municipio con el mismo nombre y es reconocido como uno de los mayores productores de plata y oro a nivel nacional e internacional (SGM, 2020). El FMD se ubica cerca de zonas rurales como la comunidad de Valdecañas, la cual es una comunidad de 1 670 habitantes, donde se realizan actividades agropecuarias como siembra, producción y comercialización de maíz y frijol, así como la cría, producción y comercialización de ganado (INEGI, 2010; SGM, 2012).

Las actividades minero-metalúrgicas pueden tener impactos negativos en el medio ambiente, provocados principalmente por los residuos mineros generados después de las etapas de extracción, entre estos impactos se incluye la contaminación del suelo, agua superficial, agua subterránea y vegetación por la presencia de metales pesados y otros elementos tóxicos como arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe), mercurio (Hg), plomo (Pb) y zinc (Zn). Estos elementos tienen la capacidad de acumularse en el suelo y ser absorbidos por las plantas mediante diferentes mecanismos, representando un riesgo para la seguridad alimentaria por los procesos de biomagnificación de estos elementos en las cadenas tróficas (Gómez-Álvarez *et al.*, 2007; Khan *et al.*, 2016; Aznar-Sánchez *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2019). Al respecto, la calidad del suelo, agua y forraje en zonas agrícolas cercanas a sitios mineros es una preocupación creciente, ya que la presencia y movilidad de elementos potencialmente tóxicos puede afectar la calidad de las zonas agrícolas, los cultivos, el ganado y la salud humana (Hu *et al.*, 2017; Vetrinurugan *et al.*, 2019; Archundia *et al.*, 2024). Estudios previos han demostrado la presencia de As, Pb, Zn y Cu en suelos agrícolas, agua de riego, sedimentos de arroyo y forrajes en zonas mineras de diferentes estados de la república mexicana, como San Luis Potosí, Sonora, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, Guanajuato y Baja California Sur (Razo *et al.*, 2004; Ramos-Arroyo & Siebe-Grabach, 2006; García-Gutiérrez & Rodríguez-Meza, 2012; Duarte-Zaragoza *et al.*, 2014; Castro-González *et al.*, 2017; Alvarado-Zambrano & Green-Ruiz, 2019; Loredó-Portales *et al.*, 2020; González-Méndez *et al.*, 2022; Silva-Gigante *et al.*, 2024). Específicamente en Zacatecas se ha evaluado el efecto del Pb, As y Hg en la calidad de suelos agrícolas impactados por la presencia de residuos mineros y su acumulación en hortalizas cultivadas en estos suelos (Dávila *et al.*, 2012; Salas-Muñoz *et al.*, 2021).

La calidad del forraje como alimento en la producción de rumiantes para la obtención de carne y leche se relaciona con la composición química, factores ambientales, tipo de suelo y exposición a contaminantes (Almaraz-Buendía *et al.*, 2019; Navarro-Ortiz & Roa-Vega, 2020; Abedi *et al.*, 2022; Vasilachi *et al.*, 2023). Por tal motivo, el análisis proximal de forrajes producidos cerca de zonas mineras es fundamental para evaluar la calidad nutricional y determinar la presencia de contaminantes que puedan representar un riesgo. Este tipo de análisis incluye la determinación de parámetros como proteína cruda (CP), fibra ácido detergente (ADF), fibra neutro detergente (NDF), cenizas y minerales, así como la cuantificación de metales pesados y otros contaminantes (Rezaeian *et al.*, 2020; Ge *et al.*, 2022; Elik & Gül, 2025). En la comunidad de Valdecañas, la comercialización de ganado es una de las actividades económicas principales, por lo que es importante evaluar el impacto que las actividades minero-metalúrgicas han generado en el sistema agropecuario local. En este trabajo se realizó una evaluación ambiental mediante la determinación de las concentraciones de metales pesados presentes en muestras de suelos, agua y forraje de la comunidad de Valdecañas, así como la evaluación del valor nutrimental del forraje producido en la comunidad mediante su caracterización proximal.

Material y Métodos

Área de estudio

La comunidad de Valdecañas pertenece al municipio de Fresnillo, Zacatecas, México (Figura 1). Presenta una elevación de 2 250 m.s.n.m. y está asentada en el fondo de un valle con presencia de flujos de ríos intermitentes, cuerpos de agua superficiales, áreas agrícolas y zonas de pastoreo; se ubica a ~2 km de las instalaciones mineras del proyecto denominado “Saucito del Poleo” (Figura 1c).

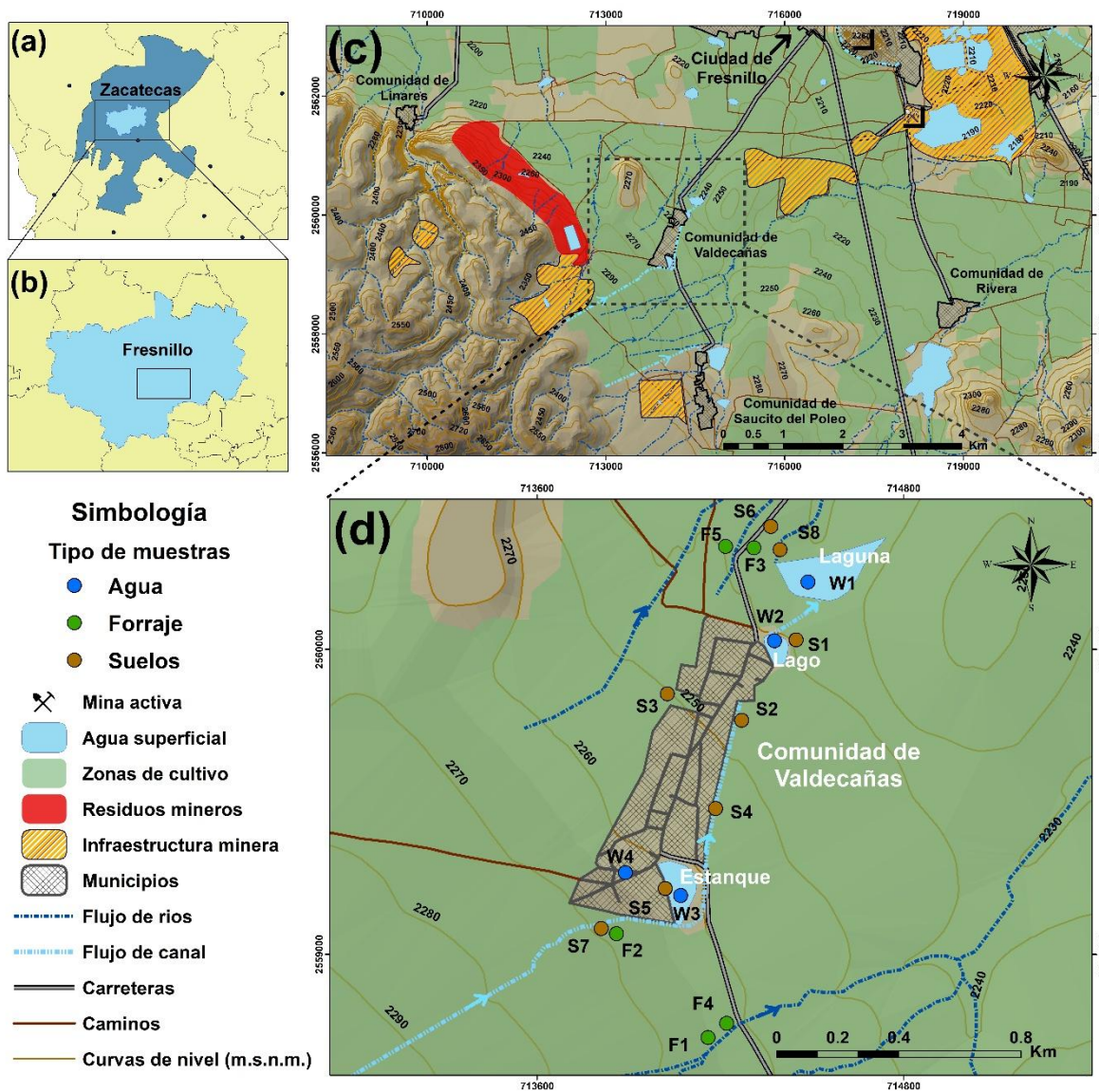


Figura 1. Mapa del área de estudio donde se presenta la ubicación de: (a) el estado de Zacatecas, (b) municipio de Fresnillo, (c) zona minera activa y (d) zona de Valdecañas, con los puntos de muestreo correspondientes de agua (circulo azul), suelo (circulo café) y forraje (circulo verde). Fuente: Elaboración propia.

Recolección de muestras de agua, suelo y forraje

En la Tabla 1 se presentan las características y ubicación de las muestras de agua, suelo y forraje de uso agropecuario recolectadas en octubre de 2024. Las muestras de agua se recolectaron de tres cuerpos de agua superficiales presentes en la zona, a los cuales se les denominó “laguna”, “lago” y “estanque”, estos cuerpos de agua reciben el caudal de un canal artesanal que proviene directamente de las instalaciones mineras y es consumida ocasionalmente por el ganado de la comunidad (Figura 1c), para el análisis de las muestras de agua se recolectaron 500 mL en botellas de polipropileno, la muestra se filtró a 45 µm utilizando filtros para jeringa de nylon y fueron acidificadas con HNO₃ al 70 % en campo, esta fracción se utilizó para la determinación de metales pesados (SE, 2016b).

El muestreo de suelo se realizó en zonas de siembra y en áreas específicas donde el ganado de la comunidad realiza actividades de pastoreo; la recolección de muestras se realizó mediante un muestreo exploratorio dirigido, recolectando ~500 g de cada muestra con profundidades de 30 cm de acuerdo a lo establecido en la Norma Mexicana NMX-132-SCFI-2016, las muestras fueron colocadas en bolsas de plástico para su traslado al laboratorio (SE, 2016a). La recolección de muestras de forrajes se realizó mediante la técnica de cuadrantes al azar, se utilizó un cuadrante de 50 x 50 cm, éste se lanzó en dirección aleatoria en diez ocasiones sobre cada una de las áreas de muestreo, se recolectó la planta contenida en el área hasta obtener 500 g de forraje, las muestras se colocaron en bolsas de papel para su posterior procesamiento en el laboratorio.

