



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**MAESTRÍA EN CIENCIAS ZOOTÉCNICAS Y
SALUD ANIMAL**

TESIS

**Efecto de la fuente de selenio suplementario sobre
variables productivas, metabólicas, ruminales y
emisión de metano entérico en ovinos de engorda**

**Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias Zootécnicas y Salud Animal**

PRESENTA

Juan Manuel Casso Gaspar

Director

Dr. Oscar Enrique Del Razo Rodríguez

Codirector

Dr. Juan Carlos Ángeles Hernández

Comité tutorial

Dr. Rodolfo Vieyra Alberto

Dr. Jacinto Efrén Ramírez Bribiesca

Dr. Jorge Luis Mejía Méndez

Ciudad Universitaria de Tulancingo, abril de 2026



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Agropecuarias

Institute of Agricultural Sciences

Área Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia

Academic Area of Veterinary Medicine and Zootecnia

Maestría en Ciencias Zootécnicas y Salud Animal

Asunto: Autorización de impresión

Mtra. Ojuky del Rocío Islas Maldonado
Directora de Administración Escolar de la UAEH

El Comité Tutorial de la **TESIS** del programa educativo de posgrado titulado **“Efecto de la fuente de selenio suplementario sobre variables productivas, metabólicas, ruminales y emisión de metano entérico en ovinos de engorda”**, realizado por la (el) sustentante, **Juan Manuel Casso Gaspar** con número de cuenta **369004** perteneciente al programa de **Maestría en Ciencias Zootécnicas y Salud Animal**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el artículo 110 del reglamento de estudios de posgrado, tiene bien a extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
“Amor, Orden y Progreso”

Tulancingo de Bravo, Hidalgo, a 27 de abril de 2026

El Comité Tutorial

Dr. Oscar Enrique Del Razo Rodríguez
Director

Dr. Juan Carlos Ángeles Hernández
Codirector

Dr. Rodolfo Vieyra Alberto
Asesor

Dr. Jacinto Efrén Ramírez Bribiesca
Asesor

Dr. Jorge Luis Mejía Méndez
Asesor

“Amor, Orden y Progreso”



Av. Universidad No. 133, Col. San Miguel Huatengo, Santiago Tulantepec. C.P. 43775. Hidalgo, Mexico.

Teléfono: 7717172000 Ext.42103
meczya@uaeh.edu.mx

uaeh.edu.mx

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar y siempre le agradezco a Dios por darme la oportunidad de llegar hasta este momento de mi vida y siempre disfrutar del aquí y ahora.

A mi familia, que siempre ha estado a mi lado, motivándome en cada etapa de mi vida académica y laboral. Gracias por su amor.

Agradezco a mi director de tesis, el Dr. Oscar Enrique de Razo Rodríguez, por darme la confianza de desarrollarme en una disciplina en la cual los biólogos no somos bien recibidos. Gracias por todas las enseñanzas, consejos, regaños y sobre todo por ser tan metódico a la hora de hacer ciencia.

Agradezco mis asesores el doctor Jorge Luis Mejía Mèndez, al doctor Rodolfo Vieyra Alberto por todas sus enseñanzas a lo largo de estos 2 años.

Agradezco al Dr. Efren Ramírez Bribiesca por las facilidades de trabajar en el Colegio de Posgraduados y al Dr. Juan Carlos Ángeles Hernández por sus enseñanzas, sus regaños.

Agradezco a la M.C Irma De La Rosa Rodríguez, por su apoyo en la estructuración de la información y sobre todo por enseñarme los trucos de la escritura científica.

Agradezco a M.C. Laura Yareli López Echeverría y M.C. Oscar Castelan López por su amistad y compañía. Gracias por hacer más amena mi estancia en el ICAP.

A mis amigos que me acompañaron en estos 2 largos años, especialmente a Stefany, Melany y José Luis, por su apoyo en la realización de esta investigación gracias.

A mis compañeros y amigos de generación los M.C. Luis Daniel Tinoco Placencia y María Guadalupe Hernández Ortiz, que, pese a que fuimos la generación con menos integrantes, fuimos la generación con mayor empatía y trabajo en equipo, gracias por su amistad.

Agradezco al Dr. Fabian Gómez de Anda y M.C. José Luis Martínez Salas por su apoyo, comprensión y amistad en los momentos más difíciles de mi maestría gracias.

Agradezco al Dr. David Paredes por su apoyo y mentoría a lo largo de esta investigación.

Agradezco a la Ing. Carmen Guzman por su apoyo y enseñanza para leer las muestras en el cromatógrafo de gases.

Agradezco al Dr. Luis Corona Gochi por el apoyo con material para realizar la técnica del SF₆.

Agradezco a la empresa Alltech de Mexico, por proveernos de insumos para realizar esta investigación.

Agradezco a la Dr. Magdalena Crosby por permitirnos utilizar el laboratorio de nutrición animal del Colegio de Postgraduados.

Agradezco a la Dr. María Fernanda Vázquez Carrillo y la Dr. Claudia Cecilia Márquez Mota por el apoyo brindado para la determinación de AGVs en la facultad de MVZ de la UNAM.

Finalmente, extendiendo mi gratitud a todas las personas del Colegio de Posgraduados, Unidad de Pastoreo de la Universidad Autónoma Chapingo y profesionistas del municipio de Acatlán Hidalgo, que me ayudaron a realizar una fracción de mi investigación, ya sea proporcionando insumos, recursos o asesoría técnica. Sin su ayuda, este proyecto no hubiera sido posible.

Y a todas las personas que se den el tiempo de leer esta investigación

Gracias ...

Juan Manuel Casso Gaspar

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Dios

Dedico esta tesis a mis padres, Alejandra Gaspar Vázquez y José Juan Casso Trejo, quienes con su amor y sacrificio me han guiado en cada paso de mi vida.

A mis amigos y colegas, quienes me han brindado su apoyo y amistad incondicional durante estos años de estudio.

Dedico este trabajo a todas esas personas que buscan en la ciencia el crecimiento personal, espero que mi es fuerza contribuya de alguna forma el desarrollo de esta disciplina.

Juan Manuel Casso Gaspar

RESUMEN

El selenio (Se) posee actividad antioxidante y participa en los mecanismos de inmunidad en los rumiantes, además ayuda en otros procesos metabólicos y microbianos. Esta investigación se realizó con el objetivo de determinar el efecto de la fuente de selenio suplementario sobre parámetros productivos, metabólicos, ruminales y emisión de metano entérico en ovinos de engorda. Para ello, se realizó un metaanálisis, una evaluación *in vitro* y un experimento *in vivo*. Los resultados del metaanálisis mostraron que la suplementación con Se mejora la ganancia diaria de peso y la conversión alimenticia, así como la actividad de la glutatión peroxidasa y concentración de hormonas tiroideas, colesterol, globulinas y Se plasmático ($p < 0.05$), sin cambios en la producción de metano entérico ($p > 0.05$); dicho efecto es mayor cuando se suplementa con nanopartículas y cuando el nivel de producción de los animales es bajo ($GDP < 0.14$ kg/d). En la evaluación *in vitro* se observó una reducción en la concentración de ácidos grasos volátiles con las fuentes de Se suplementario utilizadas ($p < 0.05$), sin cambios sobre la cinética de producción de gas, pH y la digestibilidad ($p > 0.05$). En la prueba *in vivo*, no se encontraron diferencias en los parámetros productivos y ruminales por efecto de la suplementación con levadura enriquecida con Se probablemente ($p > 0.05$). En conclusión, el Se suplementario mejora los parámetros productivos y metabólicos, aunque dicha mejora no se observó en la prueba *in vivo* debido posiblemente al nivel productivo de los ovinos utilizados ($GDP > 250$ g/d).

Palabras clave: corderos, comportamiento productivo, fermentación ruminal, cinética de producción de gas, metaanálisis

ABSTRACT

Selenium (Se) has antioxidant activity and has influence on immune mechanisms in ruminants and participate in other metabolic and microbial processes. This research was conducted to determine the effect of selenium supplementary on productive, metabolic, and ruminal parameters, as well as enteric methane emissions in fattening sheep. A meta-analysis, an *in vitro* evaluation, and an *in vivo* experiment were performed. The meta-analysis results showed that Se supplementation improves daily weight gain and feed conversion, as well as glutathione peroxidase activity and the concentration of thyroid hormones, cholesterol, globulins, and plasma Se ($p < 0.05$), without changes in enteric methane ($p > 0.05$). This effect is greater when supplemented with nanoparticles and when the production level is low ($ADG < 0.14$ kg/d). *In vitro* evaluation showed a reduction in volatile fatty acid concentration with the supplemental selenium sources used ($p < 0.05$), with no changes in gas production kinetics, pH, or digestibility ($p > 0.05$). *In vivo*, no differences were found in productive and ruminal parameters due to supplementation with selenium-enriched yeast ($p > 0.05$). In conclusion, supplemental selenium improves productive and metabolic parameters, although this improvement was not observed in the *in vivo* test, possibly due to the production level of the sheep used ($ADG > 250$ g/d).

Keywords: lambs, productive performance, ruminal fermentation, gas production kinetics, meta-analysis

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA.....	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
ÍNDICE.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABLAS	xi
INTRODUCCIÓN	1
MARCO TEÓRICO	3
Fundamentos del selenio en la nutrición animal.....	3
Importancia biológica del selenio	3
Deficiencia de selenio en rumiantes	6
Distribución del Se en los suelos y su impacto en los forrajes	6
Síndrome del musculo blanco y otras manifestaciones clínicas.....	7
Efectos subclínicos: estrés oxidativo, menor crecimiento y alteración del metabolismo ruminal.....	8
Toxicidad y margen de seguridad	8
Niveles máximos tolerables	9
Manifestaciones de intoxicación crónica y aguda.....	9
Fuentes suplementarias de selenio.....	10
Selenito y selenato de sodio.....	10
Selenometionina	11
Levaduras enriquecidas con selenio.....	12
Comparativa entre fuentes	13
Efecto del selenio suplementario sobre parámetros productivos en ovinos	15
Ganancia de peso, consumo de materia seca y conversión alimenticia	15
Respuesta inmune y salud general	15
Calidad de la canal y carne	16
Influencia del selenio sobre variables metabólicas	17
Actividad antioxidante.....	17
Parámetros sanguíneos	18
Relación entre metabolismo del Se y homeostasis energética.....	18
Efectos del selenio sobre la fermentación ruminal.....	19
Bases del microbiota ruminal.....	19
Papel del Se en la actividad microbiana.....	19
Producción de ácidos grasos volátiles (AGVs)	20
Nitrógeno amoniacal y síntesis proteica microbiana.....	21
Cinética de fermentación y degradación del sustrato	21
Producción y efecto del selenio sobre la producción CH ₄	21

JUSTIFICACIÓN.....	23
HIPÓTESIS.....	24
OBJETIVOS.....	24
Objetivo general.....	24
Objetivos específicos.....	24
MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
Fase 1: Metaanálisis	25
Pregunta PICO	25
Estrategia de búsqueda	25
Criterios de elegibilidad	26
Base de datos	26
Metaanálisis	28
Evaluación de la heterogeneidad	28
Fase 2: Experimento <i>In vitro</i>	29
Ubicación	29
Uso y cuidado de animales	29
Dieta	30
Fermentación <i>in vitro</i>	31
Análisis de laboratorio	33
Variables de respuesta.....	34
Diseño experimental y análisis estadístico	35
Fase 3: Experimento <i>In vivo</i>	35
Ubicación	35
Animales	36
Prueba de comportamiento productivo	37
Análisis de laboratorio	40
Variables de respuesta.....	41
Diseño experimental y análisis estadístico	42
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
Efecto del selenio suplementario sobre variables productivas y metabólicas en corderos de engorda: metaanálisis.....	43
Efecto del selenio suplementario sobre variables de la fermentación ruminal <i>in</i> <i>vitro</i>	50
Efecto <i>in vivo</i> del selenio suplementario sobre variables productivas y ruminales en corderos de engorda.....	57
CONCLUSIONES	62
LITERATURA CITADA.....	63
ANEXOS.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de la revisión sistemática (PRISMA) sobre el efecto del selenio suplementario sobre el comportamiento productivo, actividad antioxidante, estado metabólico y emisión de metano en ovinos de engorda.

Figura 2. Prueba de potencia para el cálculo del tamaño de muestra con una confiabilidad del 95 % a partir de los resultados de Miltko et al. (2016).

Figura 3. Curva estándar entre absorbancia a 410 nm y concentración de dióxido de titanio (TiO₂, mg) elaborada para la prueba de digestibilidad *in vivo* de la materia seca en corderos de engorda.

Figura 4. Diagrama de árbol de la ganancia diaria de peso (GDP) en corderos de engorda suplementados con selenio para diferentes niveles de producción [bajo (*Low*), <0.14 kg/d; medio (*Medium*), 0.14-0.20 kg/d; y alto (*High*)], >0.2 kg/d y fuentes de selenio.

Figura 5. Diagrama de árbol de la meta-regresión de la conversión alimenticia (CA) en corderos de engorda suplementados con selenio para diferentes niveles de producción [bajo (*Low*), <0.14 kg/d; medio (*Medium*), 0.14-0.20 kg/d; y alto (*High*)], >0.2 kg/d y fuentes de selenio.

Figura 6. Diagrama de árbol de la meta-regresión de la GPXs F en corderos de engorda suplementados con selenio para diferentes niveles de producción [bajo (*Low*), <0.14 kg/d; medio (*Medium*), 0.14-0.20 kg/d; y alto (*High*)], >0.2 kg/d y fuentes de selenio.

Figuras 7. Diagrama de árbol de la meta-regresión de la Se sangre en corderos de engorda suplementados con selenio para diferentes niveles de producción [bajo (*Low*), <0.14 kg/d; medio (*Medium*), 0.14-0.20 kg/d; y alto (*High*)], >0.2 kg/d y fuentes de selenio.

Figura 8. Gráfico de cinética de producción de gas, de los tratamientos: Control, control + levadura, selenito de sodio + levadura, SeMET + levadura y levadura de Se.

LISTA DE TABLAS

Cuadro 1. Selenoproteínas que han sido identificadas, su ubicación y funciones.

Cuadro 2. Ventajas y desventajas de la suplementación con distintas fuentes de Se en rumiantes.

Cuadro 3. Dieta para corderos de engorda utilizada como sustrato en la fermentación *in vitro* para evaluar el efecto de la fuente de selenio suplementario sobre la cinética de producción de gas.

Cuadro 4. Componentes del inóculo utilizado para la fermentación *in vitro* de una dieta para corderos de engorda con diferentes fuentes de selenio.

Cuadro 5. Dieta para corderos de engorda utilizada para evaluar el efecto de la fuente de selenio suplementario sobre variables productivas y ruminales.

Cuadro 6. Medias y desviación estándar de la concentración ruminal de metano (CH₄) para el cálculo del tamaño del efecto necesario para la prueba de potencia en el cálculo del tamaño de muestra G*power®.

Cuadro 7. Efecto del Se suplementario sobre variables productivas y metabólicas en corderos de engorda.

Cuadro 8. Parámetros de la meta-regresión de las variables de salida sobre el tamaño del efecto entre corderos de engorda suplementados con selenio y el grupo control.

Cuadro 9. Parámetros de la cinética de producción de gas *in vitro* (volumen máximo, V; tasa de producción de gas, S; y tiempo de retardo, L) de una dieta para corderos de engorda con diferentes fuentes de selenio suplementario.

Cuadro 10. pH, digestibilidad de la materia seca (DMS) y de la materia orgánica (DMO), concentración de nitrógeno amoniacal (N-NH₃) y producción de metano (CH₄) obtenidos durante la fermentación *in vitro* de una dieta para corderos de engorda con diferente fuente de selenio suplementario.

Cuadro 11. Concentración molar y porcentaje de ácidos grasos volátiles (AGV) obtenidos durante la fermentación *in vitro* de una dieta para corderos de engorda con diferente fuente de selenio suplementario.

Cuadro 12. Comportamiento productivo en corderos de engorda suplementados con levadura enriquecida con selenio a una concentración de 0.9 mg/kg MS en la dieta.

Cuadro 13. Variables ruminales en corderos de engorda suplementados con levadura enriquecida con selenio a una concentración de 0.9 mg/kg MS en la dieta.

INTRODUCCIÓN

El selenio (Se) es un oligoelemento con capacidad antioxidante en los organismos, este forma parte de más de 30 selenoproteínas las cuales se distribuyen en tejidos y órganos (Malyugina et al., 2021). Este mineral resulta esencial en la nutrición animal pese a que se requiere en bajas concentraciones en el organismo. Dadas las condiciones específicas del eje Neovolcánico de México, minerales antagonistas del pasado volcánico, como el azufre (S), limitan la biodisponibilidad y la absorción de Se en los forrajes, es por eso por lo que la suplementación de Se en la región del centro de México es por medio de su incorporación en las dietas (Ramirez-Bibriesca et al., 2004).

Existen diferentes fuentes de Se las cuales son usadas en la suplementación mineral. Dado que tienen distintos porcentajes de absorción, éstas se dividen en dos grupos: fuentes orgánicas y fuentes inorgánicas. Las inorgánicas se caracterizan por tener un umbral bajo de suplementación debido a su toxicidad, mientras que las orgánicas tiene un mayor margen de tolerancia en los rumiantes y una mayor asimilación de este mineral (Underwood y Suttle, 1999; Novoselec et al., 2022). Dado que el Se tiene un margen corto de dosificación, no resulta ser mortal al corto o largo plazo en animales de reproducción (Davis et al., 2008), sin embargo, dosis supra nutricionales de más de 20 mg Se/kg MS en pruebas *in vitro* resultan tener efectos negativos en la microbiota ruminal disminuyendo la digestibilidad de los nutrientes (Almaraz et al., 2018).

El Se tiene múltiples beneficios cuando se suplementa eficientemente, dentro de los cuales destacan a nivel metabólico en las hormonas tiroideas encargadas de regular el metabolismo celular y, por ende, son las encargadas de controlar el catabolismo y anabolismo en los rumiantes (Hendawy et al., 2021). Por otra parte, este mineral tiende a afectar positivamente a las comunidades bacterianas del rumen, especialmente géneros *Fibrobacter* y *Ruminococcus* que están relacionados a la degradación de la celulosa, carbohidrato que tiene la característica de retardo en la fermentación ruminal (Fan et al., 2020; Cui et al., 2021). Por lo cual, este mineral toma relevancia debido a que participa en la síntesis de exoenzimas de dichas bacterias. Dadas estas condiciones, este mineral es afín a los géneros bacterianos

y a la producción de estas enzimas, al mantener las condiciones idóneas para su reproducción la eficiencia bacteriana aumenta, así como la fermentación ruminal (Hendawy et al., 2021).

