

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA

**DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS, PLOMO Y CADMIO,
EN LECHE CRUDA DE VACA DISTRIBUIDA EN ZONAS MINERAS DE IZABAL:
EL ESTOR Y LIVINGSTON**

Informe de Tesis

María Fernanda Castillo Gutiérrez
Química Farmacéutica

Guatemala, 22 de febrero de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA

**DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS, PLOMO Y CADMIO,
EN LECHE CRUDA DE VACA DISTRIBUIDA EN ZONAS MINERAS DE IZABAL:
EL ESTOR Y LIVINGSTON**

Informe de Tesis

Presentado por:

María Fernanda Castillo Gutiérrez

**Para optar al título de
Químico Farmacéutico**

Guatemala, 22 de febrero de 2022

JUNTA DIRECTIVA

M.A. Pablo Ernesto Oliva Soto	Decano
Licda. Miriam Roxana Marroquín Leiva	Secretaria
Dr. Juan Francisco Pérez Sabino	Vocal I
Dr. Roberto Enriquez Flores Arzú	Vocal II
Lic. Carlos Manuel Maldonado Aguilera	Vocal III
Br. Giovanni Rafael Funez Tovar	Vocal IV
Br. Carol Merari Caceros Castañeda	Vocal V

DEDICATORIA

A Dios: por darme la fortaleza, sabiduría y entendimiento para alcanzar esta meta.

A mi padre: en memoria de mi padre Víctor Castillo, por su amor incondicional, por todos sus esfuerzos y sacrificios que hicieron posible que alcanzara mis metas y por ser la luz de mi camino.

A mi mami: Amabilia Gutiérrez por enseñarme a ser una mujer fuerte que no se da por vencida, por acompañarme en todas mis noches de desvelo, por su amor y apoyo incondicional y por ser mi inspiración.

A mi hermana: Dulce María por ser mi apoyo incondicional y por siempre estar conmigo.

A mis abuelos: Juan y Soledad; Blanca y Adalberto (en paz descansen) por amarme, apoyarme y siempre creer en mí. Este logro también es suyo.

A mi tía Patty: Por ser una segunda madre, por todos sus consejos, su amor incondicional y por estar conmigo desde el día en que nací.

A mis tíos: Omar, Suyapa, Jessica, Beto, Ana, Fernando, Maco, Betty, José Luis, Luis Antonio y Marla. Por su apoyo incondicional durante toda mi carrera.

A mis primos y primas: por todo su cariño y todos los hermosos momentos que hemos vivido juntos.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de San Carlos de Guatemala: por ser mi casa de estudios y haberme formado como profesional.

A la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia: por haberme brindado todos los conocimientos y lecciones que me han formado como persona y como profesional.

A mi asesora: MSc. Carolina Guzmán-Quilo, por todo su apoyo, conocimiento y dedicación a lo largo de esta investigación.

A mi revisora: MSc. Magda Hernández L. por su apoyo y tiempo dedicado a la revisión de esta investigación.

A la Licda. Fabiola de Micheo: por todo su apoyo, dedicación y paciencia durante la parte experimental de esta investigación.

ÍNDICE

I.	RESUMEN	8
II.	INTRODUCCIÓN	10
III.	ANTECEDENTES	11
	1. Estudios Previos.....	12
	a. Estudios Internacionales.....	12
	b. Estudios en Guatemala.....	16
IV.	JUSTIFICACIÓN.....	18
V.	OBJETIVOS	20
	1. Objetivo General.....	20
	2. Objetivos específicos	20
VI.	HIPÓTESIS	21
VII.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
	1. Universo.....	22
	2. Muestra	22
	3. Materiales.....	22
	a. Equipo	22
	b. Reactivos.....	23
	c. Cristalería	23
	4. Método	24
	a. Muestreo.....	24
	b. Codificación de la muestra.....	24
	c. Limpieza.....	25
	d. Digestión de la muestra.....	25
	e. Curvas de calibración	27
	f. Espectrofotometría de Absorción Atómica	28
	g. Análisis de Resultados	29
VIII.	RESULTADOS	30
	1. Curva de Calibración	30
	a. Plomo	30
	b. Cadmio.....	31

2. Extracción de plomo y cadmio en muestras de leche.	33
IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	43
X. CONCLUSIONES	49
XI. RECOMENDACIONES	50
XII. REFERENCIAS	51
XIII. ANEXOS	58
Anexo No. 1: Marco Teórico.....	58
a. Metales pesados.....	58
b. Leche.....	67
c. Ganadería en Guatemala	70
d. Espectrofotometría de Absorción atómica.....	71
Anexo No. 2: Mapa de derechos mineros en el Departamento de Izabal.....	73
Anexo No. 3: Lista de aldeas pertenecientes a los municipios de El Estor y Livingston	73
Anexo No. 4: Hojas de registro de datos de las muestras de leche recolectadas.	76
Anexo No. 5: Fotografías capturadas durante la colecta y análisis de muestras.	85

I. RESUMEN

La leche de vaca contribuye a la base de la dieta para una gran parte de la población guatemalteca. Desde el punto de vista nutricional, se considera a la leche como un alimento completo y equilibrado, proporcionando un alto contenido de nutrientes con relación al contenido calórico: aporta proteínas de alta calidad, carbohidratos, grasas, vitaminas liposolubles, vitaminas del complejo B y minerales, especialmente calcio y fósforo. Se estima que una ingesta de 2 a 3 raciones diarias de leche de vaca contiene la mayor parte de las necesidades de calcio en niños mayores de 2 años. Sin embargo, en ocasiones la leche puede estar contaminada con metales pesados, los cuales son perjudiciales para la salud ya que pueden provocar intoxicaciones crónicas y contribuyen al desarrollo de enfermedades como el cáncer, neuropatía periférica, enfermedades cardiovasculares e insuficiencia renal. Se ha descrito ampliamente, así mismo, el daño a nivel cognitivo especialmente en niños.

El principal objetivo de este estudio fue evaluar si había concentraciones detectables de plomo y cadmio en la leche cruda de vaca distribuida en las zonas mineras de los municipios de El Estor y Livingston, Izabal. Además, se compararon las concentraciones detectadas en las muestras analizadas con los límites máximos permisibles (LMP) de plomo y cadmio establecidos por las normas regulatorias internacionales.

Para llevar a cabo el estudio, se recurrió a la espectrofotometría de absorción atómica por horno de grafito. Se realizó una curva de calibración para plomo utilizando estándares de 2, 5 y 10 ug/L y una curva de calibración de cadmio utilizando estándares de 1, 2, 5 y 10 ug/L. Las muestras de leche fueron tratadas con ácido nítrico y ácido sulfúrico para posteriormente ser sometidas a digestión con horno de microondas. Posterior a la digestión, las muestras fueron diluidas con agua ultrapura a 25 ml. Para evaluar la exactitud del método se determinó el porcentaje de recuperación de 5 muestras fortificadas con 5 ug/L de plomo y 5 ug/L de cadmio, se obtuvo un 94.31% y 103.5% de recuperación de plomo y cadmio, respectivamente, los cuales cumplen con el criterio del *Codex Alimentarius* (80-110%).

De las veinticinco muestras de leche analizadas, 12% presentaron concentraciones de plomo por encima del límite máximo permisible, mientras que 32% de las muestras no cumplieron

con la concentración límite de cadmio. Se determinó que las muestras con concentraciones altas de plomo se colectaron en el mismo mercado del municipio de Livingston, mientras que las muestras contaminadas de cadmio procedían de cinco de los seis mercados muestreados y únicamente un mercado, en el municipio de Livingston, no presentó ninguna muestra con concentraciones por fuera de las especificaciones internacionales.

A partir de este estudio, se recomienda realizar monitoreos anuales de la leche producida y comercializada en la región de Izabal, así como de las posibles fuentes de contaminación, tales como el agua y el alimento que consumen los animales productores. También se recomienda dar capacitaciones a los productores para minimizar el riesgo de contaminación de la leche por fuentes externas, tales como los recipientes en los que la leche es almacenada y expendida.

II. INTRODUCCIÓN

Los metales pesados son especies químicas no degradables, por lo que se distribuyen en el suelo y el agua de diversos ecosistemas. La presencia de estos metales en el medio ambiente es de gran importancia, ya que generan un impacto negativo sobre la salud humana y animal (Madero & Marruego, 2011).

Se ha comprobado que la cantidad de metales pesados en cuerpos de agua y suelos en zonas industriales y mineras, que vierten sus desechos en los mismos, es elevada (Madero & Marruego, 2011).

El ganado productor de leche que se encuentra en zonas mineras suele beber agua y pastar en áreas en las cuales los niveles de metales pesados pueden ser elevados. Estudios realizados por la Organización Mundial de la Salud sobre la contaminación de leche de bovinos con metales pesados, han sugerido que los que pastorean e ingieren agua de las orillas de ríos contaminados con desechos mineros, presentan trazas de estos metales en la leche (Ayala & Romero, 2013)

Como se mencionó anteriormente, el consumo de estos metales provoca riesgos para la salud humana, por lo que es importante controlar la presencia de los mismos en alimentos de alto consumo, como lo es la leche. La intoxicación por metales pesados puede provocar síntomas neurológicos, gastrointestinales y renales. A largo plazo, metales como el cadmio, pueden ser carcinógenos en humanos (IARC, 2018) y teratogénico (Geng & Wang, 2019).

En zonas rurales, como la mayoría de regiones de Izabal, se consume leche cruda debido a que es ampliamente producida y distribuida, además de tener un precio más accesible que la leche de marcas comerciales. Así mismo, Izabal se considera una importante zona minera, rica en cuerpos de agua y en fincas ganaderas productoras de leche. Tomando en cuenta estos dos factores, es importante determinar si la leche distribuida en las zonas con mayor actividad minera presenta contaminación con metales pesados. De este modo, se puede prevenir a la población sobre, los riesgos para la salud que conlleva el consumo de estos productos.

III. ANTECEDENTES

La leche y sus derivados suelen contener metales naturalmente, tales como magnesio, hierro, manganeso, zinc y selenio, estos metales son importantes para reacciones bioquímicas debido a que actúan como coenzimas. La variabilidad mineral de la leche bovina varía durante el año y refleja los niveles minerales de los forrajes de los que se alimentan. Los niveles minerales suelen ser mayores durante el verano, esta variabilidad también presenta factores ambientales, genéticos, patológicos y fisiológicos (Monteza, 2018). Sin embargo, en algunos casos se puede detectar la presencia de metales pesados en la leche, los más comunes son plomo, cadmio, cromo, níquel y cobalto (Anexo 1). La contaminación de la leche por estos metales puede causar serios problemas de salud, tanto para el animal como para los humanos que consumen los productos derivados de la misma (Lahiji, et al., 2016).

Se sabe que los metales pesados se introducen a las plantas por medio del agua que absorben las raíces de estas. Los suelos contaminados con metales pesados contaminan los nacimientos de agua subterránea, que a su vez contaminan a las plantas y, por consiguiente, los animales que consumen estas plantas, también se contaminan (Gholizadeh y Ziarati, 2016). Los fertilizantes fosfatados y organofosforados también pueden contaminar el agua o alimento, haciendo que el animal se contamine. Estudios recientes sugieren que los animales y, por lo tanto, sus productos derivados contienen un mayor nivel de metales pesados al máximo permitido (plomo 0.02 mg/kg; cadmio: 0.30 mg/kg en productos derivados, según el Codex Alimentarius de la Food and Agriculture Organization -FAO-) cuando han consumido agua o alimentos contaminados (Pernia, et al., 2014).

Así mismo, los metales pesados pueden entrar a la cadena alimenticia por medio de contaminación procedente del procesamiento de la leche cruda, por medio del material y método de empaque o debido a malas condiciones de almacenamiento (Fathy y El, 2012).

1. Estudios Previos

a. Estudios Internacionales

A continuación, se presentan los estudios más relevantes realizados a nivel internacional sobre la determinación de niveles de plomo y cadmio en leche de bovinos.

El objetivo del estudio titulado “Metales pesados en leche de vacas alimentadas con alfalfa producida en suelos irrigados con aguas residuales en Puebla y Tlaxcala, México”, fue determinar la presencia de Cd, Pb, Ni, Cu, Cr, Zn y As en la cadena alimentaria de la leche de vaca, producida en zonas donde la alfalfa es cultivada en suelos irrigados con aguas residuales. Se muestrearon suelos y alfalfa de 16 sitios ubicados en cuatro zonas. La leche se colectó de 160 vacas, correspondiendo a 40 vacas de cuatro hatos diferentes por zona, en dos épocas del año. La leche tuvo un contenido de plomo en un rango de 0.039 a 0.05 mg/Kg, valores que se encuentran por encima del límite internacional permitido. El estudio concluye que la alfalfa es una planta acumuladora y resistente a los metales pesados, y cuando es cultivada en suelos contaminados, se convierte en un medio importante para la transferencia de metales pesados a los animales y son eliminados a través de la leche (Castro, et al., 2018).

En el estudio titulado “Direct determination of Pb in raw milk by graphite atomic absorption spectrometry (GF AAS) with electrothermal atomization sampling from slurries” se determinó la concentración de 15 muestras de leche cruda de vaca provenientes de la región de Guarapuava, Brasil. De las 15 muestras analizadas, solo una presentó contaminación por plomo, con una concentración de 37.36 $\mu\text{g/Kg}$, la cual supera la concentración máxima permitida por la Agencia Nacional de Vigilancia Sanitaria de Brasil (ANVISA), que es de 20 $\mu\text{g/Kg}$. La propiedad de la que se recolectó la muestra contaminada estaba ubicada lejos de carreteras e industrias, por lo que se

sugiere que la contaminación de la leche esté relacionada con el alimento del animal (Oliveira, et al., 2017).

En el estudio titulado “Heavy metals in cow’s milk and cheese produced in areas irrigated with waste water in Puebla, Mexico” se determinaron los niveles de plomo y arsénico en muestras de leche cruda, por medio de Espectroscopía de Absorción Atómica por Plasma Acoplado Inductivamente (AAS-ICP). Los resultados mostraron un nivel promedio de plomo de 0.03 mg/Kg, el cual está por encima del límite máximo establecido por el Codex Alimentarius y por los Estándares de la Comisión Europea (0.020 mg/Kg) (Castro, et al., 2017).

En el estudio titulado “Investigation of heavy metal contents in cow milk samples from area of Dhaka, Bangladesh” se analizaron 90 muestras de leche de marca y leche producida en la región. La concentración media de plomo en las muestras de la leche de marca y la leche producida en la región fue de 0.033 ppm y 0.012 ppm, respectivamente. Estos valores están por encima del límite máximo permitido por el Codex Alimentarius, pero se encuentran dentro de los límites permisibles según la legislación vigente de Bangladesh (Muhib, et al., 2016).

En el estudio “Levels of cadmium and lead in raw cow and buffalo’s milk samples collected from local markets of El-Behera Governorate” se analizaron 15 muestras de leche de vaca y 15 muestras de leche de búfalo. Las concentraciones medias de cadmio y plomo en la leche de vaca fueron de 0.0978 ppm y 0.3425 ppm, respectivamente. En el caso de la leche de búfalo, las concentraciones medias de cadmio y plomo fueron de 0.1892 ppm y 0.4854, respectivamente. El estudio concluye que el 80% de las muestras analizadas estaban por encima del límite permisible establecido por los Estándares Egipcios, mientras que el 20% de las muestras se encontraban dentro del límite permisible. Los autores recomiendan realizar más estudios

para identificar las causas de contaminación en la leche (El-Ansary & El-Leboundy, 2015).

González, L; Recinos, J. realizaron el estudio titulado “Determinación de la concentración de plomo y arsénico en agua para consumo animal y en leche cruda en cuatro ganaderías de El Salvador”, en el que se analizaron 16 muestras de leche cruda de vaca. El estudio concluyó que no se reportaron niveles cuantificables de plomo en las muestras de leche, por lo que puede ser consumida y comercializada sin riesgo alguno de contaminación por plomo (González y Recinos, 2015).