Tabla 1. Características y ubicación de las muestras recolectadas en la comunidad de Valdecañas, Fresnillo, Zacatecas.

Tipo de muestra	Clave	Características	Coordenadas UTM		Altitud (m.s.n.m.)
			Longitud X (Este)	Latitud Y (Norte)	
Agua	W1	Agua de laguna	714486.41	2560220.66	2,240
	W2	Agua de lago	714407.91	2560010.09	2,246
	W3	Agua de estanque	714065.16	2559209.23	2,265
	W4	Agua de grifo	713910.17	2559198.01	2,268
Suelo	S1	Suelo de pastoreo	714461.06	2560004.90	2,243
	S2		714265.43	2559755.92	2,252
	S3		714151.18	2559780.60	2,255
	S4		714184.04	2559477.82	2,258
	S5	Suelo de abrevadero	714045.75	2559198.89	2,266
	S6	Suelo de cultivo de maíz	714369.96	2560403.62	2,239
	S7	Suelo de cultivo de frijol	713848.34	2559072.98	2,271
	S8	Suelo de agostadero	714343.22	2560418.07	2,238
Forraje	F1	Forraje de frijol	714315.63	2558625.85	2,266
	F2		713848.34	2559072.98	2,271
	F3	Forraje de maíz	714369.96	2560403.62	2,239
	F4		714367.27	2558679.85	2,264
	F5		714351.06	2560430.23	2,238

W1: Agua de laguna. W2: Agua de lago. W3: Agua de estanque. W4: Agua de grifo. F1: Forraje de frijol 1.

F2: Forraje de frijol 2. F3: Forraje de maíz 1. F4: Forraje de maíz 2. S1: Suelo de pastoreo 1. S2: Suelo de pastoreo

2. S3: Suelo de pastoreo 3. S4: Suelo de pastoreo 4. S5: Suelo de abrevadero. S6: Suelo de cultivo de maíz. S7: Suelo de cultivo de frijol. S8: Suelo de agostadero. Fuente: elaboración propia

Cuantificación de metales por espectrofotometría de absorción atómica de flama

Para determinar las concentraciones de As, Pb, Cd, Cr, Cu, Fe y Zn en las muestras de suelo y forrajes, se tomaron 2.5 g de muestra previamente tamizada a un tamaño de partícula $< 250 \mu\text{m}$ para el caso del suelo y 1 mm para el caso del forraje. En las muestras se realizó una digestión ácida agregando 50 mL de una mezcla de HCl-HNO₃ relación 3:1 (agua regia). Las muestras se dejaron en reposo durante 24 h y posteriormente se calentaron a 95 °C por 3 h. Finalmente, las muestras fueron filtradas y diluidas con HNO₃ (1 %) hasta un volumen final de 50 mL. Para la cuantificación de As, Pb, Cd, Cr, Cu, Fe y Zn en muestras de agua, un volumen de 50 mL de muestra fue filtrada a 45 μm y acidificada con 1.5 mL de HNO₃ (70 %), (ISO, 1995; EPA, 1996).

Las concentraciones de los metales presentes en muestras de agua, suelos y forraje se determinaron por medio de la técnica de espectrofotometría de absorción atómica de flama, para lo cual se utilizó un espectrofotómetro de la marca Thermo Scientific, modelo iCE 3300FL (Cambridge, Reino Unido). Para el control de calidad de la digestión ácida y el análisis de elementos traza se utilizó el material de referencia NIST-2586 que contiene 500 mg kg⁻¹ de Pb (porcentaje de recuperación del 96 %) y estándares de alta pureza de la marca Thermo Scientific para generar curvas de calibración de cuatro puntos ajustadas mediante el método de mínimos cuadrados. Las longitudes de onda utilizadas (nm) para el análisis de los elementos fueron de 193.7, 217, 228.8, 357.9, 248.3, 324.8 y 213.9 para As, Pb, Cd, Cr, Fe, Cu y Zn respectivamente. Todos los análisis en las muestras se realizaron por duplicado.

Análisis fisicoquímico del suelo

Para evaluar los parámetros fisicoquímicos en las muestras de suelos, se preparó una dilución 1:10, para la cual se agregaron 2 g de muestra y 20 mL de agua desionizada en un tubo Falcón de 50 mL, la muestra se colocó en agitación por 20 min a 30 r.p.m. Posteriormente, la muestra se sedimentó y en el sobrenadante se analizaron parámetros fisicoquímicos como pH, potencial oxido-reducción (ORP), conductividad eléctrica (EC) y sólidos disueltos totales (TDS); para su medición, se utilizó un multiparámetro digital de mesa (multifunction, EZ-9909, China), (SEMARNAT, 2002).

Caracterización proximal y nutricional de forrajes: frijol, maíz y pasto.

Para el estudio de la composición química de forrajes, la muestra se pesó en fresco y se deshidrató a 60 °C durante 65 h, posteriormente la muestra se molió y cribó a 1 mm. Se determinó la cantidad de cenizas incinerándolas en horno mufla (Novatech MD-12, Lynchburg, VA, USA) a 550 °C por 6 h, por diferencia entre la materia seca y la ceniza se obtuvo la materia orgánica (OM). La proteína cruda (CP) se obtuvo

mediante la determinación de nitrógeno total por análisis de combustión de Dumas (Leco FP-528, Leco Corporation, St. Joseph, MI, USA). Las determinaciones de fibra detergente neutra (NDF) y fibra detergente ácida (ADF) se realizaron secuencialmente mediante el análisis de fibras detergentes de Van Soest, utilizando el analizador de fibras Ankom (Ankom Technology, Ankom 200, Macedon, NY, USA).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza de una sola vía (ANOVA) complementado con una prueba de medias de Tukey ($p < 0.05$). Previo a la aplicación del ANOVA, se realizaron pruebas de normalidad Shapiro-Wilk, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ (Figura C1). En los casos en que los datos no cumplieron con los supuestos de normalidad, se aplicó una transformación de potencia ($X^{0.5}$). Con los datos obtenidos se realizaron análisis de correlación de Pearson y análisis de componentes principales (PCA) con el objetivo de identificar asociaciones entre las variables analizadas y los distintos tipos de muestra (Escot-Espinoza *et al.*, 2021).

Para los metales cuyas concentraciones estuvieron por debajo del límite de detección (LOD), se aplicó un enfoque de datos censurados. Se calculó el porcentaje de muestras con valores por debajo del LOD para cada metal. En los casos donde este porcentaje fue mayor al 15 %, se consideró utilizar métodos específicos para datos censurados, tales como el método de sustitución con $\text{LOD}/\sqrt{2}$, como se recomienda en la literatura (Helsel, 2012; Hewett & Ganser, 2007). Finalmente, para los resultados del análisis proximal se utilizó estadística descriptiva, calculando la media, valores mínimos, máximos y desviación estándar. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software estadístico Minitab®18.1.

Resultados y Discusión

En la Tabla 2 se presentan los resultados de las concentraciones de As, Pb, Cd, Cr, Fe, Cu, y Zn presentes en las diferentes muestras de agua, suelo y forrajes. Para el caso del Pb, este se detectó en todas las muestras de suelo con una concentración máxima de 43.57 mg kg^{-1} en la muestra S3, la cual es una muestra recolectada en una zona de pastoreo cercana a la comunidad de Valdecañas e influenciada por la presencia de un arroyo que proviene de la zona alta orientada aguas arriba, hacia las instalaciones mineras (Figura 1d). Para el Cd, la muestra S2 fue la que presentó la mayor concentración con 1.62 mg kg^{-1} , esta muestra se ubica en una zona agrícola localizada en un llano e influenciada por el canal de agua que proviene directamente de las instalaciones mineras (Figura 1d). Todas las concentraciones de Pb y Cd determinadas en las muestras de suelo (Tabla 2) se encuentran por debajo del límite permisible (PL) para Pb (400 mg kg^{-1}) y para Cd (37 mg kg^{-1}) establecidos en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2007), sin embargo, la generación de residuos mineros por parte de las industrias mineras cercanas a la comunidad es constante y podría promover procesos de biomagnificación de metales pesados en los distintos receptores ambientales, considerando que las empresas mineras presentes iniciaron operaciones en 2011 (Minería en línea, 2022). Al respecto, Belmonte-Serrato *et al.* (2010), analizaron un área de 100 km^2 en el Distrito Minero Cartagena, La Unión, España, caracterizado por yacimientos ricos en Fe, Pb y Zn. En sus resultados determinaron concentraciones promedio de 66.12 mg kg^{-1} de Fe, 1751 mg kg^{-1} de Pb y 1.21 mg kg^{-1} de Zn en suelos de uso agrícola; reflejando el impacto

de los procesos de movilización hídrica que pueden presentar estos contaminantes en zonas con condiciones semi-áridas y que promueve su biomagnificación en diferentes receptores ambientales.

Tabla 2. Concentraciones de metales de los diferentes tipos de muestras recolectadas en la comunidad de Valdecañas, Fresnillo, Zacatecas.