Por tanto, esta investigación tuvo el objetivo de determinar el efecto de la fuente de Se suplementario sobre parámetros productivos, metabólicos, ruminales y emisión de metano entérico en ovinos de engorda, mediante una revisión sistemática, una prueba de digestibilidad *in vitro* y una prueba de comportamiento productivo, con la finalidad de identificar la fuente con máxima eficiencia productiva, que favorezca el metabolismo y la fermentación ruminal, y reduzca las emisiones de metano en ovinos de engorda.

MARCO TEÓRICO

Fundamentos del selenio en la nutrición animal

Importancia biológica del selenio

El Se es un elemento que se encuentra con poca disponibilidad en los suelos. Aunque existen regiones con concentraciones elevadas, los niveles en promedio pueden variar de 0.01-0.2 mg/kg considerándose zonas con déficit de este mineral a concentraciones menores a 0.6 mg/kg (Qi et al., 2023). Este elemento se requiere en cantidades traza, sin embargo, cuando es limitado en la dieta y ocasiona deficiencia en animales, tiende a causar distintas afectaciones como trastornos reproductivos y metabólicos: espermatozoides con poca motilidad, alta mortalidad embrionaria, partos prematuros, mortinatos y alta incidencia de retenciones placentarias; enfermedad del músculo blanco, así como hipo e hipertiroidismo (Mehdi et al., 2013; Villanueva, 2011).

El Se no puede ser asimilado en los organismos como un elemento químicamente estable, pero si en forma de selenatos, selenitos y selenuro, de lo contrario interfiere en el metabolismo (Hendawy et al., 2021). Qi et al. (2023) mencionan que la mayor biodisponibilidad se encuentra como selenoproteínas, que son estructuras que por medio de reacciones de óxido-reducción, son acopladas a cadenas de péptidos y de aminoácidos como la cisteína. Actúan a nivel celular para prevenir daños asociados con la oxidación celular.

Beckett y Arthur (2005) mencionan que la mayoría de las funciones de Se son realizadas por las selenoproteínas; estas se distribuyen en diferentes órganos y tejidos, y tienen diferentes especificidades y funciones de sustrato. Actualmente, se conocen cerca de 25 selenoproteínas, las cuales tienen distintas funciones dentro del metabolismo y fisiología de los mamíferos (Cuadro 1). Las selenoproteínas en su mayoría actúan como oxidorreductasas y se distribuyen en diferentes partes de los tejidos celulares. Las más comunes se encuentran en el hígado, riñón y músculo, y funcionan como antioxidantes que se encargan de reducir los radicales libres en las células e intervienen en la síntesis de la hormona tiroidea triyodotironina (T_3) (Beckett y Arthur, 2025).

Cuadro 1. Selenoproteínas que han sido identificadas, su ubicación y funciones.

Abreviatura	Selenoproteína	Ubicación principal	Función
GPX1	Glutación peroxidasa citosólicas	Citosol tisular, almacenamiento de glóbulos rojos	Antioxidante
GPX2	GPX hiperóxido de fosfolípidos	Membranas intracelulares, particularmente testículos	Antioxidante intracelular
GPX3	GPX de plasma	Plasma, riñón y pulmón	Antioxidante extracelular
GPX4	GPX gastrointestinal	Mucosa intestinal y riñón	Antioxidante de la mucosa
GPX5	GPX epididimario	Epidídimo	Antioxidante débil
ID1 o DIO1	Yodotironina 5-deyodinasas tipo 1	Hígado, riñón y músculo	Conversión de T ₄ a T ₃
ID2 o DIO2	Yodotironina 5'-deyodinasas tipo II BAT	Hígado, riñón y músculo	Conversión de T ₄ a T ₃
ID3 o DIO3	Placenta de yodotironina 5-deyodinasas tipo III	Hígado, riñón y músculo	Conversión de T ₄ a T ₃
TR1, 2 y 3	Tiorredoxina reductasas 1,2 3	Riñón y cerebro	Ciclo redox
Sel H	Selenoproteína H	Tejido nervioso	Neuroprotección
Sel N	Selenoproteína N	Músculo	Proliferación celular
Sel P	Selenoproteína P	Plasma	Transporte
Sel R	Selenoproteína R	Hígado y riñón	Reductasa
Sel W	Selenoproteína W	Músculo	Antioxidante y fijador de calcio
MCSep	Selenoproteína capsular mitocondrial	Cápsula mitocondrial del esperma	Almacena GPX4

Tomado de Suttle (2010).

La glutatión peroxidasa (GPx) es la enzima más caracterizada de las selenoproteínas, debido a su viabilidad celular que tiene en la reducción de los radicales libres en células (Zhang et al., 2023). Por otra parte, también se encuentran las enzimas yodotironina deiodinasas 1,5 (DIO1-3) que regulan la hormona tiroxina (T₄) mediante una deiodinación (Lei et al., 2022).

Las deiodinasas son enzimas que participan en el metabolismo de las hormonas tiroideas, las DIO1 y DIO2 transforman T₄ a triyodotironina T₃, esta última es la principal forma activa de estas hormonas (Suttle, 2010). Para la síntesis de la hormona tiroidea se requiere Se como cofactor enzimático, la T₃ y T₄ se encargan de regular el metabolismo por medio de una serie de reacciones bioquímicas para el crecimiento, el aumento de masa muscular y almacenamiento de nutrientes (Arshad et al., 2021). La hormona tiroidea tiene un papel fundamental en los neonatos a partir de los primeros 15 días después del nacimiento, para mantener una adecuada inmunidad y un óptimo desarrollo, esta hormona estimula los factores de crecimiento: nervioso y epidérmico (EGF y NGF) (Cabello y Wrutniak, 1989). Para ello se requiere una relación mutualista entre el Se y la vitamina E (Suttle, 2010). En un estudio realizado por Dhari y Kassim (2019), se evaluó el comportamiento productivo y fisiológico de la suplementación de Se y vitamina E contra un grupo control, y se observó un aumento en la producción de la hormona tiroidea en los periodos finales de la engorda (60-90 días). El grupo control al no tener suplementación mostró una disminución en la ganancia diaria de peso (GDP), ingesta de materia seca (IMS), T₃, Se e insulina, con respecto a los grupos suplementados.

En la nutrición animal existen elementos antagonistas como el azufre (S) y el hierro (Fe), que afectan la biodisponibilidad del Se en los rumiantes. El azufre a concentraciones de 2.4 g/kg MS en suelo disminuye la biodisponibilidad de este elemento, mientras que el Fe disminuye la disponibilidad debido a que transforma a un complejo no asimilable en los eritrocitos transferrinas (Jamal Rajab et al., 2023). Existe también sinergia entre el Se y el yodo (Y), si el Y se encuentra en niveles bajos en los organismos no puede actuar T₃ a pesar de estar presente Se, para contrarrestar los efectos de deficiencia de la hormona tiroidea el excipiente de Se

sigue la vía de síntesis de GPX citosólicas que son las encargadas de contrarrestar el estrés oxidativo en los tejidos del músculo (Zagrodzki et al., 1998).

Deficiencia de selenio en rumiantes

La deficiencia de Se en los rumiantes se manifiesta de diferentes maneras, la más común es la enfermedad del músculo blanco causada por un bajo consumo de Se en el último tercio de la gestación y en los primeros días después del parto. Esta afectación clínica se da por una baja producción de GPX citosólica que se distribuye en los tejidos musculares, al existir una baja reducción de los radicales libres en la membrana celular, el aumento de este compuesto químico desestabiliza el pH de la célula ocasionando una lisis celular en cadena (Rodriguez et al., 2018).

Distribución del Se en los suelos y su impacto en los forrajes

A nivel mundial, la distribución de Se no es uniforme, ya que existen zonas muy marcadas tanto con deficiencias como con niveles mayores a los normales. En México, específicamente en la zona centro que coincide con el eje Neovolcánico, presenta características edafológicas deficientes de Se (Shamberguer, 1981). Ramírez-Briebesca et al. (2004) realizaron un diagnóstico de Se en corderos prenatales y neonatos de la zona centro de México, específicamente en Tlaxcala y Puebla, y encontraron una tasa de mortalidad de corderos hasta del 70 % debido a la deficiencia de Se en los suelos donde las concentraciones normales del mineral son 0.1 mg Se/Kg MS, sin embargo, la concentración encontrada fue 0.02 µg/g MS. Esto repercute directamente en el forraje, y por consiguiente, en deficiencias de Se en los neonatos. Asimismo, se reportaron concentraciones del mineral de 0.026 µm/ml en sangre antes de suministrar el Se, posteriormente, cuando se inyectó Se a los corderos dicha concentración aumentó de 0.057 a 0.153 µm/ml. Por lo cual, los autores indican que la dosificación y concentración de este mineral tiende a variar de acuerdo con las características edafológicas de la región en plantas y animales, por lo que se debe utilizar un suplemento parental 0.25 mg Se/Kg y 0.5 mg Se/Kg de peso vivo para prevenir la distrofia muscular y la mortalidad de los corderos.

Díaz-Zarco et al. (2022) realizaron una caracterización edafológica de los suelos en bosques, llanuras y lomeríos en el municipio de San Felipe del Progreso, Estado de

México, y encontraron concentraciones de Se de 0.002 a 0.15 mg Se/Kg MS en suelo y de 0.002 a 0.81 mg/Se Kg MS en forraje, similares a las encontradas por Ramírez-Bribiesca et al. (2004). Los autores mencionan que la disponibilidad de Se no solo está sujeta a los factores fisicoquímicos, sino que otras características edafológicas intervienen con la absorción de Se por parte de los forrajes. Otro factor abiótico importante, son los niveles de precipitación ya que ésta ayuda a una asimilación más rápida de incorporación en los forrajes y, por consiguiente, la transferencia de Se a los neonatos aumenta.

Síndrome del musculo blanco y otras manifestaciones clínicas

La mayor parte de las afectaciones por deficiencia Se, se relacionan con una baja actividad antioxidante por parte de los mecanismos de defensa de los organismos, estas están correlacionadas con la Vitamina E y las GPX, las cuales se encargan de eliminar las especies de radicales libres (ROS). Otras de las manifestaciones de deficiencia de este mineral son los trastornos reproductivos asociados a las células germinales, mortalidad perinatal y posnatal relacionada con la respuesta termogénica al frío y enfermedades relacionadas con una baja actividad inmunológica (Suttle, 2010).

Micheloud et al., (2018) reportan que en un rebaño de Argentina se diagnosticó la enfermedad del músculo blanco en corderos Dorper puros. Además, mencionan que las cruas de Dorper x Santa Inés mostraron menos mortalidad debido a esta patología, mientras que los Dorper puros mostraron mayor índice de mortalidad. Esto se debe a que esta raza tiene un crecimiento acelerado en los primeros meses de vida, es por lo que se utiliza para la producción de carne. Así mismo, dichos autores reportan que, en los suelos de este país, los suelos ácidos predisponen a ciertos minerales como el calcio, fosforo y magnesio, adicionalmente los suelos son fertilizados con fosfatos y sulfatos, por lo que los selenitos solubles forman complejos con sales de hierro que disminuyen la biodisponibilidad en los suelos. Dentro de los hallazgos histopatológicos describieron daños en el musculo esquelético y lesiones a nivel del miocardio.

Efectos subclínicos: estrés oxidativo, menor crecimiento y alteración del metabolismo ruminal

Los niveles de absorción del Se tienden a variar entre rumiantes y no rumiantes, en rumiantes la tasa de asimilación varía de 29 a 80 %. Mientras que en no rumiantes esta tiende a variar de 84 a 94 % respecto al tipo de fuente con la que se suplementa. La absorción en rumiantes es menor debido a la intervención de las bacterias ruminales, las cuales reducen el Se a selenuros y es incorporado a la proteína microbiana (Lei et al., 2022). Las bacterias ruminales tienen la función de degradar los nutrientes. Se ha comprobado que cuando se suplementa con fuentes orgánicas de Se aumenta la actividad ruminal de consorcios bacterianos ligados a la degradación de la celulosa y, por ende, los productos derivados de la fermentación ruminal aumentan (Cui et al., 2021).

Sin embargo, Reséndiz-Hernández et al. (2012), que evaluaron los efectos de la complementación con Se y cromo (Cr), mostraron que las bacterias ruminales incorporaron con mayor eficacia el Se orgánico, por lo cual aumentaron los productos de la fermentación ruminal. La mayor parte del Se fue incorporado por las bacterias ruminales en la proteína microbiana, lo que ayudo a tener una mayor ganancia de peso respecto a los otros tratamientos.

Toxicidad y margen de seguridad

El Se se regula en los organismos para mantener concentraciones adecuadas de selenoproteínas y evitar una intoxicación (Burk y Hill, 2015), ya que el selenito y el selenato son más tóxicos que el Se elemental y los selenuros. Por ello, es importante ajustar las dosis terapéuticas parentales al peso corporal ya que su rápida disposición en el torrente sanguíneo tiende a formar selenuro de hidrogeno (H_2Se), el cual resulta ser un agente oxidante que causa daños a nivel celular. En zonas donde crecen plantas seleníferas existe una menor tolerancia y una mayor mortalidad por el consumo excesivo de este mineral, ya que dichas plantas pueden contener más de 4 g Se/Kg MS, causando el síndrome del tambaleo ciego (Suttle, 2010).

En una investigación, MacDonald et al. (1981) evaluaron las dosis letales de selenito de sodio con 1 y 2 mg/kg de peso vivo (PV), y encontraron que a dosis letales de 2

mg Se/kg PV se observa cansancio y falta de apetito. Después de la inyección con la dosis de Se los animales que murieron a las 12 h después del tratamiento. Estos animales presentaron edema en las paredes de los vasos sanguíneos y en los espacios de Virchow-Robin. Además, los autores mencionan que los mejores órganos o tejidos para determinar Se son la sangre, hígado y corteza renal.

Niveles máximos tolerables

En el National Research Council (2007) se recomienda que el selenio adicionado a las dietas de ovinos no debe exceder 0.3 mg/kg MS. Actualmente, se considera un nivel máximo tolerable de selenio en las dietas de 5 mg/kg. Sin embargo, una investigación en ovinos para establecer los límites máximos tolerables de Se inorgánico, encontraron que las concentraciones de este mineral de 10 a 20 mg Se/kg MS, en periodos de 84 días y 72 semanas, no mostraron efectos toxicológicos secundarios, mientras que para dosificación de Se orgánico esta alcanzó 6.6 mg/Kg MS en donde se concluyó que no existieron efectos secundarios en el rendimiento de los animales y en su salud (Davis et al., 2006 y DT Juniper et al 2007). Por su parte, Almaraz et al. (2018) encontraron que la degradación *in vitro* de la materia seca disminuye con más de 40 mg Se/Kg MS. Existen dosis marcadas para la suplementación de Se en los rumiantes, sin embargo, Camacho et al. (2012) mencionan que la adición de Se en los rumiantes va a depender de la condición fisiológica

Manifestaciones de intoxicación crónica y aguda

La selenosis es una de las afecciones causadas por el exceso de este mineral en los organismos, las principales afecciones son caída de pelo, uñas quebradizas y fatiga muscular. Algunas fuentes como el selenito y selenato de sodio resultan ser tóxicas a dosis bajas y cuando se inyectan vía intramuscular 0.4-0.6 mg Se Kg/PV, debido a su rápida acción en los vasos sanguíneos (Suttle, 2010). La selenosis crónica se presenta por la exposición a más de 30 días con granos o forrajes seleníferos y puede causar una alopecia simétrica bilateral y el crecimiento dismórfico de las pezuñas, causando daños al miocardio después de 5 semanas de intoxicación. El diagnostico de esta enfermedad se basa en signos clínicos como lesiones bioquímicas, patologías y análisis químico. El tratamiento es incierto en

rumiantes ya que no se ha estudiado en estos animales. En caballos las estrategias son suministrar dietas bajas en Se y altas en proteínas de alta calidad. Por último, para prevenir las afectaciones por Se, es importante conocer las características edafológicas del suelo, cuando los animales se encuentren en pastoreo; además de monitorear a los animales ante la presencia de los signos clínicos ya descritos (Raisbeck et al., 2020).

Fuentes suplementarias de selenio

Selenito y selenato de sodio

Existen dos formas químicas más utilizadas en la nutrición animal cuando se habla de Se. Las fuentes inorgánicas, es decir, que no contienen átomos de carbono en su estructura como el selenito (Na_2SeO_3) y selenato de sodio (Na_2SeO_4), solo se diferencian por el nivel de oxidación (Hendawy et al., 2021). Estas fuentes inorgánicas tienen diferentes tasas de absorción. El selenato de sodio tiene una absorción en el intestino de 50 al 60 %, mientras que el selenito de sodio tiene una absorción de 20 a 30 %. El selenato y selenito tienen mayor absorción que el Se elemental, el cual es oxidado e incorporado en la proteína microbiana y otra fracción es metabolizada a selenio insoluble. El selenato se oxida a selenofosfato y entra a la síntesis de selenoproteínas, mientras que el selenito forma selenuros, que son absorbidos e incorporados en GPx (National Research Council, 2007; Lei et al., 2022). Este compuesto es transportado por las albúminas a través del torrente sanguíneo y se transporta al hígado en donde actúa como cofactor enzimático, el selenio no puede ser almacenado en los tejidos, por lo cual es desechado en la orina y por medio de la saliva (Ceballos y Wittwer, 1996).

Existen ciertos efectos de las fuentes inorgánicas cuando se suplementan, una de estas afectaciones es el nivel de toxicidad. El selenato pese a tener una mayor eficiencia en el metabolismo resulta ser más tóxico que el selenito ya que al aumentar las concentraciones del compuesto en el organismo tiende a ocasionar selenosis debido a una alta disponibilidad de selenoproteínas. Mientras, el selenito es tóxico cuando existen reacciones redox con los grupos sulfhidrilos, además que en dosis excesivas puede ocasionar estrés oxidativo debido a la interacción con especies reactivas de oxígeno (ROS) (Suttle, 2010).

Ramírez-Bribiesca et al. (2004) estudiaron los efectos del suministro de selenito de sodio sobre la mortalidad en corderos neonatos en el centro del país. En esta investigación se utilizó selenito de sodio inyectado vía intramuscular y encontraron que ésta es una opción para contrarrestar los bajos niveles de Se transmitidos de madre a hijo en zonas deficientes en este mineral.

Selenometionina

La selenometionina ($C_5H_{11}NO_2Se$) es un aminoácido con un átomo de Se que sustituye a uno de azufre (S). La selenometionina (SeMET) tiene una baja degradación en rumen, por lo tanto, la mayor parte de este compuesto pasa a ser utilizada en intestino delgado (Galbraith et al., 2015). En el organismo puede seguir dos rutas metabólicas; la primera entra en el proceso de síntesis proteica y esta se almacena en tejidos: musculo, hígado, riñón y sangre, se libera durante la proteólisis actuando como una reserva fisiológica de Se. La segunda ruta de acción de la SeMET es por la conversión a selenocisteína, por medio de una transulfuración, que es la forma funcional para la transformación de las selenoproteínas, GPX, tioredoxina reductasa y yodotironina deiodinasa, las cuales se vinculan en el ciclo regulatorio de la tiroides (Surai, 2006).