Najarnezhad, et al., en el estudio “Lead and Cadmium in raw buffalo, cow, and ewe milk from west Azerbaijan, Iran”, determinaron la concentración de plomo y cadmio en 300 muestras de leche cruda de búfalo, vaca y oveja provenientes de la región oeste de Azerbaiyán. Los resultados evidenciaron que la concentración media de plomo en las muestras de leche de vaca fue de 0.007 mg/Kg, con un rango de 0.005 – 0.009 mg/Kg, estas concentraciones están por debajo del límite establecido por el Codex Alimentarius. La concentración promedio de cadmio en las muestras de leche de vaca fue de 0.001 mg/kg, la cual está por debajo del límite autorizado (0.010 mg/Kg) por el Codex Alimentarius (Najarnezhad, et al., 2015).

Ismail, et al., realizaron el estudio titulado “Estimated daily intake and health risk of heavy metals by consumption of milk”, en el que se analizaron 480 muestras de leche, de las cuales 180 muestras correspondían a leche cruda de vaca, provenientes de diferentes zonas de la ciudad de Multan, Pakistán. Las determinaciones se realizaron por medio de espectrofotometría de absorción atómica. Los resultados muestran una concentración promedio de cadmio de 0.001 mg/kg, la cual está por debajo del límite establecido por la Federación Internacional de Lácteos en 1971 (0.0026 mcg/g). Se determinó que la concentración media de plomo fue de 0.014, la cual está por debajo del límite estándar de 0.02 mg/kg establecido por el Codex Alimentarius. Sin embargo,

las muestras de algunas zonas presentaron concentraciones de plomo mayores a las recomendadas, especialmente en las zonas industriales de la ciudad. El estudio concluye que, en general, la mayoría de los metales pesados mostraron concentraciones dentro de los límites aceptables, por lo que el consumo de la leche se considera seguro, en cuanto a la cantidad de metales pesados se refiere (Ismail, et al., 2015).

En la investigación titulada “Determinación de plomo y cadmio por espectrofotometría de absorción atómica en leche cruda de bovino en establos lecheros del Distrito de Chancay-Huaral” se observó que la concentración promedio de plomo en leche cruda de bovinos fue de 0.0186 mg/Kg, el 50% de los resultados se encontraban por debajo de 0.0165 mg/kg de plomo. El análisis estadístico mostró que 10 de las 30 muestras analizadas presentaron concentraciones de plomo superiores a las establecidas por la OMS (0.020 mg/kg) (Mendoza y Medina, 2013).

Nguta, J. en el estudio “Heavy metal residues in camel milk from Kenya: Health Implications” concluyó que 14 de 15 muestras analizadas (93%), presentaron concentraciones de plomo en el rango de 0.072 a 0.449 mg/Kg, las cuales están por encima del límite permitido por el Codex Alimentarius. Por lo tanto, la leche no es segura para el consumo humano (Nguta, 2012).

Asadi, et al., en el estudio titulado “Evaluation and determination of toxic metals (Lead and Cadmium) in cow milk collected from East Azerbaijan, Iran”, concluyen que, de 100 muestras recolectadas, provenientes de 8 zonas de la zona este de Azerrbairjan, las muestras presentaron concentraciones de cadmio entre 0.00057 – 0.004 mg/Kg, por lo que el 100% de las muestras se encuentran dentro de los límites máximos establecidos por el Codex Alimentarius. Por el contrario, las concentraciones de plomo permanecieron en un rango entre 0.012 – 0.182 mg/Kg. De las 100 muestras analizadas, únicamente el 28% cumplió con el límite máximo de plomo establecido por el Codex Alimentarius. El estudio concluye que el lugar de origen de las

muestras tiene un impacto significativo en el contenido de plomo, ya que los niveles más altos del metal se cuantificaron en muestras provenientes de zonas industriales (Asadi, et al., 2012).

Londoño, L. en el estudio “Presencia de metales pesados en hatos lecheros de los municipios de San Pedro y Entreríos, Antioquia, Colombia” se analizaron 140 muestras de leche fresca de vaca. El plomo presentó concentraciones en un rango de 0.102 – 0.825 ppm y el cadmio entre 0.100 – 0.320 ppm, en ambos casos las concentraciones determinadas sobrepasan los límites permitidos por el Codex Alimentarius. El estudio concluye que, al considerar los niveles de metales pesados encontrados en varias fincas y que los sistemas de riego utilizados en las mismas se sirven aguas residuales, podría explicar la acumulación elevada de los metales en la leche de los animales (Londoño, 2010).

b. Estudios en Guatemala

Hasta la fecha no se han realizado estudios en Guatemala que determinen las concentraciones de metales pesados en leche cruda de bovinos o sus derivados. Sin embargo, se han realizado estudios en los que se cuantifican los niveles de metales pesados en otros alimentos, como los que se citan a continuación:

Boy, A. en el estudio titulado “Determinación de metales pesados en agua, peces, almejas e *Hydrilla verticillata* del lago de Izabal” concluyó que no se determinó contaminación en las muestras analizadas de agua y peces del lago de Izabal, mientras que en el caso de *Hydrilla verticillata* mostró un comportamiento normal de absorción de metales pesados del entorno acuático circundante (Boy, 2015).

En el estudio titulado “Reevaluación de los niveles de plomo en tejido muscular de peces – *Cichlasoma managuense* sp. (Guapote o Pez Tigre) – del

Lago de Amatitlán, se analizaron 45 muestras tomadas en tres puntos distintos del lago. Los resultados mostraron que las concentraciones se encontraban en el rango de 0.244 mg/kg a 0.3609 mg/kg. Se concluyó que los valores de plomo encontrados no presentan variaciones significativas con respecto a la norma FAO/OPS para plomo (Morán, 2011).

En la investigación titulada “Determinación cuantitativa de arsénico, cobre, plomo y cadmio en (*Brasica oleracea*) brócoli que se cultiva en la parcela San José, Tecpán municipio de Chimaltenango” se concluye que las muestras vegetales presentaron concentraciones de plomo, cobre y arsénico por debajo del límite recomendado para consumo. Por lo tanto, se sugiere que no existe riesgo de intoxicación por el consumo de brócoli que se cultiva en la parcela San José, Tecpán (Turcios, 2010).

IV. JUSTIFICACIÓN

La leche de vaca es básica en la alimentación humana en todas las etapas de la vida, pero especialmente en la infancia. Desde el punto de vista nutricional, se considera a la leche como un alimento completo y equilibrado, proporcionando un alto contenido de nutrientes en relación al contenido calórico: aporta proteínas de alta calidad, carbohidratos, grasas, vitaminas liposolubles, vitaminas del complejo B y minerales, especialmente calcio y fósforo. Se estima que una ingesta de 2 a 3 raciones diarias de leche de vaca contiene la mayor parte de las necesidades de calcio en niños mayores de 2 años. Estas son de las razones más importantes por las cuales muchos pediatras recomiendan el consumo diario de leche y de sus derivados (Fernández, et al., 2015).

Debido a las razones mencionadas anteriormente, la leche de vaca es uno de los alimentos más consumidos. Se estima que cada ciudadano guatemalteco consume 60 litros de leche en un año. En Guatemala se produjeron, aproximadamente, 511,000,000 litros de leche sin procesar en el año 2019 (MINECO, 2019).

La leche proveniente de vacas que pastan y beben de fuentes cercanas a depósitos de metales, tienen más probabilidad de estar contaminadas con los mismos. Esto debido a la bioacumulación de los metales en las vacas y su posterior excreción por medio de la leche (Ziarati, et al., 2018).

La cercanía de las minas a los recursos hídricos representa un factor importante en la contaminación de productos alimenticios, como es el caso de la leche. Los cuerpos de agua se ven afectados en términos de calidad y cantidad, debido a que las minas suelen verter sus desechos en el agua. Entre los desechos de las minas se encuentran metales pesados, tales como el plomo y el cadmio, los cuales terminan fluyendo por los cuerpos de agua cercanos a las minas (ICEFI, 2014). Estos cuerpos de agua, en muchos casos, son los mismos que se utilizan para que las vacas productoras de leche puedan beber y también son utilizados para regar las áreas en las que el ganado suele pastar. Por lo tanto, los animales ingieren los metales pesados a través del agua o el alimento y, posteriormente, excretan una parte de los mismos por medio de la leche (Ziarati, et al., 2018).

Debido a lo anterior, surgió la necesidad de analizar la concentración de plomo y cadmio presentes en la leche producida en las zonas mineras de El Estor y Livingston, ubicadas en el Departamento de Izabal, ya que la mayoría de consumidores de leche prefieren comprar la leche cruda de vaca debido a que tiene un costo más bajo que la leche expendida en supermercados o tiendas de barrio. Por lo tanto, se evidencia si los niveles de plomo y cadmio presentes en la leche cruda de vaca expendida en las zonas mencionadas, cumplen con el límite establecido por la FAO/OMS (FAO, 1995).

V. OBJETIVOS

1. Objetivo General

- a. Evaluar la presencia de metales pesados, plomo y cadmio, en muestras de leche cruda bovina distribuidas en las zonas mineras del departamento de Izabal, Guatemala.

2. Objetivos específicos

- a. Cuantificar los niveles de plomo presentes en la leche cruda bovina distribuida en las zonas mineras de El Estor y Livingston, ubicadas en el departamento de Izabal.
- b. Cuantificar los niveles de cadmio presentes en la leche cruda bovina distribuida en las zonas mineras de El Estor y Livingston, ubicadas en el departamento de Izabal.
- c. Evaluar si las muestras cumplen con los límites máximos permisibles (LMP) de plomo y cadmio, establecidos por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – FAO – y la Comisión Europea para productos lácteos.

VI. HIPÓTESIS

Dado que este es un estudio exploratorio no se coloca hipótesis.

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Universo

El universo lo conforma la leche cruda de vaca que se produce en el Departamento de Izabal.

2. Muestra:

La muestra se conforma de la leche proveniente de los mercados ubicados en los municipios de El Estor y Livingston. El número de muestras se determinó utilizando una precisión del 20%, haciendo un total de 25 muestras, según la estimación que se presenta a continuación:

Tamaño de muestra y precisión para estimación de una proporción poblacional

Proporción esperada: 50.000%
 Nivel de confianza: 95.0%
 Efecto de diseño: 1.0

Precisión (%)	Tamaño de muestra
20.000	25

3. Materiales

a. Equipo

- Espectrofotómetro de absorción atómica AAnalyst 900 con horno de grafito y Automuestreador AS-900 Perkin Elmer.
- Balanza analítica Shimadzu AY 220.
- Micropipetas de 10 – 100 μ L y de 100 – 1000 μ L: Eppendorf Research Plus.
- Digestor por microondas marca Speed Wave, serie No. 53-0249-19-00-001.

b. Reactivos

- Agua ultrapura
- Ácido nítrico ultrapuro concentrado.
- Ácido sulfúrico concentrado
- Solución stock de plomo 1000 ppm.
- Solución stock de cadmio 1000 ppm.

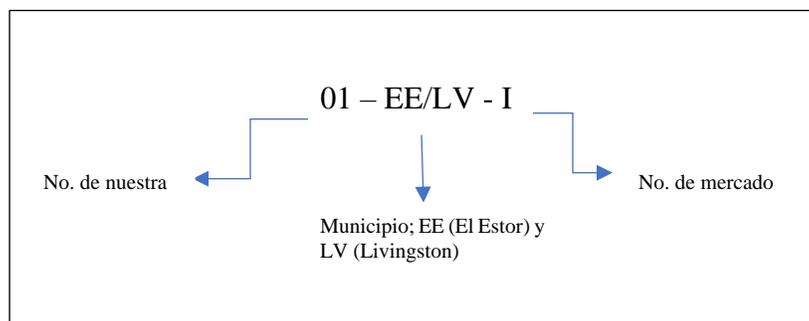
c. Cristalería

- Beakers de 10 mL
- Beakers de 50 mL
- Balones aforados de 10, 25, 500 y 1000 mL
- Varillas de agitación.

4. Método

- a. **Muestreo:** Se determinó el número de mercados en los que se tomaron las muestras. Por cuestiones logísticas se decidió muestrear los mercados más grandes de los municipios seleccionados; esto debido a que son los centros de acopio en los que los productores de leche se acercan a vender, además proporcionan una mejor opción de muestreo debido a la geografía del lugar y a posibles situaciones de inseguridad que podrían darse en el interior de las aldeas. Se georreferenció las áreas de muestreo y se procedió a realizar la compra de la leche. En el Anexo No. 3 se muestra la Tabla No. 1 y Tabla No. 2, en las cuales se enlistan las aldeas pertenecientes a los municipios de El Estor y Livingston, respectivamente, así como el número aproximado de productores lecheros que se encuentran en la zona. La leche se recolectó en los recipientes de vidrio entregados por los proveedores y, posteriormente, se trasvasaron a tubos graduados de plástico con fondo cónico y tapón de rosca de 15 mL. Las muestras se almacenaron en hieleras a una temperatura aproximada de 4 °C. En el lugar de compra se llenó la boleta de datos de muestreo (Anexo No. 4), con los datos correspondientes al lugar geográfico de la compra y las condiciones en las que los animales se alimentan, debido a que generalmente el proveedor de la leche es la persona encargada de venderla. Posteriormente, las muestras se trasladaron al Laboratorio del Departamento de Toxicología, de la Escuela de Química Farmacéutica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- b. **Codificación de la muestra:** Las muestras se numeraron conforme al sistema de codificación, tal como se explica en la Figura 1.

Figura No. 1. Código alfanumérico para la identificación de muestras de leche cruda.



Por ejemplo, la muestra 01 – EE – I corresponde a la muestra No. 1, proveniente del municipio de El Estor y recolectada en el mercado I.

- c. **Limpieza:** La cristalería y los tubos para muestra fueron tratados con ácido nítrico 20% durante 24 horas y posteriormente se enjuagaron, por triplicado, con agua ultra pura. Esto con el objetivo de prevenir que cualquier impureza presente en la cristalería contamine las muestras de análisis (Castro, et al., 2017).
- d. **Digestión de la muestra**
 - i. Se midieron 3.0 mL de muestra de leche y se agregó a un tubo de digestión.
 - ii. Se adicionaron 10.0 mL de ácido nítrico concentrado.
 - iii. Se adicionaron 3.0 mL de ácido sulfúrico concentrado.
 - iv. Se digirieron las muestras según el programa del digestor.
 - v. Se enfriaron las muestras a temperatura ambiente durante 24 horas.
 - vi. Se trasvasaron las muestras a balones aforados de 25 mL y se llevaron a volumen con agua ultrapura (Santos, et al., 2005).

Tabla 1. Condiciones de digestión de leche cruda de vaca con ácido nítrico y ácido sulfúrico.

Paso	Tiempo de rampa (min)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
1	5	15	160
2	5	15	180
3	5	5	75
4	5	5	75
5	5	5	75

e. **Curvas de calibración**

i. Preparación de disolución de plomo (10 ppm): se preparó una disolución de plomo de 10 ppm en un balón aforado de 25 ml. Para ello se midieron 250 μ L del stock de plomo (1000 ppm) y se llevó a volumen con agua ultrapura.

Posteriormente se preparó otra solución de plomo de 100 ppb, tomando 100 μ L de la solución de 10 ppm y se llevó a 10 ml con agua ultrapura.

ii. Preparación de disolución de cadmio (10 ppm): se preparó una disolución de cadmio de 10 ppm en un balón aforado de 25 ml. Para ello se midieron 250 μ L del stock de cadmio (1000 ppm) y se llevó a volumen con agua ultrapura.

