

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



DETERMINACIÓN DE PLOMO Y CADMIO Y SU IMPACTO SOBRE
PARÁMETROS HEMATOLÓGICOS EN CABRAS DE LA COMARCA LAGUNERA

Tesis

Que presenta DAVID BARRAZA SALAS
como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA


Torreón, Coahuila

Octubre 2025

DETERMINACIÓN DE PLOMO Y CADMIO Y SU IMPACTO SOBRE
PARÁMETROS HEMATOLÓGICOS EN CABRAS DE LA COMARCA
LAGUNERA.

Tesis

Elaborada por DAVID BARRAZA SALAS como requisito parcial para obtener el
Grado de Maestro en Ciencias en Producción Agropecuaria con la supervisión y
aprobación del Comité de Asesoría



Dr. Oscar Ángel García
Director de Tesis




Dr. Fernando Arellano Rodríguez
Asesor




Dra. Viridiana Contreras Villarreal
Asesor



Dr. Javier Moran Martínez
Asesor



Dra. Dalia Ivette Carrillo Moreno
Jefe del Departamento de Postgrado



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado

AGRADECIMIENTOS

Con profunda gratitud y humildad, deseo expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que han sido parte fundamental en la realización de esta tesis de maestría. Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo, la guía y la inspiración de quienes me acompañaron en este camino académico y personal.

En primer lugar, agradezco a mi director de tesis, el Dr. Oscar Ángel García, por su invaluable orientación, paciencia y compromiso durante todo el proceso de investigación.

A los miembros del comité evaluador, Dr. Fernando Arellano Rodríguez, Dra. Viridiana Contreras Villareal, Dr. Javier Moran Martinez, les agradezco por sus valiosas observaciones y sugerencias, que enriquecieron significativamente el contenido y la calidad de esta tesis.

Mi gratitud se extiende a los profesores y profesoras del programa de maestría en Producción Agropecuaria, quienes, a través de sus enseñanzas y ejemplo, contribuyeron a mi formación académica y profesional. Sus clases y consejos dejaron una huella imborrable en mi desarrollo.

Agradezco también a mis compañeros y compañeras de generación, con quienes compartí experiencias, aprendizajes y momentos inolvidables. Su amistad y apoyo fueron fundamentales para hacer de esta etapa una experiencia enriquecedora y significativa.

No puedo dejar de mencionar a mi familia, especialmente a mis padres, María Teresa Salas Reza y Jose Alfonso Barraza López, por su amor incondicional, apoyo constante y por inculcarme los valores que me han guiado a lo largo de mi vida.

A mis amigos y amigas, quienes me brindaron su apoyo emocional y ánimo en los momentos de incertidumbre y cansancio, les agradezco por ser una fuente constante de motivación y alegría.

Finalmente, agradezco al SECIHTI por el apoyo económico brindado, que fue crucial para la realización de este proyecto.

A todos y cada uno de ustedes, mi más sincero agradecimiento. Este logro es también suyo.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-----------|
| RESUMEN | ix |
| ABSTRACT..... | x |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| JUSTIFICACIÓN | 3 |
| OBJETIVO GENERAL..... | 3 |
| Objetivos específicos..... | 3 |
| HIPÓTESIS | 3 |
| REVISIÓN DE LITERATURA..... | 4 |
| Caprinocultura a nivel global | 4 |
| Caprinocultura en México..... | 5 |
| Caprinocultura en la Comarca Lagunera..... | 5 |
| Adaptabilidad de las cabras a las Zonas Áridas | 6 |
| Contaminación ambiental por metales pesados a nivel global | 7 |
| Principales fuentes de plomo y cadmio en ambientes agropecuarios..... | 8 |
| Situación ambiental de la Comarca Lagunera en relación con metales pesados | 8 |
| Vías de exposición y acumulación de metales pesados en cabras | 10 |
| Riesgos de la transferencia trófica de metales pesados en la cadena alimentaria | 11 |
| Comportamiento del cadmio y plomo en el organismo animal | 12 |
| Efectos Hematológicos de la Exposición a Plomo y Cadmio..... | 13 |
| MATERIALES Y MÉTODOS..... | 15 |
| Área geográfica de estudio | 15 |
| Determinación de plomo y cadmio en sangre de cabras..... | 15 |
| Análisis de muestras..... | 15 |
| Validación del método analítico..... | 16 |
| Evaluación de la condición corporal y análisis de biometría hemática y bioquímica sanguínea en cabras | 16 |
| Análisis estadístico | 17 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 18 |
| Concentración de cadmio y plomo en sangre de cabras | 18 |
| Evaluación del condición corporal y análisis de biometría hemática y bioquímica sanguínea en cabras | 21 |

| | |
|--|-----------|
| <i>CONCLUSIONES</i> | 25 |
| <i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i> | 37 |
| <i>ANEXOS</i> | 47 |

ÍNDICE DE CUARDOS

| | |
|---|-----------|
| <i>Cuadro 1. Coordenadas geográficas de los hatos incluidos en el estudio.</i> | <i>26</i> |
| <i>Cuadro 2. Edad y condición corporal de las cabras evaluadas en los distintos hatos .</i> | <i>26</i> |
| <i>Cuadro 3. Concentración de plomo y cadmio por cada localidad muestreada de la Comarca Lagunera (Promedio \pm DE).</i> | <i>27</i> |
| <i>Cuadro 4. Parámetros quimiométricos de las metodologías empleadas.</i> | <i>27</i> |
| <i>Cuadro 5. Parámetros de biometría hemática en cabras evaluados en diferentes localidades de la CL (Promedio \pm DE).</i> | <i>28</i> |
| <i>Cuadro 6. Parámetros de bioquímica sanguínea en cabras evaluados en diferentes localidades de la CL (Promedio \pm DE).</i> | <i>28</i> |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| <i>Figura 1. Tamaño de los países en proporción al número de cabras en el mundo, 2016. Fuente: Worldmapper.org, "Goats", https://worldmapper.org/maps/goats-2016/ . Licencia: Creative Commons CC BY-NC 4.0 .</i> | 4 |
| <i>Figura 2. Establo de cabras típico de la Comarca Lagunera. Fotografía de elaboración propia.</i> | 6 |
| <i>Figura 3. Principales vías de exposición a metales pesados en cabras. 1) Actividades mineras, 2) Contaminación atmosférica, 3) Aplicación de plaguicidas sintéticos en el ámbito agrícola, 4) Emisiones provenientes de actividades industriales, y 5) Contaminación de fuentes hídricas. *Elaboración propia.</i> | 11 |
| <i>Figura 4. Distribución de las localidades de la CL de los hatos incluidos en el estudio.</i> | 29 |
| <i>Figura 5. Concentraciones de cadmio en sangre en cabras determinado en hatos incluidos en el estudio. (Media \pm DE) *Valores con la misma letra son estadísticamente similares (Duncan, $p < 0.05$). DE: Desviación estándar.</i> | 29 |
| <i>Figura 6. Concentraciones de plomo en sangre en cabras determinado en hatos incluidos en el estudio. (Media \pm DE) *Valores con la misma letra son estadísticamente similares (Duncan, $p < 0.05$). DE: Desviación estándar.</i> | 30 |
| <i>Figura 7. Correlación entre los niveles de cadmio y plomo, vs la relación con la condición corporal de las cabras. Media \pm DE. DE: Desviación estándar.</i> | 30 |
| <i>Figura 8. Relación entre los niveles séricos de cadmio y plomo, vs la condición corporal de las cabras. Pendiente de la regresión lineal y el coeficiente de determinación (R^2).</i> | 30 |
| <i>Figuras 9. Determinación de parámetros de biometría hemática de cabras incluidas en el estudio en diferentes localidades de la CL. Media \pm DE. DE: Desviación estándar.</i> | 31 |
| <i>Figuras 10. Determinación de diferentes parámetros de biometría hemática de cabras incluidas en el estudio por estados.</i> | 31 |
| <i>Figura 11. Relación entre los niveles séricos de cadmio y parámetros de biometría hemática de cabras. Pendiente de la regresión lineal y el coeficiente de determinación (R^2).</i> | 32 |
| <i>Figura 12. Relación entre los niveles séricos de plomo y parámetros de biometría hemática de las cabras. Pendiente de la regresión lineal y el coeficiente de determinación (R^2).</i> | 33 |
| <i>Figura 13. Determinación de parámetros de bioquímica sanguínea de cabras incluidas en el estudio en diferentes localidades de la CL. Media \pm DE. DE: Desviación estándar.</i> | 34 |

| | |
|---|------------------|
| <i>Figura 14. Determinación de diferentes parámetros de bioquímica sanguínea de cabras incluidas en el estudio por estados.</i> | <i>34</i> |
| <i>Figura 15. Relación entre los niveles séricos de cadmio y parámetros de bioquímica sanguínea de cabras. Pendiente de la regresión lineal y el coeficiente de determinación (R^2).</i> | <i>35</i> |
| <i>Figura 16. Relación entre los niveles séricos de plomo y parámetros de bioquímica sanguínea de cabras. Pendiente de la regresión lineal y el coeficiente de determinación (R^2).</i> | <i>36</i> |

RESUMEN

Determinación de plomo y cadmio y su impacto sobre parámetros hematológicos en cabras de la Comarca Lagunera

David Barraza Salas

Presentada como requisito para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Producción Agropecuaria

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Dr. Oscar Ángel García

El objetivo de este estudio fue determinar la presencia de cadmio (Cd) y plomo (Pb), y evaluar su impacto en parámetros hematológicos en cabras de la Comarca Lagunera (CL). Se recolectaron muestras sanguíneas de 120 cabras de 12 localidades, seleccionando 10 animales por hato. Se evaluó la condición corporal (CC) de las cabras y se determinaron las concentraciones de Cd y Pb mediante espectrofotometría de absorción atómica. Asimismo, se realizaron análisis hematológicos y bioquímicos, junto con pruebas estadísticas, incluyendo ANOVA con prueba de Duncan y correlaciones de Spearman ($p < 0.05$), para evaluar la relación entre los metales pesados (MP) y los parámetros evaluados. Las mayores concentraciones de Pb se detectaron en Villa Juárez (6.26 µg/dL) y Venecia (5.55 µg/dL), localidades de Durango, mientras que los niveles más altos de Cd se encontraron en San Nicolás, Coahuila (0.138 µg/dL), y en Álvaro Obregón, Durango (0.117 µg/dL). El Cd presentó una correlación positiva moderada con la CC, mientras que el Pb mostró una correlación negativa débil. En Villa Juárez, San Nicolás y Álvaro Obregón se observaron valores elevados de glóbulos blancos (WBC), y niveles bajos de glóbulos rojos (RBC) en algunas localidades. Cd mostró correlaciones moderadas con RBC y hemoglobina (HGB), y una relación positiva significativa con ácido úrico. Pb se relacionó débilmente con WBC, HGB, hematocrito y algunos parámetros bioquímicos (colesterol, urea y proteínas totales). La presencia de MP en sangre de cabras de la CL mostró variaciones por localidad y posibles efectos en parámetros hematológicos, lo que sugiere alteraciones en la salud animal.

Palabras clave: Metales pesados, Plomo, Cadmio, Parámetros hematológicos, Cabras, Comarca Lagunera.

ABSTRACT

Determination of lead and cadmium and their impact on hematological parameters in goats from the Comarca Lagunera

David Barraza Salas

Submitted as a requirement for the degree of Master of Science in Agricultural Production Dr.

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Dr. Oscar Ángel García

The objective of this study was to determine the presence of cadmium (Cd) and lead (Pb) and evaluate their impact on hematological parameters in goats from the Comarca Lagunera (CL) region. Blood samples were collected from 120 goats from 12 locations, selecting 10 animals per herd. The body condition (BC) of the goats was evaluated, and Cd and Pb concentrations were determined using atomic absorption spectrophotometry. Hematological and biochemical analyses were also performed, along with statistical tests, including ANOVA with Duncan's test and Spearman's correlations ($p < 0.05$), to evaluate the relationship between heavy metals (HM) and the parameters evaluated. The highest Pb concentrations were detected in Villa Juárez (6.26 $\mu\text{g/dL}$) and Venecia (5.55 $\mu\text{g/dL}$), both in Durango, while the highest levels of Cd were found in San Nicolás, Coahuila (0.138 $\mu\text{g/dL}$), and Álvaro Obregón, Durango (0.117 $\mu\text{g/dL}$). Cd showed a moderate positive correlation with CC, while Pb showed a weak negative correlation. In Villa Juárez, San Nicolás, and Álvaro Obregón, elevated white blood cell (WBC) counts, and low red blood cell (RBC) counts were observed in some locations. Cd showed moderate correlations with RBC and hemoglobin (HGB) and a significant positive relationship with uric acid. Pb was weakly related to WBC, HGB, hematocrit, and some biochemical parameters (cholesterol, urea, and total protein). The presence of PM in the blood of goats from the CL varied by location and had possible effects on hematological parameters, suggesting alterations in animal health.

Keywords: Heavy metals, Lead, Cadmium, Hematological parameters, Goats, Comarca Lagunera.

INTRODUCCIÓN

La caprinocultura ha cobrado creciente relevancia en México como una actividad pecuaria estratégica, especialmente en zonas áridas y semiáridas, donde las condiciones climáticas limitan otras formas de producción ganadera. Este sistema productivo representa una fuente esencial de ingresos, alimento y empleo para miles de familias en el país, además de contribuir a la seguridad alimentaria mediante la producción de leche, carne y subproductos. En la CL, esta actividad constituye un eje clave en las comunidades rurales, destacándose por su impacto económico y social.

La CL se ubica en el norte de México y está conformada por 15 municipios: 10 pertenecen al estado de Durango y 5 al estado de Coahuila de Zaragoza. Entre los municipios más representativos se encuentran Gómez Palacio, Lerdo y Tlahualilo en Durango, así como Torreón, Viesca, Francisco I. Madero y San Pedro de las Colonias en Coahuila (Cervantes-Franco, 2006; INEGI, 2019). En esta región, más de 5, 000 productores se dedican a la cría de cabras, con una población aproximada de 700 000 mil cabezas de ganado (SADER, 2024a).

Sin embargo, las actividades antropogénicas en la región han ocasionado efectos negativos en el ambiente, entre los que destaca la contaminación por MP, originados por las actividades industriales locales (Benin *et al.*, 1999; Domínguez-Zúñiga *et al.*, 2021). Estos son peligrosos tanto para la salud animal como humana, debido a su toxicidad y no biodegradabilidad (Ali *et al.*, 2021).

El ganado caprino puede intoxicarse con MP debido a la contaminación de recursos naturales de la región, como las plantas forrajeras y las fuentes de agua, que constituyen su principal fuente de alimento y bebida (Rajaganapathy *et al.*, 2011). Esta acumulación de MP en cabras puede poner en riesgo la salud de los animales y de los humanos, comprometiendo la seguridad alimentaria (Njoga *et al.*, 2021), ya que incluso en pequeñas cantidades pueden causar diversas enfermedades (Little *et al.*, 2020).

Entre los MP encontrados en cabras destacan el Cd y el Pb (Alperkhdri *et al.* 2018; Emara *et al.*, 2020; Njoga *et al.*, 2021). Estos MP circulan a través del torrente sanguíneo y pueden distribuirse hacia diversas partes del organismo, incluidos órganos, tejidos y estructuras como el pelo (Robbins, 2012; Jubril *et al.*, 2017). La determinación de sus concentraciones en sangre se considera una medida confiable para evaluar la exposición a estos metales en animales (Lauwerys y Hoet, 2001; Zyambo *et al.*, 2022).

Por ello, el objetivo de esta investigación fue determinar la presencia de Cd y Pb en la sangre de cabras y evaluar su impacto sobre parámetros hematológicos en cabras de la CL.

JUSTIFICACIÓN

La creciente actividad agrícola e industrial en la Comarca Lagunera ha contribuido a la contaminación del ambiente con metales pesados como Pb y Cd, los cuales pueden incorporarse al organismo de las cabras a través del agua y los forrajes. Esta situación representa un riesgo para la salud de los animales, particularmente para el sistema hematológico. Dada la importancia económica y alimentaria de la producción caprina en la región, es fundamental evaluar la presencia de estos metales y su impacto en los parámetros sanguíneos, con el objetivo de prevenir riesgos sanitarios y garantizar la seguridad alimentaria.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la presencia de metales pesados (Pb y Cd) en la sangre de cabras de diferentes hatos de la Comarca Lagunera y su posible impacto sobre parámetros hematológicos, con el fin de conocer su estado de salud y los riesgos asociados a la exposición a estos contaminantes.

Objetivos específicos

- Determinar y cuantificar las concentraciones de Pb y Cd, en sangre de cabras de la Comarca Lagunera.
- Evaluar el estado de salud de las cabras de la Comarca Lagunera expuestas al Pb y Cd, mediante el análisis de parámetros hematológicos.

HIPÓTESIS

La presencia de Pb y Cd en la sangre de cabras de la Comarca Lagunera se asocia significativamente con alteraciones en sus parámetros hematológicos, presentando mayores alteraciones a medida que aumentan las concentraciones de estos metales.

REVISIÓN DE LITERATURA

Caprinocultura a nivel global

Según datos recientes reportados por FAOSTAT (2024), la población mundial de cabras ha aumentado en un 300 % durante los últimos 60 años, impulsada en gran medida por su capacidad de adaptación al cambio climático y su ventaja comparativa frente a otros rumiantes en entornos áridos (Loomis & Kerven, 2025). Gran parte de esta población caprina se concentra en regiones semiáridas de África, Asia y partes de América del Sur, donde desempeña un papel crucial en la seguridad alimentaria de los hogares más vulnerables (Koluman, 2023). Se estima que el 80 % de la población mundial de cabras se encuentra en países de ingresos bajos, la mayoría de estos países se ubican en Asia y África (World Bank, 2022), siendo China quien cuenta con la mayor población de cabras, seguida de cerca por India y Nigeria (Figura 1).