La SeMET se absorbe por medio del transportador intestinal de aminoácidos neutros de la metionina, éste tiene una absorción en el intestino de 70 a 90 %. A diferencia de las fuentes inorgánicas tiene baja interacción con la microbiota ruminal, de ahí que ésta tiene una alta eficacia de absorción en el intestino delgado. En cuanto a los beneficios, la SeMET aumenta la actividad de la GPx, el estado antioxidante, la concentración, la transferencia de Se en calostro y tejidos; además de tener un periodo activo en el músculo mayor que otras fuentes (Ullah et al., 2020). Existen diferencias entre la naturaleza de las fuentes suplementarias de Se y va a depender de su degradación en rumen o absorción en intestino delgado. La SeMET tiene una baja interacción con la microbiota ruminal por lo que llega íntegra al intestino delgado en donde es absorbida por difusión simple, tiene una mayor asimilación y transformación a precursores de las selenoproteínas que las fuentes inorgánicas. Por ello, cuando se suplementa con SeMET hay menor riesgo por intoxicación y el selenio puede ser transferido a las crías actuando como reservorio

ante bajos niveles de Se en el organismo. Sin embargo, las reservas de Se en músculo no pueden cubrir una deficiencia de Se (Paulson et al., 1968).

Monterrosa et al. (2011) investigaron los efectos del selenito de sodio y la SeMET sobre la fermentación ruminal en ovinos canulados. Ellos no encontraron diferencias significativas entre los tratamientos y el grupo control para las variables ruminales pese a que aumentaron los valores de Ácidos Grasos Volátiles (AGVs) en los tratamientos. Sin embargo, encontraron que la suplementación de Se aumenta las poblaciones bacterianas del rumen, así como la acumulación y absorción de Se en rumen e intestino. Así, ellos demostraron que el Se tiene actividad sobre la microbiota ruminal.

Levaduras enriquecidas con selenio

La levadura de Se es una de las fuentes más seguras en la suplementación y esto se debe a la capacidad de *Saccharomyces cerevisiae* para incorporar el selenio, a este proceso se le conoce como biofortificación. Este es un proceso biotecnológico en donde se cultivan las cepas de levadura en medios nutritivos dándole todas las condiciones para que crezca antes de la fase de crecimiento exponencial. Se añade el Se a dosis controladas para evitar una intoxicación de la levadura. Para ello, ocurre un proceso de reducción del Se a Se⁰, SeCYS- SeMET por vía de la metionina resultando los compuestos de mayor prevalencia en los cultivos. Finalmente, se inactiva la levadura y se termina el proceso quedando además de Se orgánico, péptidos y proteínas biodisponibles para los rumiantes (Hansen y Deguchi, 1996).

Las fuentes inorgánicas tienen una mayor asimilación por parte de la microbiota ruminal, no se degrada el Se⁰ que es un derivado poco activo para la síntesis de selenoproteínas; este se puede almacenar en periodos prolongados en el músculo y puede ser utilizado en la proteólisis, con mayor transferencia de Se a la cría a través del calostro. En cuanto a la toxicidad, tiene un mayor rango de tolerancia, reduce los radicales libres en comparación con el selenito de sodio, mejora la respuesta inmunitaria y la reproducción. Entre otros beneficios, la levadura resulta ser la mejor fuente para suplementar Se en los rumiantes (Novoselec et al., 2022).

Cui et al. (2021) evaluaron distintas dosificaciones de levadura de Se en ovinos alpinos de la meseta de Tibet, la cual tiene una elevación de 2000 a 4000 msnm y una temperatura promedio de 0 a 15 °C. El experimento se dividió en cuatro bloques, cada uno con seis corderos de un año (control, 0.09, 0.18 y 0.36 mg Se/Kg MS). El periodo de muestreo de los animales constó de 35 días. En esta investigación el objetivo principal fue observar el comportamiento de la microbiota ruminal con respecto al ambiente. Una de las principales características de la región es que al presentar temperaturas bajas durante todo el año la disponibilidad de forraje es limitado y estos tienden a ser bajos en nutrientes, por lo cual uno de los principales objetivos fue observar la eficiencia del rumen ante estos cambios de ambiente, al presentarse ambientes en donde los animales tienden a presentar hipoxia. Así, ellos observaron que el selenio afectaba la eficiencia ruminal de los corderos ya que en concentraciones medias de Se, se observa un aumento del nitrógeno amoniacal (N-NH₃) y AGVs, además de que las poblaciones de bacterias se ven afectadas ya que predominan géneros *Fibrobacter* y *Ruminococcus*. Finalmente, en esta investigación se observó un cambio en la composición bacteriana que afecta variables ruminales, por lo tanto, la adición de esta fuente de Se es una alternativa de suplementación para corderos en pastoreo.

Comparativa entre fuentes

En cuanto a la suplementación de Se con distintas fuentes existen consideraciones que son de gran ayuda para entender los mecanismos por medio de los cuales actúan estas (Cuadro 2). Por ejemplo, los niveles de toxicidad son más altos con fuentes inorgánicas mientras que las orgánicas son de menor riesgo, la asimilación es variable entre fuentes y tienen distintas vías metabólicas por las cuales ayudan a los rumiantes a asimilar este compuesto, y por último, los efectos en los parámetros productivos y fisiológicos son diferentes para cada fuente.

Cuadro 2. Ventajas y desventajas de la suplementación con distintas fuentes de Se en rumiantes.

Fuente	Ventajas	Desventajas
Selenito y selenato de sodio	Tiende a estar más disponible en la microbiota ruminal. Es una fuente con un costo accesible para suplementar Se incorpora en la proteína microbiana. Útil para suplementar las necesidades básicas de este mineral.	Tiene niveles bajos de tolerancia. Tiene baja retención en el organismo. Menor retención muscular.
Selenometionina	Asimilación en el intestino de alrededor 50%. Se incorpora de manera más eficiente para formar precursores de selenoproteínas. Mejora el estado antioxidante y respuesta inmune.	Tiende a tener un costo elevado. Potencial exceso si no se balancea correctamente.
Levadura de Se	Asimilación en el intestino 60% La suplementación con esta fuente no solo aporta Se sino que aporta péptidos. Mejora los parámetros productivos.	Tiene un alto costo Requiere de control de calidad entre lotes.

Tomado de Paulson et al. (1968), Suttle (2010) y Novoselec et al. (2022).

Efecto del selenio suplementario sobre parámetros productivos en ovinos

Ganancia de peso, consumo de materia seca y conversión alimenticia

Las variables productivas están relacionadas con la eficiencia de las dietas proporcionadas a los animales, ya que de ésta va a depender dichos parámetros. Por ello, es importante mantener un pH adecuado que ayude a eficientizar la microbiota ruminal la cual es sensible a los ingredientes de las raciones. Como se ha mencionado anteriormente, el Se es un antioxidante natural que protege contra ROS a los organismos y en el rumen tiene la capacidad de mantener un pH adecuado para la fermentación ruminal (6.2-6.8) (Hendawy et al., 2021). Por su parte, Cárdenas et al. (2023) utilizaron corderos la raza Pelibuey para evaluar los parámetros productivos, con 2 fuentes de Se: selenito de sodio y levadura de Se (Selplex®) y encontraron que la ganancia de peso fue mayor con la levadura Se, debido a que tiene una mayor biodisponibilidad para la microbiota ruminal. Sin embargo, en la investigación de Domínguez-Vara et al. (2009), utilizando la levadura con Se en corderos de la raza Rambouillet, no observaron diferencias estadísticas en las variables productivas.

Klein et al., 2025 evaluaron los efectos del Se y Zn sobre las variables fisiológicas y productivas de vacas lechera observaron que para los parámetros productivos la IMS no difirió de los tratamientos no suplementados mientras que para la calidad de la leche y variables fisiológicas el uso de Zn quelatado y Se orgánicos tienen efectos positivos aumentando la calidad de la leche y mejorando la respuesta inmune de las vacas. Por otra parte, Ibrahim y Mohamed (2018), evaluaron 3 fuentes de Se (selenito de sodio, levadura de Se y nanopartículas Se) y observaron un mayor efecto en los parámetros productivos (CA) cuando se suplemento con levadura Se y nanopartículas Se, esto se debido a la mayor biodisponibilidad que generan estas fuentes.

Respuesta inmune y salud general

El Se al ser un antioxidante natural es considerado como un elemento que aumenta la capacidad inmunitaria contra patógenos. El estudio en la hematología es amplio y controvertido en algunos aspectos, por ejemplo, en investigaciones como la Alimohamady et al. (2013) encontró que la suplementación con distintas dosis y

fuentes de Se no afectó los parámetros sanguíneos ya que no existió cambios en los glóbulos blancos y rojos. Sin embargo, Cárdenas et al. (2023) demostraron que la suplementación con Se aumenta la concentración de Se en sangre, así como la producción de albúminas e inmunoglobulinas; cabe destacar que la primera es una proteína que funciona como transporte para el Se y las inmunoglobulinas son inmunoestimulantes de los linfocitos que ayudan a contrarrestar virus y bacterias en la sangre, por ende, existen discrepancias entre autores. Por último, Faixová et al. (2007), encontraron que la suplementación con levadura de Se aumentó los valores hemáticos con una suplementación de 0.3 mg Se/kg MS, por lo tanto, el Se interviene como un inmunoestimulante para prevenir enfermedades causadas por patógenos.

El Se en la salud tienen distintas vías de acción directas e indirectas, por ejemplo, es un antioxidante natural que actúa en los tejidos de los organismos; así también tiende a formar relaciones con la vitamina E que es un antioxidante liposoluble, está ligado con las inmunoglobulinas y albuminas que ayudan a mantener una inmunidad contra virus y bacterias. Por otra parte, interviene en la síntesis de T_3 que se encarga de regular el metabolismo y, por ende, el crecimiento muscular a partir de la selenoproteína W (Suttle, 2010).

Calidad de la canal y carne

Las variables que se contemplan para evaluar la calidad de la carne son: pH en canal caliente y fría, peso de la canal caliente y fría, grosor de la grasa y valores nutrimentales de la carne (Cárdenas et al., 2021). Mariezcurrena-Berasain et al. (2022) evaluaron la calidad de la carne en corderos suplementados con levadura de Se y encontraron que el pH de la canal fría estuvo en un rango de 5.3 y 5.7, el cual es óptimo para mantener un buen aspecto y sabor de la carne. El grupo con la suplementación de 0.6 mg Se/Kg MS fue el que retuvo mayor humedad, por lo tanto, fue el que tuvo un mayor rendimiento de la canal; mientras que la suplementación con Se a una dosis de 0.35 mg /kg MS obtuvo una mayor cantidad de proteína en la carne. Asimismo, en la grasa de la carne, el grupo no suplementado obtuvo un mayor porcentaje de ésta. Finalmente, los niveles de carbohidratos fueron mayores en el grupo de 0.60 mg Kg/MS. Lo anterior se debe a que metabólicamente aumenta

la eficiencia y utilización de nutrientes, evitando una alteración por estrés oxidativo. Por otra parte, Cárdenas et al. (2022) encontraron un menor rendimiento de la canal cuando se suplementa con selenito de sodio y levadura de selenio, sin embargo, la deposición de este elemento en los músculos aumento con respecto al grupo control en el tratamiento de levadura de Se 0.3 mg/kg MS. Con niveles más altos o menores de Se la repuesta no es significativa, debido al gasto energético para la producción de selenoproteínas y el gasto energético que con lleva desechar el Se excedente.

Influencia del selenio sobre variables metabólicas

Actividad antioxidante

La capacidad antioxidante en los organismos esta mediada por distintos cofactores enzimáticos y cada una va a tener un lugar de mayor actividad. Por ejemplo, la vitamina E actúa como un compuesto liposoluble y se encarga de transportar los radicales libres al espacio intermembranal. Por otra parte, el Se actúa en el citosol de las células intermediado por la GPX la cual reduce los peróxidos y se transforman en agua. Esta enzima actúa en todo el organismo y su actividad va a depender de la disponibilidad de selenoproteínas en el organismo (Sultle, 2010). La acción de las GPXs está mediada por distintos aspectos fisiológicos en los organismos esta tiene su origen en el núcleo celular a partir de una transcripción del codón (UGA) en donde selenofosfato se transforma a selenocisteína, sus principales acciones son de catalizador H_2O_2 e hidroperóxidos lipídicos (Alonso et al., 1997).

Oblitas et al. (2000) utilizaron dos grupos de vaquillas y vacas que estaban a libre pastoreo, la investigación tuvo una duración de 90 días donde los grupos con suplementación recibieron una dosis de 5 mg Se/100 kg PV en los primeros 7 días de la investigación. Los niveles iniciales de la GPX fueron normales para todos los animales, después de 4 semanas de incorporado el selenio vía intramuscular, la actividad de GPX aumentó en los animales con tratamiento y al finalizar los grupos suplementados obtuvieron una mayor actividad de esta enzima. Este aumento fue debido a que se incorporó inmediatamente a los eritrocitos y no siguió a la ruta de la síntesis de selenoproteínas, sino que intervino en la eritropoyesis.

Por su parte, Qin et al. (2007) evaluaron el efecto de la suplementación de selenito de sodio, levadura de Se y Se enriquecido con probióticos a una dosis de 0.06, 0.15,

0.16 mg Se/Kg MS respectivamente, sobre la actividad de la GPX y encontraron que la levadura de Se y los probióticos con Se aumentaron los niveles de la actividad de la GPX en sangre en estos dos grupos, demostrando así que la actividad de las selenoproteínas va a estar mediada por dos vías, la primera por medio del Se inorgánico inyectado y la segunda por la actividad de Se orgánico con la microbiota ruminal y su fácil incorporación en intestino.

Parámetros sanguíneos

El selenio aumenta cuando se suplementa por las vías descritas, el torrente sanguíneo sirve como medio de transporte para que el Se viaje al hígado para la síntesis de selenoproteínas. Antunović et al. (2009) evaluaron dos fuentes de Se; orgánica e inorgánica, y encontraron que el contenido de Se en sangre después de 60 µg fue mayor cuando utilizaron selenio orgánico. Encontraron también que la efectividad del Se inorgánico es mayor cuando lo suministran vía intramuscular. Sin embargo, Antunović et al. (2020) evaluaron el efecto de la biofortificación de forrajes con selenio vía foliar incorporándolo así en sus paredes celulares sobre corderos de la raza Merinolandschafs durante 70 días. Los autores no encontraron aumentos de Se en sangre ya que la acción de la microbiota ruminal requiere periodos de adaptación más prolongados.

La albúmina es una proteína plasmática que se distribuye en el torrente sanguíneo, pese a que no forma parte de las selenoproteínas esta transporta Se a los tejidos para su síntesis en hígado. Bajos niveles de Se están asociados con una menor síntesis proteica, esta asociación funciona como un mecanismo de defensa antioxidante y mantiene la homeostasis en los rumiantes (Burk y Hill, 2015).

Relación entre metabolismo del Se y homeostasis energética

El Se es un elemento que no está ligado energéticamente en el metabolismo; sin embargo, funciona como un intermediario. Por ejemplo, en el proceso de producción de energía en las mitocondrias, la utilización de hidrógenos esta predispuesta por 6 ciclos en el ciclo de Krebs y la cadena respiratoria. Estos hidrógenos se liberan en el espacio intermembranal como ROS, que son las formas químicamente activas y se unen a hidrógenos produciendo peróxidos, a mayor demanda energética de los H⁺ los ROS aumentan y es donde el Se acciona a través de la GPX. Para mantener

una óptima regulación homeostática se requiere de una secreción de hormonas, en este caso, las hormonas tiroideas (T_3 y T_4), las cuales intervienen en el crecimiento dependiendo de las etapas fisiológicas de los rumiantes y de la disponibilidad de nutrientes (Burk et al., 2007). El efecto de Se no se limita a estos temas discutidos; también interviene en el proceso energético para evitar la pérdida de la energía en la fermentación ruminal (Hendawy et al., 2021).

Efectos del selenio sobre la fermentación ruminal

Bases del microbiota ruminal

El rumen es una cámara de fermentación en donde ocurren eventos bioquímicos aparentemente aislados y mediados por el hospedero. Evolutivamente este sistema adquirió su aislamiento debido a una adaptación que llevo millones de años, con la finalidad de aprovechar los recursos del medio, los cuales en la naturaleza son limitados y se dispone de los recursos finitos en la naturaleza (forrajes). Esta adaptación fue mediada entre animales no rumiantes y microorganismos los cuales fueron asilados por el hospedador y el hospedero. Como todas las relaciones mutualistas, se obtuvieron beneficios como carbohidratos, proteína, lípidos y minerales, estos al ser aprovechados por los microorganismos éstos devolvían AGVs de alto valor nutricional para el hospedero. La relación no se limita a este proceso, sino que, dado a que es un proceso de fermentación, intervienen los hongos de los cuales existen géneros afines a la lignina la cual sirve de barrera para proteger a la celulosa en los forrajes. Estos organismos ayudan degradando este compuesto y permiten a las bacterias asimilar los carbohidratos estructurales. Los protozoarios son los encargados de mantener las poblaciones de las bacterias estables y por último algunas arqueas se encarga de producir el gas CH_4 , lo cual representa un mecanismo de defensa para liberar el exceso de gases y que no colapsara el rumen (Mackie et al., 2022).

Papel del Se en la actividad microbiana

Dentro de los estudios para comprender las dinámicas ruminales actualmente se dispone de la comprensión de las metapoblaciones de la microbiota ruminal en la cual se han implementado técnicas moleculares para identificar géneros bacterianos del rumen de los cuales en condiciones de pastoreo los géneros que

aumenta cuando se suplementa con levadura de Se a dosis de 0.35 mg Se/Kg MS son *Fibrobacter* y *Ruminococcus* (Cui et al., 2022). Las comunidades bacterianas en el rumen tienen cierta sensibilidad a los cambios externos de su hospedador y se adaptan a las condiciones que enfrente el rumiante. Las bacterias a pesar de estar en un ambiente anaerobio comienzan a hacer más eficiente la utilización de la energía, aumentando la eficiencia energética de los carbohidratos estructurales por lo cual la disponibilidad de AGVs aumenta, así como la eficiencia del N (Fan et al., 2020). También se ha documentado que tiene una función directa en las bacterias ácido-lácticas; estos probióticos tienen las funciones antioxidantes y antiinflamatorias que ayudan a contrarrestar los patógenos como *E. coli* spp (Rasmussen et al., 1993). A nivel ruminal la microbiota ruminal transforma las fuentes de Se inorgánico en aminoácidos, principalmente SeMET y selenocisteína, aminoácidos ligados a la producción de GPX (Milewski et al., 2021).