Posteriormente se preparó otra solución de cadmio de 100 ppb, tomando 100 μ L de la solución de 10 ppm y se llevó a 10 ml con agua ultrapura.

iii. Curva de calibración para plomo: Se realizó una curva de calibración preparando estándares de plomo en las siguientes concentraciones: 2, 5 y 10 ppb, midiendo 200, 500 y 1000 μ L de la solución de plomo de 100 ppb en balones aforados de 10 ml, se les agregó 1 mL de ácido nítrico, se llevaron a volumen y se mezclaron.

iv. Curva de calibración para cadmio: Se realizó una curva de calibración preparando estándares de cadmio en las siguientes concentraciones: 1, 2, 5 y 10 ppb, midiendo 100, 200, 500 y 1000 μ L de la solución de cadmio de 100 ppb en balones aforados de 10 ml, se llevaron a volumen y se mezclaron.

f. **Espectrofotometría de Absorción Atómica:** Las muestras se analizaron por medio de espectrofotometría de absorción atómica, a una longitud de onda de 283 nm y 229 nm para plomo y cadmio, respectivamente. Se utilizó una lámpara sin electrodo. Las condiciones del equipo se detallan a continuación:

i. Condiciones del horno para determinación de plomo:

Temperatura (°C)	Tiempo de rampa (s)	Tiempo (s)
110	1	30
130	15	30
850	10	20
1600	0	5
2450	1	3

ii. Condiciones del horno para determinación de cadmio:

Temperatura (°C)	Tiempo de rampa (s)	Tiempo (s)
110	10	40
450	20	35
560	5	20
1630	0	3
2450	1	5
20	1	5

g. **Análisis de Resultados:** Las variables principales del estudio son los metales que se buscaron en las muestras de leche para determinar si estaban contaminadas o no: plomo medido en ppm y cadmio medido en ppm. En cada caso para cada muestra se hizo una comparación con los valores límite permitidos según la OMS y/o otros entes regulatorios. Para cada mercado se calculó el promedio y desviación estándar para los valores de plomo y cadmio en las muestras. Se calculó el promedio de todos los mercados de cada municipio y su desviación estándar y en todos los casos se comparó con los límites permitidos.

VIII. RESULTADOS

1. Curva de Calibración

a. Plomo

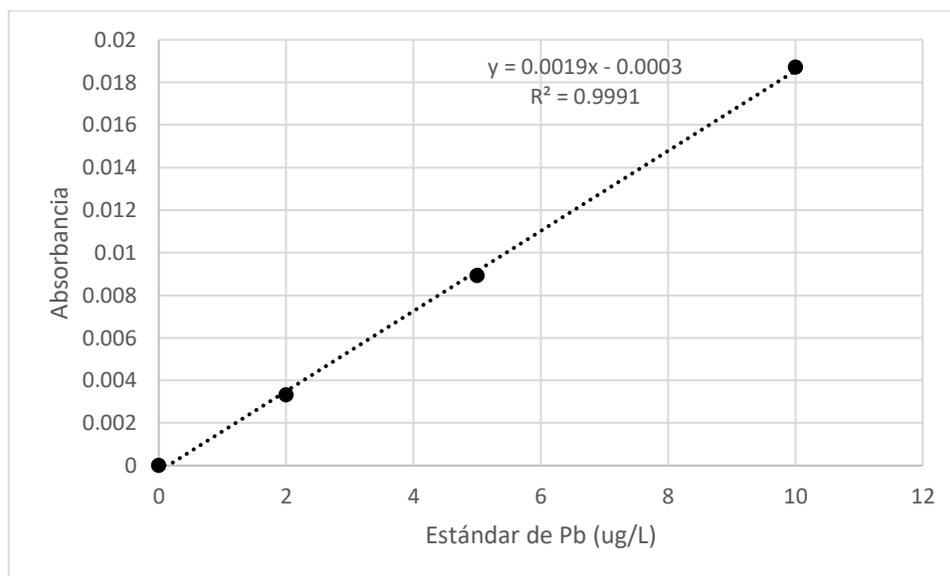
Se realizó una curva de calibración preparada con estándares de plomo a concentraciones de 2, 5 y 10 $\mu\text{g/L}$. Los datos de absorbancia se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de concentración y absorbancia obtenidos de los estándares de plomo utilizados en la curva de calibración.

<i>Std. Pb $\mu\text{g/L}$</i>	<i>Señal</i>	<i>Pb $\mu\text{/L}$</i>
<i>Blanco</i>	0.000	0.134
<i>2</i>	0.0033	1.910
<i>5</i>	0.0089	4.875
<i>10</i>	0.0187	10.080

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio del Departamento de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de regresión lineal, presentado en la Gráfica 1, obteniendo un coeficiente de correlación de 0.9995 y un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9991, tal como se muestra en la Tabla 2. Estos datos son aceptables para el análisis de plomo en las muestras.

Gráfica 1. Curva de calibración de Plomo

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el Laboratorio del Departamento de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

Tabla 2. Parámetros de la curva de calibración de plomo

R	R²	Ecuación
0.9995	0.9991	0.0019x-0.0003

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio del Departamento de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

b. Cadmio

Se realizó una curva de calibración preparada con los estándares de cadmio a concentraciones de 1, 2, 5 y 10 µg/L. Los datos de absorbancia se presentan en la Tabla 3.

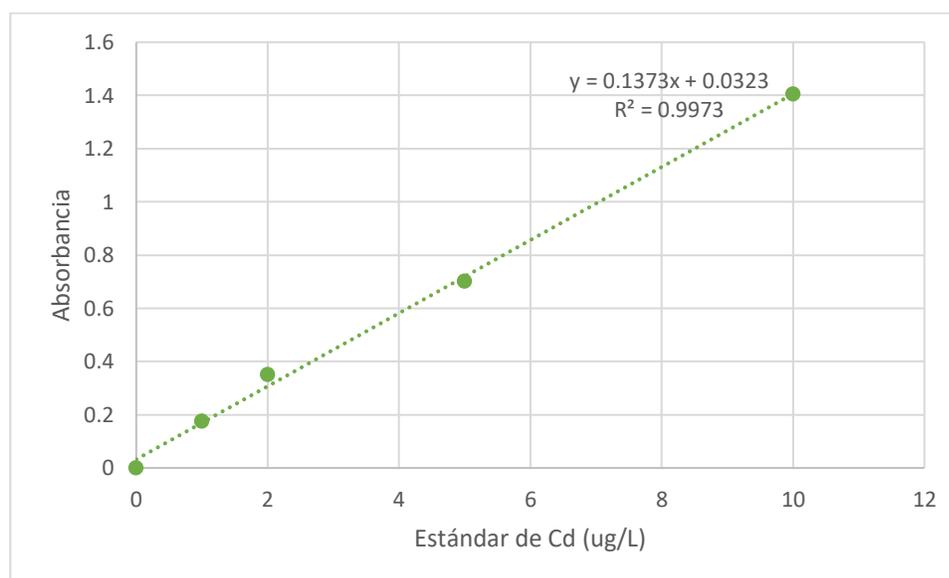
Tabla 3. Valores de concentración y absorbancia obtenidos de los estándares de cadmio utilizados en la curva de calibración.

<i>Std. Cd $\mu\text{g/L}$</i>	<i>Señal</i>	<i>Cd $\mu\text{g/L}$</i>
<i>Blanco</i>	0.000	0.000
<i>1</i>	0.1756	0.960
<i>2</i>	0.3511	2.231
<i>5</i>	0.7022	5.388
<i>10</i>	1.4044	9.764

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el Laboratorio del Departamento de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de regresión lineal, presentado en la Gráfica 2, obteniendo un coeficiente de correlación de 0.9986 y un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9973, tal como se muestra en la Tabla 4. Estos datos son aceptables para el análisis de cadmio en las muestras.

Gráfica 2. Curva de calibración de cadmio



Fuente: Datos experimentales obtenidos en el Laboratorio del Departamento de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

Tabla 4. Parámetros de la curva de calibración de cadmio

R	R²	Ecuación
0.9986	0.9973	0.1373x-0.0323

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el Laboratorio del Departamento de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

2. Extracción de plomo y cadmio en muestras de leche.

Para la extracción de metales pesados, se utilizó la digestión ácida por microondas. Se midieron 3 mL de muestra y se les agregó 10 mL de ácido nítrico ultrapuro y 3mL de ácido sulfúrico concentrado. Posteriormente se procesó por digestión de microondas bajo las condiciones que se especifican en la Tabla 5. Al finalizar la digestión, se dejó enfriar la solución durante 24 horas y se transfirió la solución a balones aforados de 25 mL, llevando a volumen con agua ultrapura.

Tabla 5. Programa de calentamiento del digestor de microondas para la digestión de leche

Paso	Tiempo de rampa (min)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
1	5	15	160
2	5	15	180
3	5	5	75
4	5	5	75
5	5	5	75

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio del Departamento de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

Posterior a esto, se realizaron las lecturas de las muestras en espectrofotometría de absorción atómica por horno de grafito bajo las condiciones detalladas en la sección de Materiales y Métodos. Para evaluar la exactitud del método se calculó el porcentaje de recuperación de cinco muestras fortificadas con 5 µg/L de estándar de plomo y 5 µg/L de cadmio, obteniéndose, en promedio, 94.3% y 103.5%, respectivamente. Los resultados se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Porcentaje de recuperación de plomo y cadmio

<i>Mx</i>	<i>Pb</i> µg/L	% de <i>recuperación</i>	<i>Cd</i> µg/L	% de <i>recuperación</i>
<i>1</i>	3.308	66.16	5.370	107.4
<i>10</i>	6.196	123.92	6.075	121.5
<i>21</i>	4.589	91.78	5.721	114.4
<i>23</i>	3.890	77.80	4.410	88.2
<i>25</i>	5.595	111.90	4.305	86.1
<i>Promedio</i>	4.716	94.31	5.176	103.5

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio del Departamento de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

El contenido de plomo total encontrado en cada mercado se muestra en las Tablas 7, 8, 9, 10 y 11. Las concentraciones totales de plomo estuvieron en un rango de 0-0.045 mg/L en los cinco mercados. Los niveles más altos de plomo se detectaron en las muestras 18 (0.045 mg/L) y 16 (0.043 mg/L), las cuales pertenecen a mercado IV de Livingston, Izabal. En la Tabla 12 se muestran los parámetros estadísticos de todas las muestras analizadas, mientras que en la Gráfica 3, se muestra una comparación de las concentraciones de plomo obtenidas con la norma de la OMS, que establece el límite en 0.020 mg/L para leche y sus derivados.

Tabla 7. Concentraciones de plomo (Pb) en muestras de leche comercializadas en el mercado I de El Estor, Izabal.

<i>Muestra</i>	<i>Pb mg/L</i>	<i>Dictamen</i>
01-EE-I	0.000	Cumple
02-EE-I	0.004	Cumple
03-EE-I	0.000	Cumple
04-EE-I	0.004	Cumple
05-EE-I	0.014	Cumple
<i>Media</i>	0.0044	
<i>Desviación estándar</i>	0.0058	

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. USAC.

Tabla 8. Concentraciones de plomo (Pb) en muestras de leche comercializadas en el mercado II de El Estor, Izabal.

<i>Muestra</i>	<i>Pb mg/L</i>	<i>Dictamen</i>
06-EE-II	0.002	Cumple
07-EE-II	0.011	Cumple
08-EE-II	0.006	Cumple
09-EE-II	0.000	Cumple
10-EE-II	0.000	Cumple
<i>Media</i>	0.0038	
<i>Desviación estándar</i>	0.0048	

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. USAC.

Tabla 9. Concentraciones de plomo (Pb) en muestras de leche comercializadas en el mercado III de Livingston, Izabal.

<i>Muestra</i>	<i>Pb mg/L</i>	<i>Dictamen</i>
<i>11-LV-III</i>	0.000	Cumple
<i>12-LV-III</i>	0.008	Cumple
<i>13-LV-III</i>	0.000	Cumple
<i>14-LV-III</i>	0.000	Cumple
<i>15-LV-III</i>	0.016	Cumple
<i>Media</i>	0.0048	
<i>Desviación estándar</i>	0.0070	

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. USAC.

Tabla 10. Concentraciones de plomo (Pb) en muestras de leche comercializadas en el mercado IV de Livingston, Izabal.

<i>Muestra</i>	<i>Pb mg/L</i>	<i>Dictamen</i>
<i>16-LV-IV</i>	0.043	No cumple
<i>17-LV-IV</i>	0.000	Cumple
<i>18-LV-IV</i>	0.045	No cumple
<i>19-LV-IV</i>	0.012	Cumple
<i>20-LV-IV</i>	0.027	No cumple
<i>Media</i>	0.0254	
<i>Desviación estándar</i>	0.0195	

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. USAC.

Tabla 11. Concentraciones de plomo (Pb) en muestras de leche comercializadas en el mercado V de Livingston, Izabal.

<i>Muestra</i>	<i>Pb mg/L</i>	<i>Dictamen</i>
21-LV-V	0.000	Cumple
22-LV-V	0.020	Cumple
23-LV-V	0.007	Cumple
24-LV-V	0.004	Cumple
25-LV-V	0.017	Cumple
<i>Media</i>	0.0096	
<i>Desviación estándar</i>	0.0085	

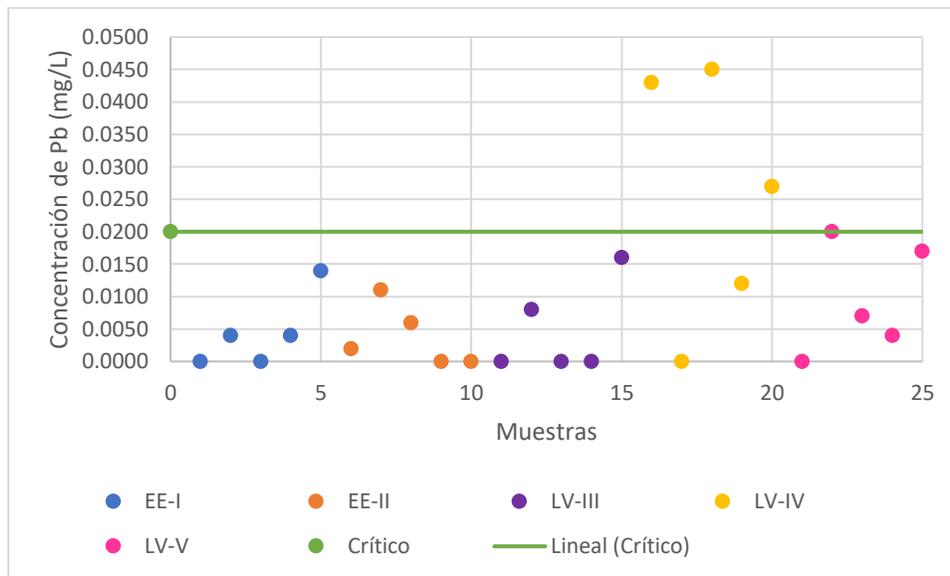
Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. USAC.

Tabla 12. Parámetros estadísticos de los niveles de plomo en leche comercializada en los mercados de El Estor y Livingston, Izabal.

<i>Estadística</i>	<i>El Estor</i>	<i>Livingston</i>
<i>Media</i>	0.00414917	0.01332278
<i>Mediana</i>	0.0029	0.007925
<i>Desviación estándar</i>	0.00501806	0.01512889
<i>Coefficiente de variación</i>	1.18703198	1.17814704
<i>Curtosis</i>	0.4472511	0.54384403

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. USAC.

Gráfica 3. Comparación de las concentraciones de plomo obtenidas con la norma de la OMS



Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. USAC.

El contenido de cadmio total encontrado en cada mercado se muestra en las Tablas 13, 14, 15, 16 y 17. Las concentraciones totales de cadmio estuvieron en un rango de 0-0.142 mg/L en los cinco mercados. Los niveles más altos de cadmio se detectaron en las muestras 8 (0.142 mg/L) y 12 (0.129 mg/L), las cuales pertenecen al mercado IV de Livingston, Izabal. En la Tabla 18 se muestran los parámetros estadísticos de todas las muestras analizadas, mientras que en la Gráfica 4, se muestra una comparación de las concentraciones de cadmio obtenidas con la norma de la Comisión Europea, que establece el límite para productos lácteos líquidos en 0.010 mg/L (Comisión Europea, 2021).