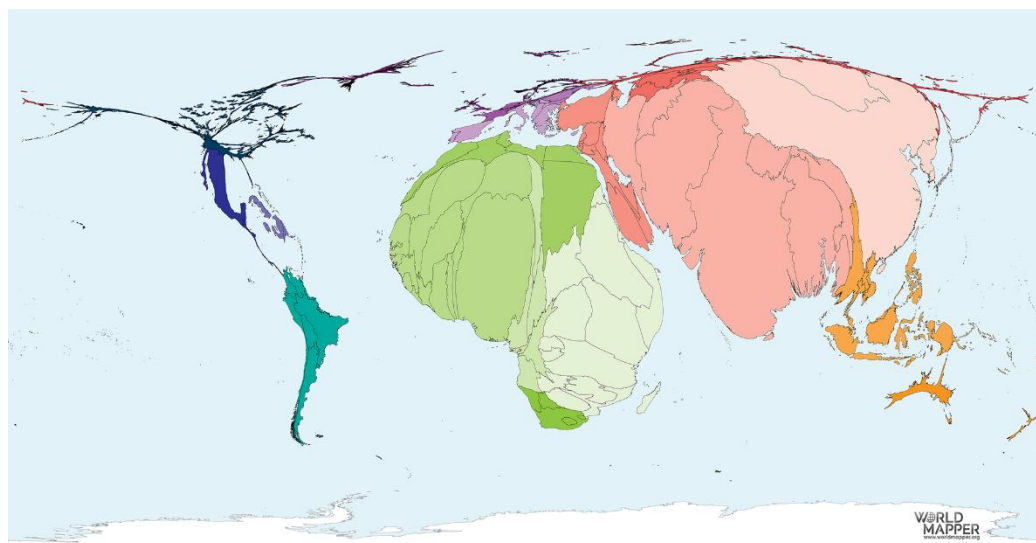


Figura 1. Tamaño de los países en proporción al número de cabras en el mundo, 2016.
Fuente: Worldmapper.org, "Goats", <https://worldmapper.org/maps/goats-2016/> .
Licencia: Creative Commons [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) .

Caprinocultura en México.

La llegada de las cabras a América ocurrió hace más de 400 años, y desde entonces, estos animales han sido parte fundamental de los sistemas productivos rurales. En México, la caprinocultura representa una actividad clave, especialmente en regiones áridas y semiáridas, donde contribuye a la economía local, la seguridad alimentaria y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales. Esta actividad se desarrolla actualmente en 29 estados del país, destacando estados como Zacatecas, San Luis Potosí y Coahuila en la Comarca Lagunera. Entre las razas más destacadas que se crían en el país se encuentran la Angora, Boer, Toggenburg, Criolla, Alpina, Anglonubia y Saanen, cada una con características particulares que se adaptan a diferentes condiciones de clima y manejo (SADER, 2024b).

La caprinocultura mexicana se caracteriza por su solidez y diversidad. De acuerdo con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en el año 2023 la producción nacional de leche de cabra alcanzó los 169,204,000 L, lo que representó un incremento del 0.38 % respecto a 2022. Por su parte, la producción de carne caprina ascendió a 41,034 t, reflejando un aumento del 0.53 % en comparación con el año anterior (SIAP, 2024).

Caprinocultura en la Comarca Lagunera

La caprinocultura en la CL, que abarca cinco municipios de Coahuila (Torreón, Matamoros, San Pedro de las Colonias, Francisco I. Madero y Viesca), y diez de Durango (Lerdo, Gómez Palacio, Mapimí, Nazas, Rodeo, Tlahualilo, General Simón Bolívar, San Juan de Guadalupe, San Luis del Cordero y San Pedro del Gallo), es una actividad económica significativa, especialmente en las zonas rurales (Figura 2), donde más de 5 mil productores trabajan con alrededor de 700 mil cabezas de cabra (SADERa, 2024). De acuerdo con el SIAP, la región lidera la producción nacional de leche de cabra, con una cosecha de 70.96 millones de L en 2023, aportando Coahuila 46.10 millones y Durango 24.85 millones. Asimismo, se promueve el mejoramiento genético mediante el uso de

sementales de raza Boer para aumento de carne, junto con razas lecheras como Alpina, Saanen, La Mancha, Toggenburg y Nubia, combinadas con criollos locales para mantener la rusticidad adaptativa al clima semiárido (SADERa, 2024). Lo anterior impulsa no solo la producción, sino también el desarrollo de iniciativas de valor agregado, como talleres para la elaboración de jabones artesanales a base de leche de cabra, destinados a nichos de cosmética y cuidado personal (El Siglo de Torreón, 2024).



Figura 2. Establo de cabras típico de la Comarca Lagunera. Fotografía de elaboración propia.

Adaptabilidad de las cabras a las Zonas Áridas

Las cabras destacan por su notable capacidad de aprovechar recursos forrajeros de baja calidad, gracias a su curiosidad y flexibilidad alimentaria, ingieren vegetación con alto contenido de fibra leñosa y bajo en proteína, que otros rumiantes no aprovechan eficientemente (Kerven, 2024). Además, frente al estrés por falta de agua, temperaturas extremas y factores antinutricionales de las plantas, las cabras despliegan adaptaciones metabólicas superiores a bovinos y ovinos (Lu, 2023). Por ello, las razas autóctonas de zonas semiáridas y áridas pueden convertir alimentos ricos en fibra de baja calidad en

nutrientes con mayor eficacia que razas exóticas o rumiantes nativos de otras especies (Silanikove, 2000). Estas características, junto con su bajo costo de adquisición, alta tasa de reproducción (gemelaridad y madurez sexual temprana) y su perfil de productos, como carne, leche, cueros y fibra, hacen de la cría caprina una opción especialmente atractiva para pequeños ganaderos (Lu, 2023; Pragna *et al.*, 2018).

No obstante, estas ventajas contrastan con la realidad de muchos sistemas familiares, donde predominan pequeñas explotaciones de subsistencia, frecuentemente con infraestructura limitada y prácticas higiénicas deficientes, lo que impacta la calidad sanitaria de los productos obtenidos (González *et al.*, 2025).

Contaminación ambiental por metales pesados a nivel global

Los MP se definen como elementos con un peso atómico elevado y una densidad mínima de 5 g/cm³ (Zhang *et al.*, 2019). La contaminación ambiental por estos metales representa un problema global de gran relevancia, debido a su persistencia en el ambiente y su alta toxicidad (Uchimiya *et al.*, 2020). Elementos como el Pb, Cd, mercurio (Hg), zinc (Zn) y cromo (Cr), así como el metaloide arsénico (As), tienden a acumularse en suelos, cuerpos de agua y aire, generando riesgos significativos para la salud humana, la biodiversidad y los ecosistemas (Bishnu-Angon *et al.*, 2024). Las fuentes principales de esta contaminación son actividades antropogénicas como la minería, la industria, la agricultura intensiva y el uso indiscriminado de pesticidas y fertilizantes, además de emisiones vehiculares y la quema de combustibles fósiles (Karpoor *et al.*, 2021). Debido a su capacidad de bioacumulación y biomagnificación, estos MP pueden ingresar a la cadena alimentaria, afectando la calidad de los alimentos y aumentando la incidencia de enfermedades crónicas y agudas en la población expuesta (Ali y Khan, 2019; Bishnu-Angon *et al.*, 2024). Incluso en trazas, los MP pueden ser altamente tóxicos para los seres humanos, afectando negativamente órganos vitales como el cerebro, el sistema nervioso central, los riñones, el sistema digestivo y el sistema reproductor (Kumar *et al.*, 2019).

Principales fuentes de plomo y cadmio en ambientes agropecuarios.

La contaminación por Cd en ambientes agropecuarios puede originarse a partir de múltiples fuentes antropogénicas, incluyendo productos de PVC, fertilizantes fosfatados, pigmentos de color, residuos de productos electrónicos, polvos y humos industriales e incineración, pesticidas, pinturas, baterías, actividades mineras y metalúrgicas, así como el vertido de aguas residuales (Yuan *et al.*, 2019). El Pb es un MP que puede encontrarse en el medio ambiente tanto por fuentes naturales como por actividades antropogénicas, especialmente las relacionadas con procesos industriales como la producción de baterías, la elaboración de pigmentos para pinturas y el sector de la electrónica (Vargas-Mendoza *et al.*, 2025). El Cd y Pb pueden absorberse rápidamente en la cadena alimentaria, representando graves riesgos para la salud humana. Estos se acumulan en los tejidos y pueden causar efectos adversos como retraso en el desarrollo infantil, así como daños significativos en el sistema auditivo, cardiovascular y renal. Los niños son especialmente vulnerables a la toxicidad de estas sustancias en comparación con los adultos (Hembrom *et al.*, 2020).

Situación ambiental de la Comarca Lagunera en relación con metales pesados

Entre las principales fuentes de contaminación por MP se encuentran el uso intensivo de fertilizantes en la agricultura, la producción de compuestos químicos y las actividades mineras, que contribuyen significativamente a la acumulación de estos elementos (Tang *et al.*, 2019). No obstante, también existen fuentes naturales relevantes, como las formaciones geológicas de origen ígneo y sedimentario, las cuales representan una vía importante de liberación natural de estos elementos al ambiente (Cannon *et al.*, 1978).

En la CL, la presencia de MP en el ambiente es una preocupación creciente debido a diversas actividades antropogénicas. Entre las principales actividades económicas en ambas ciudades destacan la minería y la fundición de metales (Saavedra-Silva *et al.*, 2009), así como la agricultura (Perales-García *et al.*, 2020; Orona-Catillo *et al.*, 2022). Un estudio realizado por Benin *et al.* (1999) reveló que en la ciudad de Torreón se registran

concentraciones de Pb y Cd comparables a las observadas en algunas de las zonas más contaminadas del mundo, superando los límites considerados seguros por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). En dicho estudio, los niveles de Pb detectados en el polvo oscilaban entre 787 y 13,231 $\mu\text{g/g}$, mientras que las concentraciones de Cd variaban de 11 a 1,497 $\mu\text{g/g}$.

En un trabajo realizado por Girón-Pérez (2014), se determinó la presencia de MP de los suelos agrícolas con cultivos hortícolas en tres localidades de la CL: San Miguel (Matamoros, Coahuila), Ciudad Juárez (Lerdo, Durango) y Venecia (Gómez Palacio, Durango). Los resultados revelaron la presencia de concentraciones elevadas de MP, destacando As en Matamoros, Cd y Pb en Cd. Juárez, Cu en Matamoros y Zn en Venecia. Estos hallazgos indican un nivel preocupante de contaminación en los suelos analizados.

Por otro lado, Azpilcueta *et al.* (2017) reportaron que, en un estudio sobre la calidad del agua en un área agrícola de maíz forrajero en la CL, el Pb presentó la mayor concentración entre los MP, con un valor promedio de 30.2 $\mu\text{g/dL}$. Las concentraciones de Cd y As fueron menores, con valores de 3.9 $\mu\text{g/dL}$ y 3.6 $\mu\text{g/dL}$, respectivamente. En todos los sitios, los niveles de estos excedieron los límites establecidos por la norma NOM-127-SSA1-1994, lo que indica una contaminación ambiental considerable y un riesgo potencial para la salud.

En un estudio realizado por Domínguez-Zúñiga *et al.* (2021), se identificaron niveles elevados de MP en nueve especies de hongos macroscópicos recolectados en Torreón, Gómez Palacio y Lerdo. *Chlorophyllum molybdites* mostró los valores más altos de Cd, Cu y Zn, mientras que *Ganoderma* sp. destacó en Pb. Las concentraciones de Cd, Cu y Pb superaron los límites establecidos por estándares europeos. Torreón presentó los niveles más altos de Pb y Zn; Lerdo, de Cu, Cd y Zn; y Gómez Palacio, valores variables.

Vías de exposición y acumulación de metales pesados en cabras

Los animales de pastoreo están expuestos a MP, los cuales pueden ingresar y bioacumularse en su organismo a través de diversas vías (Figura, 3). Una de ellas es por presencia de estos elementos en agua (Azpilcueta *et al.*, 2017), otra puede ser en productos agrícolas como granos, vegetales, frutas y forrajes, los cuales pueden contener niveles significativos de MP (Peláez-Peláez *et al.*, 2016; Ahmed *et al.*, 2019). Además, se ha reportado que estos elementos, pueden estar presentes en forma biodisponible en partículas suspendidas del aire, lo cual representa un riesgo tanto para la salud del animal cuando son inhalados (Ren *et al.*, 2021).

En consecuencia, las cabras pueden bioacumular estos MP en sus tejidos, representando un riesgo potencial para la salud pública a través del consumo de productos caprinos contaminados. En un estudio realizado por Jubril *et al.* (2017), se confirmó que la actividad minera en la zona de Bagega, Zamfara State, Nigeria, está relacionada con niveles elevados de MP, especialmente Pb y Cd, en la sangre y órganos de cabras expuestas. El hígado y los riñones presentaron las concentraciones más altas, superando los límites recomendados para animales destinados al consumo humano (JECFA, 2010). Por otro lado, Ubwa *et al.* (2017) reportaron en Makurdi, Nigeria, la presencia de Cd y Cr en sangre y vísceras de cabras nativas y no nativas. Esta contaminación podría estar relacionada con la exposición de los animales a MP en los pastizales, posiblemente debido a la deposición atmosférica de estos elementos en la región (Okoye *et al.*, 2010). En un estudio realizado por Alperkhdri *et al.* (2018) en Kirkuk, Irak, se detectaron niveles elevados de MP (Pb, Cu, Co y Cd) en carne de cabra, con una mayor acumulación de Pb, Cu y Co en el hígado y de Cd en el riñón, superando los límites internacionales permitidos. Estas concentraciones se atribuyen a la contaminación del agua (río Zab y pozos) y a diversas fuentes industriales, vehiculares, domésticas y agrícolas presentes en la región.



Figura 3. Principales vías de exposición a metales pesados en cabras. 1) Actividades mineras, 2) Contaminación atmosférica, 3) Aplicación de plaguicidas sintéticos en el ámbito agrícola, 4) Emisiones provenientes de actividades industriales, y 5) Contaminación de fuentes hídricas. *Elaboración propia.

Riesgos de la transferencia trófica de metales pesados en la cadena alimentaria

La transferencia trófica de MP a la cadena alimentaria humana es relevante que puede afectar la salud pública. Las fuentes primarias, como las actividades industrial, minera y agrícola, liberan directamente estos elementos al ambiente (Bishnu-Angon *et al.*, 2024). La absorción de MP por las plantas cultivadas en suelos contaminados genera toxicidad a lo largo de la cadena alimentaria. En este contexto, los suelos y aguas subterráneas contaminadas actúan como fuentes secundarias, ya que continúan movilizandolos MP hacia cultivos y animales (Bishnu-Angon *et al.*, 2024). Cuando los MP no son absorbidos por las plantas ni lixiviados, pueden acumularse en el suelo durante largos periodos (Ghori *et al.*, 2019).

Una vez que el ganado consume vegetación contaminada con MP, estos pueden transferirse a productos de origen animal, como la leche. Se ha documentado su presencia en leche cruda de vaca, lo que evidencia la transferencia de contaminantes a través del pastoreo en campos contaminados (Haakonde *et al.*, 2021). En el caso del Pb al superar cierto umbral, su presencia en la leche aumenta de forma proporcional a la concentración en sangre (Swarup *et al.*, 2025). Además, estos MP pueden transportarse a través del torrente sanguíneo y acumularse en tejidos y órganos, como se ha encontrado en cabras expuestas a ambientes contaminados (Jubril *et al.*, 2017; Ubwa *et al.*, 2017; Alperkhadi *et al.* 2018).

Comportamiento del cadmio y plomo en el organismo animal

En los animales, la exposición a Cd y Pb, incluso en dosis subletales, afecta negativamente diversos procesos fisiológicos y bioquímicos. La gravedad de la toxicidad de estos MP está determinada por la cantidad absorbida, la vía de entrada y la duración de la exposición, ya sea de forma aguda o crónica. Su presencia en el agua y el alimento destinados a los animales representa un riesgo para su salud debido a la bioacumulación progresiva (Tahir y Alkheraije, 2023).

La exposición al Pb ocurre principalmente por su absorción a través del sistema respiratorio o gastrointestinal. Una vez dentro del organismo, este metal se transporta por la sangre y se deposita inicialmente en los tejidos blandos, para luego acumularse en los huesos, donde puede permanecer durante largos períodos. La vida media del Pb en sangre es aproximadamente de 30 días, mientras que en el tejido óseo puede mantenerse entre 10 y 30 años (Freeman *et al.*, 1991). Clínicamente, el ganado afectado por intoxicación con Pb suele presentar signos de desnutrición, emaciación, pérdida de masa muscular, desarrollo fetal anormal, pelaje opaco y anemia moderada (Tahir y Alkheraije, 2023). La eliminación del Pb del organismo ocurre principalmente a través de la orina y las heces (Jubril *et al.*, 2017).

El Cd produce efectos tóxicos que incluyen daño pulmonar, hipertensión, lesiones hepáticas y disfunción renal (Tahir y Alkheraije, 2023). La lenta depuración celular del

Cd en el ganado, junto con la limitada eficacia de los sistemas de exportación celular, contribuye a su acumulación prolongada en tejidos de almacenamiento como el colon, el hígado y los riñones (Akar *et al.*, 2018; Tahir y Alkheraije, 2023).