Producción de ácidos grasos volátiles (AGVs)

Los compuestos de las raciones que interactúan con la microbiota ruminal son carbohidratos no estructurales y carbohidratos estructurales, proteína y lípidos. Cada uno de estos compuestos tienen fuentes y tiempos de degradabilidad en el rumen. Los carbohidratos tienen la función de proveer de energía a los rumiantes, ya que estos necesitan un suministro constante de compuestos precursores de la glucosa. La degradación de los carbohidratos por parte de la microbiota ruminal se divide en distintos productos como: AGVs, CO₂, CH₄ y agua, dependiendo de la característica, este va a seguir la ruta metabólica que le corresponda. Dentro de los AGVs se pueden encontrar 3 grupos importantes, los cuales son ácido acético, ácido propiónico y ácido butírico. El acetato es indispensable para el almacenamiento en distintos órganos y ayuda a sintetizar compuestos sólidos, el propiónico es una fuente de energía constante de alto valor ya que este entra por difusión al torrente sanguíneo y se deposita en páncreas para entrar al ciclo de la gluconeogénesis y el butírico se deposita en sólidos de la leche. Dependiendo de la vía que sigan estos compuestos va a variar la cantidad de CO₂ y CH₄ depositado en el rumen (Van Soest, 1994; Russell y Wallace, 1997).

Nitrógeno amoniacal y síntesis proteica microbiana

El N-NH_3 es la principal fuente de nitrógeno inorgánico disponible para los microorganismos ruminales, este se encuentra en el líquido ruminal, refleja la utilización de este producto y absorción en el rumen. La síntesis de proteína microbiana ocurre cuando los organismos utilizan N-NH_3 . Las concentraciones óptimas son de 5-12 mg N-NH_3 /dl. La deficiencia de este compuesto limita el crecimiento microbiano, mientras que niveles excesivos conducen a la absorción de amonio; este compuesto es tóxico en grandes cantidades y se desecha en los organismos en forma de urea, lo que provoca un gasto de energía adicional y por ende no se puede reutilizar por las bacterias ruminales (Russell et al., 1992).

Cinética de fermentación y degradación del sustrato

Existen 3 fases consideradas en la fermentación ruminal. La primera es la Fase *Lag*, que es la fase de acondicionamientos de la microbiota ruminal a los ingredientes de la dieta, esta tiene un periodo de adaptación de 0-12 h. La segunda es la fase S o tasa de producción de gas, esta es la fase exponencial de la producción de gas en la cual la competencia y degradación del sustrato aumenta. Finalmente, la fase V del volumen máximo de producción de gas, en la cual se encuentra el umbral de la producción y sigue una degradación constante hasta que se termina la materia prima (Theodorou et al., 1994). Almaraz et al. (2018) evaluaron las concentraciones de 0 a 80 mg Se/ kg MS utilizando la técnica de producción de gas *in vitro*. Ellos encontraron diferencias estadísticas en los parámetros de la cinética de producción de gas y la digestibilidad de la MS con concentraciones superiores a los 40 mg Se/ kg MS.

Producción y efecto del selenio sobre la producción CH_4

Para que el proceso de la metanogénesis tenga lugar en el rumen se tiene que seguir una serie de pasos los cuales comienzan desde la ingesta del rumiante en la que los alimentos son asimilados y degradados por las bacterias. Dentro de estas, los carbohidratos (hexosas) entran a la ruta metabólica de glucólisis en donde la principal función es producir precursores energéticos y energía como los es el ATP y piruvato; estos entran al ciclo de Krebs y la cadena respiratoria siguiendo el mismo patrón, donde se obtienen acetil CoA. Esta molécula entra al ciclo de ácidos grasos

por medio de reacciones fosforo clásticas las cuales son específicas de organismos anaerobios. Dentro de los principales sustratos que se obtienen en este proceso están el acetato, propionato y butirato, siendo el acetato el de mayor producción, dependiendo el tiempo de alimentación de los rumiantes. Durante este paso se producen H^+ en la ruta del acrilato, mientras que succinato-propionato no producen H^+ y además se consume para oxidar un carbono que se une propionato. La acumulación de H^+ inhibe la enzima $NADH^+$ ferredoxina oxidorreductasa la cual trabaja a bajas presiones de H^+ en el rumen, por lo tanto, la vía de producción de CH_4 es una vía para reducir la cantidad de H^+ (Ramírez et al., 2014). Existen distintas interacciones en el rumen entre distintas especies de la microbiota ruminal que pueden alterar los productos de la fermentación ruminal. Esta interacción se denominó sintropía debido a la autoorganización para acumular energía (Iannotti et al., 1973).

Los principales sustratos de la metanogénesis son CO_2 y acetato, compuestos regularmente de un grupo metilo; además las arqueas metanogénicas, que son los microorganismos que intervienen en este proceso bioquímico, emplean H^+ para reducir el CO_2 y producir CH_4 , el cual actúa como donador de electrones. Los principales productos son: $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \Delta G_o' = -130.747 \text{ kJ/ reacción}$ y $4HCOO + 4H \rightarrow CH_4 + 3CO_2 + 2H_2O \Delta G_o' = -144.543 \text{ KJ/reacción}$ (Ramírez et al., 2014).

El Se interviene y promueve la integridad del tracto digestivo por medio de múltiples mecanismos interrelacionados, por lo cual aumenta la fermentación ruminal ya que aumenta las poblaciones de bacterias ruminales especialmente *Ruminococcus* y *Fibrobacter*, que son degradadoras de la celulosa. Este carbohidrato estructural tiene la cualidad de tener una lenta degradabilidad por lo tanto el tiempo de degradación disminuye y la relación acetato: propionato disminuye, esto repercute en la liberación de energía en forma CH_4 , ya que entre más lenta es la fermentación ruminal se pierde más energía (Hendawy et al., 2021).

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad los sistemas pecuarios enfrentan diversos retos, entre ellos la optimización de la alimentación animal, siendo esta uno de los pilares de la eficiencia productiva. La alteración de los ciclos biogeoquímicos ocasionada por la actividad antrópica ha dificultado la producción y disponibilidad de las materias primas. Ante estos escenarios se han desarrollado distintas estrategias nutricionales orientadas a mejorar la eficiencia de utilización de los nutrientes de las raciones, incluyendo aditivos, antibióticos, microorganismos y minerales traza. Estas estrategias buscan optimizar los ingredientes de las raciones de mejor manera. Existen productos que alteran la microbiota ruminal para optimizar el proceso de la fermentación ruminal, mientras que otros compuestos inhiben la expresión genética de las arqueas metanogénicas encargadas de utilizar los H^+ acumulados en el rumen.

La suplementación con minerales traza es una de estas estrategias ya que en su mayoría funcionan como cofactores enzimáticos de bacterias ruminales. Este es el caso del Se que funciona como promotor enzimático de bacterias celulolíticas, en donde existen exoenzimas que son las encargadas de degradar la celulosa, la cual es un compuesto que tiene un retardo en la fermentación ruminal. Este proceso, al ralentizarse, forma H^+ , por lo que este mineral ayuda a optimizar la fermentación ruminal ya que se evita la pérdida de energía en forma de CH_4 . La presente investigación ayudará a generar evidencia científica sobre las fuentes de selenio que maximicen la eficiencia productiva, favorezcan el metabolismo y la fermentación ruminal, y reduzcan las emisiones de metano en ovinos de engorda.

HIPÓTESIS

Los parámetros productivos, metabólicos, ruminales y emisión de metano entérico son diferentes dependiendo de la fuente utilizada para suministrar selenio en corderos de engorda.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar el efecto de la fuente de selenio suplementario sobre parámetros productivos, metabólicos, ruminales y emisión de metano entérico en ovinos de engorda, mediante una revisión sistemática, una prueba de digestibilidad *in vitro* y una prueba de comportamiento productivo, con la finalidad de identificar la fuente que maximice la eficiencia productiva, favorezca el metabolismo y la fermentación ruminal, y reduzca las emisiones de metano en ovinos de engorda.

Objetivos específicos

- Realizar un metaanálisis, mediante una revisión bibliográfica sistemática, para determinar el efecto del Se suplementario sobre el desempeño productivo, variables metabólicas, fermentación ruminal y emisión de CH₄ en corderos en crecimiento y engorda, con la finalidad de identificar en la evidencia científica disponible el efecto de diferentes fuentes de selenio, las tendencias en la respuesta a la suplementación y reconocer vacíos de conocimiento para estudios posteriores.
- Evaluar el efecto del selenito de sodio, selenometionina y levadura enriquecida con selenio sobre la degradabilidad de nutrientes y variables de la fermentación ruminal, mediante la técnica de digestibilidad *in vitro* con producción de gas, con el propósito de explicar los mecanismos mediante los cuales dichas fuentes modulan la eficiencia de utilización de los nutrientes.
- Evaluar *in vivo* el efecto de la levadura enriquecida con selenio sobre los parámetros productivos, digestibilidad de nutrientes, variables ruminales y producción de CH₄ entérico, mediante una prueba de comportamiento productivo con corderos de engorda generar evidencia científica sobre su potencial para mejorar la eficiencia productiva en la producción de carne de ovino.

MATERIALES Y MÉTODOS

Fase 1: Metaanálisis

Pregunta PICO

Para evaluar el efecto del selenio suplementario sobre el comportamiento productivo, actividad antioxidante, estado metabólico y emisión de metano en ovinos de engorda se planteó una pregunta con la estructura PICO (por sus siglas en inglés), donde:

- P (*Participant*): corderos de engorda de cualquier raza y edad.
- I (*Intervention*): selenio suplementario administrado vía oral.
- C (*Comparator*): grupo control sin selenio suplementario.
- O (*Outcomes*): variables de respuesta (productivas, antioxidantes, metabólicas y ruminales).

Así, la pregunta planteada quedó de la siguiente manera:

En corderos de engorda (P) ¿cuál es la efectividad de la suplementación con selenio (I), respecto a corderos no suplementados (C), sobre el comportamiento productivo, la actividad antioxidante, el estado metabólico y la emisión de metano entérico (O)?

Estrategia de búsqueda

Una búsqueda exhaustiva de información fue realizada por cuatro expertos en el tema, utilizando cuatro bases de datos: Google Scholar (<http://scholar.google.com>), PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>), Scopus (<https://www.scopus.com/>) y Springer (<https://link.springer.com/>), además del buscador PRIMO en la biblioteca digital de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (<https://dgsa.uaeh.edu.mx/bdigital/>). La búsqueda se realizó utilizando ecuaciones compuestas por palabras clave y operadores booleanos: [*lamb* OR *ewe* OR *sheep*] AND [*selenium* OR *Se* OR *selenite* OR *selenate* OR *enrich-yeast* *Se* OR *nano-Se*] AND [*growing* OR *fattening* OR “*weight gain*”] AND [*methane* OR “*greenhouse gases*”]. Los artículos considerados fueron aquellos con revisión por pares, publicados en inglés y portugués. La búsqueda inicial se complementó con artículos encontrados como resultados de la revisión de las referencias de los artículos

encontrados y aquellos en los que fueron citados, con la finalidad de identificar artículos relevantes e incluirlos en la base de datos global.

Criterios de elegibilidad

El proceso de selección de los artículos se realizó siguiendo los lineamientos de la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analysis; Figura 1). Una revisión minuciosa fue llevada a cabo por tres de los investigadores participantes con la finalidad de identificar los artículos que cumplieran con los siguientes criterios de inclusión:

- Estudios publicados en revistas científicas con revisión en pares, excluyendo datos no publicados, memorias de congresos y disertaciones.
- Experimentos aleatorios *in vivo* en los que se comparan corderos suplementados con selenio con un grupo control sin selenio suplementario.
- Ausencia de intervenciones concomitantes (por ejemplo, suplementación con otros minerales, vitaminas o aditivos de manera adicional),
- Descripción clara de la asignación aleatoria de los animales (diseño experimental),
- Reporte de estimadores del efecto de la intervención, tanto del control como de los grupos de animales suplementados (por ejemplo, medias de mínimos cuadrados, coeficiente de variación, desviación o error estándar de la media).
- Tamaño de la muestra para cada grupo experimental.

Base de datos

La búsqueda global arrojó un total de 407 artículos, de los cuales 122 se removieron debido a eran artículos duplicados y 66 por otras razones (artículos en idioma diferente al inglés y portugués, no eran indexados o correspondían a memorias de congresos o a capítulos de libros). De los 219 artículos resultantes, se removieron 165 debido a que no cumplían con los requisitos en cuanto a las variables continuas y de respuesta. Posteriormente, se descartó uno debido a que no se logró recuperar el texto completo, quedando 53 artículos, de los cuales se descartaron 12 ya que no eran estudios en corderos y 13 debido a que no reportaban las variables de

interés. Por lo tanto, 28 artículos con 72 reportes experimentales fueron elegidos para el metaanálisis (Figura 1).

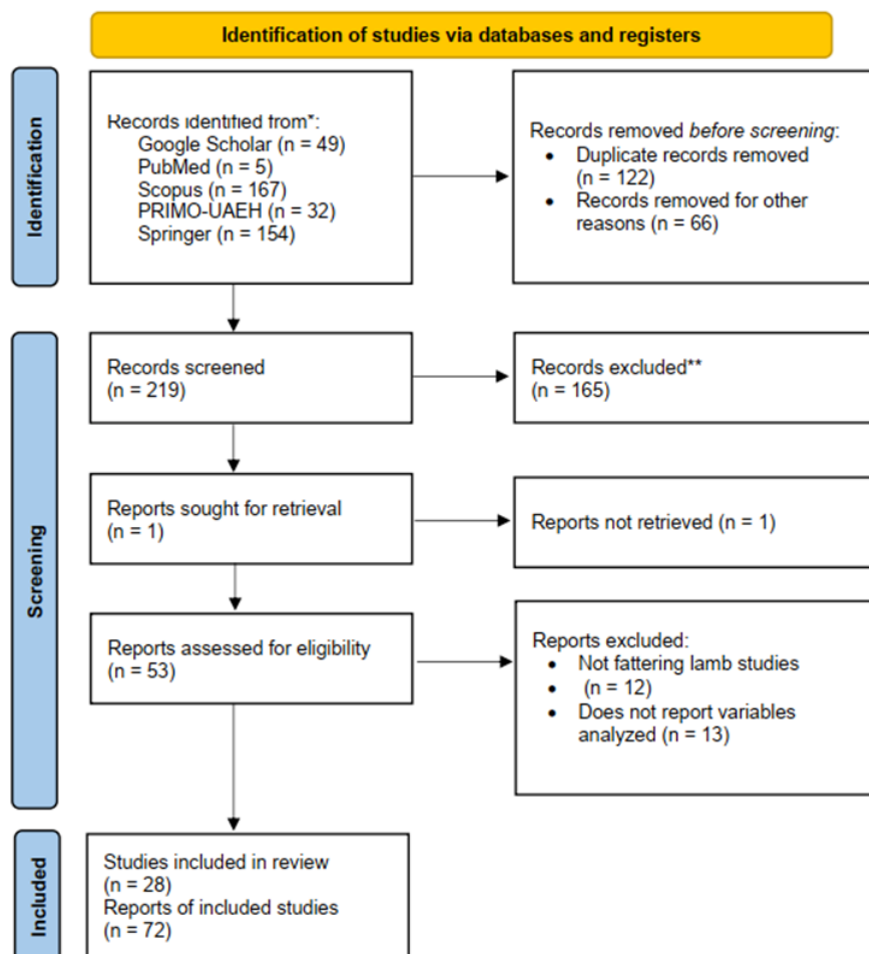


Figura 1. Diagrama de flujo de la revisión sistemática (PRISMA) sobre el efecto del selenio suplementario sobre el comportamiento productivo, actividad antioxidante, estado metabólico y emisión de metano en ovinos de engorda.

La base de datos fue construida en una hoja de cálculo de Excel con la información extraída de los artículos elegidos; posteriormente, dos investigadores expertos revisaron las bases de datos para identificar inconsistencias y corregirlas en consenso. La información de la base de datos incluyó datos de las siguientes variables:

- Productivas: ganancia diaria de peso (GDP, kg/d), consumo de materia seca (CMS, kg/d) y conversión alimenticia (CA, kg/kg).

-
- Antioxidantes: concentración de selenio en plasma ($\mu\text{g/dL}$) y actividad de glutatión peroxidasa (GPx, U/L).
 - Metabólicas: concentración de glucosa (mg/dL), T_4 ($\mu\text{g/dL}$), T_3 (ng/mL), colesterol (mg/dL), albúmina (mg/dL), globulina (mg/dL), urea (mg/dL) y proteína total (mg/dL).
 - Ruminales: producción de metano entérico (CH_4).

Además, las siguientes variables explicativas fueron registradas: raza, fuente de selenio, dosis de selenio suplementario, peso (kg) y edad de los corderos (meses), y nivel de producción en términos de GDP (bajo, < 0.14 kg/d; medio, $0.14\text{--}0.20$ kg/d; y alto, > 0.2 kg/d). Las fuentes de selenio se clasificaron como inorgánicas (selenito y selenato de sodio), orgánicas (selenometionina), levadura enriquecida con selenio y nanopartículas de selenio (incluido selenio elemental).

Metaanálisis

El metaanálisis fue realizado con el paquete Meta versión 6.1-0 (Balduzzi et al., 2019) en el programa estadístico R[®] versión 4.0.2. (R Core Team, 2020). Se implementó el modelo de efectos aleatorios, que asume la diferencia observada entre una combinación de azar y variación genuina en los efectos de intervención, cada estudio es una comparación entre el grupo control y el grupo experimental (con selenio suplementario). El modelo de efectos aleatorios fue la aproximación de Der Simonian y Laird (2015). Para mostrar el efecto global observado entre los tratamientos, se utilizó la diferencia media estandarizada (SDM) calculada con el método de Hedges (1981). Por otra parte, el intervalo de confianza (IC) del 95 % fue calculado en cada uno de los estudios y el tamaño del efecto se asumió como una distribución estándar normal. La diferencia media bruta (RMD) se calculó con las variables de respuesta que comparten las mismas escalas, esto permite interpretar el efecto en unidades originales (Appuhamy et al., 2013).

Evaluación de la heterogeneidad

La heterogeneidad se evaluó mediante la estimación de la varianza (t^2) de efectos aleatorios entre estudios. A su vez, el porcentaje de variabilidad explica la heterogeneidad (I^2) en sustitución de la varianza simple (Higgins et al., 2003). Los

valores mayores a 35 % para I^2 se consideraron indicativos de heterogeneidad entre estudios. Este modelo no explica la heterogeneidad solo la incorpora al modelo para ser analizada y reducida mediante subgrupos y meta-regresión (Serghiou y Goodman, 2019).