Clave	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Fe	Zn
$\mu\text{g L}^{-1}$							
W1	UD	30.35 $\pm$ 2.76 ^A	4.25 $\pm$ 0.35 ^A	UD	24.4 $\pm$ 0 ^B	464.9 $\pm$ 24.5 ^B	724.5 $\pm$ 12.3 ^{AB}
W2	UD	12.3 $\pm$ 2.12 ^B	3.0 $\pm$ 0.85 ^A	UD	26.5 $\pm$ 2.97 ^{AB}	218.95 $\pm$ 2.05 ^C	10.4 $\pm$ 0.57 ^C
W3	UD	34.6 $\pm$ 1.13 ^A	3.75 $\pm$ 0.07 ^A	UD	30.7 $\pm$ 0.42 ^A	915.45 $\pm$ 8.7 ^A	853 $\pm$ 17.4 ^A
W4	UD	2.95 $\pm$ 2.62 ^C	UD	UD	UD	UD	426.3 $\pm$ 87.1 ^B
mg kg^{-1}							
S1	UD	8.2 $\pm$ 0.9 ^E	0.70 $\pm$ 0.03 ^C	3.63 $\pm$ 1.57 ^B	5.50 $\pm$ 0.25 ^B	1508.5 $\pm$ 8.61 ^C	7.6 $\pm$ 0.0 ^D
S2	UD	9.8 $\pm$ 1.2 ^{DE}	1.62 $\pm$ 0.09 ^A	3.83 $\pm$ 0.08 ^B	13.65 $\pm$ 0.38 ^A	1526.4 $\pm$ 3.96 ^C	18.4 $\pm$ 1.9 ^{BC}
S3	UD	43.57 $\pm$ 1.6 ^A	1.23 $\pm$ 0.01 ^B	11.84 $\pm$ 1.15 ^{AB}	13.46 $\pm$ 1.92 ^A	1892.5 $\pm$ 20.9 ^B	65.5 $\pm$ 4.7 ^A
S4	UD	28.2 $\pm$ 0.1 ^B	1.15 $\pm$ 0.18 ^B	17.62 $\pm$ 6.35 ^A	7.44 $\pm$ 0.61 ^B	1944.1 $\pm$ 20.1 ^A	60.8 $\pm$ 1.4 ^A
S5	UD	16.3 $\pm$ 0.1 ^C	0.74 $\pm$ 0.02 ^C	13.98 $\pm$ 2.18 ^{AB}	6.78 $\pm$ 0.25 ^B	279.4 $\pm$ 0.01 ^D	25.8 $\pm$ 0.9 ^B
S6	UD	12.6 $\pm$ 0.9 ^{CD}	UD	21.56 $\pm$ 9.15 ^A	6.58 $\pm$ 0.65 ^B	262.4 $\pm$ 4.44 ^D	19.5 $\pm$ 1.2 ^B
S7	UD	5.8 $\pm$ 0.05 ^E	UD	20.87 $\pm$ 3.09 ^A	4.33 $\pm$ 0.72 ^B	277.2 $\pm$ 0.93 ^D	11.0 $\pm$ 0.4 ^{CD}
S8	UD	15.7 $\pm$ 1.3 ^C	0.62 $\pm$ 0.017 ^C	13.33 $\pm$ 0.24 ^{AB}	4.38 $\pm$ 0.03 ^B	272.2 $\pm$ 2.3 ^D	20.0 $\pm$ 0.6 ^B
F1	UD	UD	0.48 $\pm$ 0.62 ^A	41.7 $\pm$ 24.7 ^A	6.97 $\pm$ 5.57 ^A	137.1 $\pm$ 26.6 ^A	16.0 $\pm$ 4.1 ^{AB}
F2	UD	UD	UD	22.29 $\pm$ 4.19 ^A	2.43 $\pm$ 2.81 ^A	153.9 $\pm$ 16.1 ^A	18.7 $\pm$ 0.8 ^{AB}
F3	UD	UD	UD	30.78 $\pm$ 1.81 ^A	6.26 $\pm$ 0.12 ^A	141.1 $\pm$ 12.01 ^A	9.7 $\pm$ 0.3 ^B
F4	UD	UD	UD	13.88 $\pm$ 7.05 ^A	1.05 $\pm$ 0.04 ^A	104.4 $\pm$ 0.19 ^A	23.9 $\pm$ 2.2 ^{AB}

As: Arsénico. Cd: Cadmio. Cr: Cromo. Cu: Cobre. Fe: Hierro. Pb: Plomo. Zn: Zinc. W1: Agua de laguna.

W2: Agua de lago. W3: Agua de estanque. W4: Agua de grifo. F1: Forraje de frijol 1. F2: Forraje de frijol 2. F3: Forraje de maíz 1. F4: Forraje de maíz 2. S1: Suelo de pastoreo 1. S2: Suelo de pastoreo 2. S3: Suelo de pastoreo 3. S4: Suelo de pastoreo 4. S5: Suelo de abrevadero. S6: Suelo de cultivo de maíz. S7: Suelo de cultivo de frijol. S8: Suelo de agostadero. UD: No detectable. Se muestra un análisis de varianza unidireccional con prueba de medias de Tukey ($p < 0.05$), diferentes letras (A, B, C o D) indican diferencias estadísticamente significativas entre muestras.

Fuente: elaboración propia

En la muestra de agua W3 se determinaron las concentraciones máximas de Pb, Cu, Fe y Zn, con 34.6, 30.7, 915.45 y 853 $\mu\text{g L}^{-1}$ respectivamente; para el caso del Cd fue de 4.25 $\mu\text{g L}^{-1}$ determinada en la muestra W1 (Tabla 2), estas muestras son de cuerpos de agua que se abastecen constantemente de los flujos de canal que emana de las instalaciones mineras y se encuentran cerca de en zonas agrícolas, además de ser cuerpos de agua accesibles para el ganado que se cría en la comunidad (Figura 1d, Figura C2a). Asimismo, se determinó que el 75 % de las muestras superan el PL para Pb en agua de consumo establecido en la NOM-127-SSA1-2017 (10 $\mu\text{g L}^{-1}$), mientras que el 100 % superar el PL establecido por la Organización Mundial de la Salud (1 $\mu\text{g L}^{-1}$); para el caso del Cd, el 25 % de las muestras superan el PL establecido en la normativa mexicana (3 $\mu\text{g L}^{-1}$) (WHO, 2017; SSA, 2022). La presencia de estos elementos en campos agrícolas cercanos a industrias minero-metalúrgicas ya se ha evaluado (Rodríguez-Eugenio *et al.*, 2019); por lo que los cuerpos de agua de la comunidad de Valdecañas son una potencial fuente de

contaminación, asimismo, un posible proceso de biomagnificación se ve favorecido por la altimetría de la zona, que promueven la presencia de escorrentías que provienen de las instalaciones mineras y que abastecen al tanque de agua y la laguna de la comunidad (Figura 1d, Figura C2b).

Para el caso de las muestras de forrajes, se detectaron concentraciones máximas de Cr de 41.7 mg kg^{-1} en la muestra F1 (forraje de frijol), con una concentración de 20.87 mg kg^{-1} en el suelo agrícola cercano a donde fue recolectado (muestra S7). Asimismo, en la muestra F3 (forraje de maíz) se determinó una concentración de 30.78 mg kg^{-1} de Cr y en el suelo agrícola del mismo sitio se detectaron 21.56 mg kg^{-1} (muestra S6) (Figura 1c, Tabla 2). Estos resultados indican un posible mecanismo de bioacumulación y biomagnificación de Cr hacia plantas de consumo para el ganado local (Guzmán-Morales *et al.*, 2021). Al respecto, Castro-González *et al.* (2018), evaluaron el incremento en la concentración de Cr en alfalfa producida en suelos irrigados con aguas residuales durante ocho meses. En dicho estudio, observaron un aumento en la concentración de Cr de 1.36 a 2.78 mg kg^{-1} en la parte comestible (hoja y tallo) y un aumento de 1.34 a 2.14 mg kg^{-1} en raíz.

Pese a que no se logró detectar Pb en los forrajes evaluados, la presencia de este metal en suelos de zonas de pastoreo y áreas de cultivo es alarmante, ya que es un elemento que puede transferirse hacia los forrajes por medio de las cadenas tróficas, impactando la salud de los animales y seres humanos. Al respecto, Khan *et al.* (2023), evaluaron la concentración de Pb en sangre de animales, maíz forrajero y muestras de suelo agrícola, determinando concentraciones de hasta 2.39 mg L^{-1} , 10.34 mg kg^{-1} y 10.73 mg kg^{-1} respectivamente, estableciendo que el Pb es un elemento con capacidad para movilizarse del suelo hacia los forrajes y posteriormente al ganado.

Elementos como el Fe, Zn y Cu actúan como requerimientos minerales importantes para los procesos fisiológicos del ganado, por lo que la presencia de estos en los forrajes analizados podrían ser insignificantes, sin embargo, la cantidad de cada elemento depende de la especie, edad, raza y nivel de producción, por lo que es necesario establecer información más precisa respecto a las proporciones de minerales en la dieta de los animales (Rosero-Noguera & Posada-Ochoa, 2016; Bernardis *et al.*, 2017).

Evaluación de los parámetros fisicoquímicos en muestras de suelo

En la Tabla 3 se presentan los valores de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en las muestras de suelo. Las muestras presentaron valores promedio de pH de 7.03 y ORP de 78.0 mv-SHE , sin embargo, muestras de suelo como S6 y S7, presentaron potenciales reductores de -41.5 y -4.5 mv-SHE respectivamente, ambas muestras también presentaron un bajo contenido de sales reflejado en los valores de EC y TDS, propios de zonas de cultivo que presentan procesos de erosión (Gutiérrez & Llerena, 2019).

Los resultados de EC y TDS presentaron variabilidad entre los sitios muestreados. La muestra S5 presentó los valores más elevados de EC ($977.5 \mu\text{S cm}^{-1}$) y TDS (488.5 mg L^{-1}), esta muestra se ubica cerca del estanque y la desembocadura del canal que proviene de las instalaciones mineras (Figura 1d). Asimismo, se puede deducir que

existe arrastre de partículas por erosión hídrica desde las zonas más elevadas del área de estudio (instalaciones mineras) hacia el valle de la comunidad de Valdecañas, esto considerando la altimetría del área de estudio y los valores de EC detectados en suelos de las zonas de transición entre los cuerpos de agua (S2, S3 y S4), los cuales son bajos en comparación con los obtenidos en las muestras S1 y S8, ubicadas en el fondo del valle, en donde se presentan procesos de sedimentación de partículas finas (Figura 1c, d; Figura C2a), (Escot-Espinoza *et al.*, 2021).

Tabla 3. Análisis parámetros fisicoquímicos determinados en de las diferentes muestras de suelo recolectadas en la comunidad de Valdecañas, Fresnillo, Zacatecas.