Se ha reportado que el Cd se acumula principalmente en el hígado y los riñones (Sharma *et al.*, 1979). En cuanto al Pb, la mayor parte se deposita en el tejido óseo, aunque a partir de ciertos niveles de exposición también puede acumularse significativamente en los riñones. La excreción de Cd a través de la leche es mínima, mientras que esta ofrece una protección limitada frente al Pb ingerido. Además, aunque solo una pequeña fracción de Cd inorgánico logra cruzar la barrera placentaria, el Pb la atraviesa con mayor facilidad (Neathery y Miller, 1975).

En una investigación realizada por Sharma *et al.* (1982), grupos de vacas lactantes fueron alimentados diariamente Cd añadido (como cloruro) y Pb (como acetato) en experimentos separados. Los autores reportaron que el Cd no mostró un incremento en sangre, leche ni músculo esquelético, pero sí se acumuló en hígado y riñones, incluso después de suspender la exposición. En cambio, el Pb no se acumuló en el músculo, pero presentó un aumento dosis-dependiente en sangre, leche, hueso, hígado y riñones.

Efectos Hematológicos de la Exposición a Plomo y Cadmio

La evidencia sugiere que los MP como el Pb y Cd interfieren con diversas funciones hematológicas. La intoxicación por Pb se ha asociado con anormalidades en la morfología de los eritrocitos, porfirinas, normoblastos y la presencia de punteado basófilo (George y Duncan, 1979). Además, se ha demostrado que la exposición crónica al Pb, con niveles en sangre superiores a 10 µg/dL, se relaciona con una disminución significativa de la hemoglobina y el hematocrito (Nakhaee *et al.*, 2018).

El Cd puede interferir con la absorción de hierro a nivel gastrointestinal; sin embargo, los estudios sobre su relación con la anemia tras exposición oral han mostrado resultados inconsistentes. Este metal tiende a acumularse en órganos clave para la producción de

eritropoyetina (EPO), como los riñones, y se ha comprobado que afecta negativamente la síntesis de esta hormona de forma dosis-dependiente (Horiguchi *et al.*, 2011). Estudios mecanicistas han demostrado que ambos MP pueden inhibir la absorción de hierro, contribuyendo así al desarrollo de anemia (Bressler *et al.*, 2004).

Kostić *et al.* (1993) reportaron que la exposición crónica al Cd en ratas provoca anemia con alteraciones en los glóbulos rojos, como reticulocitosis, anisocitosis y poiquilocitosis, además de deficiencia de hierro, estrés oxidativo aumentado por la actividad de enzimas antioxidantes y alteraciones en el metabolismo energético de las células sanguíneas, afectando la función y viabilidad de los eritrocitos. De manera complementaria, Hamzah *et al.* (2024) observaron en ratas una reducción significativa en el recuento de leucocitos, indicando posible afectación inmunológica, sin cambios significativos en glóbulos rojos, hemoglobina ni hematocrito, pero con elevación de las enzimas hepáticas AST y ALT, reflejando daño hepático, y una disminución en la actividad antioxidante total, evidenciando estrés oxidativo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área geográfica de estudio

El estudio se realizó en la CL, seleccionando 12 localidades las cuales pertenecen a 10 municipios distribuidos entre los estados de Coahuila y Durango. En el Estado de Coahuila de igual manera se incluyeron seis localidades en cinco municipios: San Nicolás (SNC) y El Venado (EVC) en San Pedro; Congregación Hidalgo (CHC) en Matamoros; Santa Fe (SFC) en Torreón; Gabino Vázquez (GVC) en Viesca; y Nuevo León (NLC) en Francisco I. Madero. En Durango, se incluyeron seis localidades en cinco municipios: Seis de Enero (SED), Villa Juárez (VJD) y Álvaro Obregón (AOD) en Lerdo; Bermejillo (BD) en Mapimí; Venecia (VD) en Gómez Palacio; y Tlahualilo (TD) en el municipio de Tlahualilo (Cuadro 1; Figura 4). En total, se incluyeron 120 cabras distribuidas en 12 hatos, con un muestreo sanguíneo aleatorio de 10 animales por cada hato.

Determinación de plomo y cadmio en sangre de cabras

Después de la recolección e identificación de las muestras de sangre, estas fueron sometidas a un proceso de digestión húmeda. Se pesaron 0.02 g de muestra, a las cuales se les adicionaron 400 μL de ácido nítrico (HNO_3) grado trace select y 400 μL de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30 % p/v, además de 200 μL de agua ultrapura (Milli-Q). Las muestras se dejaron reaccionar por 48 h a temperatura ambiente para asegurar una completa digestión para su posterior análisis.

Análisis de muestras

La determinación de los niveles de Cd y Pb se realizó mediante espectroscopía de absorción atómica con aspiración directa, siguiendo los métodos descritos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA 1978a, 1978b) y adaptados por

Domínguez-Zúñiga *et al.* (2022). Se prepararon cinco estándares para cada metal, asegurando un coeficiente de correlación mayor a 0.995 para la curva de calibración.

Validación del método analítico

Se evaluaron criterios quimiométricos para validar el procedimiento de análisis de Cd y Pb en sangre de cabras. Los límites de detección (LOD) y de cuantificación (LOQ) se calcularon siguiendo el método propuesto por Miller y Miller (2002). La precisión y el porcentaje de error se determinaron mediante el análisis de duplicados de muestras control, procesados junto con cada lote de muestras. Para estimar el porcentaje de recuperación, se utilizaron muestras enriquecidas artificialmente con cantidades conocidas de Cd y Pb, comparando la cantidad recuperada con la cantidad añadida.

Evaluación de la condición corporal y análisis de biometría hemática y bioquímica sanguínea en cabras

Los animales muestreados fueron manejados conforme a las Normas Oficiales Mexicanas relacionadas con el trato humanitario en el transporte de animales (NOM-051-ZOO-1995), las especificaciones técnicas para pruebas diagnósticas en sanidad animal (NOM-056-ZOO-1995) y la vigilancia epidemiológica (NOM-046-ZOO-1995). El estudio cumplió con las consideraciones éticas institucionales (UAAAN/UL), así como con las normativas nacionales e internacionales: NAM, 2002 y FAS, 2010.

La condición corporal (CC) se evaluó siguiendo el método descrito por Russel (1984), el cual se basa en la palpación e inspección visual de zonas específicas del cuerpo, como la rabadilla, la base de la cola y las apófisis espinosas y transversas de la columna. A partir de estas observaciones, los animales fueron clasificados en una escala de cinco niveles, que va desde muy delgado hasta excesivamente obeso (Cuadro 2).

Las muestras sanguíneas fueron colectadas mediante punción de la vena yugular, utilizando dos tubos por cabra: uno sin anticoagulante para obtención de suero y otro con

ácido etilendiaminotetraacético (EDTA, por sus siglas en inglés) para análisis hematológico. Todos los análisis se llevaron a cabo en el laboratorio del Centro de Investigación de Producción Animal (CIPA), perteneciente a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Las muestras con EDTA se procesaron en un analizador hematológico automatizado (Hemalaizer 2000) determinando los siguientes parámetros: glóbulos blancos (WBC), glóbulos rojos (RBC), hemoglobina (HGB), hematocrito (HCT), volumen corpuscular medio (MCV), hemoglobina corpuscular media (MCH), concentración media de hemoglobina corpuscular (MCHC) y distribución eritrocitaria (RDW). Las muestras destinadas a análisis bioquímico se dejaron coagular y luego se centrifugaron a 5,000 rpm durante 15 min. El suero fue transferido a tubos Eppendorf limpios y almacenado a -20°C . Posteriormente, se analizaron las concentraciones séricas de proteínas totales (PT), creatinina (CREA), glucosa (GLC), triglicéridos (TG), ácido úrico (AU), urea (U) y colesterol (COL) utilizando un analizador automático H-100.

Análisis estadístico

Se aplicó estadística descriptiva, análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de comparación de medias de Duncan, considerando diferencias significativas con $p < 0.05$. Además, se calcularon los coeficientes de correlación de Spearman ($p < 0.05$) para evaluar, en primer lugar, la relación entre los niveles séricos de Cd y Pb, y posteriormente su asociación con la condición corporal (CC) y los parámetros hematológicos de las cabras. Todos los análisis se realizaron utilizando el software SAS (versión 9.0). Los resultados se presentan como media \pm desviación estándar (DE).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentración de cadmio y plomo en sangre de cabras

Los resultados obtenidos indican la presencia de Cd y Pb en diferentes concentraciones en las localidades evaluadas (Cuadro 3). Las concentraciones de Cd estuvieron en un rango de 0 a 0.13 $\mu\text{g/dL}$. Las concentraciones más altas se registraron en SNC (San Nicolas, Coahuila) con 0.138 $\mu\text{g/dL}$, y AOD (Álvaro Obregón, Durango) con 0.117 $\mu\text{g/dL}$. En contraste, las concentraciones más bajas se encontraron en GVC (Gabino Vázquez, Coahuila) con 0.014 $\mu\text{g/dL}$, y en BD (Bermejillo, Durango), donde no se detectaron niveles (ND) (Figura 5). Para el caso del Pb los niveles variaron entre 0 y 6.26 $\mu\text{g/dL}$. Las localidades con mayores concentraciones fueron VJD y VD con 6.26 y 5.55 $\mu\text{g/dL}$, respectivamente, pertenecientes a los municipios de Lerdo y Gómez Palacio, Durango. Por otro lado, las concentraciones más bajas se registraron en CHC (Congregación Hidalgo, Coahuila) con 0.44 $\mu\text{g/dL}$, y TD (ND) (Figura 6). En las localidades analizadas, se detectó una presencia Cd, Coahuila presentó el 56 % y Durango el 44 %. En cuanto al Pb del 36 % en Coahuila y del 64 % en Durango. Estos resultados indican una mayor concentración de Pb en Durango y de Cd en Coahuila. El método utilizado para la determinación de Cd y Pb mediante generación de hidruros presentó coeficientes de correlación de 0.9956 para Cd y 0.9987 para Pb. Los valores de LOD y LOQ fueron de 0.33 ppb y 0.99 ppb para Cd, y de 1.44 ppb y 4.31 ppb para Pb, respectivamente. La precisión fue de 94.6 % para Cd y 97.1 % para Pb, con errores bajos y recuperaciones superiores al 95 %, lo que respalda la exactitud y reproducibilidad del método (Cuadro 4). Los resultados obtenidos se ubicaron por debajo de los límites establecidos en la NOM-199-SSA1-2000 para Pb ($\leq 25 \mu\text{g/dL}$) y en la NOM-047-SSA1-2011 para Cd (0.5 $\mu\text{g/dL}$), ambos aplicables a sangre humana.

En una investigación realizada por Girón Pérez (2014), se evidenció la presencia de MP en suelos agrícolas. El Cd presentó una concentración de 49 $\mu\text{g/dL}$ en la localidad de VJD, mientras que en Matamoros, Coahuila, y en VD, se registraron concentraciones de 40 y 23 $\mu\text{g/dL}$, respectivamente. En cuanto al Pb, se detectó una concentración de 2,783 $\mu\text{g/dL}$

en VJD, seguido de Matamoros con 2,527 µg/dL y VD con 2,232 µg/dL. Azpilcueta *et al.* (2017) reportaron que, en un estudio sobre la calidad del agua en un área agrícola de maíz forrajero en la CL, el Pb presentó la mayor concentración entre los MP, con un valor promedio de 30.2 µg/dL. Las concentraciones de Cd y As fueron menores, con valores de 3.9 µg/dL y 3.6 µg/dL, respectivamente. Por su parte, Domínguez-Zúñiga *et al.* (2021) identificaron niveles elevados de MP en nueve especies de hongos. En Torreón, *C. molybdites* presentó la mayor concentración de Cd con 1,015 µg/dL y *Ganoderma* sp. de Pb con 14,730 µg/dL. En Gómez Palacio, *C. truncorum* acumuló 1,635 µg/dL de Cd y *C. lagopus* 1,533 µg/dL de Pb. En Lerdo, *C. molybdites* alcanzó 1,418 µg/dL de Cd y *C. truncorum* 341 µg/dL de Pb. Esto podría explicarse por el hecho de que los hongos, los suelos y el agua actúan como acumuladores directos de MP, mientras que los animales, como las cabras, pueden presentar mecanismos fisiológicos que limitan su absorción y favorecen su eliminación, lo que reduce su concentración en la sangre.

Actualmente, el estudio de MP en animales de interés para el consumo humano ha cobrado gran relevancia, debido a que en muchas ciudades del mundo la contaminación por estos elementos ha incrementado, principalmente como consecuencia de actividades antropogénicas como la minería. Se han realizado diversos estudios sobre la detección de MP en cabras, entre ellos el de Jubril *et al.* (2017), quienes evaluaron los niveles de MP en sangre de cabras en Zamfara, Nigeria. Sus resultados mostraron concentraciones de Pb de 225.79 ± 14.23 µg/dL, Cd de 35.85 ± 10.47 µg/dL, cromo (Cr) de 55.69 ± 23.50 µg/dL y cobre (Cu) de 130.82 ± 41.26 µg/dL, mientras que los niveles de selenio (Se) fueron de 723.85 ± 67.32 µg/dL. Por su parte Ubwa *et al.* (2017) en una investigación realizada en Makurdi, Nigeria encontraron que, en las vísceras de las cabras, los niveles residuales de Cd variaron de 0.01 a 0.31 mg/L y de Cr de 0.04 a 0.47 mg/L, con valores en el hígado, riñón, tripas y estómago. En otra investigación Alperkhdri *et al.* (2018) analizaron la presencia de MP en carne de cabras en Kirkuk, Irak. Los resultados mostraron concentraciones significativas de Pb (7.983 ppm), Cd (4.430 ppm), Cu (20.734 ppm) y cobalto (Co) (5.926 ppm). Por otro lado, Emara *et al.* (2020) reportaron concentraciones de elementos traza en muestras de cabello de cabra, expresadas como porcentaje en relación con la masa total de la muestra: Hierro (Fe) (1.542%), Zinc (Zn) (0.278%), Niquel

(Ni) (0.097%), Co (0.019%), Manganese (Mn) (0.0967%), Pb (0.0612%) y Cd (0.0000578%). Asimismo, Njoga *et al.* (2021) en el sureste de Nigeria identificaron que el 56% de las “carcasas” o “canales” de cabras procesadas en mataderos contenía concentraciones de arsénico (As) de 0,53–0,57 mg/kg, Pb (0,45–0,82 mg/kg) y Cd de (0,02–0,06 mg/kg) en distintos tejidos. Los resultados de otras regiones muestran concentraciones más altas de estos MP que las encontradas en nuestro estudio. En Nigeria, la contaminación por MP se ha asociado con la minería artesanal, el pastoreo en zonas contaminadas y el consumo de alimentos y agua con residuos industriales (Jubril *et al.*, 2017; Ubwa *et al.*, 2017). En la CL, los niveles bajos de MP podría deberse a la poca minería artesanal, menor presencia de industrias contaminantes, y un control más estricto en el uso de agroquímicos y manejo del agua, lo que reduce la contaminación del suelo y la transferencia de estos MP a los animales.

Dado que no existen normas oficiales en México que definan los niveles permitidos de Cd y Pb en la sangre de cabras destinados al consumo humano, es fundamental documentar su presencia, ya que representan un riesgo potencial para la salud pública. En un estudio realizado por Waldner *et al.* (2002) en el sur de Saskatchewan, Canadá, se evaluaron tres rebaños bovinos expuestos a baterías con Pb, donde se reportaron tasas de mortalidad de hasta 17 %, y entre los animales asintomáticos, entre el 4 y el 12 % presentaron concentraciones sanguíneas superiores a 35 µg/dL, mientras que entre el 7 y el 40 % estuvieron en el rango de 10–35 µg/dL. También se observó transmisión fetal y una disminución lenta de las concentraciones tras retirar la fuente de exposición, con una reducción promedio de 4.6 µg/dL cada 30 días y una vida media estimada de 63 días. Según Puls (1994) y el laboratorio Prairie Diagnostic Services, los niveles de Pb en sangre bovina se clasifican como normales (hasta 10 µg/dL), altos normales o subclínicos (10–35 µg/dL) y tóxicos (mayores a 35 µg/dL), lo cual resulta útil para interpretar la exposición en ausencia de normativas oficiales, especialmente considerando que estos animales forman parte de la cadena alimentaria.

Evaluación del condición corporal y análisis de biometría hemática y bioquímica sanguínea en cabras

Las cabras evaluadas en diferentes localidades presentaron una edad promedio que osciló entre los 3.2 ± 0.9 años en SED y los 6.5 ± 0.52 años en GVC. En cuanto a la CC, los valores promedio se situaron entre 1.5 ± 0.40 en TD, la localidad con el estado corporal más bajo, y 2.6 ± 0.21 en AOD, que presentó la mejor CC entre todas las localidades (Cuadro 2). Otras localidades que mostraron valores bajos de CC fueron SED (1.85 ± 0.57) y VJD (2.05 ± 0.36) (Cuadro 2). La correlación entre los niveles de Cd y Pb fue negativa y no significativa ($\rho = -0.154$; $p = 0.633$), con una pendiente de regresión de -0.0021 y un $R^2 = 0.013$. Al comparar la CC con los niveles de Cd y Pb, se observó una correlación débil y no significativa. Para Cd, se encontró una correlación positiva débil ($\rho = 0.370$; $p = 0.236$), con una pendiente de regresión de 2.1747 y un $R^2 = 0.0882$. Para Pb, la correlación fue prácticamente nula ($\rho = -0.039$; $p = 0.905$), con una pendiente de 0.0079 y un $R^2 = 0.0035$ (Figura 7; Figura 8). Estos resultados sugieren una relación muy limitada entre la concentración de estos MP y la CC de las cabras, lo cual concuerda con lo reportado por Gioushy *et al.* (2025), quienes también describieron una correlación negativa débil entre los niveles séricos de Pb y las CC de las cabras.