Para explicar la heterogeneidad, se realizó una meta-regresión a todas las variables de respuesta para encontrar un modelo ideal que explique la variabilidad entre estudios de las estimaciones del tamaño del efecto. En la meta-regresión, la variable x representa las características de los estudios (tipo racial, edad, tipo de fuente de Se, nivel de suplementación, periodo de adaptación a dieta y diseño experimental). El primer paso para el análisis de meta-regresión consistió en integrar todas las variables explicativas en un modelo completo: en segundo lugar, los modelos de regresión múltiple se redujeron manualmente mediante selección regresiva de variables hasta que los predictores fueron significativos ($p < 0.05$). Los modelos de regresión de efecto mixtos (análisis de meta-regresión) se construyeron en el paquete “metafor” (Viechtbauer, 2010). Estos modelos se compararon y seleccionaron mediante criterios teóricos de la información utilizando el criterio de información de Akaike y el Criterio de información Bayesiano.

Fase 2: Experimento *In vitro*

Ubicación

El presente estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Nutrición Animal, localizado en el Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, en Cd. Universitaria de Tulancingo, estado de Hidalgo.

Uso y cuidado de animales

Dos bovinos machos de la raza Holstein, provistos de cánula ruminal, pertenecientes al Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, fueron utilizados como donadores de líquido ruminal para la obtención de un inóculo. Los animales se encontraban en confinamiento protegidos de la lluvia y el sol, con una alimentación a base de forraje (heno de alfalfa avena) y de un concentrado comercial con 14% de proteína cruda, en una proporción de 70:30. El cuidado de los animales se basó en la NOM-062-ZOO-1999, que establece las especificaciones

técnicas para la producción, cuidado y uso de animales de laboratorio. Asimismo, el uso y cuidado de estos animales estuvo autorizado por el Comité de Bienestar Animal de dicha institución.

Dieta

Una dieta para corderos de engorda fue formulada utilizando el complemento Solver de Excel® a partir de los requerimientos nutricionales de acuerdo con las recomendaciones del National Research Council (2007; Cuadro 3).

Cuadro 3. Dieta para corderos de engorda utilizada como sustrato en la fermentación *in vitro* para evaluar el efecto de la fuente de selenio suplementario sobre la cinética de producción de gas.

Ítem	Valor
<i>Inclusión (% BS)</i>	
Rastrojo de maíz	16.0
Alfalfa	8.9
Maíz rolado	49.2
Sorgo	8.5
Pulpa de cítrico	4.0
Pasta de soya	8.4
Grasa protegida	2.0
Minerales	2.0
Buffer (bicarbonato de sodio)	1.0
<i>Composición química (%)</i>	
Materia seca	94.7
Cenizas	6.7
Proteína cruda	14.4
Extracto etéreo	3.6
Fibra detergente neutro	44.3
Fibra detergente ácido	11.8
*Energía metabolizable (Mcal kg ⁻¹ MS)	2.84
*Selenio (mg kg ⁻¹ MS)	0.23

*Valores calculados a partir de tablas.

Fermentación *in vitro*

Una prueba de digestibilidad *in vitro* con producción de gas fue utilizada para determinar la cinética de la fermentación (Theodorou et al., 1994). Para ello, un inóculo fue preparado mezclando una serie de soluciones (minerales, buffer, resazurina y reductora) con el líquido ruminal, bajo condiciones anaerobias a 39 °C (Cuadro 4).

Cuadro 4. Componentes del inóculo utilizado para la fermentación *in vitro* de una dieta para corderos de engorda con diferentes fuentes de selenio.

Componente	Fórmula química	Cantidad ¹
Solución amortiguadora		
Bicarbonato de amonio	NH ₄ HCO ₃	1.07 g
Bicarbonato de sodio	NaHCO ₃	9.32 g
Agua destilada		266.29 ml
Solución de macromineral		
Fosfato de sodio dibásico	Na ₂ HPO ₃	1.52 g
Fosfato monobásico	KH ₂ PO ₄	1.65 g
Sulfato de magnesio heptahidratado	MgSO ₄ * 7H ₂ O	0.16
Agua destilada		266.29 ml
Solución micromineral		
Cloruro de calcio dihidratado	CaCL ₂ * 2H ₂ O	66 g
Cloruro de magnesio tetrahidratado	MnCl * 6H ₂ O	50 g
Cloruro de cobalto hexahidratado	CoCL * 6H ₂ O	5 g
Cloruro férrico	FeCL ₃	40 g
Agua destilada		500 ml
Resazurina		
Resazurina 0.1%		1.95 ml
Solución reductora		
Sulfato de sodio anhidro	Na ₂ SO ₄	0.30 g
Hidróxido de sodio 0.1 N	NaOH	2.13 ml
Agua destilada		53.33 ml
Medio de cultivo		1067 ml
Líquido ruminal		533 ml
Total		1600 ml

¹Cantidades utilizadas considerando un volumen de inóculo para 40 biodigestores.

Una muestra de 0.5 g de sustrato (dieta para corderos de engorda) con 40 ml del inóculo se depositaron en un biodigestor (vial serológico de 120 ml de vidrio transparente con boca de 20 mm) con flujo de bióxido de carbono durante 10 segundos para asegurar condiciones anaerobias. Los biodigestores fueron sellados e incubados en baño húmedo (Thermo SCIENTIFIC modelo 2864) a 39 °C durante 48 horas. Dos biodigestores sin sustrato fueron incluidos para corregir la producción de gas por efecto de la fermentación de las partículas de alimento provenientes del líquido ruminal.

El volumen de gas producido en los biodigestores se registró a diferentes tiempos (1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 18, 21, 24, 30, 36, 42 y 48 h) utilizando la técnica de desplazamiento de agua (Ramirez-Bribiesca et al., 2011) con ayuda de una bureta graduada de 50 mL conectada por el extremo superior a una aguja hipodérmica (18G x 38 mm) vía manguera flexible.

Por otro lado, se incubaron también cinco biodigestores por tratamiento para registrar volumen de metano producido a las 12 y 24 h de incubación utilizando trampas de CO₂ (Herrera-Pérez et al., 2018). Dichas trampas se prepararon llenando viales serológicos de vidrio transparente de 120 ml con una solución de NaOH al 10 %. Durante la digestibilidad, se dejó acumular en los biodigestores el gas producido por la fermentación a la hora 12 y a la hora 24, teniendo una acumulación de gas en los dos tiempos de 24 h. El volumen de gas que se extrajo de cada biodigestor se determinó en función de la producción de gas obtenida para la cinética de producción de gas, por lo que se extrajeron 25 y 20 ml de gas a las 24 y 48 h, respectivamente, utilizando una jeringa de 25 ml. El gas fue introducido a la trampa la cual estuvo provista de una aguja para permitir la salida de la solución por el desplazamiento del gas introducido. El volumen de la solución desplazada fue registró con una probeta y fue considerado como el volumen de CH₄.

Una vez concluida la incubación a las 48 h, los biodigestores fueron retirados y destapados para proceder al registro del pH final del medio utilizando un potenciómetro de mesa (HANNA® HI2211). Además, una muestra de 1 ml del medio fue obtenida y colocada en un tubo Eppendorf de 2 ml con 0.25 ml de ácido meta

fosfórico al 25 % (p/v), la cual fue congelada a -20 °C hasta su posterior análisis para AGV y N amoniacal.

El material residual fue recuperado por centrifugación (HERMLE® Z326) a 13 mil 500 rpm durante 8 minutos a 4 °C en tubos de policarbonato de 80 ml con tapa. El sobrenadante fue eliminado por decantación. El precipitado fue deshidratado a 65 °C durante 48 horas en horno de secado (TERLAB® T-M12D). La materia seca residual fue calculada restando el peso seco del tubo del peso seco final total del tubo con materia seca residual. Finalmente, la materia seca residual fue recuperada e incinerada en mufla (KODIAK HEAT TECHNOLOGY KXM-12^a) a 550 °C para obtener el contenido de cenizas y, por diferencia, obtener la materia orgánica.

El porcentaje de digestibilidad de la materia seca y la materia orgánica se calculó con la siguiente fórmula:

$$Dig(\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} * 100$$

Donde: *Dig*(%) = porcentaje de digestibilidad de los componentes (MS o MO), *C_i* = peso del componente al inicio de la incubación, *C_f* = peso del componente al finalizar la incubación.

Análisis de laboratorio

La dieta utilizada como sustrato fue analizada con la metodología de la AOAC International (2023; por sus siglas en inglés *Association of Official Analytical Chemists*) para determinar contenido de humedad por deshidratación a 105 °C en horno de secado (TERLAB T-H-45DM), cenizas por incineración a 550 °C en mufla (KODIAK HEAT TECHNOLOGY KXM-12^a), proteína cruda por el método micro Kjeldahl (DMK-630) y extracto etéreo con éter de petróleo en un analizador de grasa (Ecoshel- 066). Mientras, las fracciones de Fibra Detergente Neutro (FDN) y Fibra Detergente Acido (FDA) se analizaron con la técnica de detergentes (Van Soest, 1994).

El análisis de AGV se realizó por cromatografía de gases (Erwin et al., 1961). Para ello se utilizó un cromatógrafo de gases con detector de flama (Agilent Technologies® modelo 7820^a). El argón se utilizó como gas transportador. Para el horno, una trampa de calentamiento desde 70°C a 180°C fue implementada a una

velocidad de calentamiento de 10°C/min. La temperatura del inyector se estableció en 250 °C y la temperatura del analizador se ajustó a 250 °C. Se preparó una curva de calibración utilizando estándares (Sigma Aldrich®) de los ácidos acético, propiónico y butírico, en las siguientes concentraciones 0.75 µl, 1.5 µl, 3.0 µl y 6.0 µl.

La concentración de N amoniacal se determinó por espectrofotometría de luz visible y ultravioleta (AOAC, 2023). Para ello, una muestra de 20 µl del medio previamente centrifugado a 3 mil 500 rpm se depositó en tubos de vidrio de 10 ml; posteriormente se agregaron 1 ml de una solución de fenol y 1 ml de una solución de hipoclorito de sodio; después, las muestras se agitaron y se incubaron a 37 °C durante 30 minutos en baño húmedo (TERLAB); finalmente, se retiraron y se añadieron 5 ml de agua destilada. La lectura se realizó en espectrofotómetro UV/Vis (SHIMADZU UV-1280) a 630 nm. La curva se realizó con sulfato de amonio a concentraciones de 0, 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 40 mg/dl

Variables de respuesta

Los parámetros de la cinética de la producción de gas fueron obtenidas al ajustar los datos de producción de gas acumulada en el modelo logístico de Schofield & Pell, (1995) y así obtener los parámetros;

- Volumen máximo (V , ml g⁻¹ MS).
- Tasa de producción de gas (S , ml h⁻¹).
- Tiempo de retardo (L , h).

Otras variables analizadas fueron:

- pH final de los medios.
- Degradabilidad de la materia seca y de la materia orgánica (%).
- Concentración de ácidos grasos volátiles (mMol ml⁻¹).
- Concentración de N-NH₃ (mg dl⁻¹).
- Producción de CH₄ a las 24 y 48 h (ml g⁻¹ MS).

Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un diseño completamente aleatorizado con cinco repeticiones por tratamiento. La unidad experimental fue un biodigestor. Los tratamientos consistieron en diferentes fuentes de selenio:

- Selenito de sodio + levadura comercial
- Selenometionina + levadura comercial
- Levadura enriquecida con selenio (SelpPlex® 2000 ppm, Alltech®)

Un grupo de biodigestores sin fuente de selenio suplementario fue incluido como grupo control; además, otro grupo sin fuente de selenio suplementario más levadura comercial (*S cerevisiae*, 0.5 g/kg de dieta) fue considerado para controlar el efecto de la levadura. La dosis de selenio fue de 0.9 mg Se/kg MS, una dosis supranutricional que ha demostrado mejorar su absorción y disponibilidad (Del Razo-Rodríguez et al., 2013) y que está por debajo del límite máximo tolerable para ovinos (5 mg/kg MS, National Research Council, 2007).

Los datos fueron analizados con el paquete estadístico de SAS® utilizando el procedimiento GLM. El modelo estadístico utilizado fue:

$$Y_{ij} = \mu + Se_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde: Y_{ij} = variable de respuesta, μ = media general, Se_i = efecto de la i -ésima fuente de selenio suplementario y ε = error experimental.

Las medias se obtuvieron con el enunciado Means y la comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey.

Fase 3: Experimento *In vivo*

Ubicación

Esta fase experimental se realizó en el Módulo Experimental de Ovinos en Crecimiento y Engorda localizado en el Rancho Universitario “Jorge Rojo Lugo” de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, el cual se encuentra en Ciudad del Conocimiento de Tulancingo, en el municipio de Santiago Tulantepec, estado de Hidalgo. El Rancho se encuentra ubicada a una altitud de 2154 m y en las coordenadas 20°03'43" latitud norte y 98°22'53" longitud oeste (Google Earth®)

versión 10.104.67.1). La temperatura media anual es de 21 °C y la precipitación de 500- 700 mm (Servicio Meteorológico Nacional 2026).

Animales

El uso y cuidado de los animales fue aprobado por el Comité Institucional para el Cuidado y Uso de Animales de Laboratorio (CICUAL) de la UAEH (folio CICUAL-V-1/08/2024; anexo 1).

Un lote de 17 corderos destetados, compuesto por 13 machos y 4 hembras con rasgos fenotípicos variables de las razas Dorper, Katahdin y Pelibuey, fue adquirido para la prueba de comportamiento productivo, con una edad promedio de tres meses y un peso de 25 ± 2.4 kg. Los animales fueron adquiridos de una unidad de producción ubicada en el municipio de Acatlán, perteneciente al valle de Tulancingo, y fueron trasladados en apego a lo establecido en la NOM-024-ZOO-1995 utilizando un remolqué ganadero.

Los animales fueron alojados de manera individual en corrales con piso elevado provistos de comedero y suministro de agua limpia. Después de 48 horas de su llegada, el manejo preventivo consistió en la administración de un antiparasitario (Albendazol con cobalto, 1 ml por animal vía oral), un complejo vitamínico (Vigantol® ADE fuerte, 2.5 ml por animal vía intramuscular) y una bacterina toxoide de 11 vías (Bacterina Biobac 11 vías, 2.5 ml por animal vía intramuscular). Además, seis animales que presentaron cuadros de neumonía recibieron un tratamiento con antibiótico (Sulfatrim 3ml vía intramuscular) por tres días.

A su llegada y previo al experimento, el manejo alimenticio consistió en 70% de la dieta experimental y 30% de rastrojo molido tamaño de partícula de 2 pulgadas. Durante el periodo experimental, los animales fueron alimentados dos veces al día (7:00 y 17:00 horas), garantizando en todo momento el suministro de agua limpia y fresca. La dieta experimental fue formulada utilizando el complemento Solver de Excel® a partir de los requerimientos nutricionales de acuerdo con las recomendaciones del National Research Council (2007) con ingredientes disponibles en la región (Cuadro 5).

Cuadro 5. Dieta para corderos de engorda utilizada para evaluar el efecto de la fuente de selenio suplementario sobre variables productivas y ruminales.

Ítem	Valor
Inclusión (% BS)	
Heno de alfalfa	10.0
Salvado de trigo	4.1
Salvado de arroz	1.8
Grano rolado de maíz	36.4
Grano rolado de cebada	16.2
Grano rolado de sorgo	2.5
Grano de trigo	2.5
Pulpa de cítrico	4.0
Grano seco de destilería	5.0
Pasta de canola	2.0
Pasta de soya	11.2
Grasa de sobrepaso	0.8
Premezcla mineral (sin fuente de selenio)	2.0
Buffer (carbonato de calcio)	1.5
Composición química (%)	
Materia seca	89.2
Cenizas	5.4
Proteína cruda	16.3
Extracto etéreo	2.9
Fibra detergente neutro	29.5
Fibra detergente ácido	10.2
Energía metabolizable (Mcal kg ⁻¹ MS)	3.12
Selenio (mg kg ⁻¹ MS)	0.28

Prueba de comportamiento productivo

El tamaño de muestra se calculó con el programa G*Power® versión 3.1.9.6 utilizando los resultados de concentración ruminal de CH₄ obtenidos por Miltko et al. (2016) con levadura enriquecida con selenio (Cuadro 6).

Cuadro 6. Medias y desviación estándar de la concentración ruminal de metano (CH₄) para el cálculo del tamaño del efecto necesario para la prueba de potencia en el cálculo del tamaño de muestra G*power®.

Grupo	CH ₄ mM dL ⁻¹
Control	1.51 ± 0.27
Levadura de selenio	1.85 ± 0.43

Fuente: Miltko et al. (2016).

El tamaño del efecto se calculó dividiendo la diferencia entre la media del grupo control y la del tratamiento entre la desviación estándar, el tamaño del efecto obtenido fue de 0.423. Así, el tamaño de muestra obtenido con un nivel de confiabilidad del 95 % fue de 14 unidades experimentales (Figura 2).

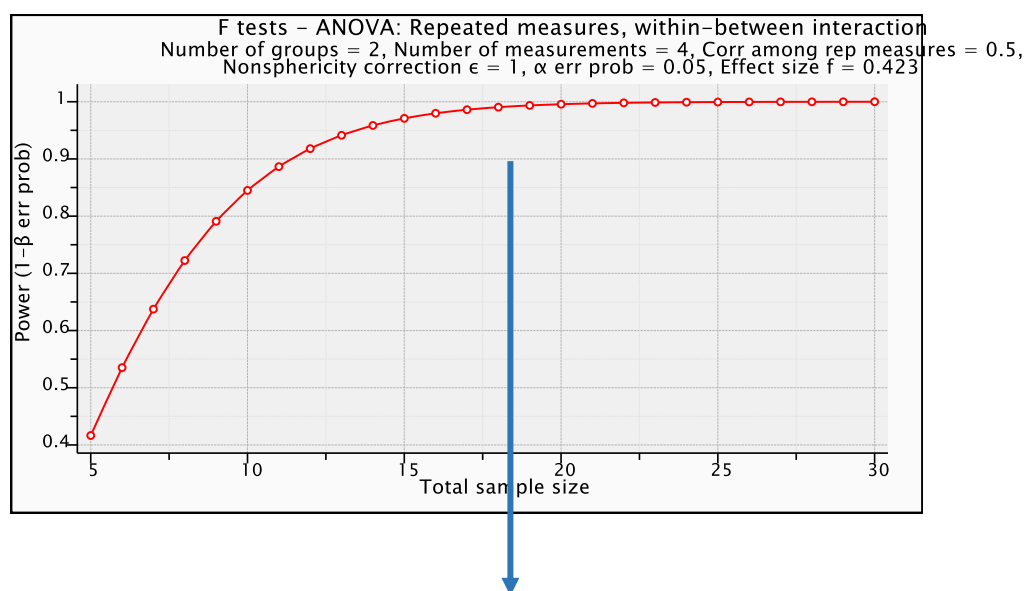


Figura 2. Prueba de potencia para el cálculo del tamaño de muestra con una confiabilidad del 95% a partir de los resultados de Miltko et al. (2016).