Clave	pH	ORP (mv-SHE)	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	TDS (mg L^{-1})
S1	7.4 $\pm$ 0.07 ^{AB}	77 $\pm$ 9.9 ^B	282.5 $\pm$ 47.4 ^B	141.5 $\pm$ 23.3 ^B
S2	6.7 $\pm$ 0.49 ^B	158.5 $\pm$ 16.3 ^A	219 $\pm$ 21.2 ^{BC}	109.5 $\pm$ 10.61 ^{BC}
S3	6.9 $\pm$ 0.21 ^{AB}	86.5 $\pm$ 3.54 ^B	72 $\pm$ 2.83 ^C	35.5 $\pm$ 2.12 ^C
S4	7.0 $\pm$ 0 ^{AB}	59.5 $\pm$ 13.44 ^B	43 $\pm$ 4.24 ^C	43 $\pm$ 4.24 ^{BC}
S5	6.7 $\pm$ 0 ^B	158 $\pm$ 0 ^A	977.5 $\pm$ 132.2 ^A	488.5 $\pm$ 65.8 ^A
S6	8.2 $\pm$ 0 ^A	-41.5 $\pm$ 2.12 ^D	50.5 $\pm$ 20.5 ^C	35 $\pm$ 4.24 ^C
S7	6.4 $\pm$ 0 ^B	-4.5 $\pm$ 0.71 ^C	33.5 $\pm$ 3.54 ^C	16.5 $\pm$ 2.12 ^C
S8	7.0 $\pm$ 0.84 ^{AB}	138 $\pm$ 4.24 ^A	213.5 $\pm$ 6.36 ^{BC}	106.5 $\pm$ 3.54 ^{BC}

S1: Suelo de pastoreo 1. S2: Suelo de pastoreo 2. S3: Suelo de pastoreo 3. S4: Suelo de pastoreo 4. S5: Suelo de abrevadero. S6: Suelo de cultivo de maíz. S7: Suelo de cultivo de frijol. S8: Suelo de agostadero. ORP: Potencial oxido-reducción. EC: Conductividad eléctrica. TDS: Solidos disueltos totales. Se muestra un análisis de varianza unidireccional con prueba de medias de Tukey ($p < 0.05$), diferentes letras (A, B, C o D) indican diferencias estadísticamente significativas entre muestras.

Fuente: elaboración propia

Análisis proximal y nutricional de forrajes

Las concentraciones del análisis proximal realizado en los forrajes se presentan en la Tabla 4; los resultados reflejan porcentajes normales de CP con 20.5 %, 10 % y 11.4 % para forraje de frijol, maíz y grama respectivamente, estos corresponden a valores observados en forrajes con condiciones fenológicas previas a la maduración y que son muy similares a la de otro tipo de forrajes como la alfalfa (Palmonari *et al.*, 2014; Guo *et al.*, 2019; Vuković *et al.*, 2025), el uso de estos forrajes se ve reflejado en tasas moderadas de ganancia en peso corporal y producción de leche (Mobashar *et al.*, 2018; Hansen *et al.*, 2022), sin embargo, estos forrajes son adecuados para el mantenimiento y funcionamiento de los microorganismos ruminales presentes en el ganado, ya que para este tipo de animales se tiene una exigencia mínima de 7 a 10 % de CP (Posada-Ochoa *et al.*, 2016).

El contenido promedio de NDF en los forrajes evaluados fue de ~37.5 %, mientras que para ADF fue de 34 %. Asimismo, el contenido de cenizas permitió conocer la concentración mineral de los forrajes, en el caso del forraje de frijol fue de 10.6 %, forraje de maíz de 11 % y forraje de grama 10.7 %, estos valores son aceptables para forrajes usados en dietas bovinas (Bernardis *et al.*, 2017). Al respecto, los forrajes son fuente importante de minerales para el ganado de pastoreo, necesarios para su desarrollo y reproducción, además de apoyar en las funciones microbiológicas en el

rumen y combatir enfermedades, la ingesta en niveles bajos o aumentados puede afectar la productividad y la salud del animal. El utilizar aguas residuales para riego de cultivos aumenta las concentraciones de minerales en el suelo y el forraje, afectando su desarrollo y calidad nutricional (Bernardis *et al.*, 2017; Khan *et al.*, 2023).

Los resultados del análisis proximal y nutricional de los pastos o grama se encuentran en intervalos considerados como normales (Tabla 4), esto considerando que los pastos de buena calidad deben tener un contenido de CP (> 7 %), NDF (< 60 %) y ADF (< 40 %) para satisfacer las necesidades nutricionales del ganado. Sin embargo, los pastos expuestos a contaminantes pueden presentar alteraciones en su composición nutricional, por ejemplo, la acumulación de metales en los tejidos vegetales puede reducir el contenido de CP y aumentar el contenido de cenizas (Miranda *et al.*, 2005; Calderón *et al.*, 2023). Asimismo, la presencia de elementos tóxicos puede interferir con la absorción y utilización de nutrientes esenciales por parte del ganado al incorporarse en el ciclo suelo-planta-animal, lo que puede afectar las condiciones de salud y productividad (Pérez-Vázquez *et al.*, 2015; Archundia *et al.*, 2024).

Tabla 4. Caracterización proximal y nutricional de los diferentes forrajes recolectados en la comunidad de Valdecañas, Fresnillo, Zacatecas.

Parámetros	Media (%)	Desviación estándar	Mínimo (%)	Máximo (%)
Forraje de grama (pastos)				
Ash	10.77	0.57	10.37	11.17
OM	88.58	0.2	NA	NA
NDF	41.96	3.02	39.82	44.1
ADF	41.85	3.01	39.72	43.98
CP	11.44	6.27	NA	NA
Forraje de frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>)				
Ash	10.65	0.51	10.30	11.01
OM	89.35	3.35	NA	NA
NDF	41.96	3.02	39.82	44.1
ADF	41.85	3.01	39.72	43.98
CP	20.51	0.62	NA	NA
Forraje de maíz (<i>Zea mays</i>)				
Ash	11.07	1.04	10.3	11.80
OM	89.43	0.23	NA	NA
NDF	28.61	7.64	23.2	34.01
ADF	18.43	2.84	16.43	20.44
CP	10.06	0.23	NA	NA

Ash: Cenizas. OM: Materia orgánica. NDF: Fibra neutro detergente. ADF: Fibra ácido detergente. CP: Proteína cruda. NA: No aplicable.

Fuente: Elaboración propia

La presencia de actividades minero-metalúrgicas cerca de áreas agrícolas y de pastoreo puede tener un impacto significativo en la calidad y seguridad de los cultivos y pastos utilizados en la dieta para el ganado. Los forrajes de maíz y frijol evaluados en esta investigación muestran estar dentro de rangos establecidos como normales, por lo que su siembra en las áreas de cultivo cercanas a las instalaciones mineras no afecta su calidad nutricional, no obstante, la presencia de metales puede afectar la

seguridad alimentaria de los consumidores, pues se han reportado efectos negativos sobre la salud humana, asociados a problemas del sistema nervioso y riesgo cancerígeno (Nuss & Tanumihardjo, 2010; Suárez-Martínez *et al.*, 2016; Rai *et al.*, 2019; Soto-Benavente *et al.*, 2020). Asimismo, los pastos o grama que crece en las proximidades de las zonas mineras pueden estar expuestos a diversos contaminantes, como metales pesados y otros elementos tóxicos, que pueden acumularse en los tejidos vegetales y posteriormente en los productos derivados del ganado, como leche y carne, representando un riesgo para la salud humana (Miranda *et al.*, 2005; Bermúdez *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013; Pérez-Vázquez *et al.*, 2015).

Análisis estadístico de muestras de suelo y forraje

El análisis de correlación de Pearson para las muestras de suelo se presenta en la Tabla 5, estos resultados muestran una correlación positiva ($p < 0.05$) entre los metales Pb, Cd, Cr, Fe y Zn, la correlación es más fuerte entre Pb y Cd ($p < 0.01$), lo que podría estar asociado a un origen antropogénico común. Asimismo, se observó una correlación positiva entre la EC y TDS ($p < 0.05$), lo que sugiere que las muestras de suelo tienen una carga iónica que se relaciona con la presencia de sales disueltas, dentro de estas sales se podría encontrar fases minerales secundarias portadoras de metales pesados (Escot-Espinoza *et al.*, 2021).

Tabla 5. Análisis de correlación de Pearson para muestras de suelo recolectadas en la comunidad de Valdecañas, Fresnillo, Zacatecas.

Variable	Pb	Cd	Cr	Cu	Fe	Zn	pH	ORP	EC	TDS
Pb	1									
Cd	0.852**	1								
Cr	0.915**	0.779*	1							
Cu	0.729	0.864**	0.52	1						
Fe	0.631	0.73*	0.385	0.731*	1					
Zn	0.765*	0.476	0.645	0.562	0.503	1				
pH	-0.261	-0.298	-0.283	-0.122	-0.046	-0.087	1			
ORP	0.727	0.881**	0.783*	0.668	0.344	0.211	-0.334	1		
EC	0.164	0.288	0.142	0.142	-0.268	-0.239	-0.159	0.628	1	
TDS	0.225	0.344	0.162	0.162	-0.211	-0.175	-0.189	0.659	0.993*	1

Cd: Cadmio. Cr: Cromo. Cu: Cobre. Fe: Hierro. Pb: Plomo. Zn: Zinc. ORP: Potencial óxido-reducción. EC: Conductividad eléctrica. TDS: Solidos disueltos totales. * $p < 0.05$. ** $p < 0.01$. Fuente:

Elaboración propia

Una agrupación y misma orientación de los vectores de los elementos Pb, Cd, Cr y Cu en el PCA presentado en la Figura 2a, reafirma la teoría de un origen similar de estos elementos (Tabla C1). Asimismo, una correlación positiva en el análisis de Pearson entre el Fe y Cu, y Zn y Pb ($p < 0.05$) se podría asociar con suelos agropecuarios con presencia de partículas de fases minerales propias del distrito minero de Fresnillo como pirita (FeS_2), calcopirita (CuFeS_2), esfalerita (ZnS) y galena (PbS) (Rubalcaba-Ruiz & Thompson, 1988). Estas partículas provienen del

procesamiento de minerales y pueden dispersarse desde la mina hacia los cuerpos de agua de la comunidad de Valdecañas mediante el canal artesanal (Figura 1c). La presencia de estas partículas portadoras también se asocia con la correlación positiva entre la EC y los TDS (Tabla 5, $p < 0.05$), esto podría implicar un enriquecimiento iónico por proceso de disolución y liberación de elementos en las zonas de acumulación de sedimentos (López-Díaz & Estrada-Medina, 2015; Escot-Espinoza *et al.*, 2021).