Tabla 13. Concentraciones de cadmio (Cd) en muestras de leche comercializadas en el mercado I de El Estor, Izabal.

<i>Muestra</i>	<i>Cd mg/L</i>	<i>Dictamen</i>
01-EE-I	0.045	No cumple
02-EE-I	0.002	Cumple
03-EE-I	0.005	Cumple
04-EE-I	0.001	Cumple
05-EE-I	0.009	Cumple
<i>Media</i>	0.0124	
<i>Desviación estándar</i>	0.0184	

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. USAC.

Tabla 14. Concentraciones de cadmio (Cd) en muestras de leche comercializadas en el mercado II de El Estor, Izabal.

<i>Muestra</i>	<i>Cd mg/L</i>	<i>Dictamen</i>
06-EE-II	0.007	Cumple
07-EE-II	0.008	Cumple
08-EE-II	0.142	No cumple
09-EE-II	0.012	No cumple
10-EE-II	0.051	No cumple
<i>Media</i>	0.0440	
<i>Desviación estándar</i>	0.0579	

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. USAC.

Tabla 15. Concentraciones de cadmio (Cd) en muestras de leche comercializadas en el mercado III de Livingston, Izabal.

<i>Muestra</i>	<i>Cd mg/L</i>	<i>Dictamen</i>
<i>11-LV-III</i>	0.009	Cumple
<i>12-LV-III</i>	0.129	No cumple
<i>13-LV-III</i>	0.001	Cumple
<i>14-LV-III</i>	0.000	Cumple
<i>15-LV-III</i>	0.034	No cumple
<i>Media</i>	0.0346	
<i>Desviación estándar</i>	0.0544	

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. USAC.

Tabla 16. Concentraciones de cadmio (Cd) en muestras de leche comercializadas en el mercado IV de Livingston, Izabal.

<i>Muestra</i>	<i>Cd mg/L</i>	<i>Dictamen</i>
<i>16-LV-IV</i>	0.005	Cumple
<i>17-LV-IV</i>	0.001	Cumple
<i>18-LV-IV</i>	0.002	Cumple
<i>19-LV-IV</i>	0.000	Cumple
<i>20-LV-IV</i>	0.004	Cumple
<i>Media</i>	0.0024	
<i>Desviación estándar</i>	0.0023	

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. USAC.

Tabla 17. Concentraciones de cadmio (Cd) en muestras de leche comercializadas en el mercado V de Livingston, Izabal.

<i>Muestra</i>	<i>Cd mg/L</i>	<i>Dictamen</i>
21-LV-V	0.015	No cumple
22-LV-V	0.037	No cumple
23-LV-V	0.000	Cumple
24-LV-V	0.003	Cumple
25-LV-V	0.000	Cumple
<i>Media</i>	0.0110	
<i>Desviación estándar</i>	0.0156	

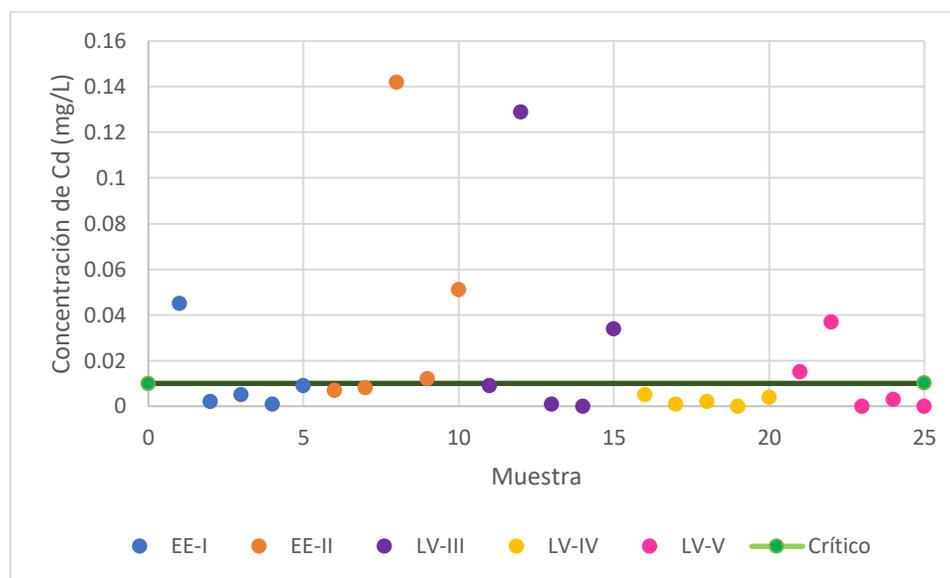
Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. USAC.

Tabla 18. Parámetros estadísticos de los niveles de cadmio en leche comercializada en los mercados de El Estor y Livingston, Izabal.

<i>Estadística</i>	<i>El Estor</i>	<i>Livingston</i>
<i>Media</i>	0.027971667	0.015985
<i>Mediana</i>	0.0082875	0.003383333
<i>Desviación estándar</i>	0.04374799	0.033358564
<i>Coficiente de variación</i>	2.349583776	3.133558797
<i>Curtosis</i>	5.836322557	10.56280594

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. USAC.

Gráfica 4. Comparación de las concentraciones de cadmio obtenidas con la norma de la Comisión Europea



Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. USAC.

En la Tabla 19 se muestra una comparación de los niveles de plomo y cadmio encontrados en las muestras con los límites establecidos por las autoridades regulatorias para productos lácteos y sus derivados.

Tabla 19. Comparación de los niveles de plomo y cadmio en las muestras de leche con los límites establecidos por las normas internacionales.

<i>Análisis</i>	<i>Norma</i>	<i>Estándar Internacional</i>	<i>Promedio obtenido</i>	<i>Porcentaje de muestras que superan el límite</i>
<i>Plomo</i>	OMS	0.02 mg/L	0.010	12%
<i>Cadmio</i>	Comisión Europea	0.01 mg/L	0.021	32%

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. USAC.

IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con el objetivo de evaluar la linealidad, se realizaron curvas de calibración con estándares de plomo y cadmio, en concentraciones de 2, 5 y 10 $\mu\text{g/L}$ y 1, 2, 5 y 10 $\mu\text{g/L}$, respectivamente. En la Tabla 1 se pueden observar los valores de absorbancia y concentración para los estándares de plomo, en este caso el coeficiente de correlación fue de 0.9995, lo cual indica una excelente correlación positiva entre la absorbancia y la concentración de plomo. Esta fuerte linealidad creciente se ve evidenciada en la Gráfica 1.

Así mismo, los valores de absorbancia y concentración para los estándares de cadmio, se encuentran evidenciados en la Tabla 3. En este caso, el coeficiente de correlación (Tabla 4) fue de 0.9986, lo cual indica que la correlación es positiva entre la señal obtenida y las concentraciones de cadmio. En la Gráfica 2 se puede observar dicha linealidad y correlación.

Para cuantificar el plomo y cadmio presente en las muestras de leche, es necesario tratar las muestras con un proceso de digestión ácida; en este caso se utilizaron ácidos fuertes concentrados, ácido nítrico y ácido sulfúrico, y se sometieron a la radiación por microondas bajo las condiciones propuestas por el Digestor *Speedwave* para alimentos con alto contenido de grasa, tal como lo es la leche (Tabla 5).

Para determinar la exactitud de la metodología empleada se utilizó la fortificación de muestras, con el objetivo de determinar el porcentaje de recuperación de las mismas, los resultados se pueden observar en la Tabla 6. Cinco muestras fueron contaminadas con 5 $\mu\text{g/L}$ de plomo y cadmio, como se evidencia en los resultados, se obtuvo un promedio de recuperación de 94.31% para plomo y 103.5% para cadmio. Estos resultados indican que el método cumple con el criterio del Codex Stan, que requiere un porcentaje de recuperación en un rango de 80-110% (FAO, 1995).

En las Tablas 7, 8, 9, 10 y 11 se pueden observar las concentraciones de plomo obtenidas en los cinco mercados muestreados, de las 25 muestras analizadas únicamente tres presentan concentraciones de plomo superiores al límite establecido por la OMS (0.020 mg/L). Cabe mencionar que las tres muestras señaladas fueron tomadas del mercado IV de Livingston, este se encuentra situado en la aldea Semox, Izabal. Esta aldea se encuentra cerca de la Mina

Saquipec, Mina Chocón, Mina Cantera El Norte y Mina Magnesium (Ver Anexo No. 3). Según modelos propuestos, el plomo proveniente de los desechos gaseosos y los desechos líquidos vertidos en ríos y lagos, producidos por la industria minera, se deposita en el suelo. El metal geodepositado en el suelo pasa a los pastos de los que se alimentan las vacas lecheras y, finalmente el plomo se excreta por la leche (Mamani, 2020). En este caso, la cercanía de cuatro minas a los hatos lecheros explica que la contaminación de las tres muestras tomadas en este mercado, dupliquen la concentración máxima permitida.

El resto de muestras presentó concentraciones de plomo no detectadas, siendo el límite de cuantificación de 2 $\mu\text{g/L}$ o concentraciones por debajo del límite máximo permitido. Sin embargo, es importante recalcar que, si bien algunas muestras están dentro de los límites permitidos, presentan contaminación por plomo. Esto puede ser perjudicial a mediano y largo plazo, debido a que este metal tiende a acumularse en dientes, huesos, hígado, pulmones, riñones y bazo. La ingesta de dosis bajas de plomo puede llevar a la acumulación del metal y a la intoxicación crónica, lo cual pone en peligro la vida del paciente (Corzo y Velásquez, 2014).

En la Tabla 12 se muestran los parámetros estadísticos de las muestras analizadas para plomo de cada municipio, en ella se puede observar que la media de los datos para el municipio de El Estor es de 0.0041 mg/L y para el municipio de Livingston es de 0.0133 mg/L, por lo que ambos cumplen con las normas internacionales. Así mismo, se hace notar que la desviación estándar es de 0.005 y 0.015 para El Estor y Livingston, respectivamente, estos valores indican que los datos suelen estar cerca de la media.

Finalmente, en la Gráfica 3 se pueden observar las concentraciones de plomo obtenidas y si estas están por encima de la línea crítica (0.020 mg/L). En esta gráfica se observa que, de las 25 muestras analizadas, 9 no presentaron contaminación y 13 muestras presentaron contaminación por debajo de los límites permitidos, al comparar estos datos con los obtenidos en otros estudios, se puede mencionar que, en estudios realizados en áreas industrializadas se obtuvo una mayor cantidad de muestras contaminadas (Castro, et al., 2017; Ismail, et al., 2015), en comparación con estudios realizados en zonas rurales alejadas de la industrialización (Oliveira, et al., 2017). Es de notar que los mercados IV y V, ubicados en

Livingston son los que presentan mayor número de muestras contaminadas, con cuatro muestras cada uno, seguidos por los mercados I y II con tres muestras contaminadas cada uno. Es importante mencionar que los mercados I y II de El Estor se encuentran a inmediaciones de la Compañía Guatemalteca de Níquel y de la Extracción Minera Fenix; los mercados IV y V ubicados en aldea Semox y Chocón, respectivamente, están a inmediaciones de cuatro minas. En todos estos mercados se obtuvieron muestras contaminadas, aunque las concentraciones cuantificadas fueran menores al LMP. Mientras tanto, el mercado III ubicado en la aldea Fronteras Río Dulce, Livingston, Izabal, presentó el menor número de muestras contaminadas, esto puede deberse a que la aldea está alejada de minas y, por lo general, los hatos lecheros cuentan con lagunas artificiales para que los animales beban, así como amplias pasturas alejadas de recursos hídricos.

Los datos obtenidos concuerdan con estudios previos, en los que la leche analizada ha presentado contaminación en la mayoría de casos. Es importante mencionar que la cantidad de plomo encontrada en este tipo de muestras es muy variable de un estudio a otro. En estudios realizados en México, las concentraciones de plomo se han encontrado en rangos de 0.039-0.05 mg/Kg (Castro, et al., 2018); en Brazil los rangos varían entre 0.03-0.08 mg/Kg (Oliveira, et al., 2017), mientras que, en Oriente Medio, los niveles de plomo son mucho más elevados, con una media de 0.090 mg/Kg (El-Ansary & El-Leboundy, 2015; Najarnezhad, et al., 2015). Un elemento en común entre los estudios mencionados, es que las muestras contaminadas han sido recolectadas cerca de zonas muy industrializadas o con ríos de aguas contaminadas cercanas a la zona de producción lechera.

En las Tablas 13, 14, 15, 16 y 17 se pueden observar las concentraciones de cadmio obtenidas en los cinco mercados muestreados, de las 25 muestras analizadas únicamente ocho presentan concentraciones de cadmio superiores al límite establecido por la UE (0.010 mg/L) para productos lácteos líquidos y sus derivados. Cabe destacar que, en el caso del cadmio, las muestras con niveles mayores a 0.010 mg/L se distribuyeron en los mercados I, II, III y V, únicamente en el mercado IV no se obtuvieron muestras por fuera de las especificaciones. Las muestras con el valor más alto (0.142 mg/L) pertenece al mercado II de El Estor, este valor puede estar relacionado a la actividad minera de la zona, ya que las zonas de forraje de las vacas se encuentran en áreas aledañas a minas o a ríos que siguen un curso cercano a las

minas. Así mismo, los mercados I y V también se encuentran a inmediaciones de minas, por lo que esto podría haber causado la contaminación de la leche comercializada en los mercados. Cabe destacar que, en el mercado III ubicado en Fronteras Río Dulce, en donde se obtuvo la muestra con el segundo valor más alto de cadmio y en el que los niveles de plomo fueron bajos, no está cerca de minas. Sin embargo, es una de las aldeas más desarrolladas en cuanto a agricultura, pesca, comercio y urbanización. Esto puede indicar que las fuentes contaminantes de cadmio no son únicamente mineras y metalúrgicas. Se han realizado estudios en los que los niveles de cadmio cuantificados en leche de ganado vacuno que se alimenta cerca de agroindustrias, han superado los LMP. Esto puede indicar una relación entre la contaminación por cadmio de la leche y el uso inadecuado de agroquímicos o de piensos de mala calidad. Así mismo, pueden encontrarse compuestos de cadmio en pinturas, esmaltes, plásticos, vidrios, tintas de impresión, entre otros (Oliveiro, et al., 2017; Abdol-Samad et al., 2020).

En la Tabla 18 se muestran los parámetros estadísticos de las muestras analizadas para cadmio, en ella se puede observar que la media de los datos para el municipio de El Estor es de 0.0279 mg/L y para el municipio de Livingston es de 0.0159 mg/L, lo cual no cumple con las normas internacionales. Así mismo, se hace notar que la desviación estándar es de 0.043 y 0.033 para El Estor y Livingston, respectivamente, lo cual indica que los datos suelen estar cerca de la media. Los datos presentan una distribución leptocúrtica, lo cual indica que existe una mayor concentración de los datos en torno a su media.

En la Gráfica 4 se puede observar la concentración de cadmio presente en cada muestra, según el mercado de donde fueron tomadas. Se observa que las muestras que se salen del LMP no se distribuyen en un solo mercado y son más abundantes en comparación con las contaminadas con plomo. De las 25 muestras analizadas, únicamente cuatro fueron no detectadas (límite de cuantificación 1 µg/L) y no se encuentran todas en el mismo mercado, esto sugiere que la contaminación por cadmio puede provenir de fuentes variadas, tales como el uso de fertilizantes fosfatados, de la incineración de madera y de residuos urbanos (Sánchez, 2016). Esta última actividad es bastante común en Izabal, muchas veces los pobladores suelen quemar sus residuos para ahorrar el costo de extracción de basura. Así mismo, debido a que hay una gran variedad de cultivos de frutas y madera en la zona, es

común el uso de fertilizantes fosfatados, lo cual, podría influir en la contaminación de la leche comercializada en el área.