Los resultados de la biometría hemática en cabras mostraron alteraciones significativas en diversos parámetros sanguíneos (Cuadro 5). Se detectaron valores elevados de WBC por encima del rango fisiológico normal ($5.0\text{--}14 \times 10^9/\text{L}$) en localidades del estado de Durango como VJD ($18.04 \times 10^9/\text{L}$), SED ($17.5 \times 10^9/\text{L}$) y AOD ($14.3 \times 10^9/\text{L}$), así como en localidades del estado de Coahuila como SNC, SFC y CHC con 16.12 , 15.84 y $15.44 \times 10^9/\text{L}$, respectivamente. En cuanto a los RBC, los valores más bajos se registraron en GVC ($7.234 \times 10^{12}/\text{L}$), TD ($7.396 \times 10^{12}/\text{L}$) y SFC ($7.422 \times 10^{12}/\text{L}$), situándose por debajo del rango de referencia ($8.30\text{--}17.9 \times 10^{12}/\text{L}$). No obstante, algunas localidades como SED, SNC, EVC y NLC presentaron niveles de eritrocitos dentro de los rangos normales. En todas las localidades, los valores de HGB se encontraron dentro del rango esperado de 8 a 11.5 g/dL. HCT se encontró por debajo del rango normal ($23\text{--}35\%$) en todas las localidades, con valores especialmente bajos en AOD (0.62%) y GVC (0.64%). Por otra parte, MCV, cuyo rango de referencia es de 14 a 25 fL, y MCH, con un rango de 5.2 a 8

pg, estuvieron significativamente elevados en casi todas las localidades, excepto en SFC y GVC, que presentaron valores de 22.46 y 22.88 fL, respectivamente, dentro del rango normal para MCV. En cuanto a MCHC, cuyo rango normal es de 30 a 39 g/dL, se observaron valores anormalmente elevados en las localidades de VJD, TD, BD, VD, SNC, CHC y NLC, con cifras que oscilaron entre 46.84 y 787.78 g/dL. En contraste, en AOD, SED, EVC, SFC y GVC no se registraron datos disponibles para este parámetro. Finalmente, en lo que respecta a RDW-CV, con un rango de referencia de 10 a 20 %, solo la localidad de AOD presentó un valor fuera de rango, con 9.74 %, lo que sugiere una menor variabilidad en el tamaño de los eritrocitos (Figura 9). Durango y Coahuila presentaron valores elevados de WBC, MCV y MCH, así como niveles reducidos de RBC y HCT (Figura 10).

En cuanto a las relaciones entre los niveles séricos de Cd y Pb con los parámetros hematológicos mediante el coeficiente de correlación de Spearman. Los niveles séricos de Cd mostraron una correlación positiva significativa en RBC ($\rho = 0.622$; $p = 0.031$; pendiente = 13.97; $r^2 = 0.49$), y una correlación moderada positiva moderadas con HGB ($\rho = 0.521$; $p = 0.081$; pendiente = 15.91; $r^2 = 0.36$). Además, presentaron correlaciones bajas con RDW-CV ($\rho = 0.388$; $p = 0.211$; pendiente = 9.07; $r^2 = 0.05$), MCH ($\rho = 0.252$; $p = 0.429$; pendiente = 9.09; $r^2 = 0.11$), MCV ($\rho = 0.196$; $p = 0.542$; pendiente = 25.67; $r^2 = 0.089$), WBC ($\rho = 0.105$; $p = 0.746$; pendiente = 15.36; $r^2 = 0.0619$) y HCT ($\rho = 0.076$; $p = 0.812$; pendiente = 1.161; $r^2 = 0.04$). En contraste, la correlación con MCHC fue negativa ($\rho = -0.174$; $p = 0.589$; pendiente = -427.47; $r^2 = 0.003$) (Figura 11). Para Pb, se observaron correlaciones positivas, pero no significativas (bajas) con WBC ($\rho = 0.377$; $p = 0.226$; pendiente = 0.46; $r^2 = 0.165$), HCT ($\rho = 0.384$; $p = 0.217$; pendiente = 0.04; $r^2 = 0.09$), HGB ($\rho = 0.360$; $p = 0.249$; pendiente = 0.1232; $r^2 = 0.06$), MCH ($\rho = 0.193$; $p = 0.549$; pendiente = 0.04; $r^2 = 0.0096$), MCHC ($\rho = 0.131$; $p = 0.686$; pendiente = 30.15; $r^2 = 0.05$) y RBC ($\rho = 0.167$; $p = 0.602$; pendiente = 0.009; $r^2 = 0.0006$). En contraste, se encontró una correlación negativa moderada no significativa con MCV ($\rho = -0.524$; $p = 0.080$; pendiente = 0.59; $r^2 = 0.14$) y una correlación prácticamente nula con RDW-CV ($\rho = -0.004$; $p = 0.991$; pendiente = -0.097; $r^2 = 0.0019$) (Figura 12).

Estos resultados concuerdan por lo reportado por Gioushy *et al.* (2025), el cual encontró que cabras expuestas a altas concentraciones de Pb presentaron niveles elevados de BWC, mientras tanto, el recuento de RBC, HGB y HCT aumentaron leve e insignificamente en las cabras con niveles elevados de Pb. En el mismo contexto, el MCV y el MCH no difirieron entre cabras con niveles altos y bajos de Pb. Lo cual contrasta con nuestros resultados, en los que tanto los RBC como el HCT mostraron una disminución, mientras que los valores de HGB se mantuvieron dentro del rango establecido. Por otro lado, los valores de MCV se encontraron por encima de los límites establecidos, y la detección de MCH fue variable, presentando tanto valores elevados como ausencias de detección.

En cuanto a los resultados de bioquímica sanguínea en cabras, algunos parámetros presentaron alteraciones significativas respecto a los valores de referencia establecidos (Cuadro 6). La localidad GVC presentó niveles por encima del límite superior para GLC (291.62 mg/dL; referencia: 0–200 mg/dL), COL (210.96 mg/dL; referencia: 0–200 mg/dL). Asimismo, SNC mostró un valor de AU elevado (60.824 mg/dL), muy por encima del rango de referencia. También se observaron niveles altos de AU en AOD (10.26 mg/dL), EVC (9.57 mg/dL), y SFC (16.21 mg/dL). Aunque para triglicéridos (TG, promedio: 71.6 mg/dL), urea (U, promedio: 25.506 mg/dL) y proteínas totales (PT, promedio: 8.98 g/dL) no se cuenta con límites de referencia establecidos, varias localidades como AOD, VD, SFC y GVC superaron ampliamente estos promedios. En contraste, los niveles de CREA (referencia: 0–54.9 mg/dL) se mantuvieron dentro del rango normal en todas las localidades (Figura 13). Durango y Coahuila presentaron niveles elevados de GLC y AU (Figura 14).

La relación entre los MP con parámetros de bioquímica sanguínea en Cd se observaron correlaciones positivas entre Cd y AU ($p = 0.587$, $p = 0.045$; pendiente = 259.63; $r^2 = 0.4$), lo cual fue estadísticamente significativo, así como con GLC ($p = 0.140$, $p = 0.665$; pendiente = 181.04; $r^2 = 0.0041$), TG ($p = 0.448$, $p = 0.145$; pendiente = 403.7; $r^2 = 0.089$), U ($p = 0.098$, $p = 0.762$; pendiente = 588.97; $r^2 = 0.280$) y CREA ($p = 0.196$, $p = 0.542$; pendiente = 3.4737; $r^2 = 0.002$), aunque estas últimas no fueron significativas. En contraste, se identificaron correlaciones negativas entre Cd y COL ($p = -0.497$, $p = 0.101$;

pendiente = -762.28; $r^2 = 0.2926$) y PT ($\rho = -0.315$, $p = 0.319$; pendiente = -23.569; $r^2 = 0.0212$), sin significancia estadística (Figura 15). Respecto al Pb, se identificaron correlaciones negativas con GLC ($\rho = -0.098$, $p = 0.762$; pendiente = -1.44; $r^2 = 0.0008$), TG ($\rho = -0.552$, $p = 0.063$; pendiente = -10.70; $r^2 = 0.1875$), CREA ($\rho = -0.497$, $p = 0.101$; pendiente = -0.6059; $r^2 = 0.1834$) y AU ($\rho = -0.273$, $p = 0.391$; pendiente = -0.5067; $r^2 = 0.0045$), aunque ninguna alcanzó significancia estadística. Por otro lado, se observaron correlaciones positivas débiles con COL ($\rho = 0.301$, $p = 0.342$; pendiente = -3.9016; $r^2 = 0.0227$), U ($\rho = 0.119$, $p = 0.713$; pendiente = -0.092; $r^2 = 2E-5$), y PT ($\rho = 0.392$, $p = 0.208$; pendiente = 0.9637; $r^2 = 0.105$), también sin significancia estadística (Figura 16).

De acuerdo con Gioushy *et al.* (2025), en cabras expuestas a niveles elevados de Pb se observaron aumentos significativos en los niveles de lípidos totales (LT) y fosfatasa alcalina (FA), así como una disminución del nitrógeno ureico en sangre (BUN), mientras que otros parámetros bioquímicos no presentaron cambios significativos. Además, se reportaron correlaciones positivas débiles entre Pb y LT ($\rho = 0.28$, $p = 0.009$) y FA ($\rho = 0.24$, $p = 0.031$), así como correlaciones negativas con albúmina, U y CREA. Estos hallazgos coinciden parcialmente con nuestros resultados, donde también se identificaron correlaciones débiles entre Pb y algunos parámetros de bioquímica sanguínea. Sin embargo, en nuestro estudio se observaron correlaciones positivas entre Cd y AU, y en el caso del Pb, correlaciones positivas débiles con COL, U y PT.

CONCLUSIONES

Se detectó la presencia de Cd y Pb en sangre de cabras de distintas localidades de la CL, con concentraciones significativamente diferentes entre las zonas muestreadas. Aunque no se encontraron correlaciones estadísticamente significativas entre la concentración de los MP y la CC de los animales, los datos sugieren posibles implicaciones subclínicas en algunos parámetros hematológicos. En el caso del Cd, se observaron correlaciones positivas significativa con AU y moderadas con RBC y HGB. Por su parte, el Pb correlaciones positivas bajas con WBC, HGB y HCT. En conjunto, estos hallazgos indican que, aunque las asociaciones estadísticamente significativas fueron limitadas, se identificaron alteraciones hematológicas compatibles con posibles efectos subclínicos en cabras expuestas crónicamente a Cd y Pb, lo que sugiere un impacto potencial sobre la salud animal. Estos resultados subrayan la necesidad de continuar con investigaciones más amplias, que incluyan un mayor tamaño de muestra y análisis multivariados, para evaluar con mayor precisión el impacto toxicológico de los metales pesados sobre la salud animal en la región de la CL.

CUADROS

Cuadro 1. Coordenadas geográficas de los hatos incluidos en el estudio.

| Localidad | Municipio, Estado | Coordenadas |
|----------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Gabino Vázquez (GVC) | Viesca, Coahuila | 25.4852750, -103.0639560 |
| El venado (EVC) | San Pedro, Coahuila | 25.9750100, -103.1632600 |
| Nuevo León (NLC) | Francisco I Madero, Coahuila | 25.7192970, -103.2977130 |
| San Nicolas (SNC) | San pedro, Coahuila | 25.9327240, -102.8361960 |
| Congregación Hidalgo (CHC) | Matamoros, Coahuila | 25.4765784, -103.1414090 |
| Santa Fe (SFC) | Torreón, Coahuila | 25.5687065, -103.3331154 |
| Seis de Enero (SED) | Lerdo, Durango | 25.5203110, -103.5974350 |
| Villa Juárez (VJD) | Lerdo, Durango | 25.4980720, -103.5850670 |
| Álvaro Obregón (AOD) | Lerdo, Durango | 25.5145030, -103.5029290 |
| Bermejillo (BD) | Mapimí, Durango | 25.8821750, -103.6289740 |
| Venecia (VD) | Gómez Palacio, Durango | 25.78347, -103.3508 |
| Tlahualilo (TD) | Tlahualilo, Durango | 26.1082270, -103.4485010 |

Cuadro 2. Edad y condición corporal de las cabras evaluadas en los distintos hatos muestreados (Promedio \pm DE).

| Localidad | Edad \pm DE | Condición Corporal \pm DE |
|-----------|-----------------|-----------------------------|
| GVC | 6.5 \pm 0.52 | 2.1 \pm 0.31 |
| EVC | 6.4 \pm 0.69 | 2.07 \pm 0.41 |
| NLC | 6.15 \pm 2.02 | 2.25 \pm 1.06 |
| SNC | 5.9 \pm 0.31 | 2.3 \pm 0.58 |
| CHC | 4.5 \pm 1.17 | 2.4 \pm 0.31 |
| SFC | 4.5 \pm 1.2 | 2.35 \pm 0.33 |
| SED | 3.2 \pm 0.91 | 1.85 \pm 0.57 |
| VJD | 3.8 \pm 1.39 | 2.05 \pm 0.36 |
| AOD | 4 \pm 1.24 | 2.6 \pm 0.21 |
| BD | 5.4 \pm 0.56 | 2.25 \pm 0.26 |
| VD | 5.7 \pm 0.82 | 2.25 \pm 0.63 |
| TD | 5.9 \pm 0.73 | 1.5 \pm 0.40 |

DE: Desviación Estándar.

Cuadro 3. Concentración de plomo y cadmio por cada localidad muestreada de la Comarca Lagunera (Promedio \pm DE).

| Localidad | Promedio de Cadmio ($\mu\text{g/dL}$) | DE | Promedio de Plomo ($\mu\text{g/dL}$) | DE |
|-----------|---|------|--|------|
| GVC | 0.014c | 0.03 | 2.162cde | 4.23 |
| EVC | 0.10ab | 0.02 | 0.812e | 1.11 |
| NLC | 0.06abc | 0.04 | 1.30de | 1.26 |
| SNC | 0.138a | 0.01 | 2.61bcde | 2.62 |
| CHC | 0.07abc | 0.03 | 0.44e | 0.43 |
| SFC | 0.04bc | 0.07 | 4.52abcd | 2.16 |
| SED | 0.062abc | 0.06 | 5.18abc | 0.89 |
| VJD | 0.05bc | 0.05 | 6.26a | 2.77 |
| AOD | 0.117ab | 0.02 | 1.86de | 0.54 |
| BD | ND | 0 | 2.42cde | 0.89 |
| VD | 0.074abc | 0.08 | 5.55ab | 4.42 |
| TD | 0.048bc | 0.10 | ND | 0 |

ND: No detectado (significa que los valores fueron inferiores al límite óptimo cuantificable, LOC). *Valores con la misma letra son estadísticamente similares (Duncan, $p < 0.05$). DE: Desviación Estándar.

Cuadro 4. Parámetros quimiométricos de las metodologías empleadas.

| Elemento | Unidades | Correlación | Ecuación de Curva | LOD | LOC | Rango Lineal | Precisión | % Error | % Recobro | Técnica |
|----------|----------|-------------|---------------------------|------|------|--------------|-----------|---------|-----------|---------|
| Plomo | Ppb | 0.9987 | $Y = 0.0168 + 0.0058 * X$ | 1.44 | 4.31 | 4.31 - 64 | 97.1 | 2.90 | > 97.0 | HG |
| Cadmio | Ppb | 0.9956 | $Y = 0.0205 + 0.0693 * X$ | 0.33 | 0.99 | 0.99 - 8 | 94.6 | 5.40 | > 95.0 | HG |

*LOD. Límite óptimo detectable, LOC. Límite óptimo cuantificable. AAS. Espectrometría de Absorción Atómica, HG. Espectrometría de Absorción Atómica, técnica de horno de grafito, C. Colorimetría.

Cuadro 5. Parámetros de biometría hemática en cabras evaluados en diferentes localidades de la CL (Promedio \pm DE).

| Localidades | Parámetros de biometría sanguínea en cabras | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|---|------|----------------|------|-------|------|---------------|------|----------------|------|---------------|------|----------------|--------|---------------|------|
| | WBC | DE | RBC | DE | HGB | DE | HCT | DE | MCV | DE | MCH | DE | MCHC | DE | RDW-CV | DE |
| GVC | 13.04 | 2.66 | 7.234** | 0.51 | 8.4 | 0.82 | 0.64** | 0.14 | 22.88 | 4.71 | 9.24* | 0.41 | 0** | 0 | 11.1 | 2.04 |
| EVC | 12.88 | 1.50 | 9.254 | 1.10 | 10.8 | 1.28 | 1.04** | 0.42 | 30.64* | 2.81 | 11.6* | 0.37 | 0** | 0 | 13.46 | 1.74 |
| NLC | 11 | 5.26 | 8.374 | 0.98 | 9.96 | 1.44 | 1.36** | 0.58 | 30.422* | 6.45 | 12.14* | 1.07 | 46.84* | 72.76 | 13.2 | 2.22 |
| SNC | 16.12* | 8.12 | 9.82 | 0.62 | 11.98 | 0.72 | 1.56** | 0.13 | 27.74* | 1.23 | 12.16* | 0.47 | 468.1* | 88.14 | 14.88 | 0.60 |
| CHC | 15.44* | 6.2 | 8.048** | 0.73 | 9.8 | 0.61 | 0.88** | 0.31 | 29.1* | 2.77 | 12.1* | 0.50 | 329.42* | 43.76 | 13.7 | 1.08 |
| SFC | 15.84* | 3.20 | 7.422** | 1.74 | 9.18 | 1.01 | 1.08** | 0.19 | 22.46 | 4.64 | 9.8* | 1.85 | 0** | 0 | 11.52 | 0.97 |
| SED | 17.5* | 1.36 | 8.712 | 1.04 | 10.34 | 0.63 | 0.96** | 0.68 | 28.86* | 0.93 | 11.78* | 0.49 | 0** | 0 | 13.82 | 1.26 |
| VJD | 18.04* | 3.10 | 8.204** | 1.26 | 10.8 | 1.50 | 1.38** | 0.48 | 28.64* | 5.31 | 13.14* | 0.41 | 787.78* | 207.95 | 11.36 | 1.93 |
| AOD | 14.3* | 6.91 | 7.772** | 0.73 | 8.82 | 1.54 | 0.62** | 0.36 | 33.16* | 3.05 | 11.28* | 0.92 | 0** | 0 | 9.74** | 1.22 |
| BD | 11.42 | 8.12 | 7.892** | 0.62 | 9.48 | 0.72 | 1.14** | 0.13 | 30.84* | 1.23 | 11.98* | 0.47 | 472.16* | 88.14 | 13.1 | 0.60 |
| VD | 11.26 | 2.79 | 8.014** | 0.48 | 9.84 | 0.70 | 1.46** | 0.66 | 29.12* | 3.10 | 11.86* | 0.42 | 469.18* | 282.61 | 13.7 | 2.05 |
| TD | 13.86 | 6.91 | 7.396** | 0.73 | 8.74 | 1.54 | 1.22** | 0.36 | 32.82* | 3.05 | 11.78* | 0.92 | 549.84* | 6.91 | 13.48 | 1.22 |

DE: Desviación Estándar. *: Valores mayores a los de referencia. **: Valores menores a los de referencia.