En el análisis de correlación de Pearson para los forrajes (Tabla 6), se evidencia una correlación positiva entre la NDF y la ADF ($p < 0.05$). Asimismo, se muestran correlaciones positivas entre los metales Cr y Cu, y Fe y Zn ($p < 0.05$); similares a las presentadas en las muestras de suelo. La presencia de metales como el Cr y Cu en los forrajes podría asociarse a un proceso de bioacumulación desde el suelo a la planta, asimismo, podría estar presente un proceso de bioestabilización por la presencia de materia orgánica, que promueve la formación de complejos organometálicos en las zonas radicales del cultivo (Salas-Ávila *et al.*, 2021; Santos-Ubaldo *et al.*, 2023).

Tabla 6. Análisis de correlación de Pearson para muestras de forraje recolectadas en la comunidad de Valdecañas, Fresnillo, Zacatecas.

Variable	Cd	Cr	Cu	Fe	Zn	Ash	OM	NDF	ADF	CP
Cd	1									
Cr	0.627	1								
Cu	0.59	0.999*	1							
Fe	0.562	0.997	0.999*	1						
Zn	0.513	0.99	0.996	0.998*	1					
Ash	-0.725	0.082	0.128	0.162	0.219	1				
OM	0.426	0.972	0.982	0.988	0.995	0.314	1			
NDF	0.5	-0.361	-0.404	-0.435	-0.487	-0.959	-0.57	1		
ADF	0.5	-0.361	-0.404	-0.435	-0.487	-0.959	-0.57	1*	1	
CP	0.99	0.508	0.468	0.437	0.384	-0.817	0.291	0.62	0.62	1

Cd: Cadmio. Cr: Cromo. Cu: Cobre. Fe: Hierro. Pb: Plomo. Zn: Zinc. Ash: Cenizas. OM: Materia orgánica.

NDF: Fibra neutra detergente. ADF: Fibra ácido detergente. CP: Proteína cruda. * $p < 0.05$. Fuente: *Elaboración propia*

En la Figura 2a se presenta el PCA para las muestras de suelo y se observa como los componentes 1 y 2 representan el 77.6 % de la varianza total de los datos. Asimismo, se observa como los vectores de Pb, Fe, Cu, Cd, Zn y ORP se orientan hacia las muestras de suelos de pastoreo (S2, S3 y S4), las cuales presentan las mayores concentraciones de estos elementos.

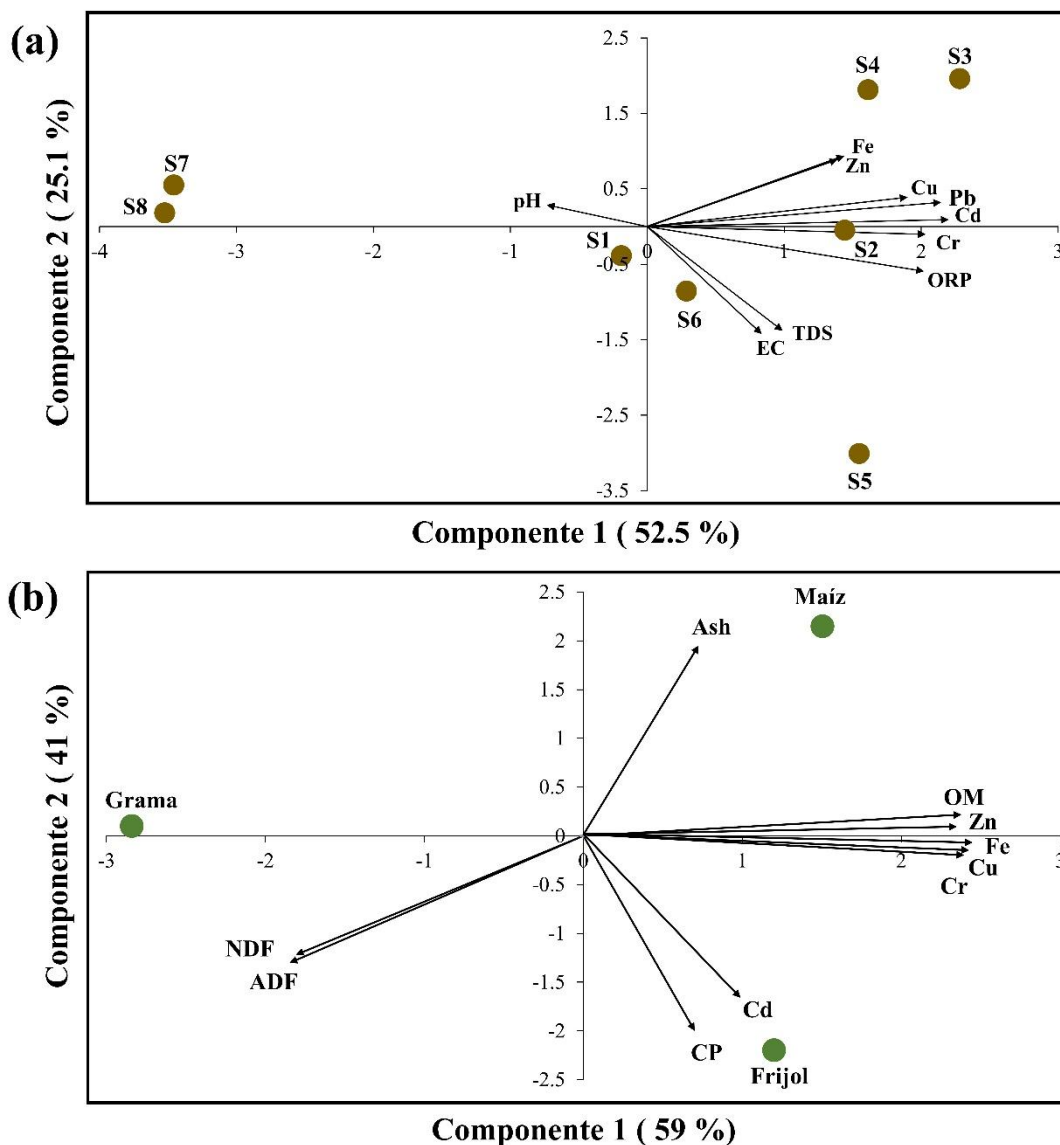


Figura 2. Análisis de componentes principales (a) para muestras de suelo y (b) muestras de forraje evaluadas en la comunidad de Valdecañas, Fresnillo, Zacatecas.
Fuente: Elaboración propia

Las muestras S7 y S8 que corresponde a suelos de cultivo de maíz y frijol respectivamente, no presentan un impacto significativo por la presencia de metales pesados Figura 2a. Las asociaciones encontradas en el PCA en las muestras de suelo evidencian que la presencia de metales se relaciona con cambios en las condiciones fisicoquímicas promovidas por la presencia de materia orgánica, que genera una acumulación por procesos de quelación y/o adsorción en las zonas de pastoreo. Cuando las partículas portadoras de metales están en contacto con materia orgánica, presente en las zonas de cultivo, pueden promover una disolución como iones libres, aumentando su biodisponibilidad y participando en reacciones de intercambio

cati3nico con minerales, organismos vivos o plantas de uso forrajero (Navarro-Avi3o *et al.*, 2007; Aguirre *et al.*, 2021).

En el PCA para las muestras forrajes (Figura 2b, Tabla C2) se observa que el componente 1 y 2 contribuyen con un 100 % de la varianza total de los datos. El componente 1 correlaciona la presencia de metales pesados (Zn, Fe, Cu y Cr) con la materia org3nica, esto reafirma la teor3a de proceso de formaci3n de complejos organomet3licos en las zonas agr3colas evaluadas. Mientras que el componente 2 correlaciona los contenidos de prote3na cruda con la presencia de Cd. Aunque en el Distrito Minero de Fresnillo no se han reportado fases minerales que contengan Cd en su estructura, este puede estar asociado a minerales de Zn o fosforo (como impureza), por lo que no se descarta el aporte antropog3nico por el uso de fertilizantes, pesticidas y/o plaguicidas en las zonas de cultivo del 3rea de estudio (Bonomelli *et al.*, 2003; Lora-Silva & Bonilla-Guti3rrez, 2010).

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian un impacto ambiental derivado de las actividades minero-metal3rgicas sobre los componentes ed3ficos, h3dricos y vegetales de la comunidad de Valdeca3as, Fresnillo, Zacatecas. Las actividades minero-metal3rgicas han influido negativamente en la calidad de los cuerpos de agua superficiales utilizados por los pobladores de la comunidad con fines agropecuarios, al detectarse concentraciones de metales pesados por encima de los niveles permitidos por la normativa nacional e internacional. Asimismo, la presencia de metales pesados en suelos agr3colas y de pastoreo, especialmente en 3reas cercanas a los cuerpos de agua, sugiere un proceso de transporte y sedimentaci3n de part3culas portadoras de metales, magnificado por las caracter3sticas fisiogr3ficas de la zona, escurrimientos y canales de agua.

Aunque las concentraciones de metales en suelo no sobrepasan los l3mites permisibles, la correlaci3n entre las concentraciones en suelos, agua y forraje sugiere la existencia de un proceso de biomagnificaci3n en el sistema agropecuario local, con implicaciones ambientales y sanitarias a mediano y largo plazo. A pesar de que el an3lisis proximal mostr3 que los forrajes de ma3z, frijol y grama presentan valores nutricionales adecuados para la dieta de rumiantes, la presencia de metales como Cr, Cu y Zn plantea un riesgo latente para la seguridad alimentaria, por lo que es necesario un monitoreo continuo para evitar afectaciones en los diferentes receptores ambientales.

Este estudio muestra la importancia de evaluar el efecto de los metales pesados en 3reas agropecuarias cercanas a actividades minero-metal3rgicas y los posibles procesos de biomagnificaci3n en las cadenas tr3ficas, por lo que es recomendable realizar estudios posteriores que sustenten esta idea.