Finalmente, en la Tabla 19 se presenta la comparación de la concentración experimental promedio de plomo y cadmio con los límites máximos permitidos por las normas internacionales. En el caso del plomo, la concentración media determinada fue de 0.010 mg/L y se comparó con la norma del *Codex Alimentarius* de la OMS/FAO. De acuerdo con esta norma, las muestras cumplen con la especificación, sin embargo, el 12% de las muestras presentó concentraciones mayores a las permitidas. En el caso del cadmio, la concentración media determinada fue de 0.020 mg/L, la cual no cumple con el límite máximo permitido establecido por la Comisión Europea en 2021, que es 0.010 mg/L para productos lácteos líquidos y sus derivados. En este caso, 32% de las muestras no cumplieron con la especificación.

Si bien en ambos casos el porcentaje de incumplimiento es menor a 50%, es importante considerar que estos metales son tóxicos y dañinos para la salud humana y animal. Entre los efectos tóxicos del plomo se encuentran la deficiencia cognitiva, motora y conductual. Se cree que el plomo podría ser cofactor del desarrollo de trastornos neuropsicológicos complejos, como la esquizofrenia. Entre los daños producidos al sistema nervioso se encuentran la excitotoxicidad, interferencias en la neurotransmisión y daños oxidativos en lípidos y proteínas (Garza, et al., 2005). Por su parte, los efectos tóxicos del cadmio se manifiestan principalmente en los riñones y los huesos, incluso la exposición crónica a concentraciones relativamente bajas puede provocar daño glomerular, lo que puede llevar a insuficiencia renal (García, et al., 2012). Por lo tanto, cualquier indicio de contaminación debe ser considerado como una alerta para monitorear los niveles de estos metales en la zona.

La variabilidad de los datos obtenidos en estudios similares es bastante grande, dependiendo de la región en donde se realicen los mismos. Un metaanálisis de 72 estudios de 37 países demostró que las variaciones son bastante significativas. Las concentraciones más altas de plomo se localizaron en Brasil, Egipto, México, Nigeria, Palestina, Siria y Turquía (Zwierzchowski y Ametaj, 2018).

Un estudio realizado en nueve regiones de Corea concluyó que ninguna muestra de leche cruda presentó contaminación por plomo o cadmio (Kim, et al., 2016). Mientras que, en Turquía un estudio determinó que el 70% de las muestras analizadas presentaban concentraciones de plomo 2.5 veces superiores a las permitidas por las normas europeas (Koyuncu y Alwazeer, 2019).

Por lo tanto, es importante crear programas de monitoreo específicos para cada región, así como identificar las posibles fuentes de contaminación y brindar educación en salud a los productores de leche, para que puedan asegurar que su ganado no ingiera cantidades significativas de cadmio y plomo. También es importante brindar educación sobre el correcto almacenamiento de la leche, para evitar que esta pueda contaminarse al estar en contacto con recipientes de metal que puedan contener metales pesados o que se deje el producto a la intemperie en donde pueda contaminarse por medio de las partículas que viajan en el aire. De este modo, los productores se aseguran que sus lácteos estén libres de metales pesados.

X. CONCLUSIONES

Se determinó que de las 25 muestras de leche cruda bovina analizadas, 64% presentaron niveles cuantificables de plomo y 84% presentaron niveles cuantificables de cadmio. Se confirma la presencia de plomo y cadmio en la leche cruda bovina comercializada en los mercados aledaños a zonas mineras de los municipios de El Estor y Livingston, Izabal.

El rango de cuantificación determinado para el análisis de plomo en las muestras de leche cruda bovina fue de 0-0.045 mg/L para ambos municipios, con una concentración promedio de 0.0041 mg/L y 0.0133 mg/L para los municipios de El Estor y Livingston, respectivamente.

El rango de cuantificación determinado para el análisis de cadmio fue de 0-0.142 mg/L para ambos municipios, con una concentración promedio de 0.0279 mg/L para El Estor y 0.0159 mg/L para el municipio Livingston.

Se determinó que el 12% de las muestras de leche cruda bovina analizadas, no cumplen con los límites máximos permisibles de plomo en productos lácteos, establecidos por la FAO/OMS. El 52% de las muestras presentó concentraciones de plomo menores al límite máximo.

Se determinó que el 32% de las muestras de leche analizadas no cumplen con el límite máximo permisible de cadmio en productos lácteos, establecidos por la Comisión Europea. El 52% de las muestras presentó concentraciones de cadmio menores al límite máximo.

XI. RECOMENDACIONES

Se recomienda que para futuros estudios, las muestras sean colectadas “al pie de la vaca” en recipientes de polipropileno o en tubos de ensayo plásticos, debido a que las muestras pueden contaminarse de metales pesados presentes en los recipientes de almacenamiento de la leche que comúnmente se utilizan en estos lugares.

Realizar monitoreos, a través del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), de los niveles de plomo y cadmio en las leches crudas de esta región geográfica, como mínimo una vez al año para establecer un rango de concentración típico de la región y, de este modo, implementar vigilancia.

Realizar el estudio en épocas del año diferentes para comparar si las concentraciones de plomo y cadmio fluctúan en época lluviosa y en época seca. Estos estudios pueden ser llevados a cabo por el MAGA o por medio de investigaciones desarrolladas por las Universidades del país.

Implementar programas de educación en salud dirigidos a los productores lecheros, en los que se haga énfasis en garantizar que el agua y alimentos que consumen sus animales sean de óptima calidad, para evitar la contaminación de la leche con metales pesados.

XII. REFERENCIAS

- Agudelo, D. y Bedoya, O. (2005). Composición nutricional de la leche de ganado vacuno. *Revista Lasallista de Investigación*. 2(1): 38-45. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69520107>
- Asadi, A., Eshaghi, A., Aghajanzadeh, A., Nazeradl, K., Yari, A. & Hoda, S. (2012). Evaluation and determination of toxic metals (Lead and Cadmium) in cow milk collected from East Azerbaijan, Iran. *European Journal of Experimental Biology*. 2(1): 261-265.
- Ayala, J., & Romero, H. (2013). Presencia de metales pesados (arsénico y mercurio) en leche de vaca al sur de Ecuador. *La Granja*, 17(1), 36-43.
- Boy, A. (2015). *Determinación de metales pesados en agua, peces, almejas e Hydrilla verticillata del Lago de Izabal*. [Tesis de Licenciatura]. Universidad de San Carlos de Guatemala
- Castro, N., Calderón, F., Castro, J., Moreno, R., Tamariz, J., Pérez, M. & Soní, G. (2017). Heavy metals in cow's milk and cheese produced in areas irrigated with waste water in Puebla, Mexico. *Food Additives & Contaminants: Part B*. DOI: 10.1080/19393210.2017.1397060
- Castro, N., Moreno, R., Calderón, F., Moreno, A. y Tamariz, J. (2018). Metales pesados en leche de vacas alimentadas con alfalfa producida en suelos irrigados con aguas residuales en Puebla y Tlaxcala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 9(3). DOI: <https://doi.org/10.22319/rmcp.v9i3.4358>
- Código Postal (s.f.). *Código Postal Izabal – Guatemala*. Disponible en: <https://codigo-postal.org/guatemala/izabal/>
- El-Ansary, M. & El-Leboudy. (2015). Levels of Cadmium and Lead in raw and buffalo's milk samples collected from local markets of El-Behera Governorate. *Alexandria Journal of Veterinary Sciences*. 47: 129-133. DOI: 10.5455/ajvs.199860

- European Commission Standards. (2006). Commission Regulation (EC) No. 1881/2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs.
- Fathy S. and El AA. (2012) “Assessment of Toxic Heavy Metals in Some Dairy Products and the Effect of Storage on its Distribution”. *Journal of American Science* 8(8): 665-670.
- Fernández, E., Martínez, J., Martínez, V., Moreno, J., Collado, L., Hernández, M. y Morán, F. (2015). Documento de Consenso: importancia nutricional y metabólica de la leche. *Nutrición Hospitalaria*. 31(1): 92-101. DOI: 10.3305/nh.2015.31.1.8253
- Gallegos, W., Vega, M. y Noriega, P. (2012). Espectroscopía de Absorción Atómica con llama y su aplicación para la determinación de plomo y control de productos cosméticos. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*. 15(1): 18-25. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=476047399003>
- García, P. y Azcona, M. (2012). Los efectos del cadmio en la salud. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*. 17(3): 199-205. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/473/47324564010.pdf>
- Garza, A., Chávez, H., Vega, R. y Soto, E. (2005). Mecanismos celulares y moleculares de la neurotoxicidad por plomo. *Salud Mental*. 28(2). Disponible en: http://www.revistasaludmental.mx/index.php/salud_mental/article/view/1043#:~:text=Los%20estragos%20ocasionados%20ocurren%20aun,m%C3%A1s%20complejos%20como%20la%20esquizofrenia.
- Geng, H. & Wang, L. (2019). Cadmium: Toxic effects on placental and embryonic development. *Environ Toxicol Pharmacol*. 67: 102-107. DOI: 10.1016/j.etap.2019.02.006
- Gholizadeh E. and Ziarati P. (2016) “Remediation of Contaminated Rice Farmlands Soil and *Oryza sativa* Rice Product by Apple Pomace as Adsorbent”. *Bioscience Biotechnology Research Asia*. 13(4): 2245-2253.

- González, L. y Recinos, J. (2015). *Determinación de la concentración de plomo y arsénico en agua para consumo animal y en leche cruda en cuatro ganaderías de El Salvador*. [Tesis de licenciatura]. Universidad de El Salvador.
- González, J. (2009). Metales pesados en carne y leche y certificación para la Unión Europea (UE). *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 22(3).
- Guerrero, J. y Rodríguez, P. (2010). *Características físico-químicas de la leche y su variación. Estudio de caso, Empresa de lácteos El Colonial, león, Nicaragua*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Agraria de Nicaragua.
- Guillén, P. y Medina, M. (2012). *Determinación de plomo en leche de ganado bovino en el Cantón Sitio del Niño, municipio de San Juan Opico, El Salvador*. Tesis de Ingeniería. Universidad de El Salvador.
- Instituto Centroamericano de Estudios Fiscales -ICEFI- (2014). *Minería en Guatemala: realidad y desafíos frente a la democracia y el desarrollo*. Red de Bibliotecas Virtuales de CLACSO. Disponible en: <http://biblioteca.clacso.edu.ar/Guatemala/icefi/20140903122033/mineria-impresion.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística. (2003). IV Censo Nacional Agropecuario: Numero de fincas censales, existencia animal, producción pecuaria y características complementarias de la finca censal y del productor agropecuario. Ministerio de Agricultura y Ganadería. República de Guatemala.
- Ismail, A., Riaz, M., Akhtar, S., Ismail, T., Ahmad, Z. & Saad, M. (2015). Estimated daily intake and health risk of heavy metals by consumption of milk. *Food Additives and Contaminants: Part B Surveillance*. 8(4): 260-265. DOI: 10.1080/19393210.2015.1081989
- Lahiji, F. A., Ziarati, P., & Jafarpour, A. (2016). Potential of Rice Husk Biosorption in Reduction of Heavy Metals from Oryza sativa Rice. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 13(4), 2231-2237. <https://doi.org/10.13005/bbra/2388>

- Londoño, L. (2010). *Presencia de metales pesados en hatos lecheros de los municipios de San Pedro y Entreríos, Antioquía, Colombia*. Tesis de licenciatura. Universidad de León. Colombia.
- Madero, A., & Marruego, J. (2011). Detección de metales pesados en bovinos, en los valles de los ríos Sinú y San Jorge, departamento de Córdoba, Colombia. *MVZ Córdoba*, 16(1), 2391-2401.
- Martínez, R. (2015). *Análisis Instrumental: Espectrometría de Absorción Atómica (EAA)*. Universitat Politècnica de Valencia. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/138418/Mart%C3%ADnez%20-%20An%C3%A1lisis%20Instrumental.%20Espectrometr%C3%ADa%20de%20Absorci%C3%B3n%20At%C3%B3mica%20%28EAA%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mendoza, Y. y Medina, C. (2013). *Determinación de plomo y cadmio por espectrofotometría de absorción atómica en leche cruda de bovino en establos lecheros del distrito de Chancay-Huaral*. [Tesis de Licenciatura]. Universidad de Wiener.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería -MAGA- (2016). *Agro en Cifras 2016*. Disponible en: <https://www.maga.gob.gt/download/El%20agro16.pdf>
- Ministerio de Economía -MINECO- (2019). *Guatemala conmemora el Día Mundial de la Leche*. Disponible en: <https://www.mineco.gob.gt/guatemala-conmemora-d%C3%ADa-mundial-de-la-leche#:~:text=Guatemala%2C%2031%20mayo%20de%202019.&text=La%20leche%20es%20una%20excelente,y%20desarrollo%20de%20los%20ni%C3%B1os.&text=Actualmente%20en%20el%20pa%C3%ADs%20se,de%20511%20millones%20de%20litros>.
- Ministerio de Energía y Minas -MEM- (2018). *Derechos mineros: Departamento de Izabal*. Disponible en: http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2018/09/Ot_izabal.pdf

- Ministerio de Energía y Minas -MEM- (2019). *Política Minera Institucional*. Dirección General de Minería. Disponible en: <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2019/01/Pol%C3%ADtica-Minera-Institucional.pdf>
- Monteza, Y. (2018). *Determinación de metales pesados en leche fresca de vacunos, alimentados con pasturas regadas con aguas servidas*. [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional de Cajamarca. Perú.
- Morán, G. (2011). *Reevaluación de los niveles de plomo en tejidos muscular de peces – Cichlasoma managuense sp (Guapote o Pez Tigre) – del Lago de Amatitlán*. [Tesis de Licenciatura]. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Muhib, I., Zaman, M., Jakarin, N., Rhaman, M., Shammi, M., Fardous, Z., Latiful, M., Uddin, K., Kurasaki, M. & Alam, K. (2016). Investigation of heavy metal contents in cow milk samples from area of Dhaka, Bangladesh. *International Journal of Food Contamination*. 3(16). DOI: <https://doi.org/10.1186/s40550-016-0039-1>
- Najarneshad, V, Jalilzadeh, G., Anassori, E. & Zeinali, V. (2015). Lead and Cadmium in raw buffalo, cow and ewe milk from west Azerbaijan, Iran. *Food Additives & Contaminants: Part B*. DOI: 10.1080/19393210.2015.1007396
- Nava, C. y Méndez, M. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Arch Neurocién Mex*. 18(4): 140-147.
- Nguta, J. (2012). Heavy metal residues in camel milk from Kenya: Health implications. *Journal of Clinical Toxicology*. 2(9).
- Oliveira, T., Peres, J., Felsner, M. & Justi, K. (2017). Direct determination of Pb in raw milk by graphite furnace atomic absorption spectrometry (GF AAS) with electrothermal atomization sampling from slurries. *Food Chemistry*. DOI: <http://de.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.143>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – FAO – (1995). *Codex Stan 193-1995 Norma General de Codex para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos*. Disponible en línea.