Cuadro 6. Parámetros de bioquímica sanguínea en cabras evaluados en diferentes localidades de la CL (Promedio \pm DE).

| Localidades | Parámetros de bioquímica sanguínea de cabras | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|--|-------|-------|------|----------------|--------|--------|--------|----------------|-------|--------|-------|----------------|--------|
| | PT | DE | CREA | DE | GLC | DE | TG | DE | AU | DE | U | DE | COL | DE |
| GVC | 9.26 | 1.92 | 5.338 | 4.86 | 291.62* | 205.51 | 159.02 | 127.76 | 3.818 | 2.44 | 46.84 | 8.89 | 210.96* | 34.71 |
| EVC | 1.34 | 0.80 | 6.762 | 3.94 | 87.6 | 77.29 | 183.26 | 206.86 | 9.574* | 6.08 | 46.652 | 22.85 | 76.02 | 26.45 |
| NLC | 1.86 | 1.14 | 8.022 | 4.68 | 178.32 | 130.05 | 81.66 | 39.80 | 8.302* | 3.90 | 23.81 | 10.79 | 55.88 | 24.70 |
| SNC | 8.24 | 1.45 | 2.88 | 3.15 | 194.56 | 96.87 | 103.96 | 78.23 | 60.824* | 21.02 | 175.22 | 62.25 | 8.738 | 5.74 |
| CHC | 0.92 | 0.83 | 4.054 | 2.09 | 219.24* | 139.05 | 227.54 | 57.25 | 5.634 | 6.34 | 16.54 | 10.65 | 41.88 | 21.25 |
| SFC | 10.12 | 2.92 | 2.248 | 0.60 | 194.76 | 105.71 | 98 | 96.77 | 16.218* | 24.65 | 62.51 | 44.01 | 127.998 | 75.21 |
| SED | 8.98 | 1.43 | 1.386 | 0.94 | 69.64 | 12.48 | 71.6 | 50.86 | 3.37 | 2.05 | 25.506 | 14.76 | 77.96 | 45.37 |
| VJD | 12.78 | 0.63 | 1.184 | 0.92 | 7.76 | 7.36 | 81.44 | 62.54 | 4.64 | 5.15 | 19.028 | 4.06 | 94.68 | 13.22 |
| AOD | 19.12 | 13.05 | 1.616 | 0.65 | 73.88 | 101.12 | 194.6 | 220.15 | 10.262* | 15.60 | 30.426 | 11.25 | 146.08 | 123.61 |
| BD | 15.42 | 1.74 | 1.022 | 0.94 | 5.96 | 6.97 | 99.28 | 79.87 | 2.9 | 2.75 | 26.838 | 3.63 | 117.36 | 14.63 |
| VD | 0.96 | 0.43 | 8.152 | 6.43 | 363.88* | 303.86 | 173.1 | 142.77 | 4.856 | 3.38 | 34.698 | 9.14 | 69.04 | 75.08 |
| TD | 1.04 | 0.40 | 8.818 | 7.23 | 149.9 | 38.08 | 115.4 | 119.03 | 9.402* | 5.17 | 27.412 | 12.83 | 43.74 | 16.69 |

DE: Desviación Estándar. *: Valores mayores a los datos de referencia.

FIGURAS

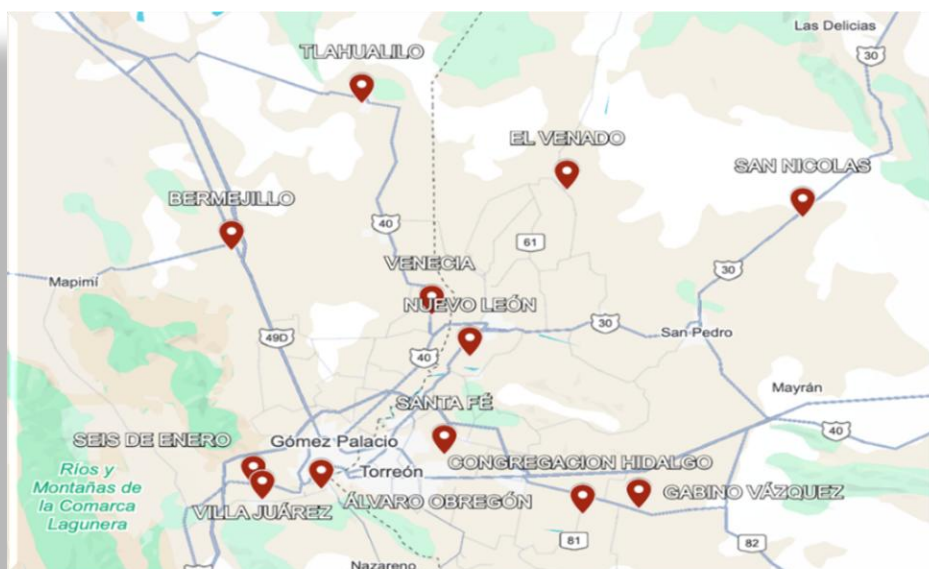


Figura 4. Distribución de las localidades de la CL de los hatos incluidos en el estudio.

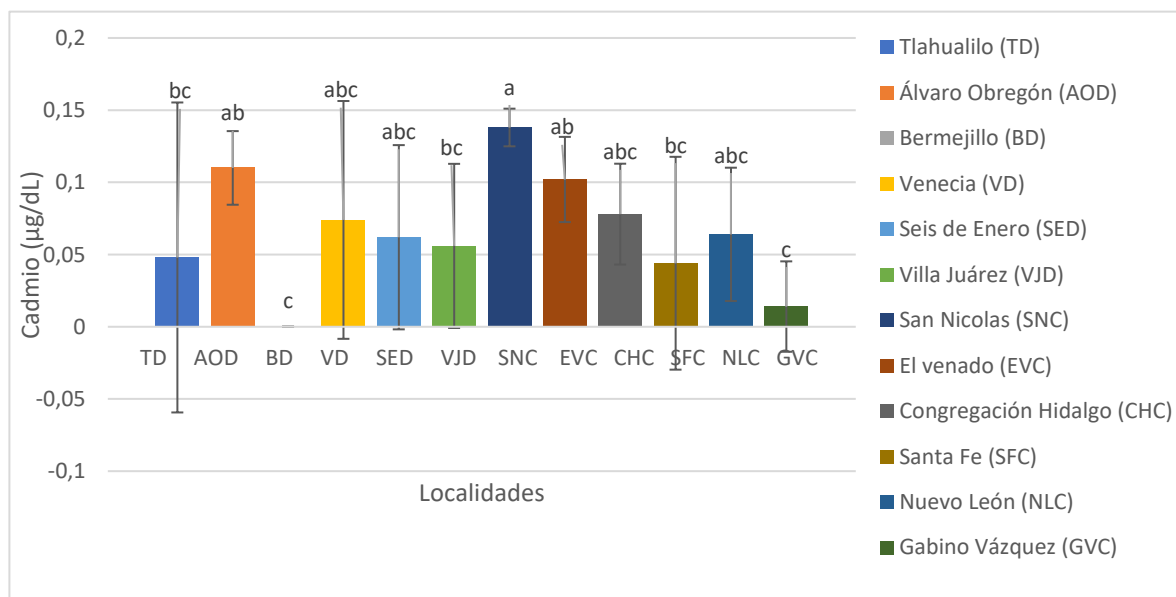


Figura 5. Concentraciones de cadmio en sangre en cabras determinado en hatos incluidos en el estudio. (Media \pm DE) *Valores con la misma letra son estadísticamente similares (Duncan, $p < 0.05$). DE: Desviación estándar.

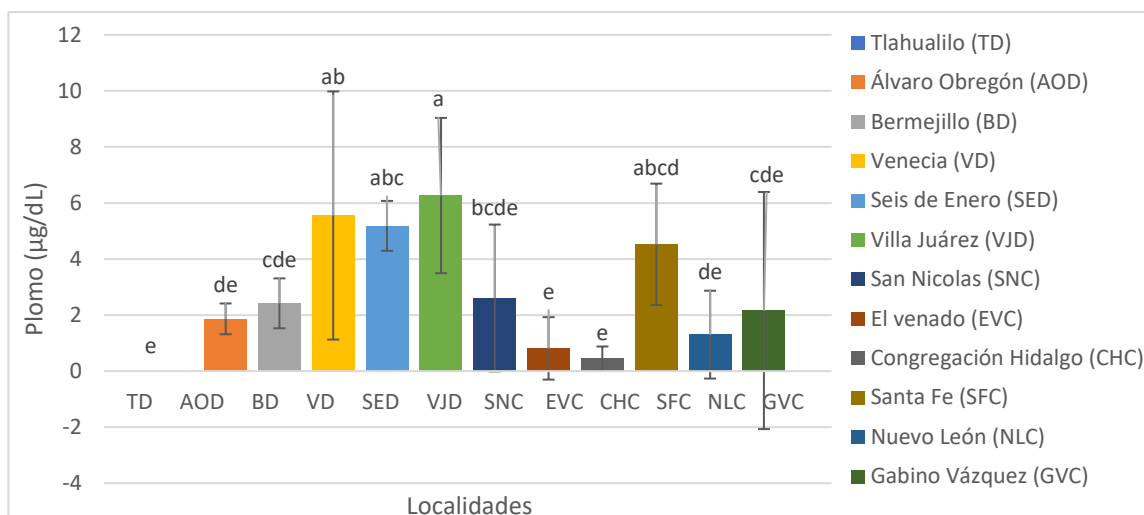


Figura 6. Concentraciones de plomo en sangre en cabras determinado en hatos incluidos en el estudio. (Media \pm DE) *Valores con la misma letra son estadísticamente similares (Duncan, $p < 0.05$). DE: Desviación estándar.

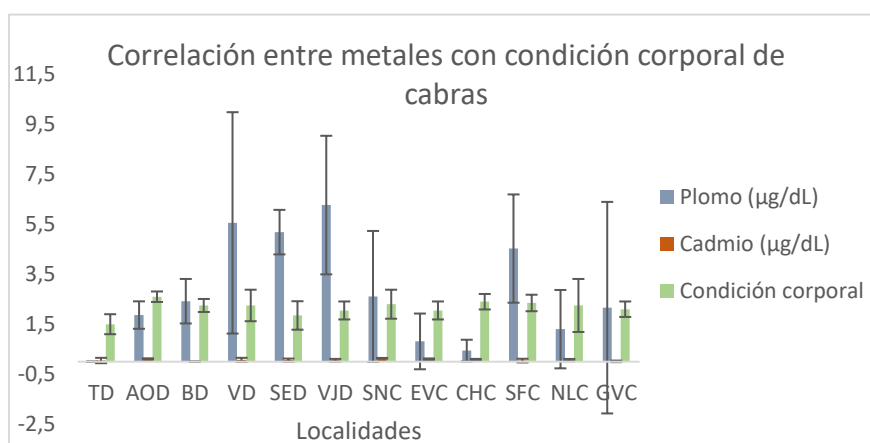


Figura 7. Correlación entre los niveles de cadmio y plomo, vs la relación con la condición corporal de las cabras. Media \pm DE. DE: Desviación estándar.

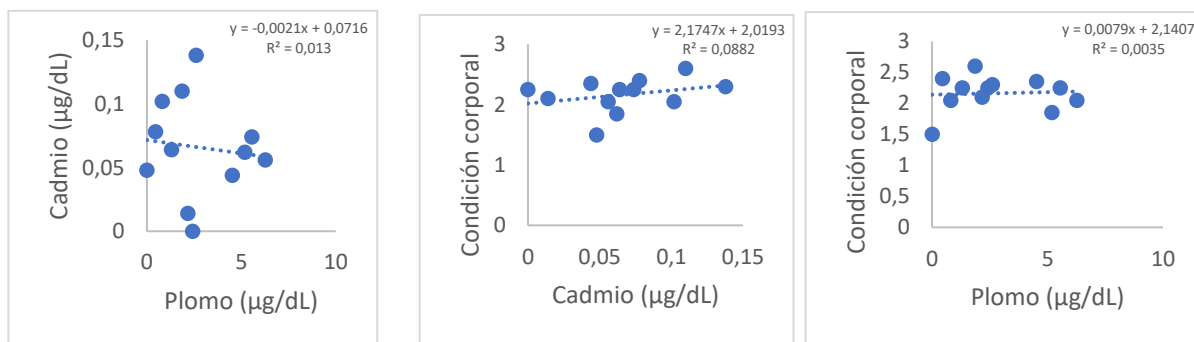


Figura 8. Relación entre los niveles séricos de cadmio y plomo, vs la condición corporal de las cabras. Pendiente de la regresión lineal y el coeficiente de determinación (R^2).

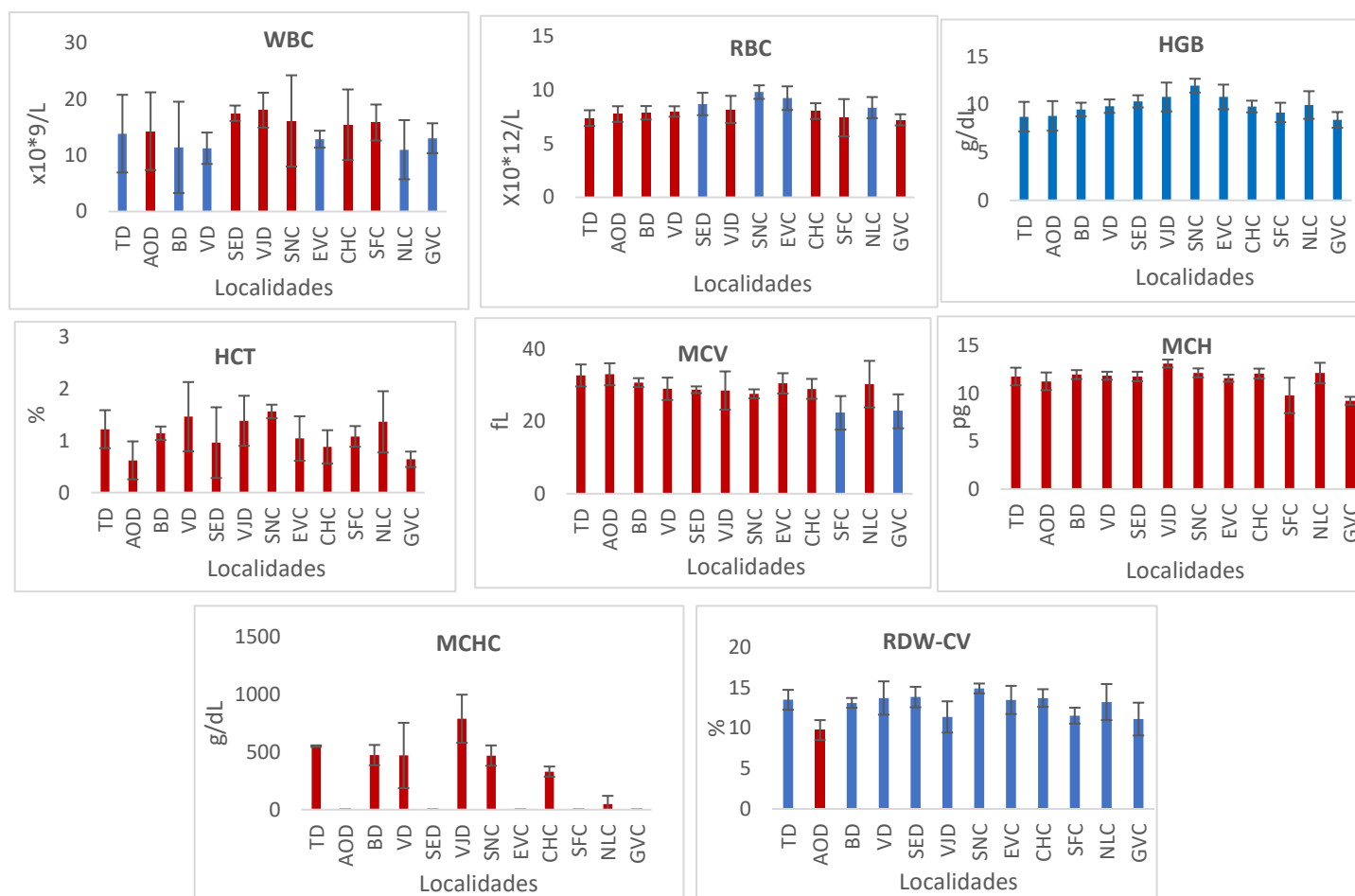


Figura 9. Determinación de parámetros de biometría hemática de cabras incluidas en el estudio en diferentes localidades de la CL. Media \pm DE. DE: Desviación estándar.