Contribución de los autores

Conceptualización del trabajo, X.S.R., A.E.C., H.G.B., V.M.E.E., J.A.F.D.T.; desarrollo de la metodología, X.S.R.; manejo de software, X.S.R., V.M.E.E.; validación experimental, J.A.F.D.T., A.E.C., H.G.B.; análisis de resultados, X.S.R., V.M.E.E., H.G.B., A.E.C.; Manejo de datos, X.S.R., V.M.E.E.; escritura y preparación del manuscrito, X.S.R.; redacción, revisión y edición, X.S.R., V.M.E.E., H.G.B., A.E.C., J.A.F.D.T.; administrador de proyectos, J.A.F.D.T., H.G.B. Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Referencias

- Abedi, T., Gavanji, S., & Mojiri, A. (2022). Lead and Zinc uptake and toxicity in maize and their management. *Plants*, 11, 1992. <https://doi.org/10.3390/plants11151922>
- Aguirre, S. E., Piraneque, N. V., & Linero-Cueto, J. (2021). Concentración de metales pesados y calidad físico-química del agua de la Ciénaga Grande de Santa Marta. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 24(1), e1313. <http://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1313>
- Almaraz-Buendía, I., García, A. M., Sánchez-Santillán, P., Torres-Salado, N., Herrera-Pérez, J., Bottini-Luzardo, M.B., & Rojas-García, A. R. (2019). Análisis Bromatológico y producción de gas in vitro de forrajes utilizados en el trópico seco mexicano. *Archivos de Zootecnia*, 68(262), 260-266. <https://doi.org/10.21071/az.v68i262.4145>
- Alvarado-Zambrano, D., & Green-Ruiz, C. R. (2019). Assessment of the pollution status and human health risk in soils from an agricultural valley in Northwest Mexico. *Water, Air, & Soil Pollution*, 230, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4246-2>
- Archundia, D., Prado-Pano, B., & Molina-Freaner, F. (2024). Potentially toxic elements in soil-plant-water-animal continuum in a mining area from Northwestern Mexico: animal exposure pathways and health risks for children. *Environmental Geochemistry and Health*, 46(3), 99. <https://doi.org/10.1007/s10653-024-01902-x>
- Aznar-Sánchez, J.A., García-Gómez, J.J., Velasco-Muñoz, J.F., & Carretero-Gómez, A. (2018). Mining Waste and Its Sustainable Management: Advances in Worldwide Research. *Minerals*, 8(7), 284. <https://doi.org/10.3390/min8070284>
- Belmonte-Serrato, F., Romero-Díaz, A., Alonso-Sarría, F., Moreno-Brotóns, J., & Rojo-López, S. (2010). Afección de suelos agrícolas por metales pesados en áreas limítrofes a explotaciones mineras del Sureste de España. *Papeles de Geografía*, 51-52, 45-54. <https://revistas.um.es/geografia/article/view/114381>
- Bernardis, A. C., Villafañe, R., Pellerano, R. C., & Marchevky E. (2017). Perfil mineral en los pastizales de *Andropogon lateralis* y *Sorhastrum setosum* (Graminae) en Corrientes, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 49(2), 203-217. <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/RFCA/article/view/3080>
- Bermúdez, G. M. A., Jasan, R., Plá, R., & Pignata, M. L. (2011). Heavy metal and trace element concentrations in wheat grains. Assessment of potential non-carcinogenic health Hazard through their consumption. *Journal of Hazardous Materials*, 193, 262-271. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.07.058>
- Bonomelli, C., Bonilla, C., & Valenzuela, A. (2003). Efecto de la fertilización fosforada sobre el contenido de cadmio en cuatro suelos de Chile. *Revista Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 38(10), 1179-1186. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003001000007>
- Calderón, R., García-Hernández, J., Palma, P., Leyva-Morales, J.B., Godoy, M., Zambrano-Soria, M., Bastidas-Bastidas, P.J., & Valenzuela, G. (2023). Heavy metals and metalloids in organic and conventional vegetables from Chile and Mexico: Implications for human

- health. *Journal of Food Composition and Analysis*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105527>
- Castro-González, N. P., Calderón-Sánchez, F., Moreno-Rojas, R., Moreno-Ortega, A., & Tamariz-Flores, J.V. (2017). Riesgos para la salud en poblaciones rurales por metales pesados encontrados en suelos agrícolas regados con aguas residuales en la subcuenca del alto balsas en Tlaxcala y Puebla, México. *Revista internacional de investigación en salud ambiental*, 27 (6), 476–486. <https://doi.org/10.1080/09603123.2017.1386767>
- Castro-González, N. P., Moreno-Rojas, R., Calderón-Sánchez, F., Moreno-Ortega, A., & Tamariz-Flores, J. V. (2018). Metales pesados en leche de vacas con alfalfa producida en suelos irrigados con aguas residuales en Puebla y Tlaxcala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 9(3), 466-485. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v9i3.4358>
- Dávila, O. G., Gómez-Bernal, J. M., & Ruiz-Huerta, E. A. (2012). Plants and soil contamination with heavy metals in agricultural areas of Guadalupe, Zacatecas, Mexico. *Environmental contamination*, 29, 37-50. <https://doi.org/10.5772/31062>
- Duarte-Zaragoza, V. M., Gutiérrez-Castorena, E. V., Gutiérrez-Castorena, M. D. C., Carrillo-González, R., Ortiz-Solorio, C. A., & Trinidad-Santos, A. (2014). Heavy metals contamination in soils around tailing heaps with various degrees of weathering in Zimapán, Mexico. *International Journal of Environmental Studies*, 72(1), 24-40. <https://doi.org/10.1080/00207233.2014.961310>
- Elik, Ü., & Gül, Z. (2025). Accumulation potential of lead and cadmium metals in maize (*Zea mays* L.) and effects on physiological-morphological characteristics. *Life*, 15(2), 310. <https://doi.org/10.3390/life15020310>
- Escot-Espinoza, V. M., Ramos-Arroyo, Y. R., Lázaro, I., Montes-Ávila, I., Carrizalez-Yañez, L.C., & Briones-Gallardo, R. (2021). Presence of arsenic in potential sources of drinking water supply located in mineralized and mined area of the Sierra Madre Oriental in Mexico. *Toxics*, 9(11), 307. <https://doi.org/10.3390/toxics9110307>
- García-Gutiérrez, C., & Rodríguez-Meza, G.D. (2012). Problemática y riesgo ambiental por el uso de plaguicidas en Sinaloa. *Ra Ximhai*, 8(3b), 1-10. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46125177005>
- Ge, X., Khan, Z. I., Chen, F., Akhtar, M., Ahmad, K., Ejaz, A., Arslan, M., Nadeem, M., Akhtar, S., Alkahtani, J., Dwiningsih, Y., & Elshikh, M.S. (2022). A study on the contamination assessment, health risk and mobility of two heavy metals in the soil-plants-ruminants system of a typical agricultural region in the semi arid environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(10), 14584–14594. doi.org/10.1007/s11356-021-16756-4
- Gómez-Álvarez, A., Valenzuela-García, J. L., Aguayo-Salinas, S., Meza-Figueroa, D., Ramírez-Hernández, J., & Ochoa-Ortiz, E. (2007). Chemical partitioning of sediment contamination by heavy metals in the San Pedro River, Sonora, Mexico. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 19(1), 25-35. <https://doi.org/10.3184/095422907X198013>
- González-Méndez, B., Webster, R., Loredó-Portales, R., Molina-Freaner, F., & Djellouli, R. (2022). Distribution of heavy metals polluting the soil near an abandoned mine in Northwestern Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 81(6), 176. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10285-0>
- Guo, G., Shen, C., Liu, Q., Zhang, S. L., Wang, C., Chen, L., Xu, Q.F., Wang, Y.X., & Huo, W. J. (2019). Fermentation quality and in vitro digestibility of first and second cut alfalfa silages harvested at three stages of maturity. *Animal Feed Science and Technology*, 257, 114274. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.114274>
- Gutiérrez, T., & Llerena, C. (2019). Impactos mineros, agropecuarios y de la conservación en la calidad del agua y los sedimentos, cuenca Tambopata, Madre de Dios. *Xilema*, 29(1), 54-63. https://www.academia.edu/127593575/Impactos_mineros_agropecuarios_y_de_la_conservaci%C3%B3n_en_la_calidad_del_agua_y_los_sedimentos_cuenca_Tambopata_Madre_de_Dios
- Guzmán-Morales, A. R., Cruz-De La Paz, O., Valdés-Carmenate, R., & Valdés-Hernández, P. A. (2021). Evaluación de la contaminación por metales pesados y su acumulación en plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Cultivos Tropicales*, 42(4), e03.

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S025859362021000400003&lng=es&tlng=es