Los animales fueron distribuidos aleatoriamente en dos grupos: 1) control o sin selenio suplementario en la dieta y 2) levadura enriquecida con selenio. Los animales fueron adaptados paulatinamente a la dieta de engorda hasta alcanzar el 100 % del consumo en 10 días. Posteriormente, se registró el peso de los animales en el primer día del experimento. Al grupo control se le adicionó levadura comercial en la dieta (*Saccharomyces cerevisiae*) mediante la premezcla mineral, con la finalidad de controlar el efecto asociado a la levadura en el grupo con levadura enriquecida con selenio. La fuente de selenio utilizada fue un producto comercial proporcionado por Alltech de México (SelpPlex® 2000 ppm, Alltech®). El producto se administró a través de la premezcla mineral y se calculó para alcanzar una dosis de selenio suplementario de 0.9 mg kg/MS.

El alimento consumido y rechazado fue registrado diariamente en una bitácora con la finalidad de ajustar el alimento ofrecido respecto al día anterior. Cada animal recibió 100 g más de alimento respecto al consumo calculado del día anterior. Una muestra de alimento ofrecido y del rechazado fue colectada para su análisis posterior de materia seca en el laboratorio. Los datos de materia seca en alimento consumido y rechazado fueron utilizados para el cálculo de consumo de materia seca.

Además, el peso vivo de los animales fue registrado al inicio del experimento y cada dos semanas hasta su venta. El pesaje se realizó con ayuda una báscula digital colgante. Estos datos fueron utilizados posteriormente para el cálculo de ganancia diario de peso.

Para la prueba de digestibilidad *in vivo*, se pesaron tres gramos de dióxido de titanio (TiO₂, aditivo grado alimenticio, Diquítra®) fueron suministrados a cada animal vía el alimento ofrecido por la mañana, durante 10 días. Los primeros cinco días fueron de adaptación y los días restantes fueron de muestreo. Una muestra de excreta fue colectada mediante estimulación rectal por la mañana y por la tarde. Las muestras fueron depositadas en bolsas de plástico y congeladas a -20 °C hasta su posterior análisis. Este procedimiento se realizó una vez durante el último tercio de la engorda.

Un muestreo de gas producido por la fermentación ruminal fue realizado mediante la técnica del Hexafluoruro de Azufre (SF_6) como lo describe López-Ojeda et al. (2022). Para ello, en el último tercio del experimento, una cápsula conteniendo SF_6 , un gas marcador, fue introducido vía esofágica al rumen de cada cordero. La cápsula fue previamente calibrada para permitir la salida de cierta cantidad de SF_6 a cierta tasa. Asimismo, un arnés de tela, para sujetar un cilindro de captación de gas, fue colocado en cada cordero durante un periodo de adaptación de 15 días. Posteriormente, los cilindros fueron sujetos en el arnés para hacer la colección del gas eructado durante cinco días. La descripción detallada de la técnica se presenta en el Anexo 2. Una vez concluido el muestreo, los cilindros fueron retirados y trasladados al Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química ambiental del Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, en Texcoco, Estado de México, para el análisis de CH_4 .

Finalmente, un día antes de la venta de los animales, se obtuvo un volumen de 30 ml de líquido ruminal vía esofágica de cada animal. Diez mililitros fueron utilizados para la medición de pH mientras que 20 ml fueron depositados en un tubo Falcon de 50 ml, mezclados con 5 ml de ácido metafosfórico al 25 % p/v y congelados a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ para su posterior análisis. La medición del pH se realizó en el Laboratorio de Nutrición Animal inmediatamente después de la obtención de la muestra con ayuda de un potenciómetro de mesa (HANNA®).

Análisis de laboratorio

El análisis de humedad, cenizas, proteína cruda, extracto, FDN, FDA y N amoniacal se realizaron como se describe en el experimento *in vitro*.

El análisis de dióxido de titanio (TiO_2) en muestras de excreta se realizó por espectrofotometría (Myers et al., 2004). Para ello, las muestras fueron previamente sometidas a deshidratación a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un horno de secado por 48 horas y molidas a un tamaño de partícula de 1 mm. Posteriormente, 2 gramos de muestra se incineraron a $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ en crisol por 5 horas en una mufla (KODIAK HEAT TECHNOLOGY KXM-12^a). Después de ello, las cenizas fueron sometidas a ebullición con 50 ml de H_2SO_4 y un catalizador concentrado (sulfato de potasio y sulfato de cobre) durante 2 horas a una temperatura de $420\text{ }^{\circ}\text{C}$. Después, la muestra

se enfrió durante 2 minutos y se le agregaron 5 ml de agua destilada tibia de manera gradual para evitar la reacción exotérmica. Las muestras fueron entonces filtradas con papel filtro Watman® #541. Finalmente, la lectura de las muestras se realizó con un espectrofotómetro UV/Vis a 410 nm (SHIMADZU UV-1280). Para ello, se preparó una curva de calibración de 0 a 45 ppm de TiO₂ (Figura 3).

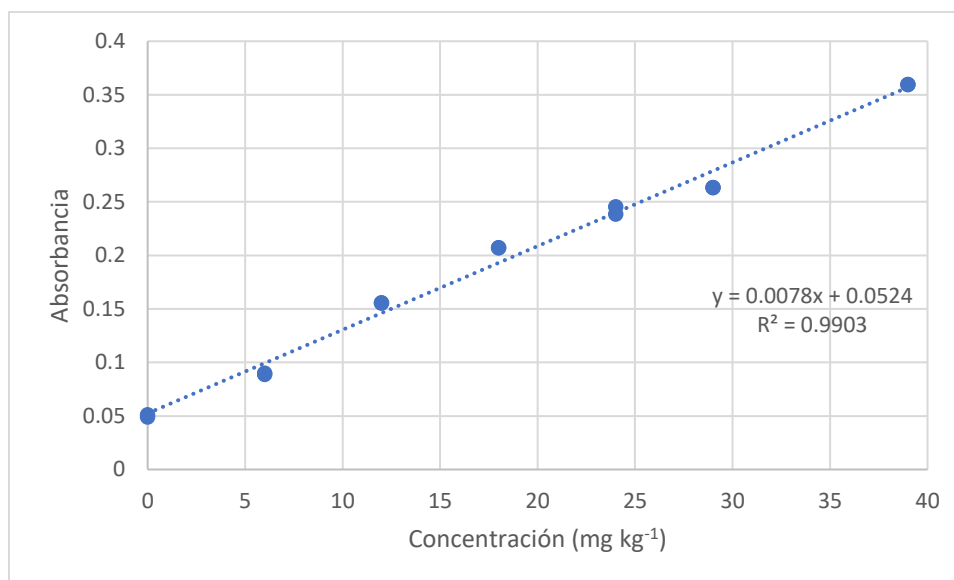


Figura 3. Curva estándar entre absorbancia a 410 nm y concentración de dióxido de titanio (TiO₂, mg kg⁻¹) elaborada para la prueba de digestibilidad *in vivo* de la materia seca en corderos de engorda.

Variables de respuesta

Las variables productivas analizadas fueron:

- Peso Vivo Inicial (PVI, kg)
- Peso Vivo Final (PVF, kg)
- Consumo de materia seca (CMS)
- Ganancia Diaria de Peso (GDP)
- Conversión Alimenticia (CA)

El CMS se calculó restando el alimento rechazado del alimento ofrecido, en base seca; mientras que la ganancia diaria de peso se calculó restando el peso vivo final del peso vivo inicial y dividiendo el resultado entre el número de días de la engorda. Finalmente, la conversión alimenticia se obtuvo al dividir el CMS entre la GDP.

Mientras que las variables ruminales y digestivas consideradas fueron:

- pH ruminal
- Concentración de N amoniacal (N-NH₃, mg/dL)
- Digestibilidad de la Materia Seca (DMS, %)
- Producción de metano (CH₄, g/d)

La digestibilidad de la materia seca se calculó a partir de la siguiente fórmula:

$$DMS = \frac{MS_{cons} - MS_{exc}}{MS_{cons}} * 100$$

Donde: DMS = Digestibilidad de la materia seca (%), MS_{cons} = MS consumida (g/d) y MS_{exc} = MS excretada (g/d).

La cantidad de MS excretada (MS_{exc}, g/d) se calculó utilizando la cantidad consumida al día de dióxido de titanio (TiO₂_{cons}, g/d) y la concentración de dióxido de titanio en la excreta (TiO₂_{excr}, g/g MS), utilizando la siguiente fórmula:

$$MS_{exc} = \frac{TiO_{2cons}}{TiO_{2excr}}$$

Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño experimental fue un completamente aleatorizado con 8 repeticiones por tratamiento. La unidad experimental fue un cordero. El tratamiento experimental fue la levadura enriquecida como fuente de selenio suplementario a través de la dieta y un grupo control sin fuente de selenio.

Los datos fueron analizados con el paquete estadístico de SAS® utilizando el procedimiento MIXED con mediciones repetidas en el tiempo (enunciado REPEATED), para lo cual se consideró el animal como efecto aleatorio. Se probó el peso vivo inicial (PVI) como covariable. Las medias de mínimos cuadrados se obtuvieron con el enunciado LSMEANS y se probó efecto de tratamiento por periodo con el enunciado SLICE. El modelo estadístico utilizado fue:

$$Y_{ij} = \mu + PVI + Se_i + A + \varepsilon_{ij}$$

Donde: Y_{ij} = variable de respuesta, μ = media general, PVI = efecto del peso vivo inicial como covariable, Se_j = efecto de la i -ésima fuente de selenio suplementario, A = efecto aleatorio de animal y ε = error experimental.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto del selenio suplementario sobre variables productivas y metabólicas en corderos de engorda: metaanálisis

El Cuadro 7 muestra la media con su desviación estándar, el tamaño del efecto en términos de la diferencia media bruta (DMB) y diferencia media estandarizada (DME), y la prueba de heterogeneidad y sesgo de las variables productivas y metabólicas analizadas para corderos de engorda con selenio suplementario.

Cuadro 7. Efecto del Se suplementario sobre variables productivas y metabólicas en corderos de engorda.

Ítem	n ^a	Control media (DE ^h)	Tamaño del efecto				Heterogeneidad y sesgo	
			DMB ⁱ (95% IC ^k)	Valor de P	DME ^j (95% IC ^k)	Valor de P	I ² RM ^b	Prueba de Begg
GDP ^a (kg/d)	33	0.17 (0.06)	+0.02 (+0.01, +0.03)	0.0001	+0.72 (+0.47, +0.98)	0.0001	56.4	0.0001
CMS ^b (kg/d)	26	1.14 (0.27)	+0.004 (-0.02, +0.02)	0.71	+0.14 (-0.06, +0.35)	0.18	36.7	0.91
CA ^c (kg/kg)	26	7.77 (2.02)	-0.88 (-1.29, -0.46)	0.0001	-0.92 (-1.44, -0.41)	0.0005	78.9	0.001
Glucosa (mg/dL)	13	68.38 (11.03)	+1.21 (-2.95, +5.36)	0.56	+0.23 (-0.37, +0.85)	0.44	72.6	0.19
GPx ^d	46	NE	NE	NE	+1.44 (+1.06, +1.82)	0.0001	74.0	0.0001
T ₃ ^e (ng/mL)	12	1.52 (0.20)	+0.17 (+0.08, +0.26)	0.0002	+0.84 (+0.36, +1.31)	0.0005	52.0	0.003
T ₄ ^f (µg/dL)	12	9.16 (0.74)	-0.47 (-0.99, +0.06)	0.08	-0.41 (-0.92, +0.11)	0.12	59.0	0.09
Colesterol (mg/dL)	13	70.65 (5.37)	+0.41 (+0.03, +0.79)	0.03	+0.22 (-0.05, +0.50)	0.11	0	0.01
Albúmina (g/dL)	20	3.7 (0.5)	+0.02 (-0.03, +0.08)	0.37	+0.19 (-0.10, +0.49)	0.19	42.0	0.94
Globulinas (g/dL)	14	2.82 (0.71)	+0.13 (+0.04, +0.21)	0.001	+0.49 (+0.16, +0.82)	0.003	14.3	0.06
Urea (mg/dL)	7	47.88 (7.84)	+1.14 (-3.09, +5.37)	0.59	+0.04 (-0.68, +0.77)	0.89	69.3	0.88
Proteína (g/dL)	16	6.35 (0.65)	+0.11 (-0.007, +0.23)	0.06	+0.31 (-0.06, +0.69)	0.09	49.2	0.0006
Concentración de Se (µg/dL)	22	4.39 (2.72)	+5.13 (+1.83, +8.43)	0.01	+4.92 (+3.44, +6.41)	0.0001	89.3	0.0001
CH ₄ ^g	8	NE	NE	NE	+0.19 (-0.41, 0.79)	0.53	54.4	0.45

GDP^a, ganancia diaria de peso; CMS^b, consume de materia seca; CA^c, conversión alimenticia. GPx^d, actividad de glutatión peroxidasa; T₃^e, triyodotironina; T₄^f, tiroxina; CH₄^g, emission de metano; SD^h, desviación estándar; DMBⁱ, diferencia media bruta; DME^j, diferencia media estandarizada; 95% IC^k, intervalos de confianza al 95 %. NE (no estimado): la diferencia media bruta (DMB) no fue estimada para GPx y CH₄ debido a que fueron expresados en diferentes escalas de medida sin la posibilidad de homogenización.

De acuerdo con estos resultados, la administración de selenio suplementario incrementa ($p<0.01$) la GDP en 0.02 kg/d y reduce ($p<0.01$) la CA en 0.88 kg/d con respecto al grupo control, sin observarse cambios en el CMS ($p>0.05$). La suplementación con selenio también incrementa la actividad de GPx ($p<0.01$) en términos de la DME (la DMB no fue determinada debido a las diferencias entre las unidades en que fue reportada esta variable). Otras variables que incrementan con la suplementación de selenio fueron la concentración de T_3 en 0.17 ng/ml, colesterol en 0.41 mg/dl, globulinas en 0.13 g/dl y selenio en plasma en 5.13 μ g/dl ($p<0.01$). Respecto al CH_4 en el metaanálisis no se logró homogenizar una unidad estándar para evaluar el efecto de esta variable, sin embargo, de acuerdo con la DEM, se obtuvo un valor de $p < 0.53$, por lo cual no existieron diferencias estadísticas.

En el Cuadro 8 se muestran los resultados de la meta-regresión. La heterogeneidad encontrada en GDP fue explicada por la influencia del nivel de producción, fuente de selenio y edad de los corderos, mientras que el nivel de producción, fuente de selenio y peso vivo explicaron en gran medida la heterogeneidad encontrada para la CA. Así mismo, la raza, nivel de producción, edad y peso fueron las covariables que explicaron gran parte de la heterogeneidad de la actividad de GPx. Por su parte, la heterogeneidad para T_3 fue explicada solamente por el nivel de producción y fuente de selenio. Finalmente, la raza, nivel de producción, fuente de selenio y peso vivo explicaron la heterogeneidad para la concentración de selenio en sangre.

El nivel de producción de los corderos tuvo influencia sobre el efecto de la suplementación con selenio sobre la GDP ($p<0.01$; Figura 4) la cual fue mayor en corderos con bajo nivel de producción (DME = 1.56). Asimismo, la fuente de selenio suplementario también influyó sobre la respuesta en esta variable ($p<0.05$), siendo la mayor respuesta con nanopartículas de selenio (DME = 3.24), seguida de selenio inorgánico de alta pureza (DME = 1.72) y selenio orgánico (DME = 1.29).

Cuadro 8. Parámetros de la meta-regresión de las variables de salida sobre el tamaño del efecto entre corderos de engorda suplementados con selenio y el grupo control.

Ítem	b1				< I ² f	R ² g
	Raza	Nivel de producción ^e	Fuente de selenio	Edad	Peso vivo	
GDP^a (kg/d)		Bajo +0.26**	Nanopartículas +2.05*	+0.024**	0.0	100.0
CA^b (kg/kg)		Bajo -4.21***	Organico +25.6*** Levadura +23.9*** Selenito +25.8***	-0.17*	7.77	99.1
GPx^c	Muzaffarnagari +8.98*** Ossimi -8.84***	Bajo +4.42***		-1.57***	+0.19*	8.27 97.4
T₃^d (ng/mL)		Alto +1.74*** Bajo +1.54**	Maíz biofortificado -1.76*		0.0	100.0
Se en sangre (µg/dL)	Valaska +1.98*** Merino +0.71***	Bajo +9.39***	Selenito -0.04*		+0.13***	25.18 95.3

GDP^a, ganancia diaria de peso; CA^a, conversión alimenticia; GPx^b, actividad de la glutatión peroxidasa; T₃^c, tiroxina; ^dbajo (<0.14 kg/d), medio (0.14-0.20 kg/d) y alto (>0.2 kg/d); ^fporcentaje de disminución en heterogeneidad entre el modelo aleatorio y el modelo mixto; and ^gcantidad de la heterogeneidad asociada al modelo mixto. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

El nivel de producción de los corderos tuvo influencia sobre el efecto de la suplementación con selenio sobre la GDP ($p < 0.01$; Figura 4) la cual fue mayor en corderos con bajo nivel de producción (DME = 1.56). Asimismo, la fuente de selenio suplementario también influyó sobre la respuesta en esta variable ($p < 0.05$), siendo la mayor respuesta con nanopartículas de selenio (DME = 3.24), seguida de selenio inorgánico de alta pureza (DME = 1.72) y selenio orgánico (DME = 1.29).

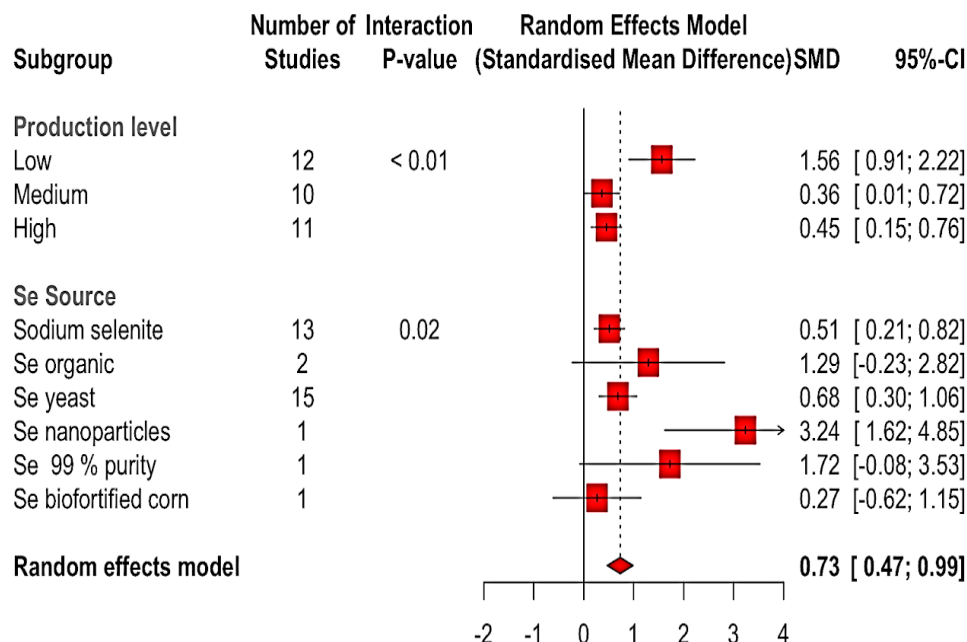


Figura 4. Diagrama de árbol de la ganancia diaria de peso (GDP) en corderos de engorda suplementados con selenio para diferentes niveles de producción [bajo (*Low*), <0.14 kg/d; medio (*Medium*), 0.14-0.20 kg/d; y alto (*High*)], >0.2 kg/d) y fuentes de selenio.