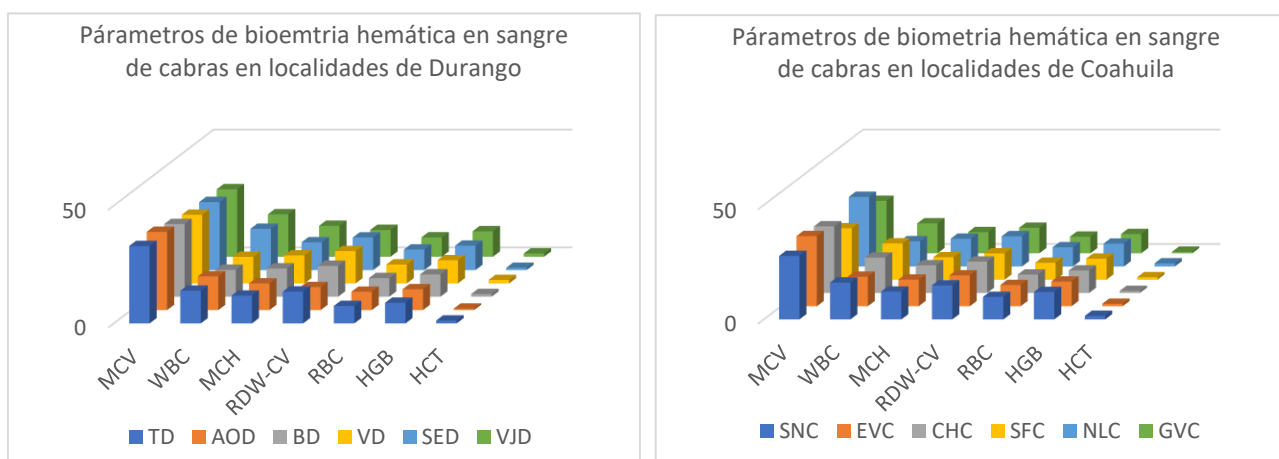


Figura 10. Determinación de diferentes parámetros de biometría hemática de cabras incluidas en el estudio por estados.

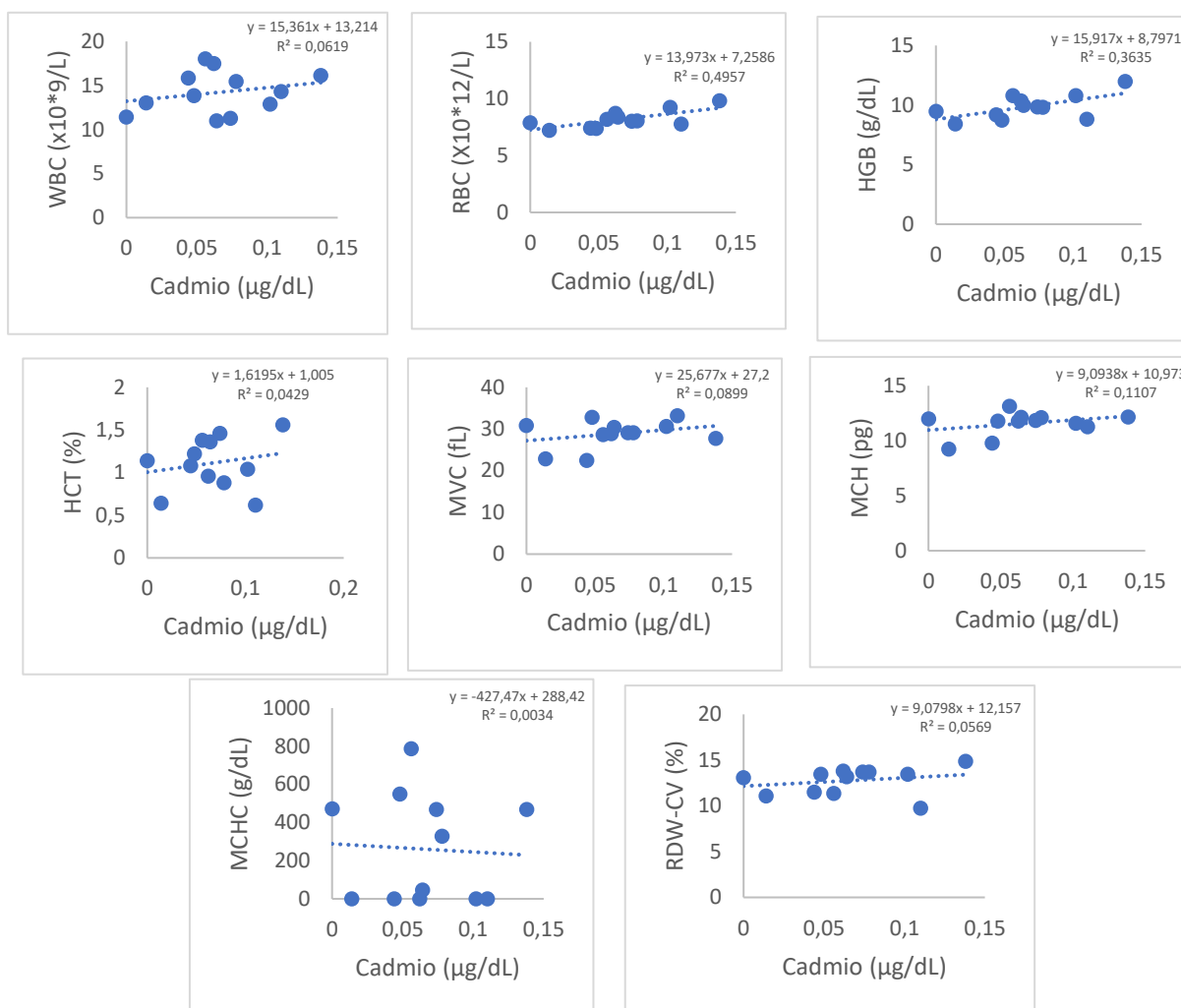


Figura 11. Relación entre los niveles séricos de cadmio y parámetros de biometría hemática de cabras. Pendiente de la regresión lineal y el coeficiente de determinación (R^2).

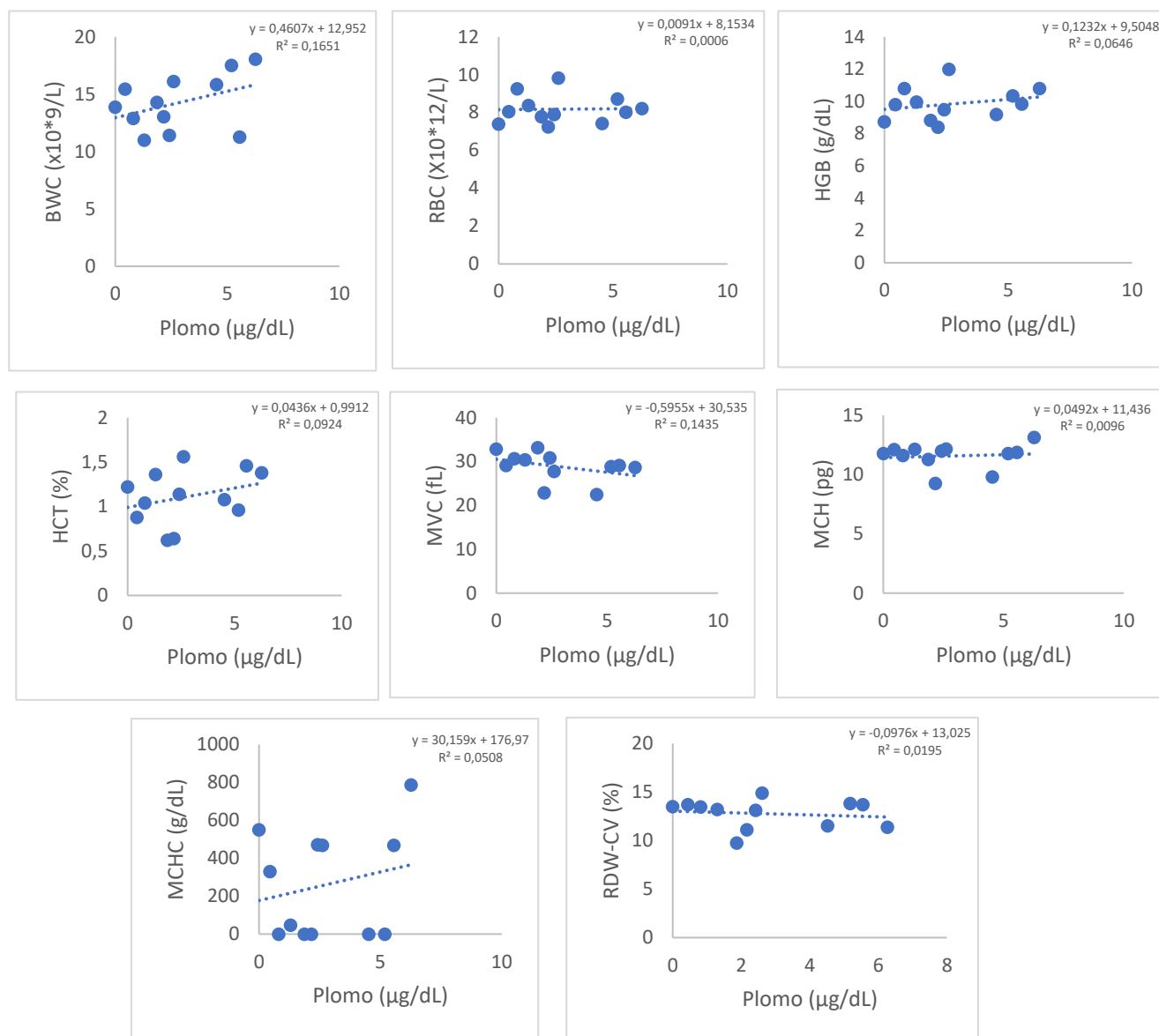


Figura 12. Relación entre los niveles séricos de plomo y parámetros de biometría hemática de las cabras. Pendiente de la regresión lineal y el coeficiente de determinación (R^2).

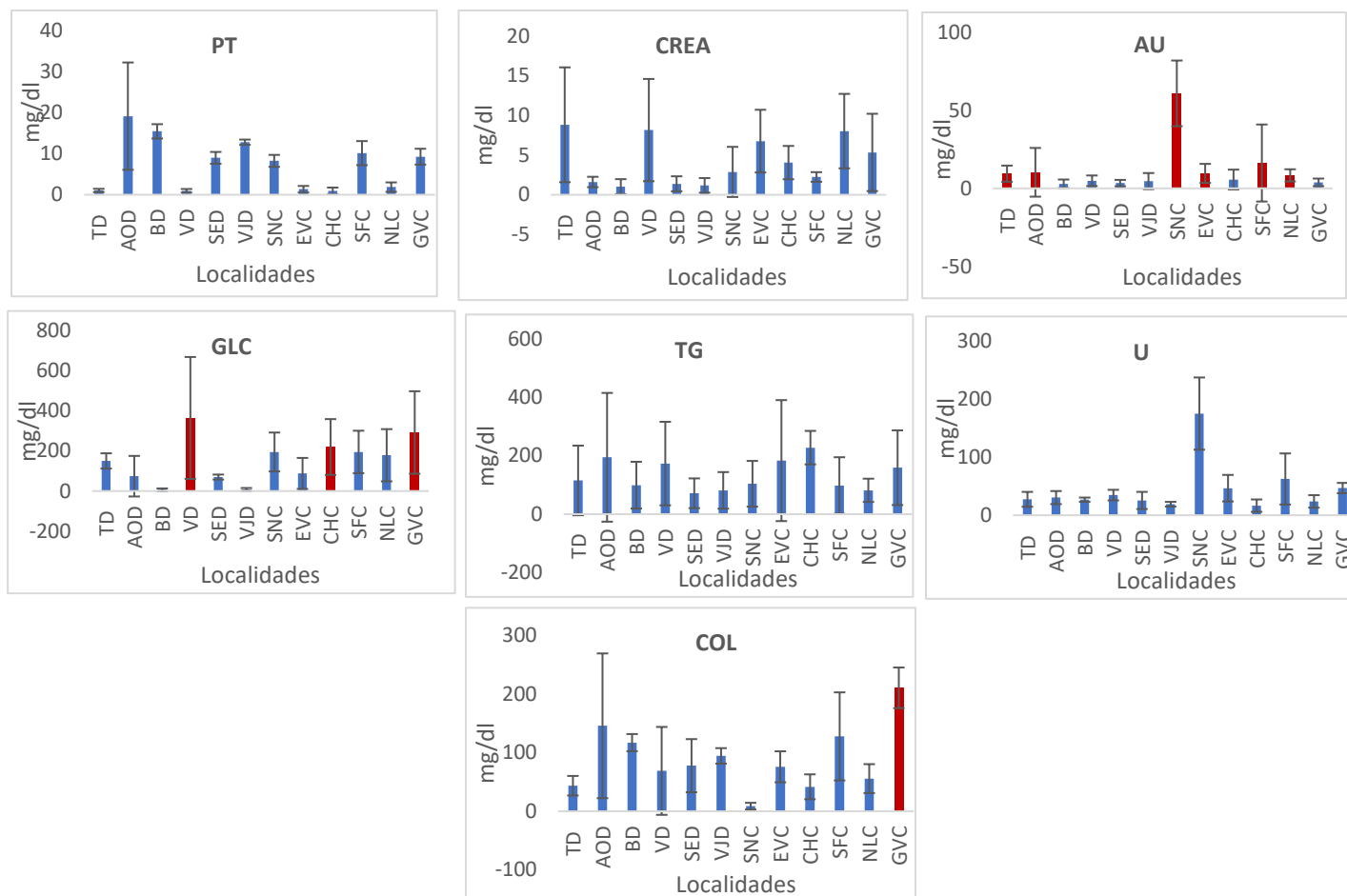


Figura 13. Determinación de parámetros de bioquímica sanguínea de cabras incluidas en el estudio en diferentes localidades de la CL. Media \pm DE. DE: Desviación estándar.

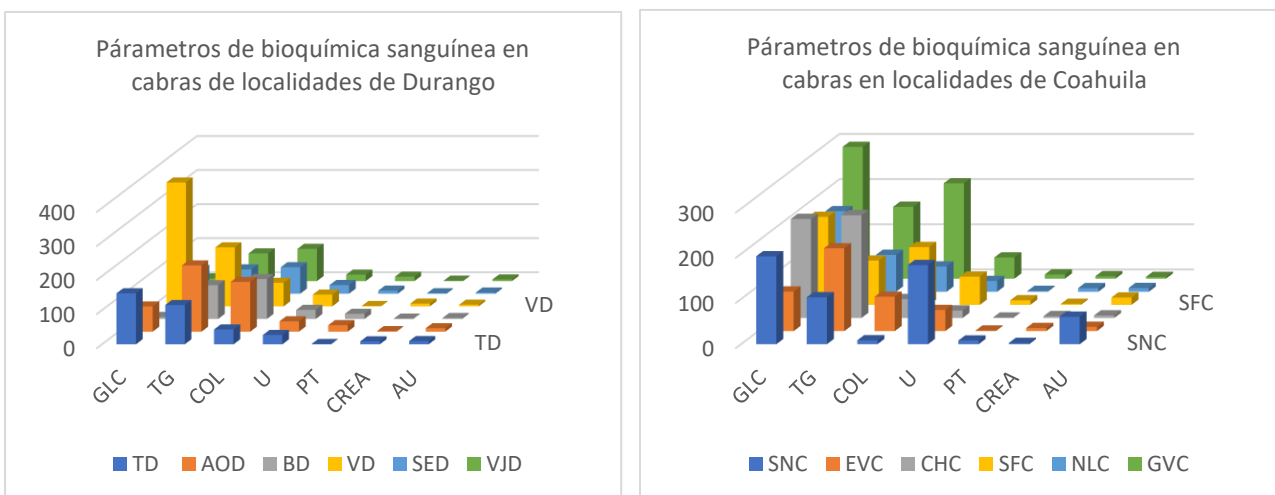


Figura 14. Determinación de diferentes parámetros de bioquímica sanguínea de cabras incluidas en el estudio por estados.