- Hansen, N. P., Kristensen, T., Johansen, M., Wiking, L., Poulsen, N. A., Hellwing, A.L.F., Foldager, L., Jensen, S. K., Larsen, L. B., & Weisbjerg, M. R. (2022). Effects on feed intake, milk production, and methane emission in dairy cows fed silage or fresh grass with concentrate or fresh grass harvested at early or late maturity stage without concentrate. *Journal of Dairy Science*, 105(10), 8036-8053. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-21885>
- Helsel, D. R. (2012). Statistics for censored environmental data using Minitab® and R (2.^a ed.). John Wiley & Sons., Hoboken, New Jersey. pp. 12-21. www.wiley.com.
- Hewett, P., & Ganser, G. H. A. (2007). Comparison of several methods for analyzing censored data. *Annals of Occupational Hygiene*, 51(7), 611–632. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mem045>
- Hu, B., Jia, X., Hu, J., Xu, D., Xia, F., & Li. (2017). Assessment of heavy metal pollution and health risks in the soil-plant-human system in the Yangtze River Delta, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(9), 1042. <https://doi.org/10.3390/ijerph14091042>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. [INEGI]. (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010: Fresnillo, Zacatecas. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/32/32010.pdf
- International Organization for Standardization [ISO]. (1995). Soil quality-Extraction of trace elements soluble in aqua regia (ISO Standard No. 11466). ISO. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:11466:ed-1>
- Khan, Z. I., Muhammad, F. G., Ahmad, K., Alrefaei, A. F., Ahmad, T., Ejaz, A., Nadeem, M., Shahzadi, M., Muqaddas, H., & Mehmood, N. (2023). Evaluation of potential ecological risk assessment of toxic metal (lead) in contaminated meadows in the vicinity of suburban city: soil vs forages vs livestock. *Brazilian Journal of Biology*, 83, e272087. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.272087>
- Khan, Z., Rehman, A., Hussain, S. Z., Nisar, M. A., Zulfiqar, S., & Shakoori, A.R. (2016). Cadmium resistance and uptake by bacterium *Salmonella enterica* 43C, isolated from industrial effluent. *AMB Express*, 6(1), 54. <https://doi.org/10.1186/s13568-016-0225-9>
- Liu, X., Song, Q., Tang, Y., Li, W., Xu, J., Wu, J., Wang, F., & Brookes, P.C. (2013) Human health risk assessment of heavy metals in soil–vegetable system: A multi-medium analysis. *Science of the Total Environment*, 1(463-464): 530-540. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.064>
- Lora-Silva, R., & Bonilla-Gutiérrez, H. (2010). Remediación de un suelo de la cuenca alta del Río Bogotá contaminado con los metales pesados cadmio y cromo. *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*, 13(2), 61-70. <https://doi.org/10.31910/rudca.v13.n2.2010.730>
- López-Díaz, M., & Estrada-Medina, H. (2015). Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. *Bioagrobiencias*, 8(1), 3-11. https://www.academia.edu/15103699/2015_Propiedades_f%C3%ADsicas_qu%C3%ADmicas_y_biol%C3%B3gicas_del_suelo_Bioagrobiencias_8_1_3_11
- Loredo-Portales, R., Bustamante-Arce, J., González-Villa, H. N., Moreno-Rodríguez, V., Del Rio-Salas, R., Molina-Freaner, F., & Archundia-Peralta, D. (2020). Mobility and accessibility of Zn, Pb, and As in abandoned mine tailings of northwestern Mexico. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 26605-26620. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09051-1>
- Minería en Línea. (2022, 22 de mayo). Saucito. En Proyectos. Recuperado el 27 de junio de 2025, de https://mineriaenlinea.com/proyectos/saucito/?utm_source=c
- Miranda, M., López-Alonso, M., Castillo, C., Hernández, J., & Benedito, J. L. (2005). Effects of moderate pollution on toxic and trace metal levels in calves from a polluted area of northern Spain. *Environment International*, 31(4), 543-548. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.09.025>
- Mobashar, M., Tahir, M., Javaid, S., Anjum, M. I., Gul, I., Ahmad, N., & Sami, A. (2018). Nutritional evaluation of various stages of maturity of oat hay and its effect on milk

- production and composition in lactating holstein friesland cows. *Pakistan Journal of Zoology*, 50(6), 2209-2216. <https://doi.org/10.17582/journal.pjz/2018.50.6.2209.2216>
- Navarro-Aviñón, J. P., Aguilar-Alonso, I., & López-Moya, J.R. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*, 16(2), 10-25. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54016203>
- Navarro-Ortiz, C.A., & Roa-Vega, M.L. (2020). Determination of *in vitro* digestibility of forage species used in ruminant feeding. *Tropical Animal Health and Production*, 52(6), 3045-3069. <https://doi.org/10.1007/s11250-020-02325-3>
- Nuss, E. T., & Tanumihardjo, S.A. (2010). Maize: A paramount staple crop in the context of global nutrition. *Comprehensive Review in Food Science and Food Safety*, 9(4), 417-436. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00117.x>
- Palmonari, A., Fustini, M., Canestrari, G., Grilli, E., & Formigoni, A. (2014). Influence of maturity on alfalfa hay nutritional fractions and indigestible fiber content. *Journal of Dairy Science*, 97(12), 7729-7734. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8123>
- Pérez-Vázquez, F.J., Flores-Ramírez, R., Ochoa-Martínez, A. C., Carrizales-Yáñez, L., Ilizaliturri-Hernández, C. A., Moctezuma-González, J., Pruneda-Álvarez, L.G., Ruiz-Vera, T., Orta-García, S. T., González-Palomo, A. K., & Pérez-Maldonado, I. N. (2015). Human health risks associated with heavy metals in soil in different areas of San Luis Potosí, Mexico. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 22(2), 323-336. <https://doi.org/10.1080/10807039.2015.1064760>
- Posada-Ochoa, S. L., Escobar-Restrepo, C. S., & Rosero-Noguera, R. (2016). Mezclas minerales múltiples para la alimentación de bovinos: Aplicación y formulación. (1ra ed.). Fondo Editorial Biogénesis. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/entities/publication/2b69f9c5-6464-4885-887c-197d589475da>
- Rai, P. K., Lee, S. S., Zhang, M., Tsang, Y.F., & Kim, K. H. (2019). Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environment International*, 125, 365-385. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.067>
- Ramos-Arroyo, Y. R., & Siebe-Grabach, C. D. (2006). Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(1), 54-74. <https://www.redalyc.org/pdf/572/57230104.pdf>
- Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz-Barriga, F., & Monroy, M. (2004). Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution*, 152, 129-152. <https://doi.org/10.1023/B:WATE.0000015350.14520.c1>
- Rezaeian, M., Tohidi Moghadam, M., Kiaei, M. M., & Mahmud Zadeh, H. (2020). The effect of heavy metals on the nutritional value of Alfalfa: comparison of nutrients and heavy metals of Alfalfa (*Medicago sativa*) in industrial and non-industrial areas. *Toxicological research*, 36(2), 183-193. <https://doi.org/10.1007/s43188-019-00012-6>
- Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2019). La contaminación del suelo: una realidad oculta. Roma, FAO. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i9183es>
- Rosero-Noguera, R., & Posada-Ochoa, S.L. (2016). Cálculo de sales minerales para vacunos en pastoreo. (1ra ed). Fondo Editorial Biogénesis. <https://hdl.handle.net/10495/36385>
- Rubalcaba-Ruiz, D.C., & Thompson, T.B. (1988). Ore deposits at the Fresnillo mine, Zacatecas, Mexico. *Economic Geology*, 83(8), 1583-1597. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.8.1583>
- Salas-Ávila, D., Chaiña-Chura, F. F., Belizario-Quispe, G., Quispe-Mamani, E., Huanqui-Pérez, R., Valarde-Coaquira, E., & Berdedo-Colca, F., Salas-Mercado, D., & Hermosa-Gutiérrez, M. (2021). Evaluación de metales pesados y comportamiento social asociados con la calidad del agua en el río Suches, Puno, Perú. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(6), 145-195. <https://doi.org/10.24850/tyca-2021-06-04>
- Salas-Muñoz, S. S., Valdez, E. V., Castillo, J. A. M., Badillo, F. B. S., Carrillo, H. R. V., & Salas-Luevano, M. A. (2021). Accumulation of As and Pb in vegetables grown in agricultural soils

- contaminated by historical mining in Zacatecas, Mexico. *Environmental Earth Science*, 81(14), pp. 374. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-508711/v1>
- Santos-Ubaldo, D., Delgado-Macuill, R. J., Romero-Rodríguez, A., & Castro-Sierra, A. (2023). Fitorremediación de metales pesados en ambientes contaminados: una revisión. *Frontera Biotecnológica*, (26-4), 18-27. <https://www.revistafronterabiotecnologica.cibatlaxcala.ipn.mx/volumen/vol26/pdf/vol-26-4.pdf>
- Secretaría de Economía [SE]. (2016a). NMX-AA-132-SCFI-2016. Muestreo de suelos para la identificación y cuantificación de metales y metaloides, y manejo de muestra. (Publicación oficial). Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6471/seeco16_C/seeco16_C.html
- Secretaría de Economía [SE]. (2016b). NMX-AA-051-SCFI-2016. Análisis de agua - Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales tratadas - Método de prueba. (Publicación oficial). Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6280/seeco3a12_C/seeco3a12_C.html
- Secretaría de Economía [SE]. (2016c, 6 de abril) [Página web]. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>
- Servicio Geológico Mexicano [SGM]. (2020) Anuario estadístico de la minería mexicana, 2019 (Ed. 2020). Secretaría de Economía. https://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2019_Edicion_2020.pdf
- Servicio Geológico Mexicano [SGM]. (2012). Inventario físico de los recursos minerales de la carta Mesillas F13-B35. Municipios: Sombrerete, Fresnillo y Saín Alto, estado de Zacatecas. Secretaría de Economía. <https://www.gob.mx/sgm>
- Secretaría de Salud [SSA]. (2022). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SEMARNAT-2021, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5650705
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2007). Norma Oficial Mexicana, NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004: Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Diario Oficial de la Federación. https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1392/1/nom-147-semarnat_ssa1-2004.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2002). Norma Oficial Mexicana, NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. <https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Silva-Gigante, M., Hinojosa-Reyes, L., Bazzan-Dessuy, M., Rosas-Castor, J. M., Torres-Gaytán, D. E., Quero-Jiménez, P. C., Caballero-Quintero, A., & Guzmán-Mar, J. L. (2024). Traces of the past: assessing the impact of potentially toxic elements from an abandoned mine on groundwater and agricultural soil in San Luis Potosí, México. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(11), 1015. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13081-4>
- Soto-Benavente, M., Rodríguez-Achata, L., Olivera, M., Arostegui, V., Colina, C., & Garate, J. (2020). Riesgos para la salud por metales pesados en productos agrícolas cultivados en áreas abandonadas por la minería aurífera en la Amazonía peruana. *Scientia Agropecuaria*, 11(1), 49-59. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.01.06>
- Suárez-Martínez, S.E., Ferriz-Martínez, R.A., Campos-Vega, R., Elton-Puente, J.E., De la Torre- Carbot, K., & García-Gasca, T. (2016). Bean seeds: Leading nutraceutical source for human health. *CyTA Journal of Food*, 14(1), 131-137. <https://doi.org/10.1080/19476337.2015.1063548>
- United States Environmental Protection Agency [EPA]. (1996, diciembre). Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges, and soils (Revision 2). *Environmental Protection Agency*. <https://www.epa.gov/esam/epa-method-3050b-acid-digestion-sediments-sludges-and-soils>

- Vasilachi, I.C., Stoleru, V., & Gavrilescu, M. (2023). Analysis of heavy metal impacts on cereal crop growth and development in contaminated soils. *Agriculture*, 13, 1983. <https://doi.org/10.3390/agriculture13101983>
- Vuković, A., Lalaević, D., Barać, S., Janjić, J., Rakonjac, T., Jovanović, V.S., & Stanisavljević, R. (2025). Forage yield and nutritional value of alfalfa in relation to cutting height, stage of maturity and climatic changes. *Applied Ecology and Environmental Research*, 23(3), 5461–5473. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/2303_54615473
- Vetrimurugan, E., Shruti, V. C., Jonathan, M. P., Roy, P. D., Sarkar, S. K., Rawlins, B. K., & Campos-Villegas, L. E. (2019). Comprehensive study on metal contents and their ecological risks in beach sediments of KwaZulu-Natal province, South Africa. *Marine Pollution Bulletin*, 149: 110555. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110555>
- World Health Organization [WHO]. (2017). Guidelines for drinking-water quality. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
- Zhu, H., Bing, H., Wu, Y., Zhou, J., Sun, H., Wang, J., & Wang, X. (2019). The spatial and vertical distribution of heavy metal contamination in sediments of the Three Gorges Reservoir, China. *Science of The Total Environment*, 664, 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.016>

Material complementario

Tabla C1. Análisis de componentes principales para las muestras de suelo utilizando la concentración de metales y los parámetros fisicoquímicos.