En lo que respecta al efecto de la suplementación con selenio sobre la CA, el nivel de producción y la fuente de selenio suplementario fueron determinantes ($p < 0.01$; Figura 5), observándose la mayor reducción de esta variable en corderos con bajo nivel de producción (DMB = -1.52) y en corderos que utilizaron nanopartículas de selenio (DMB = -2.98).

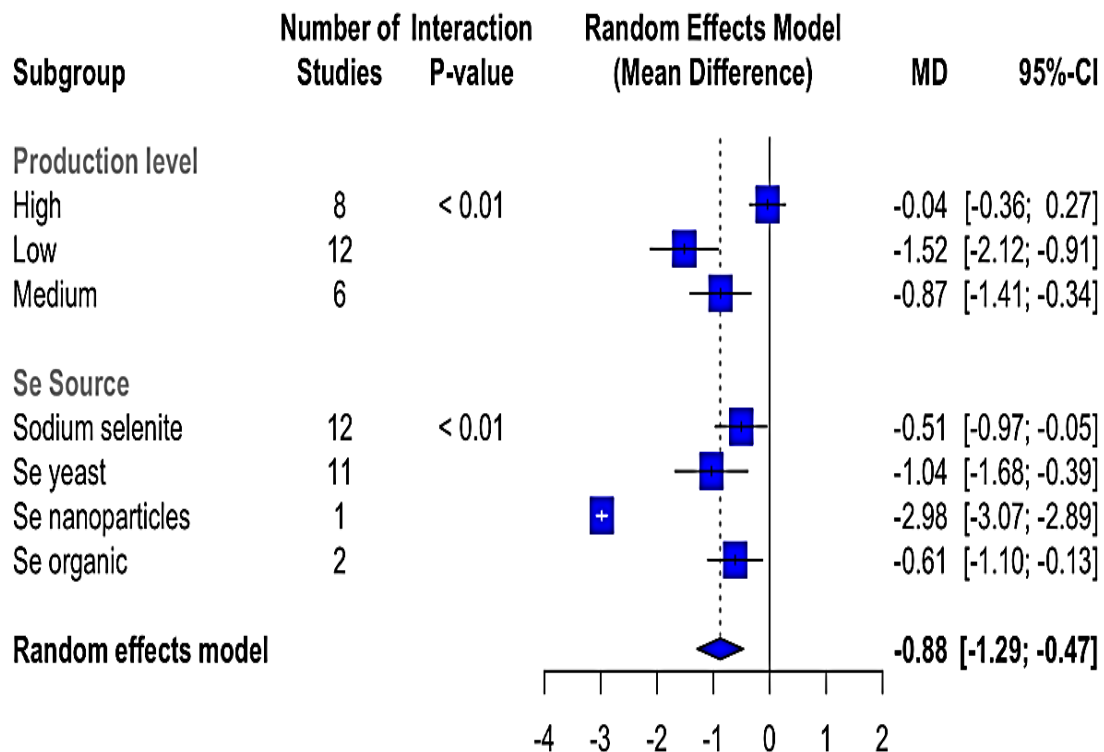
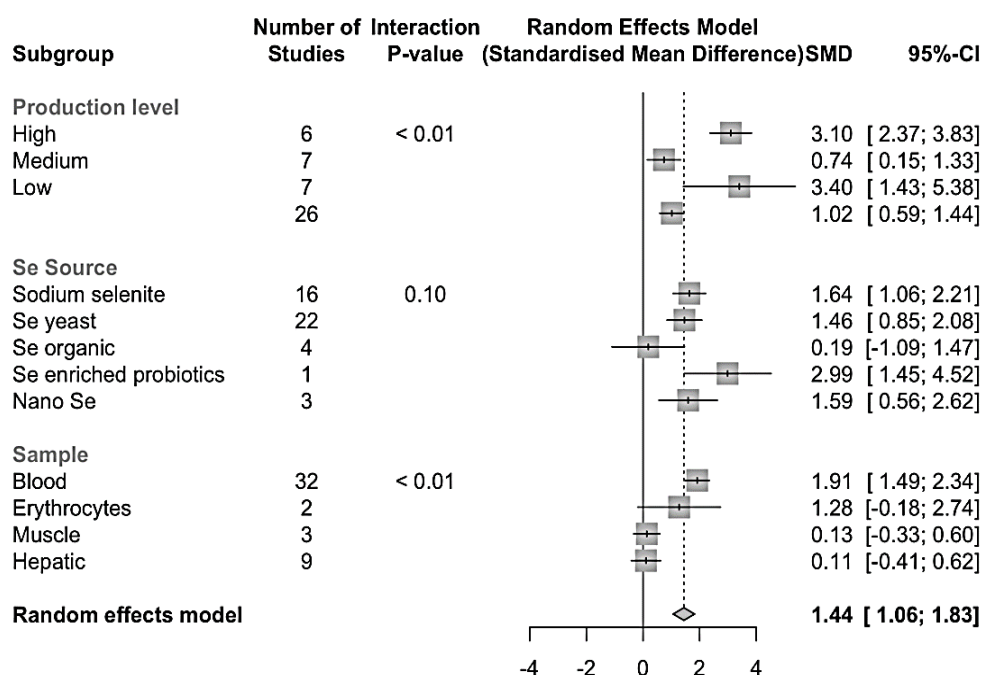


Figura 5. Diagrama de árbol de la meta-regresión de la conversión alimenticia (CA) en corderos de engorda suplementados con selenio para diferentes niveles de producción [bajo (*Low*), <0.14 kg/d; medio (*Medium*), 0.14-0.20 kg/d; y alto (*High*)], >0.2 kg/d) y fuentes de selenio.

Con respecto al efecto del selenio suplementario sobre la actividad de GPx (Figura 6), el nivel de producción de los corderos influyó en la respuesta de esta variable ($p < 0.01$), observándose que dicho efecto fue mayor en corderos con alto (DME = 3.4) y bajo (DME = 3.10) nivel de producción. Por su parte, la fuente de selenio suplementario no afectó la actividad de esta enzima ($p > 0.05$), sin embargo, el tipo de muestra si fue determinante ($p < 0.01$). El mayor efecto se observó sobre la actividad de GPx en sangre entera (DME = 1.91) seguida de la actividad en eritrocitos (DME = 1.28).



Figuras 6. Diagrama de árbol de la meta-regresión de la actividad de glutatión peroxidasa (GPx) en corderos de engorda suplementados con selenio para diferentes niveles de producción [bajo (*Low*), <0.14 kg/d; medio (*Medium*), 0.14-0.20 kg/d; y alto (*High*)], >0.2 kg/d), fuentes de selenio y tipo de muestra.

Los resultados de las variables productivas se relacionan con la eficiencia de las dietas proporcionadas a los animales, mientras que la biodisponibilidad de Se se relaciona con la eficiencia de la microbiota ruminal. El Se además de ser un antioxidante natural, tiene diferentes mecanismos de acción en los organismos teniendo un mejor desempeño en neonatos y animales jóvenes, dado que este efecto va a estar ligado a la transferencia de Se de la madre al hijo (Mehdi y Dufrasne, 2016). Los resultados de este metaanálisis demuestran que el Se tiene efectos sobre la GDP, las fuentes, así o como el performance, ayudan a potencializar este parámetro productivo. Animales más jóvenes y de razas cárnicas tienen un mayor potencial de rendimientos que animales que tienen otro propósito (lana y leche), las bacterias ruminales son las encargadas de hacer que el Se esté disponible para los rumiantes y sea dirigido a los órganos donde tiene un mayor efecto (hígado, músculo y riñón). En cuanto a las fuentes de selenio suplementario,

las nanopartículas de Se son las de mayor efecto, esto debido a que tienen una alta absorción en intestino delgado y se transforman con mayor facilidad en selenometionina.

Dentro de las selenoproteínas descubiertas hasta la actualidad, algunas formas activas ligadas al musculo (selenoproteína W) son las encargadas de realizar una serie de codificaciones para acelerar la atrofia muscular, esta va a estar ligada a la biodisponibilidad de Se en el torrente sanguíneo, mientras que su actividad va a estar dictaminada por las hormonas tiroideas, que son las encargadas de regular el metabolismo. La eficiencia alimenticia está definida por la capacidad del rumiante para sintetizar más masa muscular con un menor consumo de alimento y, por ende, la correcta función de las actividades enzimáticas y de las hormonas es importante para un correcto funcionamiento. Por otro lado, las bacterias ruminales van a aprovechar de mejor manera los nutrientes de la dieta debido a que el Se mantiene un pH adecuado en rumen para la correcta función de la microbiota ruminal, dado que este mineral inhibe el crecimiento de patógenos y, por ende, no se afecta el suministro de nutrientes al rumiante (AGV) para un correcto suministro de energía (Hendawy et al., 2021).

Las globulinas son las encargadas de dar transporte a minerales como Se en el torrente sanguíneo para su síntesis. Kiremidjian-Schumacher y Stotzky (1987), indican que la suplementación con dosis bajas de Se aumenta la respuesta inmunitaria, mejorando la respuesta inmune contra patógenos. Asimismo, Faxiova et al. (2007) indican que el aumento de Se en sangre actúa como un inmunoestimulante para contrarrestar patógenos. Sin embargo, Filippini et al. (2022), mencionan que el aumento de Se sérico de 100 µg/l, con respecto a los niveles normales (70 µg /l), no tiene efecto en la producción de inmunoglobulinas y linfocitos en los humanos. Cárdenas et al. (2022) demostraron que dosis superiores a las recomendadas (0.3 mg/kg MS) aumentan la disponibilidad de Se en sangre para globulinas e inmunoglobulinas en rumiantes.

La disponibilidad de selenoproteínas va a depender de las dosis de suplementación en los rumiantes (Suttle, 2021). Para que la GPx accione, requiere de selenocisteína, ya que es un cofactor enzimático (Zhang et al. 2023). Pese a que no

se encontró un efecto entre las fuentes de Se, Lie et al. (2022) indican que las fuentes tienen diferente biodisponibilidad en los organismos. Las fuentes inorgánicas tienden a formar selenio elemental (Se_0) por acción de la microbiota ruminal, el cual es absorbido en el intestino e incorporado a torrente sanguíneo para actuar como cofactor enzimático. Por otra parte, Surai (2006) menciona que las fuentes orgánicas (selenometionina) son absorbidas en intestino donde por medio de una reacción conocida como transulfuración, son incorporadas a selenocisteína, aminoácido fundamental para la transformación de las selenoproteínas y GPXs.

En el presente metaanálisis, las fuentes de mayor efecto fueron las nanopartículas y el Se biofortificado. Oblitas et al. (2000) reportan que las fuentes inorgánicas (selenito de sodio) tienen mayor disponibilidad cuando se inyecta vía intramuscular, esto debido a que el Se es incorporado a los eritrocitos para intervenir en la eritropoyesis; mientras que las fuentes orgánicas siguen el proceso de la síntesis de selenoproteínas. En todo, la absorción intestinal facilita el aumento de este mineral en sangre (Quin et al., 2006), sin embargo, Ibrahim y Mohamed. (2018) demostraron que las nanopartículas de Se tienen una alta asimilación en intestino, debido a que tienen una baja interacción con la microbiota ruminal y a que debido a sus características se absorben por difusión simple en el intestino y se incorporan rápidamente en sangre hacia la ruta de eritropoyesis.

Efecto del selenio suplementario sobre variables de la fermentación ruminal *in vitro*

En el Cuadro 9 se presentan los resultados de los parámetros de la cinética de producción de gas *in vitro*. La fuente de selenio suplementario no tuvo efecto sobre los valores de dichos parámetros ($p>0.05$), observándose curvas de producción de gas muy similares (Figura 7).

Cuadro 9. Parámetros de la cinética de producción de gas *in vitro* (volumen máximo, V; tasa de producción de gas, S; y tiempo de retardo, L) de una dieta para corderos de engorda con diferentes fuentes de selenio suplementario.

Variable	Fuente de selenio					EE	P
	Control	C+L	Se+L	Smet+L	LSe		
V (ml g ⁻¹ MS)	276.8	279.9	278.7	279.5	277.9	2.5	0.8985
S (h ⁻¹)	0.0537	0.0537	0.0544	0.0536	0.0554	0.0008	0.5597
L (h)	-0.42	-0.58	-0.48	-0.53	-0.44	0.09	0.8102

C+L= control más levadura, Se+ L= selenito de sodio más levadura, Smet + L= selenometionina más levadura, LSe =levadura enriquecida con selenio, EE= error estándar y P= probabilidad estadística.

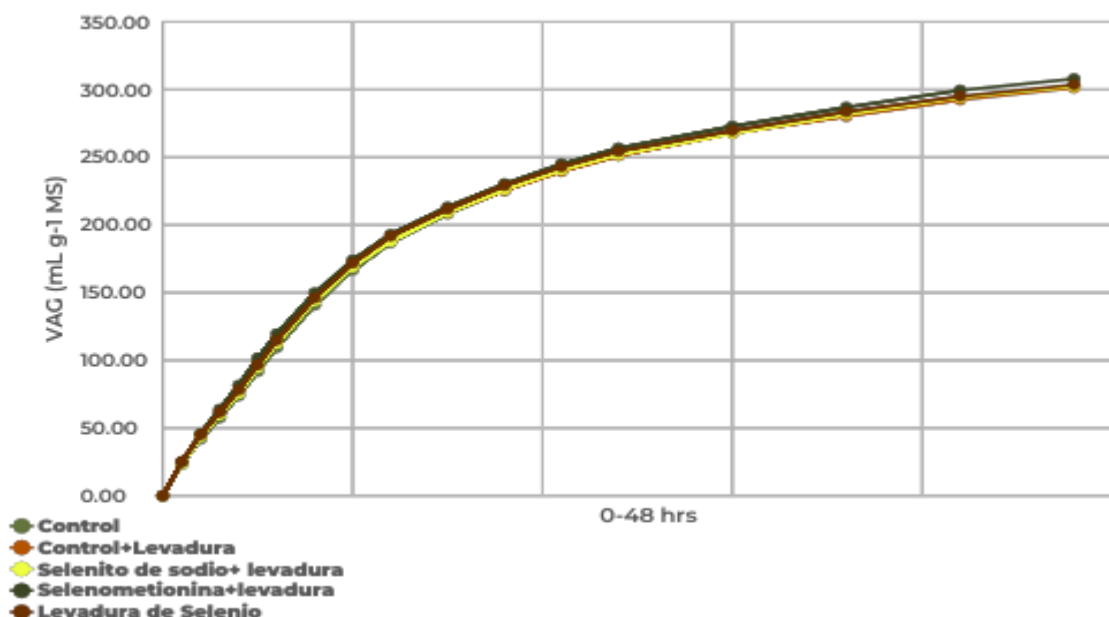


Figura 7. Cinética de producción de gas de una dieta para corderos de engorda con diferentes fuentes de selenio suplementario (Control, control + levadura, selenito de sodio + levadura, selenometionina + levadura y levadura enriquecida con selenio, a una dosis de 0.9 mg Se/kg MS.

En el Cuadro 10 se presentan las medias ($\pm$ error estándar) y valores de probabilidad para las variables pH, DMS, DMO, N-NH₃ y CH₄ obtenidas durante la fermentación *in vitro* con diferentes fuentes de selenio suplementario. Ninguna de estas variables fue afectada por la fuente de selenio ($p>0.05$).

Cuadro 10. pH, digestibilidad de la materia seca (DMS) y de la materia orgánica (DMO), concentración de nitrógeno amoniacal (N-NH₃) y producción de metano (CH₄) obtenidos durante la fermentación *in vitro* de una dieta para corderos de engorda con diferente fuente de selenio suplementario.

Variable	Fuente de selenio					EE	P
	Control	C+L	Se+L	SMet+L	LSe		
pH	6.70	6.71	6.69	6.72	6.71	0.2	0.8102
DMS (%)	77.9	76.8	77.8	77.1	78.1	1.84	0.1148
DMO (%)	61.5	62.3	61.2	59.9	60.1	1.82	0.7956
N-NH ₃ (mg dl)	4.9	5.4	4.7	4.6	4.9	0.76	0.9561
CH ₄ 24 h (ml)	28.0	29.2	30.0	30.8	30.0	5.60	0.5602
CH ₄ 48 h (ml)	32.5	33.0	32.5	31.0	31.0	4.37	0.7162
CH ₄ 24 h (%)	17.19	18.54	18.95	20.31	19.19	3.73	0.7886
CH ₄ 48 h (%)	16.33	16.92	15.86	15.36	15.17	2.55	0.9648

C+L= control más levadura, Se+ L= selenito de sodio más levadura, Smet + L= selenometionina más levadura, LSe =levadura enriquecida con selenio, EE= error estándar y P= probabilidad estadística.

Respecto a la emisión de CH₄ a las 24 h los tratamientos no mostraron diferencias estadísticas, mientras que para las 48 h los tratamientos siguieron la misma tendencia.

En el Cuadro 11 se muestran los resultados de la concentración molar y el porcentaje de ácidos grasos volátiles (AGV) obtenidos durante la fermentación *in vitro*. La fuente de selenio suplementario tuvo efecto sobre la concentración total e individual de AGV ($p<0.05$). Dicho efecto no se observó cuando los valores se expresaron en porcentaje ($p>0.05$). La concentración de AGV total e individual fue

menor con la levadura enriquecida con selenio, respecto a los otros tratamientos (P<0.01),

Cuadro 11. Concentración molar y porcentaje de ácidos grasos volátiles (AGV) obtenidos durante la fermentación *in vitro* de una dieta para corderos de engorda con diferente fuente de selenio suplementario.