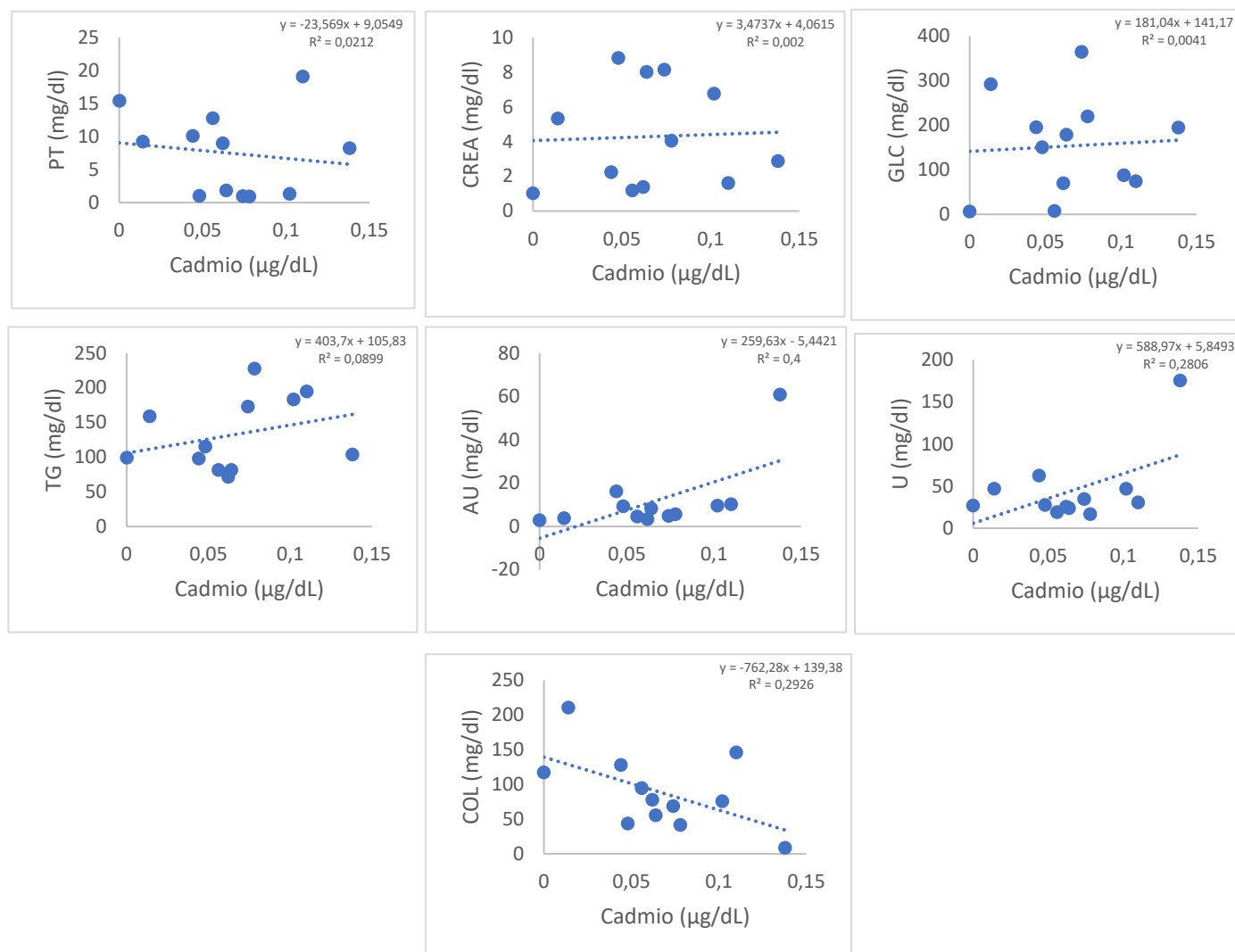


Figura 15. Relación entre los niveles séricos de cadmio y parámetros de bioquímica sanguínea de cabras. Pendiente de la regresión lineal y el coeficiente de determinación (R^2).

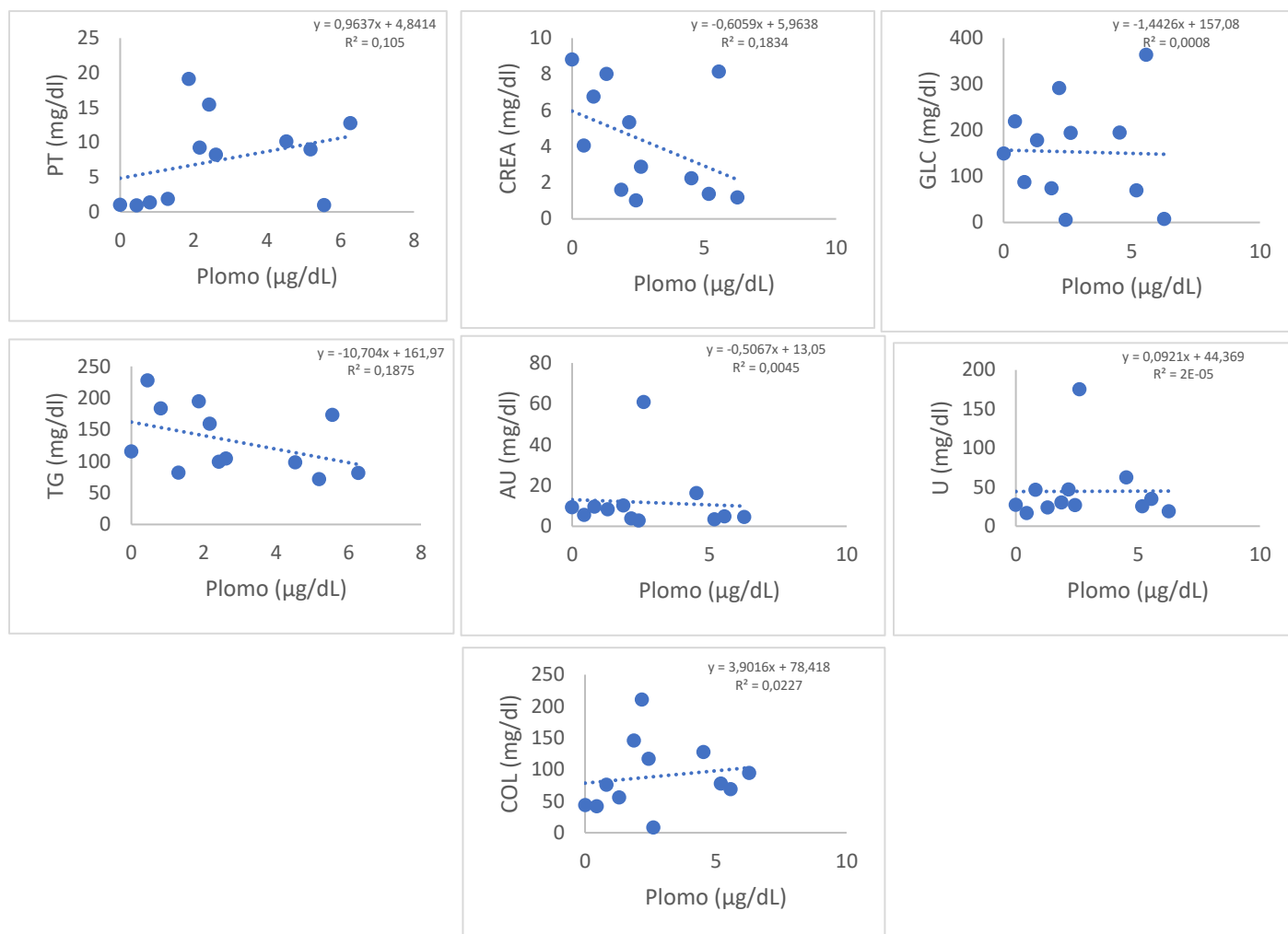


Figura 16. Relación entre los niveles séricos de plomo y parámetros de bioquímica sanguínea de cabras. Pendiente de la regresión lineal y el coeficiente de determinación (R^2).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, A. S. S., Sultana, S., Habib, A., Ullah, H., Musa, N., Hossain, M. B., Rahman, M. M., & Sarker, M. S. I. (2019). Bioaccumulation of heavy metals in some commercially important fishes from a tropical river estuary suggests higher potential health risk in children than adults. *PLOS ONE*, 14(10), e0219336. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219336>
- Akar, Y., Ahmad, N., & Khalid, M. (2018). The effect of cadmium on the bovine in vitro oocyte maturation and early embryo development. *International journal of veterinary science and medicine*, 6, S73-S77. <https://doi.org/10.1016/j.ijvsm.2018.03.001>
- Ali, H., & Khan, E. (2019). Trophic transfer, bioaccumulation, and biomagnification of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in food chains/webs—Concepts and implications for wildlife and human health. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 25(6), 1353-1376. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1469398>
- Ali, M. M., Hossain, D., Al-Imran, Khan, M. S., Begum, M., & Osman, M. H. (2021). Environmental pollution with heavy metals: A public health concern. En Heavy metals—their environmental impacts and mitigation. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96805>
- Alperkhedri, A. S., Abdullah, M. K., & Khidhir, Z. K. (2018). Detection of some heavy metals residues in the local goat meat in Kirkuk during the winter and summer seasons. *In JZS. Special Issue, 2nd Int. Conference of Agricultural Sciences*.
- Azpilcueta, M. E., Pedroza Sandoval, A., Sánchez Cohen, I., Jacobo Salcedo, M. D. R., & Trejo-Calzada, R. (2017). Calidad química del agua en un área agrícola de maíz forrajero (*Zea mays* L.) en la Comarca Lagunera, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(1), 75–83. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.07>
- Benin AL, Sargent JD, Dalton M, Roda S. (1999). High Concentrations of heavy metals in neighborhoods near ore smelters in Northern Mexico. *Environmental Health Perspectives* 107, 279-284. <https://doi.org/doi:10.1289/ehp.99107279>

- Bishnu-Angon, P., Islam, M. S., KC, S., Anjum, N., Poudel, A., & Akter-Suchi, S. (2024). Sources, effects, and current perspectives of heavy metal contamination: Soil, plants, and human food chain. *Heliyon*, 10(7), e28357. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28357>
- Bressler, J. P., Olivi, L., Cheong, J. H., Kim, Y., & Bannona, D. (2004). Divalent metal transporter 1 in lead and cadmium transport. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1012(1), 142-152. <https://doi.org/10.1196/annals.1306.011>
- Cannon, H. L., Connally, G. G., Epstein, J. B., Parker, J. G., Thornton, I., & Wixson, G. (1978). Rocks: geological sources of most trace elements. In *report to the workshop at south scas plantation Captiva Island, FL, US. Geochem Environ* (Vol. 3, pp. 17-31).
- Cervantes, M. C., & Franco, A. M. (2006). Diagnóstico ambiental de la Comarca Lagunera. In Á. López López y R. Carmona Mares (Presidencia), *Foro Interdisciplinario sobre la Comarca Lagunera. Simposio llevado a cabo en la sede de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, Ciudad de México, México*. 1-2 pp. <http://www.observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egall1/Procesosambientales/Impactoambiental/22.pdf>
- Cowan, V., & Blakley, B. (2016). Acute lead poisoning in livestock in western Canada: A 16-year retrospective study of diagnostic case records. *The Canadian Veterinary Journal*, 57(4), 421–426. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4790235/>
- Domínguez-Zúñiga, L. I., Puente-Valenzuela, C. O., Estrada-Arellano, J. R., Aguirre-Acosta, E., & Aguillón-Gutiérrez, D. R. (2021). Concentración de metales pesados en hongos de la zona metropolitana de la Comarca Lagunera, México. *Scientia fungorum*, 52, e1389. <https://doi.org/10.33885/sf.2021.52.1389>
- El Siglo de Torreón. (2024). Lidera Comarca Lagunera producción de leche cabra, una oportunidad de desarrollo para los caprinocultores. <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/2024/lidera-comarca-lagunera-produccion-de-leche-cabra-una-oportunidad-de-desarrollo-para-los-caprinocultores.html>
- Emara, E. M., Imam, H., Song, H., & Liu, S. (2020). Detection of heavy metals using laser-induced breakdown spectroscopy technique for both horse hair and goat hair. *Journal of Laser Applications*, 32(4). <https://doi.org/10.2351/7.0000143>

FAOSTAT (2024). *Food and agriculture data*. (Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations). Available online at: <https://www.fao.org/faostat/en/data/QCL>

Freeman, G. B., Johnson, J. D., Liao, S. C., Feder, P. I., Killinger, J. D., & Bergstrom, P. D. (1991). Effect of soil dose on bioavailability of lead from mining waste soil in rats. *Journal of Chemical Speciation and Bioavailability*, 3(4), 121–128. <https://doi.org/10.1080/09542299.1991.11083163>

George, J. W., & Duncan, J. R. (1979). The hematology of lead poisoning in man and animals. *Veterinary Clinical Pathology*, 8(1), 23-30. <https://doi.org/10.1111/j.1939-165X.1979.tb00878.x>

Ghori, N. H., Ghori, T., Hayat, M. Q., Imadi, S. R., Gul, A., Altay, V., & Ozturk, M. (2019). Heavy metal stress and responses in plants. *International journal of environmental science and technology*, 16(3), 1807-1828. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02215-8>

Gidlow, D. A. (2015). Lead toxicity. *Occupational medicine*, 65(5), 348-356. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqv018>

Girón Pérez, S. (2013). Evaluación de la presencia de metales pesados en suelos agrícolas con cultivos hortícolas de la Comarca Lagunera [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Repositorio Institucional UAAAN. <http://repositorio.uaaan.mx/xmlui/handle/123456789/7161>

Gioushy, M., Salem, S. E., Alsharif, A., Soliman, M. M., Gaber, A., Elkashefy, E., Albattal, S. B., & Elkhodery, S. (2025). Impacts of elevated lead levels on oxidative stress, hemodynamic, and biochemical indicators in goats. *Italian Journal of Animal Science*, 24(1), 813–826. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2025.2477030>

González, I. D. R., Hernández Andrade, L., Rojas Anaya, E., García Espinosa, G., & Mendoza Elvira, S. E. (2025). Characterization of family goat farms and identification of risk factors associated with the sanitary quality of raw milk and fresh cheese in three production areas of Mexico. *Mundo Veterinario*, 18(4), 927–938. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2025.927-938>

Haakonde, T., Yabe, J., Choongo, K., Muzandu, K., & Nakazato, Y. (2021). Uranium contamination of cow milk in the uranium mining area of Siavonga District, Zambia: A

preliminary human health risk assessment. *Bulletin of the National Research Centre*, 45, 96. <https://doi.org/10.1186/s42269-021-00556-4>

Hamzah, R. A., Alawadi, H. A. H., & Dahash, O. A. M. (2024). The effect of cadmium on hematology, oxidative stress liver and kidney function in rats. *SAR Journal of Medical Biochemistry*, 5(3), Article 001. <https://doi.org/10.36346/sarjmb.2024.v05i03.001>

Hembrom, S., Singh, B., Gupta, S. K., & Nema, A. K. (2020). A comprehensive evaluation of heavy metal contamination in foodstuff and associated human health risk: A global perspective. In P. Singh, R. Singh, & V. Srivastava (Eds.), *Contemporary environmental issues and challenges in era of climate change* (pp. 17–42). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9595-7_2

Horiguchi, H., Oguma, E., & Kayama, F. (2011). Cadmium induces anemia through the interdependent progression of hemolysis, body iron accumulation, and insufficient erythropoietin production in rats. *Toxicological Sciences*, 122(1), 198–210. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfr100>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2019). Mapa de susceptibilidad del fenómeno de subsidencia en el Valle de la Comarca Lagunera, Durango y Coahuila de Zaragoza [Mapa]. INEGI. <https://www.inegi.org.mx>

JECFA (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives) (2010). Evaluation of certain food additives and contaminants: Summary and conclusions of the seventy-third meeting. World Health Organization.

Jubril, A. J., Kabiru, M., Olopade, J. O., & Taiwo, V. O. (2017). Biological monitoring of heavy metals in goats exposed to environmental contamination in Bagega, Zamfara State, Nigeria. *Advances in Environmental Biology*, 11(6), 11-18. <https://www.aensiweb.net/AENSIWEB/aeb/aeb/2017/June/11-18.pdf>

Kapoor, D., & Singh, M. P. (2021). Heavy metal contamination in water and its possible sources. In *Heavy metals in the environment* (pp. 179–189). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821656-9.00010-9>

Kerven C. (2024). Contribution of goats to climate change: How and where? *Pastoral research Policy Pract.* 14, 13988. <https://doi:10.3389/past.2024.13988/full>

Koluman N. (2023). Goats and their role in climate change. *Small Ruminant Res.* 228, 107094. <https://doi:10.1016/j.smallrumres.2023.107094>

- Kostić, M. M., Ognjanović, B., Dimitrijević, S., Zikić, R. V., Zstajn, A., Rosić, G. L., & Zivković, R. V. (1993). Cadmium-induced changes in the antioxidant and metabolic state of rat red blood cells: In vivo effects. *European Journal of Haematology*, 51(2), 86–92. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0609.1993.tb01598.x>
- Krajnc, E. I., Vos, J. G., & Van Logten, M. J. (2013). Recent animal studies with regard to cadmium toxicity. En E. H. F. Schmidt & A. G. Hildebrandt (Eds.), *Health evaluation of heavy metals in infant formula and junior food* (22^a ed., pp. 112–119). Springer-Verlag.
- Kumar, S., Prasad, S., Yadav, K. K., Shrivastava, M., Gupta, N., Nagar, S., Bach, Q.-V., Kamyab, H., Khan, S. A., Yadav, S., & Malav, L. C. (2019). Hazardous heavy metals contamination of vegetables and food chain: Role of sustainable remediation approaches – A review. *Environmental Research*, 179(Part A), 108792. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108792>
- Lauwerys, R.R., and P. Hoet. (2001). Chromium in industrial chemical exposure. In: Guidelines for Biological Monitoring. 3rd ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, pp: 77-87. <https://doi.org/10.1201/9781482293838>
- Little, B. B., Reilly, R., Walsh, B., & Vu, G. T. (2020). Cadmium is associated with type 2 diabetes in a superfund site lead smelter community in Dallas, Texas. *International journal of environmental research and public health*, 17(12), 4558. <https://doi.org/10.3390/ijerph17124558>
- Loomis, C., & Kerven, C. (2025). The environmental impact of goats: Uprooting the narrative. *Frontiers in Animal Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fanim.2025.1544366>
- Miller, J. N., & Miller, J. C. (2002). *Estadística y quimiometría para química analítica* (4.^a ed.). Prentice Hall.
- Lu C. D. (2023). The role of goats in the world: Society, science, and sustainability. *Small Ruminant Res.* 227, 107056. <https://doi:10.1016/j.smallrumres.2023.107056>
- Nakhaee, S., Amirabadizadeh, A., Brent, J., & Mehrpour, O. (2018). Impact of chronic lead exposure on liver and kidney function and hematological parameters. *Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology*, 124(5), 621–628. <https://doi.org/10.1111/bcpt.13179>
- Nawrot, T. S., Staessen, J. A., Roels, H. A., Munters, E., Cuypers, A., Richart, T., ... & Vangronsveld, J. (2010). Cadmium exposure in the population: from health risks to

strategies of prevention. *Biometals*, 23, 769-782. <https://doi.org/10.1007/s10534-010-9343-z>

Neathery, M. W., & Miller, W. J. (1975). Metabolism and toxicity of cadmium, mercury, and lead in animals: A review. *Journal of Dairy Science*, 58(12), 1767–1781. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(75\)84785-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(75)84785-0)

Njoga, E.O.; Ezenduka, E.V.; Ogbodo, C.G.; Ogbonna, C.U.; Jaja, I.F.; Ofomatah, A.C.; Okpala, C.O.R. (2021). Detection, Distribution and Health Risk Assessment of Toxic Heavy Metals/Metalloids, Arsenic, Cadmium, and Lead in Goat Carcasses Processed for Human Consumption in South-Eastern Nigeria. *Foods*, 10, 798. <https://doi.org/10.3390/foods10040798>

NOM-199-SSA1-2000, Salud ambiental. Niveles de plomo en sangre y acciones como criterios para proteger la salud de la población expuesta no ocupacionalmente. Diario Oficial de la Federación. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=751988&fecha=18/10/2002#gsc.tab=0

NOM-047-SSA1-2011, Salud ambiental-Índices biológicos de exposición para el personal ocupacionalmente expuesto a sustancias químicas. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5249877&fecha=06/06/2012#gsc.tab=0

Okoye, C. O. B., Ugwu, J. N., & Ibeto, C. N. (2010). Characterisation of rural water resources for potable water supply in some parts of South-eastern Nigeria. *Journal of Chemical Society of Nigeria*, 35(1), 83–87.