Variable	Vectores propios				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Pb	0.409	0.128	-0.068	0.243	-0.144
Cd	0.419	0.037	0.076	-0.258	-0.163
Cr	0.387	-0.041	-0.127	0.425	-0.404
Cu	0.362	0.154	0.245	-0.298	0.601
Fe	0.274	0.373	0.191	-0.408	-0.189
Zn	0.265	0.354	-0.125	0.547	0.469
pH	-0.144	0.115	0.905	0.33	-0.16
ORP	0.385	-0.236	0.05	-0.147	-0.256
EC	0.163	-0.567	0.154	0.05	0.232
TDS	0.188	-0.55	0.125	0.08	0.165
Valor propio (Eg)	5.252	2.512	0.932	0.778	0.298
Varianza (%)	52.5	25.1	9.3	7.8	3
Acumulado (%)	52.5	77.7	87	94.8	97.7

Fuente: Elaboración propia

Tabla C2. Análisis de componentes principales para las muestras de forraje utilizando la concentración de metales y el análisis proximal de forrajes.

Variable	Valores propios				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Cd	0.195	-0.435	-0.162	0.191	-0.221
Cr	0.405	-0.09	0.158	-0.027	0.571
Cu	0.408	-0.068	0.002	-0.252	-0.521
Fe	0.41	-0.051	0.246	-0.078	-0.316
Zn	0.411	-0.022	0.182	-0.031	-0.064
Ash	0.108	0.476	0.173	0.795	-0.19
OM	0.411	0.026	0.108	0.071	0.458
NDF	-0.216	-0.42	0.218	0.044	0.016
ADF	-0.216	-0.42	0.684	0.223	-0.035
CP	0.141	-0.464	-0.547	0.452	0.057
Valor propio (Eg)	5.895	4.104	0	0	0
Varianza (%)	59	41	0	0	0
Acumulado (%)	59	100	100	100	100

Fuente: elaboración propia

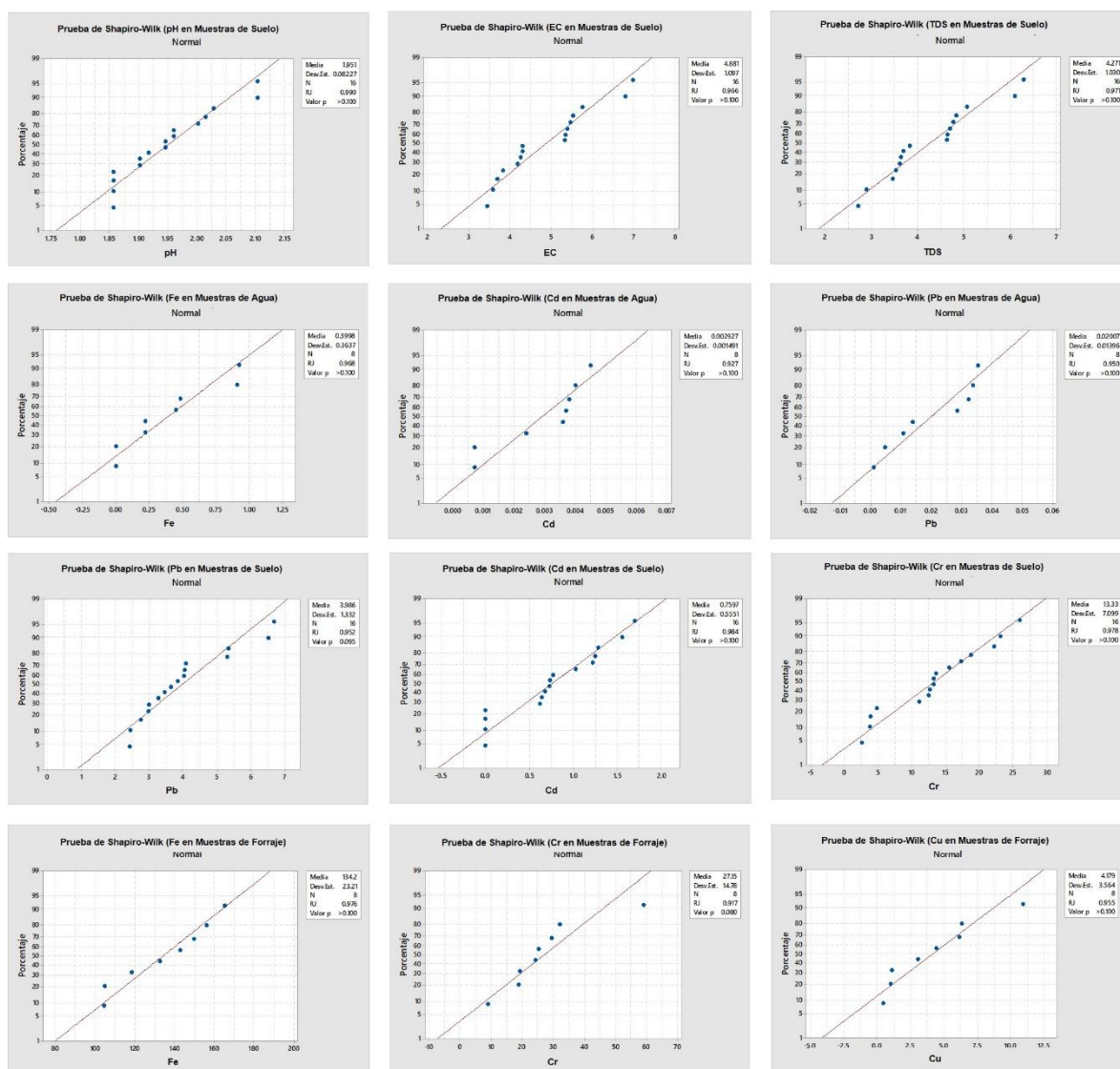


Figura C1. Gráficas de prueba de normalidad de Shapiro-Wilk ($\alpha = 0.05$). $p > 0.05$, los datos son normales. $p < 0.05$, los datos no son normales (se rechaza la normalidad). Fuente: elaboración propia.

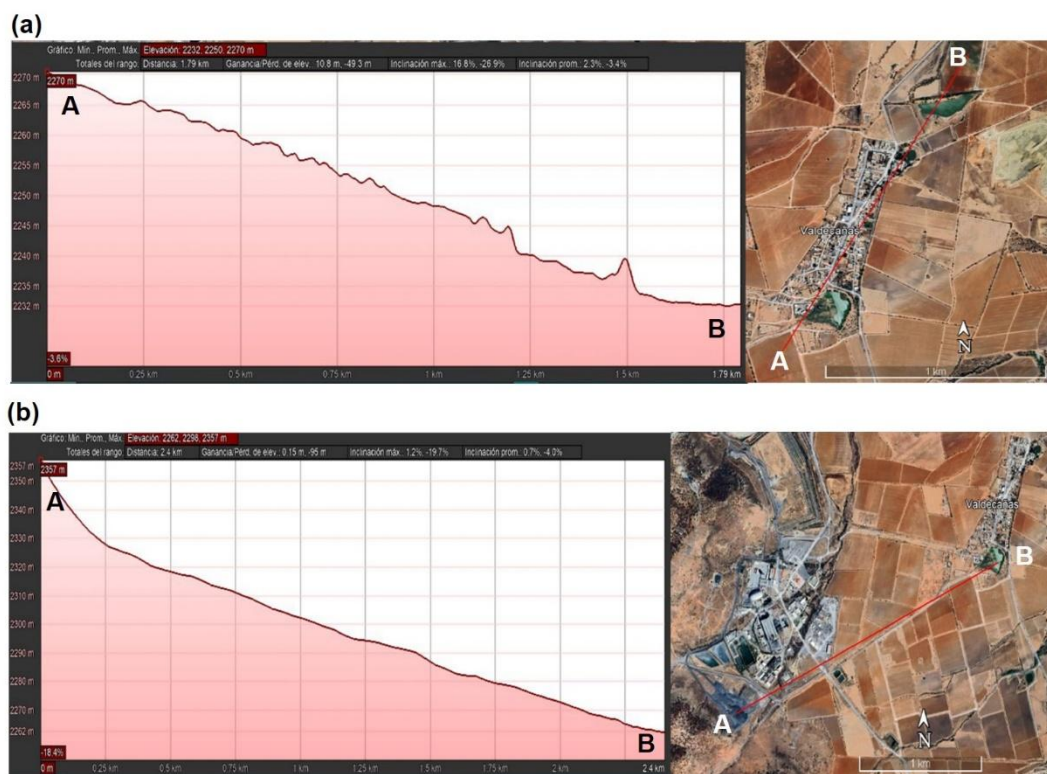


Figura C2. Perfil de elevación de (a) la comunidad de Valdecañas y (b) la zona entre las instalaciones mineras y la comunidad de Valdecañas. Fuente: Elaboración propia.