- Park, J., Cherrington, N & Klaassen, C. (2002). Intestinal absorption of cadmium is associated with divalent metal transporter 1 in rats. *Toxicol Sci.* 62(2): 288-94.
- Pernia, B., Mero, M., Bravo, K., Ramírez, N., López, D., Muñoz, J. y Egas, F. (2014). Detección de cadmio y plomo en la leche de vaca comercializada en la ciudad de Guayaquil, Ecuador. *Rev. Cient. Cien. Nat. Ambien.* 8(2): 81-86.
- Piotrowski, J. & Coleman, D. (1990). Environmental Hazards of Heavy Metals: Summary Evaluation of Pb, Cd, and Hg. *Marc. Report N° 20.*
- PNUMA. (2010). Análisis de flujo de comercio y revisión de prácticas de manejo ambientalmente racionales de productos conteniendo cadmio, plomo y mercurio en América Latina y el Caribe. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Ramírez, A. (2002). Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. *Anales de la Facultad de Medicina.* 63(1): 51-64.
- Ramírez, A. (2005). El cuadro clínico de la intoxicación ocupacional por plomo. *Anales de la Facultad de Medicina.* 66(1). DOI: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1025-55832005000100009
- Rana, M., Tangpong, J. & Rahman, M. (2018). Toxicodynamics of lead, cadmium, mercury, and arsenic induced kidney toxicity and treatment strategy: A mini review. *Toxicology Reports.* 5: 704-713. DOI: [10.1016/j.toxrep.2018.05.012](https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2018.05.012)
- SIAFA. (2010). Ficha de datos de seguridad: Cadmio. Disponible en: <http://www.siafa.com.ar/notisiafa/fichas/cadmio.pdf>
- Shibamoto, T. & Bjeldanes, L. (2009). Introduction to Food Toxicology. Unites States: Elsevier.

- Turcios, J. (2010). *Determinación cuantitativa de arsénico, cobre, plomo y cadmio en (Brasica oleracea) brócoli que se cultiva en la parcela San José, Tecpán municipio de Chimaltenango*. [Tesis de Maestría]. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Zela, J. (2005). Aspectos Nutricionales y Tecnológicos de la Leche. *Dirección General de Producción Agraria*. Ministerio de Agricultura.
- Ziarati, P., Shirkhan, F., Mostafidi, M. & Tamaskani, M. (2018). An Overview of the Heavy Metal Contamination in Milk and Dairy Products. *Acta Scientific Pharmaceutical Science*. 2(7): 8-21.

XIII. ANEXOS

1. Anexo No. 1: Marco Teórico

a. Metales pesados

Los metales pesados son elementos que poseen pesos atómicos entre 63.5 y 200.5 una y gravedades específicas mayores a 4. Algunos metales pesados son importantes para el funcionamiento del organismo, por lo que es necesario consumir cantidades trazas de los mismos. Entre los metales pesados requeridos por el organismo se encuentran el hierro (Fe), el cobalto (Co), el cobre (Cu), zinc (Zn) y manganeso (Mn). Sin embargo, existen otros metales pesados que pueden ocasionar graves daños a la salud, tales como el plomo (Pb), arsénico (As), cromo (Cr), cadmio (Cd) y antimonio (Sb). Los niveles excesivos de metales pesados, incluso de los requeridos por el organismo, pueden resultar contraproducentes debido a los efectos a largo plazo que pueden desencadenar (Shibamoto & Bjeldanes, 2009).

i. Plomo

El plomo es el metal pesado más abundante en la Tierra, se ha encontrado en todos los cuerpos de agua y suelos que han sido analizados. Las principales causas de contaminación ambiental por plomo, son la presencia de plomo en baterías o en algunos pesticidas. Los alimentos también pueden contaminarse con plomo, la mayoría de alimentos que han sido analizados, poseen niveles bajos o mínimos de plomo. Este metal entra a la cadena alimenticia principalmente por medio de los sistemas de agua, ya sea que esta se utilice para beber o para regar alimentos (Shibamoto & Bioldanes, 2009).

Propiedades fisicoquímicas del plomo

- Símbolo: Pb
- Clasificación: Grupo 14
- Número atómico: 82
- Masa atómica: 207

- Electronegatividad: 2.33
- Punto de fusión: 327.46 °C
- Punto de ebullición: 1749 °C
- Densidad: 11342 kg/m³
- Estructura cristalina: cúbica
- Color: azulado brillante

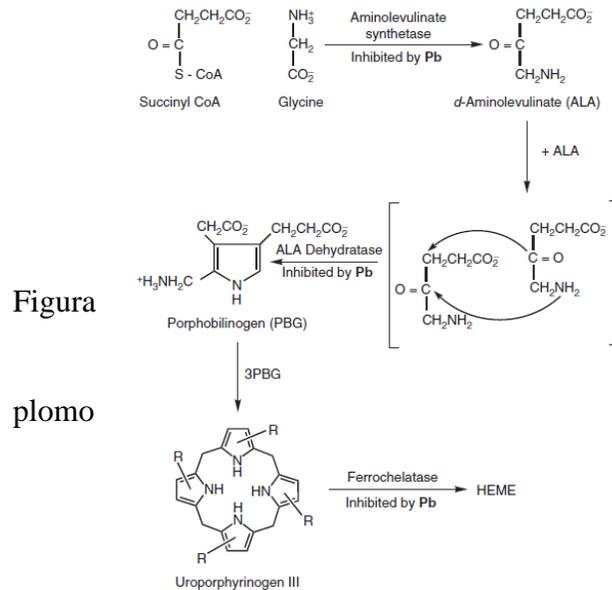
(Limo, 2003)

Toxicocinética del plomo

La absorción de plomo en el tracto gastrointestinal depende principalmente de la forma química del plomo. Los compuestos orgánicos de plomo son absorbidos rápidamente (> 90%) en el tracto gastrointestinal y se depositan principalmente en los huesos, aunque también pueden depositarse en cantidades más pequeñas en el hígado, riñones, músculos y en el sistema nervioso central. En cambio, los compuestos de plomo inorgánico no se absorben bien en el tracto gastrointestinal (3-5%), los niños absorben el plomo inorgánico en mayor proporción (40-50%) (Shibamoto & Bieldanes, 2009).

La distribución del plomo es independiente de la ruta de absorción. Las concentraciones de plomo en sangre varían considerablemente con la edad y estado fisiológico. La mayor parte de plomo que se encuentra en la sangre, está unido a los eritrocitos, en donde se une a diferentes proteínas intracelulares, siendo ALAD el principal ligando. Esta unión inhibe la función de ALAD, ya que el plomo desplaza al zinc, el ligando natural de la proteína (Ramírez, 2005).

Se reconocen tres etapas de la intoxicación por plomo. La primera etapa se denomina “Asintomática” no se asocia a síntomas neurológicos o a disfunciones orgánicas, pero si hay cambios en la sangre. La anemia es un síntoma temprano de la intoxicación moderada, debido a que el plomo disminuye el tiempo de vida de los



eritrocitos y la síntesis de hemoglobina. En la No. 2 se muestra la interacción del con el sistema hematopoyético.

Figura No. 2 Interacción del plomo con el sistema hematopoyético

Fuente: Shibamoto & Bioldanes, 2009

Los efectos del plomo sobre la sangre pueden ser explicados debido a la influencia inhibitoria del metal sobre las enzimas ALA sintetasa, ALA deshidratasa y ferroquelatasa. La etapa I también se caracteriza por un aumento de uroporfirinógeno en sangre, como consecuencia de la inserción disminuida de hierro al uroporfirinógeno, lo cual es mediado por la enzima ferroquelatasa (Shibamoto & Bioldanes, 2009).

En la etapa II de la intoxicación por plomo, se empiezan a observar síntomas más marcados. Para este momento la anemia es evidente y aparecen síntomas neurológicos, tales como hiperactividad, comportamiento impulsivo, desordenes de la percepción y habilidades de aprendizaje disminuidas. En casos severos los síntomas pueden

incluir temblores musculares, irritabilidad, cefaleas, ataxia y pérdida de memoria (Shibamoto & Bieldanes, 2009).

Si la exposición al plomo continua se alcanza la etapa III, con síntomas que pueden desencadenar en falla renal, convulsiones, coma y la muerte (Shibamoto & Bieldanes, 2009).

Como se menciona anteriormente, incluso pequeñas concentraciones de plomo en sangre pueden desencadenar síntomas hematopoyéticos, lo que lleva a la producción de especies reactivas de oxígeno e intensificación de estrés oxidativo. El estrés oxidativo juega un papel determinante en la patogénesis de la intoxicación por plomo, debido a que puede acelerar la apoptosis de neurocitos, interferencia con enzimas dependientes de calcio como la Sintasa de óxido nítrico (Nemsadze, et al. 2009).

Una vasta cantidad de estudios han demostrado que hay una correlación entre la exposición a plomo y desarrollo de hipertensión y enfermedad cardiovascular. El endotelio vascular es reconocido como la diana principal para los efectos tóxicos del plomo, debido a que éste afecta la función vasoactiva del endotelio a través de la producción aumentada de especies reactivas de oxígeno, inactivación del óxido nítrico endógeno y desregulación de las guanilato cilasas solubles por acción de las especies reactivas de oxígeno. Esto conlleva a una disponibilidad limitada de óxido nítrico, lo que bloquea la señalización del mismo (Nemsadze, et al. 2009).

La Agencia Internacional de Investigación de Cáncer clasifica al plomo como 2B: carcinógeno probable en el humano. La evidencia en animales de experimentación sugiere que los compuestos de plomo inorgánico pueden inducir toxicidad genética a través de estrés oxidativo (IARC, 2017).

Intoxicación por plomo de bovinos

Los bovinos suelen intoxicarse debido a que pastan cerca de carreteras muy transitadas, en las que se dispersan en el aire partículas de plomo provenientes de los combustibles de los automóviles. Así mismo, las fuentes de intoxicación pueden ser recursos hídricos contaminados con desechos industriales, o bien, ingestión de plomo debido a que los animales mastican o lamen objetos que podrían contener plomo, como baterías viejas que se encuentren cerca de su zona de alimentación. En estos animales el síntoma característico de la intoxicación por plomo es la ataxia, seguida de temblores musculares y expulsión de espuma por la boca. En algunos casos hay una marcada hiperestesia a los ruidos y ceguera. El síntoma más grave suele ser la convulsión tónico-clónica que sufre un animal con intoxicación severa, lo que en la mayoría de casos lleva a la muerte por paro respiratorio (Guillen y Medina, 2012).

ii. Cadmio

El cadmio es un metal blanco plateado, dúctil, muy blando y maleable. Suele presentarse en forma de polvo, con un color grisáceo, es bastante volátil por lo que emite vapores a temperaturas inferiores al punto de ebullición.

Las características del cadmio son similares a las del zinc. A temperatura ambiente y en seco suele ser estable, pero se oxida rápidamente en presencia de humedad. Si se calienta desprende vapores rojizos de óxido de cadmio. Es atacado por todos los ácidos, lo que forma sales tóxicas. El cadmio fundido forma aleaciones con numerosos metales, por lo que es altamente utilizado en la industria metalúrgica (SIAFA, 2010).

Propiedades físicas:

- Peso molecular: 112.4
- Punto de ebullición: 767 °C

- Punto de fusión: 321 °C
- Temperatura de autoignición: 250 °C
- Densidad relativa: 8.64
- Densidad de vapor: 3.94
- Solubilidad en agua: ninguna

(SIAFA, 2010).

Las mayores fuentes de exposición a cadmio son el agua, los alimentos y el tabaco. El cadmio que se encuentra en el agua, suele llegar a ella debido a que se encuentra en las aleaciones utilizadas para galvanizar las tuberías. Los alimentos suelen contener menos de 0.05 ppm de cadmio, investigaciones de la OMS sugieren que los mayores niveles de cadmio en alimentos se encuentran en los mariscos y en los riñones de bovinos, pollos, cerdos, ovejas y pavos (Shibamoto & Bioldanes, 2009).

La minería de metales no ferrosos es la principal fuente de liberación de cadmio al medio acuático, la contaminación puede deberse al agua de drenado de las minas, desechos del proceso mineral, derrames accidentales o de las aguas residuales del procesamiento mineral (PNUMA, 2010).

Toxicocinética del cadmio

El cadmio se puede absorber por vía oral, inhalatoria o dérmica no importando la forma química del mismo. Al ser inhalado, el cadmio se deposita en el tracto respiratorio y los pulmones, las partículas grandes suelen alojarse en la parte superior del tracto respiratorio y posteriormente son eliminadas debido a efectos mucociliares, mientras que las partículas de menor tamaño llegan a penetrar los alveolos y se distribuyen por el organismo (Piotrowski & Coleman, 1990).

La absorción oral de cadmio es muy baja, aparentemente solo el 5% de la dosis administrada se absorbe en el tracto gastrointestinal. Los mecanismos de absorción aún no están completamente establecidos, pero se sugiere que el Transportador de Metales Divalentes (DMT1) está implicado (Park, et al, 2002).

La distribución de cadmio ha sido estudiada en animales de laboratorio. En ratas, el cadmio se distribuye en el bazo, hígado, glándulas adrenales y duodeno. La acumulación en los riñones suele ser más lenta, alcanzando el nivel máximo seis días después de la administración. El cadmio es altamente estable dentro del organismo, con una vida media estimada de 20 a 40 años. Se cree que esta vida media tan prolongada se debe a la proteína metalotioneína, que se encuentra en los riñones. La metalotioneína por sí misma no reduce la toxicidad del cadmio, sin embargo, el complejo metalotioneína-cadmio es más tóxico que el cadmio por sí solo (Shibamoto & Bieldanes, 2009).

La fracción de cadmio que pasa a la sangre se distribuye en tres compartimientos de recambio:

- Compartimento 1 de recambio rápido: no genera acumulación.
- Compartimento 2 de recambio medio: está constituido por los eritrocitos, en los que se acumulan pequeñas cantidades.
- Compartimento 3 de recambio lento: una fracción importante de cadmio se une a la metalotioneína y se deposita en los órganos diana.

Los compartimentos 1 y 3 son los que presentan mayor recambio con otros órganos. Se estima que la tasa de transferencia del compartimento 1 es del 50% a otros tejidos y de un 16% al hígado. En el riñón el compartimento 3 es el de mayor recambio, aunque este se

realice en forma lenta, en este caso no hay acumulación pero si se da la filtración en el glomérulo (Ramírez, 2002).

La excreción del cadmio se da principalmente por medio de la orina y heces. Aproximadamente se elimina un 0.007% al día del contenido corporal por medio de la orina y por las heces se elimina un 0.03% (Ramírez, 2002).

En la Figura No. 3 se puede apreciar el sistema toxicocinético del cadmio.

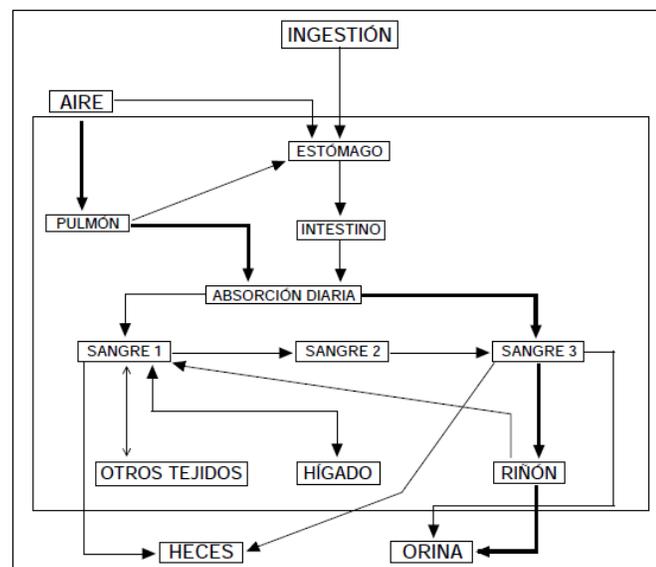


Figura 2. Toxicología del cadmio. Esquema toxicocinético.

Figura No. 3 Esquema toxicocinético del cadmio

Fuente: Ramírez, 2002

Toxicodinámica del cadmio

Este metal daña principalmente los riñones, produciendo disfunción renal tubular e insuficiencia renal crónica. También afecta al sistema cardiovascular, produciendo aterosclerosis aórtica y coronaria. Los niños son especialmente susceptibles al cadmio, debido a que atraviesa con facilidad la barrera hematoencefálica produciendo cambios neurológicos como edema cerebral, hemorragias y necrosis cerebral (Nava y Méndez, 2011).