Orona-Castillo, I, Del-Toro-Sánchez, CL, Fortis-Hernández, M, Preciado-Rangel, P, Espinoza-Arellano, JJ, Rueda-Puente, E, Flores-Vázquez, M, & Cano-Ríos, P. (2022). Indicadores técnico-económicos de la producción del cultivo de tomate bajo agricultura protegida en la Comarca Lagunera, México. *Biotecnia*, 24(3), 70-76. Epub 19 de junio de 2023. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i3.1721>

Peláez-Peláez, Manuel José, Bustamante Cano, John Jairo, & Gómez López, Eyder Daniel. (2016). Precencia de cadmio y plomo en suelos y su bioacumulación en tejidos vegetales en especies de *Brachiaria* en el Magdalena medio Colombiano. *Luna Azul*, (43), 82-101. <https://doi.org/10.17151/luaz.2016.43.5>

- Perales-García, M. V., Alvarado-Martínez, L. F., Hermosillo-Salazar, L. J., Vega-Sotelo, F., & Hermosillo-Alba, M. C. (2020). Impacto de la agricultura de conservación y la aplicación de zinc en la rentabilidad sostenible de forraje de maíz-triticale en la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 47, 607-616.
- Pragna P., Chauhan S. S., Sejian V., Leury B. J., Dunshea F. R. (2018). Climate change and goat production: Enteric methane emission and its mitigation. *Animals* 8, 235. <https://doi.org/10.3390/ani8120235>
- Puls, R. (1994). Mineral levels in animal health: diagnostic data. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19952200896>
- Rajaganapathy, V., Xavier, F., Sreekumar, D., & Mandal, P. K. (2011). Heavy metal contamination in soil, water and fodder and their presence in livestock and products: a review. *Journal of Environmental Science and Technology*, 4(3), 234-249. <http://scialert.net/fulltext/?doi=jest.2011.234.249&org=11>
- Ren, Y., Luo, Q., Zhuo, S., Hu, Y., Shen, G., Cheng, H., & Tao, S. (2021). Bioaccessibility and public health risk of heavy metals in airborne particles from four northern Chinese cities. *Chemosphere*, 270, 130312. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130312>
- Robbins, C. R. (2012). Chemical and Physical Behavior of Human Hair (Vol. 4). Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2009-9>
- Russel, A. (1984). Body condition scoring of sheep. *In Practice*, 6(3), 91–93. <https://doi.org/10.1136/inpract.6.3.91>
- SADERa. (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural) (2024). *Promueve Agricultura intercalado de caprinos para mejorar productividad y resiliencia al medio ambiente*. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/promueve-agricultura-intercalado-de-caprinos-para-mejorar-productividad-y-resiliencia-al-medio-ambiente>
- SADERb (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). (2024). Descubriendo la Caprinocultura: Un Mundo de Oportunidades. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/descubriendo-la-caprinocultura-un-mundo-de-oportunidades>
- Saavedra-Silva EE, Morales-Ramírez J. 2009. Minería y metalúrgica. In: López-López A, Sánchez-Crispín A (eds.), Comarca lagunera: procesos regionales en el contexto global. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. Pp. 302-323.

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2024). Producción pecuaria por especie: Leche y carne caprina, 2022-2023. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/siap>

Sharma, R. P., Calle, J. C., Verma, D., & Shupe, J. L. (1979). Absorption of cadmium from feed and its distribution to food products of livestock. *Environmental Health Perspectives*, 28, 59–66. <https://doi.org/10.1289/ehp.792859>

Sharma, R. P., Calle, J. C., Shupe, J. L., & Bourcier, D. R. (1982). Accumulation and depletion of cadmium and lead in tissues and milk of lactating cows fed small amounts of these metals. *Journal of Dairy Science*, 65(6), 972–979. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(82\)82298-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(82)82298-4)

Silanikove N. (2000). The physiological basis of adaptation in goats to harsh environments. *Small Ruminant Res.* 35, 181–193. [https://doi:10.1016/S0921-4488\(99\)00096-6](https://doi:10.1016/S0921-4488(99)00096-6)

Swarup, D., Patra, R. C., Naresh, R., Kumar, P., & Shekhar, P. (2005). Blood lead levels in lactating cows reared in areas with high environmental lead contamination: Transfer of lead into milk. *Science of the Total Environment*, 347(1–3), 106–110. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.12.055>

Tahir, I., & Alkheraije, K. A. (2023). A review of important heavy metal toxicity with special emphasis on nephrotoxicity and its management in livestock. *Frontiers in Veterinary Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1149720>

Tang, J., Zhang, J., Ren, L., Zhou, Y., Gao, J., Luo, L., Yang, Y., Peng, Q., Huang, H., & Chen, A. (2019). Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review of heavy metal contamination. *Journal of Environmental Management*, 244, 440–447. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.061>

Thévenod, F., & Lee, W. K. (2013). Toxicology of Cadmium and Its Damage to Mammalian Organs. In: Sigel, A., Sigel, H., Sigel, R. (eds) Cadmium: From Toxicity to Essentiality. *Metal Ions in Life Sciences*, vol 11. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5179-8_14

Ubwa, S. T., Ejiga, R., Okoye, P. A. C., & Amua, Q. M. (2017). Assessment of heavy metals in the blood and some selected entrails of cows, goat and pigs slaughtered at

Wurukum Abattoir, Makurdi-Nigeria. *Advances in analytical chemistry*, 7(1), 7-12.
<https://doi:10.5923/j.aac.20170701.02>

Uchimiya, M., Bannon, D., Nakanishi, H., McBride, M. B., Williams, M. A., & Yoshihara, T. (2020). Chemical speciation, plant uptake, and toxicity of heavy metals in agricultural soils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(46), 12856-12869.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c00183>

US EPA, *Lead (AA, Furnace Technique)*, United States Environmental Protection Agency, 1978.

US EPA, *Cadmium (AA, Furnace Technique)*, United States Environmental Protection Agency, 1978.

Vargas-Mendoza, L. A., Buitrago-González, M. E., & Villegas-Méndez, L. C. (2025). Lead contamination in food in Colombia and technologies for its environmental management. *Área Ambiental*, 16(1). <https://doi.org/10.22490/21456453.7273>

Waldner, C., Checkley, S., Blakley, B., Pollock, C., & Mitchell, B. (2002). Managing lead exposure and toxicity in cow–calf herds to minimize the potential for food residues. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*, 14(6), 481–486.
<https://doi.org/10.1177/104063870201400606>

World Bank (2022). *The world by income and region*. Available online at: <https://datatopics.worldbank.org/world-development-indicators/the-world-by-income-and-region.html>

Yuan, Z., Luo, T., Liu, X., Hua, H., Zhuang, Y., Zhang, X., Zhang, L., Zhang, T., Xu, W., & Ren, J. (2019). Tracing anthropogenic cadmium emissions: From sources to pollution. *Science of the Total Environment*, 676, 87–96.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.250>

Zhang, X., Yan, L., Liu, J., Zhang, Z., & Tan, C. (2019). Removal of different kinds of heavy metals by novel PPG-nZVI beads and their application in simulated stormwater infiltration facility. *Applied Sciences*, 9(20), 4213. <https://doi.org/10.3390/app9204213>

Zyambo, G., Yabe, J., Muzandu, K., M'kandawire, E., Choongo, K., Kataba, A., Chawinga, K., Liazambi, A., Nakayama, S. M. M., Nakata, H., & Ishizuka, M. (2022). Human health risk assessment of lead exposure via consumption of raw cow's milk produced near a lead–zinc mine in Kabwe, Zambia. *International Journal of*

Environmental Research and Public Health, 19(8), 4757.
<https://doi.org/10.3390/ijerph19084757>

ANEXOS

A1. Memoria fotográfica



B1. Análisis estadístico

Procedimiento ANOVA

Variable dependiente: dato

| Fuente | DF | Suma de cuadrados | Cuadrado de la media | F-Valor | Pr > F |
|----------------|----|-------------------|----------------------|---------|--------|
| Modelo | 11 | 0.08395833 | 0.00755076 | 2.45 | 0.0163 |
| Error | 48 | 0.14820000 | 0.00308750 | | |
| Total correcto | 59 | 0.23125833 | | | |

| R-cuadrado | Coef Var | Raiz MSE | dato Media |
|------------|----------|----------|------------|
| 0.359158 | 84.48295 | 0.055565 | 0.065833 |

| Fuente | DF | Anova SS | Cuadrado de la media | F-Valor | Pr > F |
|--------|----|------------|----------------------|---------|--------|
| Trat | 11 | 0.08395833 | 0.00755076 | 2.45 | 0.0163 |

Número de medias: 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
Rango crítico: .07066 .07431 .07671 .07845 .07979 .08085 .08172 .08244 .08305 .08358 .08403

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

| Duncan Agrupamiento | Media | N | Trat |
|---------------------|---------|---|------|
| A | 0.13880 | 5 | 1 |
| B | 0.11000 | 5 | 6 |
| B | 0.10200 | 5 | 2 |
| B | 0.07880 | 5 | 3 |
| B | 0.07400 | 5 | 9 |
| B | 0.06400 | 5 | 5 |
| B | 0.06200 | 5 | 10 |
| B | 0.05680 | 5 | 11 |
| B | 0.04880 | 5 | 4 |
| B | 0.04400 | 5 | 8 |
| B | 0.01400 | 5 | 12 |
| C | 0.00000 | 5 | 7 |

SNC
AOD
EVC
CHC
VD
NLC
SED
VID
TD
SFC
GVC
BD

ANOVA y comparación de medias Cadmio

Procedimiento ANOVA

Variable dependiente: dato

| Fuente | DF | Suma de cuadrados | Cuadrado de la media | F-Valor | Pr > F |
|----------------|----|-------------------|----------------------|---------|--------|
| Modelo | 11 | 246.4490583 | 22.4044598 | 4.30 | 0.0002 |
| Error | 48 | 258.0853600 | 5.2101117 | | |
| Total correcto | 59 | 496.5344183 | | | |

| R-cuadrado | Coef Var | Raiz MSE | dato Media |
|------------|----------|----------|------------|
| 0.496338 | 82.63683 | 2.282567 | 2.762167 |

| Fuente | DF | Anova SS | Cuadrado de la media | F-Valor | Pr > F |
|--------|----|-------------|----------------------|---------|--------|
| Trat | 11 | 246.4490583 | 22.4044598 | 4.30 | 0.0002 |

Número de medias: 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
Rango crítico: 2.903 3.053 3.151 3.223 3.278 3.321 3.357 3.387 3.412 3.433 3.452

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

| Duncan Agrupamiento | Media | N | Trat |
|---------------------|-------|---|------|
| A | 6.266 | 5 | 11 |
| A | 5.554 | 5 | 9 |
| A | 5.184 | 5 | 10 |
| A | 4.526 | 5 | 8 |
| B | 2.610 | 5 | 1 |
| B | 2.420 | 5 | 7 |
| B | 2.162 | 5 | 12 |
| D | 1.866 | 5 | 6 |
| D | 1.302 | 5 | 5 |
| E | 0.812 | 5 | 2 |
| E | 0.444 | 5 | 3 |
| E | 0.000 | 5 | 4 |

VID
VD
SED
SFC
SNC
BD
GVC
AOD
NLC
EVC
CHC
TD

ANOVAS y comparación de medias Plomo

Sistema SAS 15:38 Thursday, June 3, 2025 1

Procedimiento CORR

1 Con Variables: CC
2 Variables: Pb Cd

Estadísticos simples

| Variable | N | Media | Desviación típica | Mediana | Mínimo | Máximo |
|----------|----|---------|-------------------|---------|---------|---------|
| CC | 12 | 2.16250 | 0.28455 | 2.25000 | 1.50000 | 2.60000 |
| Pb | 12 | 2.76217 | 2.11681 | 2.29100 | 0 | 6.26600 |
| Cd | 12 | 0.06583 | 0.03886 | 0.06300 | 0 | 0.13800 |

Coefficientes de correlación Spearman, N = 12
Prob > |r| suponiendo H0: Rho=0

| | Pb | Cd |
|----|--------------------|-------------------|
| CC | -0.03880 0.9047 | 0.37038 0.2360 |

Correlación entre Cd y Pb con la Condición Corporal de las cabras del estudio.

| | | | | | | |
|--|----|----------|-------------------|------------------------------|--------|---------|
| Sistema SAS | | | | 15:44 Thursday, June 3, 2025 | | 1 |
| Procedimiento CORR | | | | | | |
| 2 Variables: Pb Cd | | | | | | |
| Estadísticos simples | | | | | | |
| Variable | N | Media | Desviación típica | Mediana | Mínimo | Máximo |
| Pb | 12 | 2.76217 | 2.11681 | 2.29100 | 0 | 6.26600 |
| Cd | 12 | 0.06583 | 0.03886 | 0.06300 | 0 | 0.13800 |
| Coeficientes de correlación Spearman, N = 12 | | | | | | |
| Prob > r suponiendo H0: Rho=0 | | | | | | |
| | | Pb | Cd | | | |
| | Pb | 1.00000 | -0.15385 | | | |
| | | | 0.6331 | | | |
| | Cd | -0.15385 | 1.00000 | | | |
| | | 0.6331 | | | | |

Correlación entre Cd y Pb.

| | | | | | | | | | |
|--|--------|--------------------|--------------------|------------------------------|-----|-----|------|--------|---|
| Sistema SAS | | | | 16:07 Thursday, June 3, 2025 | | | | | 1 |
| Procedimiento CORR | | | | | | | | | |
| 8 Con Variables: | WBC | RBC | HGB | HCT | MCV | MCH | MCHC | RDW_CV | |
| 2 Variables: | Pb | Cd | | | | | | | |
| Coeficientes de correlación Spearman, N = 12 | | | | | | | | | |
| Prob > r suponiendo H0: Rho=0 | | | | | | | | | |
| | | Pb | Cd | | | | | | |
| | WBC | 0.37762 0.2262 | 0.10490 0.7456 | | | | | | |
| | RBC | 0.16783 0.6021 | 0.62238 0.0307 | | | | | | |
| | HGB | 0.36077 0.2493 | 0.52189 0.0818 | | | | | | |
| | HCT | 0.38462 0.2170 | 0.07692 0.8122 | | | | | | |
| | MCV | -0.52448 0.0800 | 0.19580 0.5419 | | | | | | |
| | MCH | 0.19264 0.5486 | 0.25219 0.4291 | | | | | | |
| | MCHC | 0.13052 0.6860 | -0.17403 0.5886 | | | | | | |
| | RDW_CV | -0.00350 0.9914 | 0.38879 0.2116 | | | | | | |

Correlación entre Cd y Pb respecto a diferentes parámetros evaluados de biometría hemática en cabras.

7 Con Variables: GLC TG COL U PT CREA AU
 2 Variables: Plomo Cadmio

Coeficientes de correlación Spearman, N = 12
 Prob > |r| suponiendo H0: Rho=0

| | Plomo | Cadmio |
|------|--------------------|--------------------|
| GLC | -0.09790 0.7621 | 0.13986 0.6646 |
| TG | -0.55245 0.0625 | 0.44755 0.1446 |
| COL | 0.30070 0.3423 | -0.49650 0.1006 |
| U | 0.11888 0.7129 | 0.09790 0.7621 |
| PT | 0.39161 0.2081 | -0.31469 0.3191 |
| CREA | -0.49650 0.1006 | 0.19580 0.5419 |
| AU | -0.27273 0.3911 | 0.58741 0.0446 |

Correlación entre Cd y Pb respecto a diferentes parámetros evaluados de bioquímica sanguínea en cabras.