Después de la exposición el cadmio es transportado a la sangre, en donde se une a eritrocitos y a la albúmina. Además de unirse a la albúmina, una gran cantidad del cadmio forma complejo con la metalotioneína, la cual es filtrada fácilmente por el glomérulo, reabsorbida en el túbulo proximal y distal a través de endocitosis. Después de que el cadmio ingresa a la célula tubular, los lisosomas rompen el complejo cadmio-metalotioneína para liberar al cadmio. Esto inicia el daño renal debido a que se perturba la homeostasis del calcio, el gradiente electroquímico, se inicia el proceso de estrés oxidativo, hay infiltración celular inflamatoria y disminuye la regulación de las coenzimas Q mitocondriales. En la Figura No. 4 se observa el proceso de toxicidad renal producido por cadmio (Rana, et al. 2018).

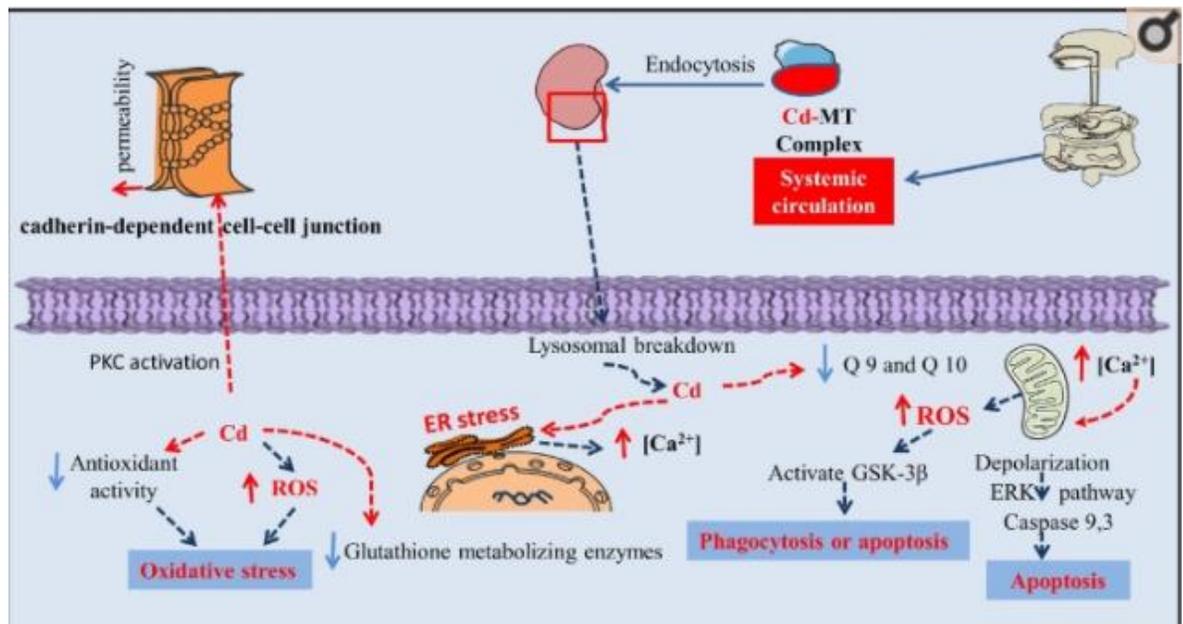


Figura No. 4 Toxicidad renal por cadmio

Fuente: Rana, et al. 2018

b. Leche

La leche es un alimento segregado por las glándulas mamarias de las hembras de los mamíferos, con el fin de alimentar a sus crías (González y Recinos, 2015). Ahora bien, la leche cruda entera se refiere al producto íntegro no alterado ni adulterado, proveniente del ordeño higiénico de vacas sanas y bien alimentadas, esta leche no contiene calostro y está exenta de olores, colores o sabores anormales (Zela, 2005).

La composición química de la leche varía dependiendo de la especie de mamífero que la segrega, el estado fisiológico y sanitario del animal, la época del año y el número de ordeños (Zela, 2005). En la Figura No. 5 se muestra la composición nutricional de la leche según la especie de mamífero que la segrega.

COMPOSICIÓN DE LA LECHE SEGÚN LA ESPECIE (en %)

Especie	Grasa	Proteína	Sólidos Totales
Humana	3.75	1.63	12.57
Vacuna	3.70	3.50	12.80
Búfalo de agua	7.45	3.78	16.77
Cebú	4.97	3.18	13.45
Caprina	4.25	3.52	13.00
Ovina	7.90	5.23	19.29
Asnal	1.10	1.60	9.60
Caballar	1.70	2.10	10.50
Camélida	4.10	3.40	12.80
Reno	12.46	10.30	36.70

Figura No. 5. Composición de la leche según la especie

Fuente: Ramírez, 2005

i. Composición nutricional de la leche

La leche es una emulsión que presenta sustancias definidas, tales como el agua, grasa, proteínas, carbohidratos, vitaminas y minerales. El agua presente en la leche es la fase dispersante, en ella se encuentran suspendidos glóbulos de grasa (Agudelo & Bedoya, 2005).

La proteína que se encuentra en la leche, representa un 3.5% de la misma. La leche contiene caseína (80%) y proteínas séricas (20%). La

caseína es la proteína que caracteriza a la leche, debido a que no se encuentra en ningún otro alimento, así mismo, las proteínas séricas que se encuentran en la leche son albúmina y globulinas (Agudelo & Bedoya, 2005).

Las grasas se encuentran presentes en la leche en un 3% de su composición. Estas se encuentran en forma de partículas emulsionadas. El contenido de grasa puede verse afectado por la raza del animal y la calidad de alimentación. La porción grasosa de la leche también se ve disminuida por procesos inflamatorios o infecciosos que tengan lugar en la ubre (Agudelo & Bedoya, 2005).

El único carbohidrato que compone la leche es la lactosa, ésta es el principal agente osmótico de la leche, ya que permite el transporte de agua desde la sangre. La leche de vaca contiene cerca del 5% de lactosa, lo que no es suficiente para actuar como un endulzante. El poder edulcorante de la lactosa es cinco veces menor que el de la sacarosa, sin embargo, la lactosa es la responsable de darle el sabor característico a la leche (Zela, 2005).

La leche es una fuente de todas las vitaminas necesarias para el metabolismo. Es rica en riboflavina, tiamina y vitamina A, mientras que los niveles de niacina y ácido ascórbico son más modestos. Los niveles de carotenos y vitamina A presentes en la leche son más elevados durante el verano, debido a que los bovinos tienen más abundancia de alimento que en el invierno. Así mismo, la vitamina D es preponderante en verano debido al aumento de intensidad de la luz solar, por esta razón muchos ganaderos deciden suplementar a sus animales durante el invierno (Zela, 2005).

En cuanto a los constituyentes minerales de la leche, se sabe que contiene todos los minerales que la vaca pudiera ingerir. El más prominente de los minerales es el calcio, está disponible en cantidades

elevadas y es fácilmente asimilado por el organismo del consumidor. La leche también contiene niveles significativos de fósforo, sin embargo, desde el punto de vista nutricional no es tan importante debido a que puede obtenerse en cantidades mayores de otros alimentos (Zela, 2005).

ii. Propiedades fisicoquímicas de la leche

Las características organolépticas de la leche son muy importantes al momento de su paso por los diferentes controles de calidad antes de llegar al consumidor final. La leche fresca es de color blanco y puede presentar un color amarillento cuando el contenido de grasa es elevado. El color es proporcionado por fosfocaseinato de calcio, carotenos y riboflavina (Guerrero y Rodríguez, 2010).

La leche fresca no debe presentar olor, sin embargo, suele adquirir el olor del recipiente en el que es almacenada. Cuando la leche se acidifica o se contamina con ciertos minerales, adquiere un olor desagradable característico. El sabor de la leche es dulce debido al alto contenido de lactosa, pero fácilmente puede adquirir sabores a hierbas u otros saborizantes artificiales (Guerrero y Rodríguez, 2010).

En la Figura No. 6 se enlistan las principales características físicas de la leche de vaca.

Densidad a 15 °C	1.030 a 1.034
Calor específico	0.93
Punto de congelación	-0.55 °C
pH	6.5 – 6.6
Acidez expresada en grados Dornic, (es decir en decigramos de acidez láctico por litro)	16 a 18

Figura No. 6. Principales características físicas de la leche de vaca

Fuente: Guerrero y Rodríguez, 2010

iii. Metales pesados en la leche

La leche puede contaminarse con metales pesados provenientes de la contaminación ambiental. Estos metales pueden llegar al ganado a través de agua o alimentos contaminados. Así mismo, la contaminación puede provenir del mal manejo del ordeño, al utilizar utensilios o contenedores de almacenamiento que tengan soldadura de plomo o que estén galvanizados (Mendoza y Medina, 2013).

La época del año afecta la composición mineral de la leche, durante el verano las concentraciones de los mismos aumentan, debido a que los animales beben más agua y tiene más disponibilidad de alimentos que pudieran estar contaminados (Mendoza y Medina, 2013).

c. Ganadería en Guatemala

Según el Censo Agropecuario de Guatemala, realizado en el año 2003, la República de Guatemala cuenta con un total de 3,495,703 cabezas de ganado de todas las especies, de las cuales 1,755,831 corresponden a cabezas de ganado bovino lo que representa un 50.8% de todas las cabezas de ganado. El 91% de todo el ganado bovino se encuentra en fincas censales, mientras que 8.4% restante se encuentra en viviendas particulares (INE, 2003).

En el departamento de Izabal se registraron un total de 166,505 cabezas de ganado vacuno, 2,819 fincas censales y 828 viviendas que cuentan con cabezas de ganado. Del total del ganado, 159,699 cabezas se encuentran distribuidas en las fincas censales, mientras que 6,806 cabezas se localizan en viviendas particulares. En los municipios de El Estor y Livingston específicamente, se registraron 10,258 y 33,501 cabezas de ganado, respectivamente (INE, 2003).

De las cabezas de ganado registradas en el departamento de Izabal, 57.0% corresponden a hembras. El departamento presentó una tasa de natalidad bruta de 142.1 y una tasa de mortalidad de 15.2, por lo que se considera que se cuenta con una buena tasa de incremento (INE, 2003).

En cuanto al número de vacas ordeñadas y litros de leche producidos al día, el censo del año 2003 indica que en el departamento de Izabal se ordeñan 10,455 vacas al día y se producen 32,497 litros de leche diarios. En el municipio de El Estor se produjeron 571 litros de leche diarios, mientras que en el municipio de Livingston se obtuvieron 2,603 litros de leche (INE, 2003).

d. Espectrofotometría de Absorción atómica

La espectrofotometría de absorción atómica (AAS) es una técnica instrumental sumamente sensible y específica, esto se debe a que las líneas de absorción atómica son muy estrechas y las energías de transición son únicas para cada elemento (Gallegos, et al., 2012).

El proceso de absorción atómica consiste en aplicar energía a una longitud de onda determinada a un átomo en estado fundamental, esta energía es absorbida por el átomo y un electrón sube a un orbital de mayor energía, lo que provoca que el átomo sea menos estable. A la capacidad del átomo de absorber energía a longitudes de onda determinadas se le conoce como absorción atómica (González y Recinos, 2015).

La espectrofotometría de absorción atómica se basa en el mismo principio de atomización directa a la llama, sin embargo, en este caso se usa un atomizador calentado eléctricamente a través de un horno de grafito (González y Recinos, 2015).

i. Instrumentación de absorción atómica

La instrumentación fundamental para realizar un análisis de AAS consiste de tres componentes principales: fuente de energía, celda para la muestra y detector de energía.

La fuente de energía radiante emite la longitud del elemento de interés; el sistema de atomización suministra la energía calorífica necesaria para la formación de átomos libres; el monocromador aísla las

radiaciones a la longitud de onda medida y el detector acoplado a un registro de datos, reporta las señales correspondientes a la cantidad de analito cuantificada (Martínez, 2015).

En la AAS por horno de grafito, la muestra dispensada en un tubo de grafito es sometida a un incremento de temperatura hasta que se consigue la atomización. En la Figura No. 7 se muestran las etapas del ciclo de temperaturas (Martínez, 2015).

Etapas	Observaciones
<i>Secado</i>	Muestra dispensada en tubo de grafito se seca a baja temperatura (100-120 °C) para evitar salpicaduras
<i>Pirolisis</i>	En esta etapa se volatilizan los componentes orgánicos e inorgánicos de la muestra, dejando el elemento de interés en una matriz menos compleja. La temperatura no debe superar el valor en la cual se producen pérdidas del analito
<i>Atomización</i>	El propósito de esta etapa es producir vapor atómico del analito y permitir la absorción de energía. La temperatura de esta etapa está en función del elemento que se esté analizando
<i>Limpieza</i>	En esta etapa el tubo de grafito se calienta a temperaturas muy elevadas para eliminar residuos de muestra
<i>Enfriamiento</i>	En esta etapa se deja el tubo de grafito a temperatura ambiente y preparado para la siguiente muestra

Figura No. 7. Etapas del ciclo de temperatura en AAS con Horno de grafito

Fuente: Martínez, 2015

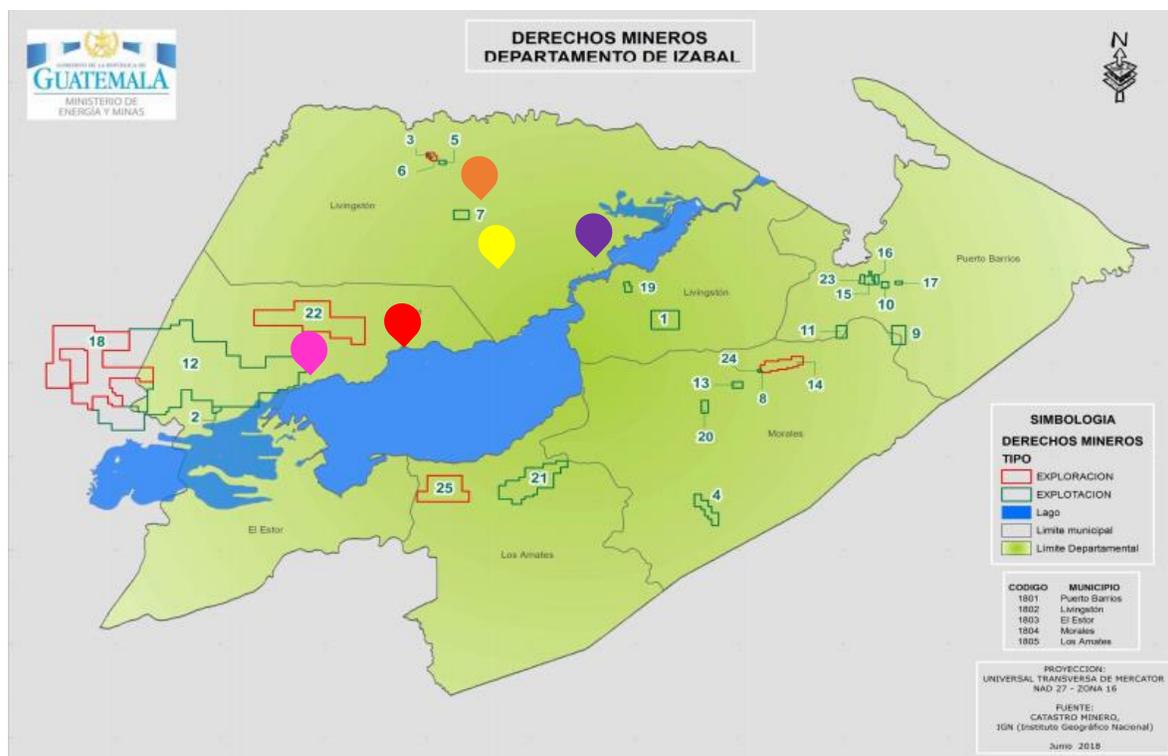
ii. Análisis cuantitativo

El parámetro utilizado para caracterizar la absorción de energía en AAS, es la absorbancia. Este parámetro sigue una correlación lineal con la concentración, siguiendo la Ley de Lambert-Beer (Martínez, 2015).

Para determinar la concentración del analito, primero se debe medir la absorbancia de una serie de disoluciones patrones que contienen una concentración conocida del analito. De esta manera se construye una

curva de calibración, que se utilizará para obtener la concentración del analito aplicando la relación absorbancia/concentración (Martínez, 2015).

Anexo No. 2: Mapa de derechos mineros en el Departamento de Izabal



Fuente: Ministerio de Energía y Minas, 2018.

Rosa: EE-I; Rojo: EE-II; Morado: LV-III; Amarillo; LV-IV; Naranja: LV-V

Anexo No. 3: Lista de aldeas pertenecientes a los municipios de El Estor y Livingston

Tabla No. 1. Aldeas pertenecientes al municipio de El Estor, Izabal.

Aldea	Cantidad de productores de leche en la zona
Agua Caliente El Paraíso	15
Balandra	10
Bocanacha	10

Caxlampon	10
Chapín Abajo	15
Chapín Arriba	15
Chichipate	10
Chinabenque	10
Chinamococh	5
Aldea Chinebal	5
El Bongo	15
El Sauce	20
Guaritas	10
La Ensenada	20
Los Ángeles Pancala	5
Aldea Manguito I	5
Aldea Manguito II	5
Aldea Marcajam	5
Aldea Naranjal Yaxte	5
Aldea Nimblabenque	5
Aldea Nuevo San Miguelito	10
Aldea Playa Pataxte	5
Aldea Rio Sauce	5
Aldea San Pablo I	10
Aldea Santiaguito	5
Aldea Santo Domingo	10
Aldea Selich	5
Aldea Semococh	5
Aldea Semuy	5
Aldea Sepum	5
Aldea Sepur	5
Aldea Setolox	5

Aldea Sexan	5
Aldea Socela	5
Aldea Tablitas	10

Fuente: construcción propia con base en la base de datos de Código Postal. <https://codigo-postal.org/guatemala/izabal/el-estor/>

Tabla No. 2. Aldeas pertenecientes a Livingston, Izabal

Aldea	Cantidad de productores de leche en la zona
Aldea San Felipe	20
Aldea Fronteras	30
Aldea Aguacate	Sin datos
Aldea Blue Creek	0
Aldea Brisas del Golfete	Sin datos
Aldea Camelias	Sin datos
Aldea Castulo Creek	15
Aldea Cayo Quemado	5
Aldea Chino Creek	Sin datos
Aldea Chocón	35
Aldea Coyucte	5
Aldea La Bacadilla	Sin datos
Aldea La Esmeralda	10
Aldea La Pintada	Sin datos
Aldea Modesto Méndez	5
Aldea Nueva Jerusalén	Sin datos
Aldea Las Pacayas	Sin datos
Aldea Quegueche	Sin datos
Aldea Río Salado	Sin datos
Aldea San Juan	Sin datos
Aldea San Marcos	Sin datos

Aldea Se Limón	20
Aldea Serranax	Sin datos
Aldea Semox	20
Aldea Toquela	10
Aldea Toxz Vial	Sin datos
Aldea San Antonio Sejá	30

Fuente: construcción propia con base en la base de datos de Código Postal. <https://codigo-postal.org/guatemala/izabal/livingston/>

Anexo No. 4: Hojas de registro de datos de las muestras de leche recolectadas.

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	<u>16/10/2021</u>	Hora:	<u>6:45</u>	Código de muestra:	<u>01-EE-I</u>
Estación climática:	<u>lloviosa</u>				
Municipio:	<u>El Estor</u>				
Nombre del mercado:	<u>Mercado Municipal Juan Bautista</u>	Localización geográfica:	<u>15.52470869099712, -89.333916873890507</u>		
Resultados de Pb	<u>0.000 mg/L</u>	Resultados de Cd	<u>0.045 mg/L</u>		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	<u>16/10/2021</u>	Hora:	<u>6:55</u>	Código de muestra:	<u>02-EE-I</u>
Estación climática:	<u>lloviosa</u>				
Municipio:	<u>El Estor</u>				
Nombre del mercado:	<u>Mercado Municipal Juan Bautista</u>	Localización geográfica:	<u>15.52470869099712, -89.333916873890507</u>		
Resultados de Pb	<u>0.004 mg/L</u>	Resultados de Cd	<u>0.002 mg/L</u>		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	<u>16/10/2021</u>	Hora:	<u>7:00</u>	Código de muestra:	<u>03-EE-I</u>
Estación climática:	<u>lloviosa</u>				
Municipio:	<u>El Estor</u>				
Nombre del mercado:	<u>Mercado Municipal Juan Bautista</u>	Localización geográfica:	<u>15.52470869099712, -89.333916873890507</u>		
Resultados de Pb	<u>0.000</u>	Resultados de Cd	<u>0.005 mg/L</u>		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	16/10/2021	Hora:	7:05	Código de muestra:	04EE-J
Estación climática:	Lluviosa				
Municipio:	El Estor				
Nombre del mercado:	del Mercado Municipal Juan Bautista		Localización geográfica:	15.52470869099712 -89.333916873890507	
Resultados de Pb	0.004 mg/L	Resultados de Cd	0.001 mg/L		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	16/10/2021	Hora:	7:10	Código de muestra:	05-EE-I
Estación climática:	Lluviosa				
Municipio:	El Estor				
Nombre del mercado:	del Mercado Municipal Juan Bautista		Localización geográfica:	15.52470869099712 -89.333916873890507	
Resultados de Pb	0.014 mg/L	Resultados de Cd	0.009 mg/L		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	16/10/2021	Hora:	7:30	Código de muestra:	06-EE-II
Estación climática:	Lluviosa				
Municipio:	El Estor				
Nombre del mercado:	del Mercado Municipal #2		Localización geográfica:	15.52491619, -89.3339979	
Resultados de Pb	0.002 mg/L	Resultados de Cd	0.007 mg/L		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	<u>10/10/2021</u>	Hora:	<u>7:40</u>	Código de muestra:	<u>07-EE11</u>
Estación climática:	<u>Lluviosa</u>				
Municipio:	<u>El Estor</u>				
Nombre del mercado:	<u>Mercado Municipal #2</u>	Localización geográfica:	<u>15.5249019, -89.3339979</u>		
Resultados de Pb	<u>0.011 mg/L</u>	Resultados de Cd	<u>0.009 mg/L</u>		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	<u>10/10/2021</u>	Hora:	<u>7:45</u>	Código de muestra:	<u>08-EE-11</u>
Estación climática:	<u>Lluviosa</u>				
Municipio:	<u>El Estor</u>				
Nombre del mercado:	<u>Mercado Municipal #2</u>	Localización geográfica:	<u>15.5249019, -89.3339979</u>		
Resultados de Pb	<u>0.004 mg/L</u>	Resultados de Cd	<u>0.142 mg/L</u>		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	<u>10/10/2021</u>	Hora:	<u>7:50</u>	Código de muestra:	<u>09-EE-11</u>
Estación climática:	<u>Lluviosa</u>				
Municipio:	<u>El Estor</u>				
Nombre del mercado:	<u>Mercado Municipal #2</u>	Localización geográfica:	<u>15.5249019, -89.3339979</u>		
Resultados de Pb	<u>0.000 mg/L</u>	Resultados de Cd	<u>0.012 mg/L</u>		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	<u>10/10/2021</u>	Hora:	<u>7:55</u>	Código de muestra:	<u>10-EE-11</u>
Estación climática:	<u>lloviosa</u>				
Municipio:	<u>El Estor</u>				
Nombre del mercado:	<u>Mercado Municipal #2</u>	Localización geográfica:	<u>15.5749619 -89.3339179</u>		
Resultados de Pb	<u>0.000 mg/l</u>	Resultados de Cd	<u>0.051 mg/l</u>		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	<u>10/10/2021</u>	Hora:	<u>8:30</u>	Código de muestra:	<u>11-LV-111</u>
Estación climática:	<u>lloviosa</u>				
Municipio:	<u>Livingston</u>				
Nombre del mercado:	<u>Mercado de Rio Dulce</u>	Localización geográfica:	<u>15.722153, -89.998159</u>		
Resultados de Pb	<u>0.000 mg/l</u>	Resultados de Cd	<u>0.009 mg/l</u>		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	<u>10/10/2021</u>	Hora:	<u>8:40</u>	Código de muestra:	<u>12-LV-111</u>
Estación climática:	<u>lloviosa</u>				
Municipio:	<u>Livingston</u>				
Nombre del mercado:	<u>Mercado de Rio Dulce</u>	Localización geográfica:	<u>15.722153, -89.998159</u>		
Resultados de Pb	<u>0.008 mg/l</u>	Resultados de Cd	<u>0.129 mg/l</u>		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	<u>10/10/2021</u>	Hora:	<u>8:45</u>	Código de muestra:	<u>13-LV-111</u>
Estación climática:	<u>Lluviosa</u>				
Municipio:	<u>Livingston</u>				
Nombre del mercado:	<u>del Mercado de Rio Dulce</u>		Localización geográfica:	<u>15.722153, -89.998159</u>	
Resultados de Pb	<u>0.000 mg/L</u>	Resultados de Cd	<u>0.001 mg/L</u>		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	<u>10/10/2021</u>	Hora:	<u>8:50</u>	Código de muestra:	<u>14-LV-111</u>
Estación climática:	<u>Lluviosa</u>				
Municipio:	<u>Livingston</u>				
Nombre del mercado:	<u>del Mercado de Rio Dulce</u>		Localización geográfica:	<u>15.722153, -89.998159</u>	
Resultados de Pb	<u>0.000 mg/L</u>	Resultados de Cd	<u>0.000 mg/L</u>		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	<u>10/10/2021</u>	Hora:	<u>8:55</u>	Código de muestra:	<u>15-LV-111</u>
Estación climática:	<u>Lluviosa</u>				
Municipio:	<u>Livingston</u>				
Nombre del mercado:	<u>del Mercado de Rio Dulce</u>		Localización geográfica:	<u>15.722153, -89.998159</u>	
Resultados de Pb	<u>0.016 mg/L</u>	Resultados de Cd	<u>0.034 mg/L</u>		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	<u>17/10/2021</u>	Hora:	<u>6:30</u>	Código de muestra:	<u>10-LV-IV</u>
Estación climática:	<u>lluviosa</u>				
Municipio:	<u>Livingston</u>				
Nombre del mercado:	<u>Mercado Semox</u>	Localización geográfica:	<u>15.830010, -89.175629</u>		
Resultados de Pb	<u>0.043 mg/L</u>	Resultados de Cd	<u>0.005 mg/L</u>		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	<u>17/10/2021</u>	Hora:	<u>6:35</u>	Código de muestra:	<u>17-LV-IV</u>
Estación climática:	<u>lluviosa</u>				
Municipio:	<u>Livingston</u>				
Nombre del mercado:	<u>Mercado Semox</u>	Localización geográfica:	<u>15.830010, -89.175629</u>		
Resultados de Pb	<u>0.000 mg/L</u>	Resultados de Cd	<u>0.001 mg/L</u>		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	<u>17/10/2021</u>	Hora:	<u>6:40</u>	Código de muestra:	<u>18-LV-IV</u>
Estación climática:	<u>lluviosa</u>				
Municipio:	<u>Livingston</u>				
Nombre del mercado:	<u>Mercado Semox</u>	Localización geográfica:	<u>15.830010, -89.175629</u>		
Resultados de Pb	<u>0.045 mg/L</u>	Resultados de Cd	<u>0.002 mg/L</u>		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	17/10/2021	Hora:	6:50	Código de muestra:	19-LV-1V
Estación climática:	Lluviosa				
Municipio:	Livingston				
Nombre del mercado:	Mercado Semox	Localización geográfica:	15.830010, -89.175029		
Resultados de Pb	0.012 mg/L	Resultados de Cd	0.000 mg/L		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	17/10/2021	Hora:	6:55	Código de muestra:	20-LV-1V
Estación climática:	Lluviosa				
Municipio:	Livingston				
Nombre del mercado:	Mercado Semox	Localización geográfica:	15.830010, -89.175029		
Resultados de Pb	0.027 mg/L	Resultados de Cd	0.004 mg/L		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston 					
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE					
Fecha:	17/10/2021	Hora:	7:15	Código de muestra:	21-LV-V
Estación climática:	Lluviosa				
Municipio:	Livingston				
Nombre del mercado:	Mercado Chocón	Localización geográfica:	15.871930, -89.221252		
Resultados de Pb	0.000 mg/L	Resultados de Cd	0.015 mg/L		

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston			
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE			
Fecha:	<u>17/10/2021</u>	Hora:	<u>7:20</u>
		Código de muestra:	<u>22-LV-V</u>
Estación climática:	<u>Lluviosa</u>		
Municipio:	<u>Livingston</u>		
Nombre del mercado:	<u>Mercado Chocón</u>	Localización geográfica:	<u>15.871930, -89.221252</u>
Resultados de Pb	<u>0.020 mg/L</u>	Resultados de Cd	<u>0.037 mg/L</u>

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston			
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE			
Fecha:	<u>17/10/2021</u>	Hora:	<u>7:25</u>
		Código de muestra:	<u>23-LV-V</u>
Estación climática:	<u>Lluviosa</u>		
Municipio:	<u>Livingston</u>		
Nombre del mercado:	<u>Mercado Chocón</u>	Localización geográfica:	<u>15.871930, -89.221252</u>
Resultados de Pb	<u>0.007 mg/L</u>	Resultados de Cd	<u>0.000 mg/L</u>

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston			
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE			
Fecha:	<u>17/10/2021</u>	Hora:	<u>7:30</u>
		Código de muestra:	<u>24-LV-V</u>
Estación climática:	<u>Lluviosa</u>		
Municipio:	<u>Livingston</u>		
Nombre del mercado:	<u>Mercado Chocón</u>	Localización geográfica:	<u>15.871930, -89.221252</u>
Resultados de Pb	<u>0.004 mg/L</u>	Resultados de Cd	<u>0.003 mg/L</u>

 Determinación de metales pesados, plomo y cadmio, en leche cruda de vaca distribuida en zonas mineras de Izabal: El Estor y Livingston			
REGISTRO DE DATOS DE MUESTRAS DE LECHE			
Fecha:	<u>17/10/2021</u>	Hora:	<u>7:25</u>
		Código de muestra:	<u>25-LV-V</u>
Estación climática:	<u>Lluviosa</u>		
Municipio:	<u>Livingston</u>		
Nombre del mercado:	<u>Mercado Chocón</u>	Localización geográfica:	<u>15.871930, -89.221252</u>
Resultados de Pb	<u>0.017 mg/L</u>	Resultados de Cd	<u>0.000 mg/L</u>

Anexo No. 5: Fotografías capturadas durante la colecta y análisis de muestras.



Fuente: Fotografía obtenida durante la colecta de muestras. Livingston, Izabal, Guatemala.

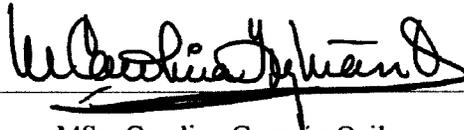


Fuente: Fotografía obtenida en el Laboratorio del Departamento de Toxicología de la Escuela de Química Farmacéutica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.



Br. María Fernanda Castillo Gutiérrez

Autor



MSc. Carolina Guzmán Quilo

Asesora



MSc. Magda E. Hernández Lima

Revisora



M.A. Lucrecia Martínez de Haase

Directora de Escuela de Química Farmacéutica



M.A. Pablo Ernesto Oliva Soto

Decano de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.