Variable	Fuente de selenio					EE	P
	Control	C+L	Se+L	Smet+L	LSe		
AGV total (Mmol/ml)	41.4 ^a	41.9 ^a	37.3 ^{ab}	38.1 ^{ab}	27.4 ^b	2.7	0.0112
ACE (Mmol/ml)	24.9 ^a	25.0 ^a	22.5 ^{ab}	22.9 ^{ab}	16.4 ^b	1.6	0.0113
PRO (Mmol/ml)	8.9 ^a	9.1 ^a	8.1 ^{ab}	8.3 ^{ab}	6.2 ^b	0.5	0.0117
ISOBUT (Mmol/ml)	0.55 ^a	0.55 ^a	0.47 ^{ab}	0.5 ^{ab}	0.25 ^b	0.1	0.0161
BUT (Mmol/ml)	5.3 ^a	5.5 ^a	4.7 ^{ab}	4.8 ^{ab}	3.6 ^b	0.4	0.0211
ISOVAL (Mmol/ml)	0.98 ^a	1.00 ^a	0.84 ^{ab}	0.87 ^{ab}	0.44 ^b	0.1	0.0229
VAL (Mmol/ml)	0.77 ^a	0.77 ^a	0.65 ^{ab}	0.69 ^{ab}	0.52 ^b	0.1	0.0286
ACE (%)	60.0	59.5	60.4	60.3	60.2	0.7	0.8854
PRO (%)	21.8	21.6	21.7	21.7	22.6	0.4	0.3575
ISOBUT (%)	1.33	1.30	1.25	1.30	0.85	0.1	0.1003
BUT (%)	12.8	13.3	12.7	12.8	13.2	0.3	0.4553
ISOVAL (%)	2.4	2.4	2.3	2.3	1.5	0.3	0.1148
VAL (%)	1.9	1.8	1.8	1.8	1.9	0.1	0.8640

C+L= control más levadura, Se+ L= selenito de sodio más levadura, Smet + L= selenometionina más levadura, LSe =levadura enriquecida con selenio, EE= error estándar y P= probabilidad estadística. ACE = ácido acético, PRO = ácido propiónico, ISOBUT = ácido isobutírico, BUT ácido butírico, ISOVAL = ácido isovalérico, VAL = ácido valérico.

Los resultados del análisis *in vitro* demostraron que las dosis supranutricionales de Se (0.9 mg/Kg MS) no afectan la producción de gas (V, S y L). La cámara de fermentación ruminal funciona a través de asociaciones que permiten el

aprovechamiento de los componentes de la dieta, sin embargo, los minerales predisponen el funcionamiento de enzimas específicas de la microbiota ruminal (Markie et al., 2022). Almaraz et al. (2018) reportan que la fermentación ruminal in vitro no se ve afectada con concentraciones inferiores a 40 mg Se/Kg MS, donde ocurre una disminución de la producción de gas y de la digestibilidad de la materia seca y, por lo tanto, de la producción de los productos de la fermentación disminuye. Por su parte, Cruz-Monterrosa et al. (2011) indica que con una concentración de 0.64 mg Se/Kg MS aumenta la eficiencia bacteriana demostrando que fuentes orgánicas como la selenometionina aumentan la cantidad de protozoarios y bacterias ruminales por lo cual los derivados de la fermentación ruminal aumentan (AGV); así mismo, esta investigación indica que el aumento va dirigido a las bacterias proteolíticas, que son las encargadas de la degradación de la proteína. Además, Cui et al. (2021) documentan que los géneros bacterianos asociados con el Se son bacterias celulolíticas de los géneros *Fibrobacter* y *Ruminococcus*, los cuales se encargan de degradar la celulosa y hemicelulosa, que son los compuestos con más retardo en la degradación ruminal y producen H⁺ que son la materia prima de las arqueas para formar CH₄ (Ramírez et al., 2014).

En cuanto al pH, este parámetro ruminal influye en la digestibilidad de los nutrientes, especialmente en carbohidratos no estructurales como la celulosa. Las bacterias celulíticas tienden a ser más eficientes en pH lo más cercano a neutro y a pH ácidos tienden a ser poco eficientes (Ruseel y Wilson, 1996). Por otra parte, este parámetro también afecta la absorción de selenio suplementario, ya que a cambios de pH ocasionados por dietas altas en grano se reduce el selenio a formas no absorbibles por lo que este mineral no puede ser aprovechado (Gerlof et al., 1992). Los microorganismos ruminales tienen una mayor preferencia hacia el Se oxidado, reduciéndolo hasta que esta resulte no asimilable (Podol et al., 1992). Por ello, en esta investigación no se reportan diferencias estadísticas entre las fuentes de Se justificando que la asimilación de Se por parte del microbiota ruminal no difiere en concentraciones de 0.9 mg Se /Kg MS entre fuentes, por lo que los parámetros ruminales siguen la misma tendencia.

En el presente estudio, la DMS y DMO no presentaron diferencias estadísticas entre tratamientos. Las investigaciones de digestibilidad fraccionadas *in vivo* demuestran que existen diferencias en la digestibilidad de la MO orgánica con dietas de 50% grano del 50-70% dependiente de los ingredientes de las dietas, mientras que en duodeno la digestibilidad de la MO ronda de un 75 a 83% posterior a la digestibilidad en rumen (Del Razo et al., 2013); en la misma investigación se observó que al adicionar una dosis máxima de 0.9 mg Se/kg MS se observa una mayor digestibilidad de MO con respecto al grupo control. Sin embargo, Hernández-Calva et al. (2013) no reportan un aumento de la digestibilidad de MO, esto debido a que adiciono magnesio (Mg) y esta interacción en el rumen no favoreció la digestibilidad de MO en duodeno, mientras que para rumen obtuvieron porcentajes de 78-86 % de digestibilidad. Los valores indicados resultaron ser más altos que los encontrados por Del Razo et al. (2013), demostrando que la interacción de 0.1 mg Se /Kg MS con un complemento de 18 % de Mg aumenta la eficiencia bacteriana en rumen.

En cuanto a las concentraciones de N-NH₃, en el presente estudio no existieron diferencias estadísticas entre los tratamientos. Los datos difirieron de los reportados en investigaciones con dietas altas en grano y forrajes, de acuerdo con (Wang et al. 2019), la proteína dietética es la principal fuente de N-NH₃ en el rumen, por lo cual su concentración va a depender de la eficiencia de la microbiota ruminal para degradarla. Por su parte Cui et al. (2021) reportan una concentración de N-NH₃ más alta en dosis medias de levadura enriquecida con selenio (0.18 mg Se/ Kg MS), mientras que Del Razo et al. (2013), presenta los valores más altos de N-NH₃ con concentraciones medias de 0.6 mg Se/ Kg MS y 70% grano y de 0.9 y 50% grano, por lo que la eficiencia de utilización del N está relacionada con la cantidad de fibra de la dieta. De la misma forma, Hernández-Calva et al. (2007) reportan que dietas altas en carbohidratos reducen la concentración de N-NH₃, por lo tanto, la eficiencia de utilización del N está relacionada con la FDN.

En esta investigación, se observaron diferencias estadísticas entre tratamientos sobre la concentración de AGV, sin embargo, para los porcentajes de AGV no existieron diferencias. La producción de AGV está en función del tipo de fuente energética con la cual se balanceó la dieta (Zhang et al., 2019). Del Razo et al.

(2013) reportan una menor relación acético:propiónico (A:P) en dietas altas en grano cuando se suplementa únicamente con Se. Por su parte, Hernández-Calva et al. (2007) reportan que la interacción control-mineral puede influenciar en la proporción A:P. Los datos obtenidos concuerdan con los del primer autor, sin embargo, esta condición fue diferente en esta investigación *in vitro*, donde el grupo control fue el de mayor producción de AGV. Un factor que pudiera haber intervenido es el modelo biológico utilizado y el tipo de fuente de Se utilizado, así como la cantidad de inclusión en la dieta. Almaraz-Buendía et al. (2018) reportan que dosis superiores a 40 mg Se/kg MS disminuyen la digestibilidad y los productos de la fermentación ruminal (AGV), sin embargo, en esta investigación, la digestibilidad se mantuvo resiliente, aunque la producción de AGV fue distinta entre tratamientos. Esto no concuerda con lo encontrado por Getachew et al. (2004) quienes indican que la digestibilidad de MS en modelos *in vitro* esta correlacionada con la producción de AGV.

La producción de CH₄ a las 24 y 48 h no tuvo efectos significativos entre los tratamientos, sin embargo, se ha demostrado que el Se actúa como cofactor enzimático de bacterias celulíticas ligadas a este compuesto, que es el de mayor retardo en la digestibilidad de los nutrientes, por lo tanto, es el que tiene una mayor producción de H⁺. A nivel ruminal, el Se aumenta la producción de AGV, específicamente el propiónico que es un compuesto que consume los H⁺ disponibles en el rumen, por lo tanto, éste compuesto, que es la materia prima para la síntesis de CH₄, disminuye trayendo consigo una mayor eficiencia de los alimentos y un menor desperdicio energético (Hendawy et al., 2021). Sin embargo, los resultados de esta investigación son diferentes a los resultados con animales en pastoreo y esto se debe a que la mayor acción del Se es por medio de bacterias celulíticas, en donde aumenta la digestibilidad de los nutrientes por medio de exoenzimas encargadas de la degradación de estos compuestos (celulosa y hemicelulosa) (Pan et al., 2020). Estos mismos autores demostraron que existe una mayor digestibilidad de los nutrientes, especialmente de los forrajes, cuando se suplementa con levadura enriquecida con selenio. También Whang et al. (2019) encontraron que en ovejas alpinas la digestibilidad de la pastura aumenta cuando se suplementa con levadura

enriquecida con selenio (0.35 mg /kg MS). En la presente investigación la dieta fue a base de granos y un mínimo de forrajes, es por eso por lo que la capacidad de Se de tener efectos en dichas bacterias disminuyó, por lo tanto, no se observa una disminución en la pérdida de energía por CH₄.

Efecto *in vivo* del selenio suplementario sobre variables productivas y ruminales en corderos de engorda

En el Cuadro 12 se presentan las variables productivas de corderos de engorda con levadura enriquecida con selenio como fuente de selenio suplementaria. La levadura enriquecida con selenio no tuvo efecto sobre dichas variables respecto al grupo control ($p>0.05$); sin embargo, la covariable PVI tuvo efecto sobre el CMS, encontrándose 57.9 g de consumo por cada kg de PV ($p=0.02$).

Cuadro 12. Comportamiento productivo en corderos de engorda suplementados con levadura enriquecida con selenio a una concentración de 0.9 mg/kg MS en la dieta.

Variable	Tratamiento		Error estándar	Probabilidad
	Control	LSe		
PVI (kg)	25.67	25.84	-	-
PVF (kg)	48.37	50.9	3.48	0.5514
CMS (g)	1063.5	1160.1	68.8	0.3285
GDP(g)	254.9	250.4	23.8	0.9094
CA	3.97	3.85	0.1	0.7494

LSe =levadura enriquecida con selenio. PVI = peso vivo inicial, PFV = peso vivo final, CMS = consumo de materia seca, DGP = ganancia diaria de peso, CA = conversión alimenticia.

En el cuadro 13 se muestran las medias de las variables ruminales, las cuales no mostraron efecto de la levadura enriquecida con Se ($p>0.05$).

Cuadro 13. Variables ruminales en corderos de engorda suplementados con levadura enriquecida con selenio a una concentración de 0.9 mg/kg MS en la dieta.

Variable	Tratamiento		Error estándar	Probabilidad
	Control	LSe		
pH ruminal	6.11	6.05	0.32	0.7597
N-NH ₃ (mg/dl)	7.65	8.48	3.99	0.7384
DMS (%)	72.48	74.55	10.25	0.7395
CH ₄ (g/día)	0.525	0.481	0.15	0.7006

LSe =levadura enriquecida con selenio. N-NH₃ = nitrógeno amoniacal, DMS = digestibilidad de la materia seca, CH₄ = metano entérico.

Los corderos tienen una fase exponencial de crecimiento que abarca hasta los 12 meses de edad, ésta cambia de acuerdo con su raza y condiciones abióticas. El modelo de Brody permite predecir el crecimiento de los animales y es utilizado para calcular el rendimiento productivo de los animales, donde la mayor demanda de nutrientes que tienen los corderos es en la primera mitad. En esta investigación, no se encontraron diferencias estadísticas en los parámetros productivos, lo cual no concuerda con Wang et al. (2019), quienes obtuvieron mayores efectos con 0.6 mg Le Se /Kg MS en la dieta con respecto al grupo no suplementado. Así mismo, existen diferentes tasas de absorción y eliminación de este mineral en los rumiantes, por lo cual el tipo de fuente a utilizar va a ocasionar variabilidad en los resultados debido a los niveles de asimilación (Hadrup y Ravn-Haren, 2021). Por otra parte, la disponibilidad de este mineral va a estar determinada por las condiciones volcánicas de la región (Valle de Tulancingo), donde la deficiencia de esta mineral es responsable de la mortalidad y performance de los animales, por lo tanto, la suplementación es una de las principales vías para satisfacer las necesidades de este mineral en los rumiantes (Ramírez-Bibriesca et al., 2004).

En la GDP no se observaron diferencias estadísticas significativas asociadas a la suplementación con selenio. Dada la naturaleza de este mineral, este no tiende a

acumularse en el musculo, por lo que el exceso de este mineral requiere de un gasto energético extra para eliminar el excedente (Galbrait et al., 2015). Por otra parte, concentraciones altas de este mineral en el organismo ocasionan bajas en los parámetros productivos (GDP, CMS y CA), en estas condiciones, los genes encargados de la atrofia se ven inhibidos, por lo cual el anabolismo y el catabolismo se ven interrumpidos (Zhang et al., 2021). La suplementación de Se propicia la síntesis de hormonas encargadas en la regulación del crecimiento muscular, como la selenoproteína W; en esta investigación las diferencias estadísticas nulas se pueden justificar, debido a que el periodo en donde los animales requieren de una mayor suplementación con selenio es desde neonatos hasta los primeros 6 meses de vida, el periodo entre el destete y la engorda pudo interferir debido a las condiciones de los animales (Diniz et al., 2021).

Las bacterias ruminales, especialmente consorcios específicos de la degradación de carbohidratos, tienen un cierto margen de tolerancia a los cambios del medio ruminal (pH) (Ruseell y Wilson, 1996), por lo que no existieron diferencias estadísticas entre el grupo control y el de levadura enriquecida con Se. Estas condiciones son similares a las reportadas en la investigación *in vitro*, pese a que en investigaciones ligadas al ganado lechero las condiciones se muestran similares mostrando diferencias entre tratamientos. Uno de los principales efectos al disminuir los niveles de pH es un aumento de los productos derivados de la fermentación ruminal (Zhang et al., 2020). Existe una correlación entre niveles de pH más bajos y un aumento de los productos de fermentación ruminal, como el N-NH₃ un compuesto nitrogenado importante para la comunidad bacteriana. Los niveles normales de este compuesto en el rumen son de 5-25 mg/dl, niveles bajos o altos ocasionan diferentes trastornos metabólicos: baja eficiencia bacteriana, disminución de la digestibilidad, afectación del ciclo de la urea y pérdida energética de los animales (Preston y Leng, 1987). La eficiencia bacteriana está ligada con el N-NH₃ así mismo lejos del papel de Se como un antioxidante natural, la degradación de fuentes orgánicas, como las levaduras enriquecidas con Se, aporta un extra de proteína y funcionan como un preprobiótico que aumenta la respuesta de los

microorganismos por los componentes de la dieta suministrada al hospedero (Desnoyers et al., 2009 y Cui et al., 2021).

La DMS *in vivo* va a depender de múltiples factores bióticos y abióticos, los cuales son importantes ya que pueden afectar de múltiples maneras la experimentación. En esta investigación no existieron diferencias estadísticas entre tratamientos, los parámetros descritos anteriormente dependen directamente de la digestibilidad de la dieta ya que se liberan los compuestos derivados de la fermentación ruminal (Medhi et al., 2013). La suplementación con Se, aumenta la población microbiana, además de favorecer un ambiente antioxidante en donde proliferan los microorganismos encargados de degradar compuestos como la celulosa (Russell y Wilson, 1996). En otros estudios se reporta que un aumento en la digestibilidad de nutrientes (PC, FDN y MO) (Shi et al., 2011) por efecto de las fuentes de Se, se debe principalmente a la síntesis de selenoproteínas que contrarrestan el estrés oxidativo del medio donde proliferan patógenos que alteran la fermentación ruminal (Hendawy et al., 2021).

La fermentación ruminal como mecanismo del aprovechamiento del alimento por parte de los rumiantes, tiende a la liberación de distintos gases. Uno de esos gases es el CH₄ que tiene un potencial de efecto invernadero hasta de 25 veces más de capacidad de calentamiento en la atmósfera que el CO₂. Es por eso por lo que las estrategias de alimentación juegan un papel importante en los rumiantes. Cabe mencionar que en esta investigación no se encontraron diferencias estadísticas entre los tratamientos, lo que contrasta con Milko et al. (2016), quienes reportan una disminución en la producción de CH₄ producido durante la fermentación ruminal. Por otra parte, no se reportan las posibles causas de este efecto, sin embargo, existen diferentes compuestos minerales que juegan un papel importante de enzimas de la categoría de las hidrogenasas, que son las encargadas de utilizar los H⁺ en el rumen, los cuales son precursores de CH₄ (Las y Ophaharam, 2012). Dentro de estas enzimas las bacterias que tienen una mayor afinidad por el Se son *Fribrobacter* y *Ruminococcus* (Cui et al., 2021). El tiempo de retención de los alimentos en el rumen va a determinar la producción de la materia prima para la producción de CH₄, por lo tanto, mantener ingredientes con diferentes tasas de

digestibilidad es importante para el aprovechamiento de los alimentos en los rumiantes, sin embargo, las rutas metabólicas y la plasticidad del rumen son importantes para mantener resiliente el sistema (Russell y Wilson, 1996).

CONCLUSIONES

Con base en el metaanálisis realizado, el selenio suplementario promueve cambios positivos sobre los parámetros productivos (ganancia diaria de peso y conversión alimenticia) y metabólicos (actividad de GPx, T₃, globulina y Se en sangre), en corderos de engorda, siendo el nivel de producción de los animales y la fuente de selenio factores determinantes para dicho efecto, ya que el mayor impacto se observa en animales con bajo nivel productivo y utilizando nanopartículas de selenio o selenio orgánico. La falta de efecto sobre las emisiones de metano debe interpretarse cuidadosamente debido la falta de estudios disponibles y variabilidad en los métodos de medición.

La fuente de selenio suplementario no afecta las variables de la fermentación ruminal *in vitro*, excepto la concentración de AGVs, siendo la levadura enriquecida con selenio a dosis supra nutricionales (0.9 mg Se/kg MS) la que provocó menor producción de AGVs con respecto al grupo control y los demás tratamientos.

Finalmente, la levadura enriquecida con selenio no mejoró los parámetros productivos y ruminales en corderos de engorda, respecto a los corderos sin selenio suplementario, posiblemente debido al nivel productivo de los animales (GDP > 200 g/d), confirmándose así lo observado en el metaanálisis.

LITERATURA CITADA

- Alimohamady, R., Aliarabi, H., Bahari, A., & Dezfoulan, A. H. (2013). Influence of different amounts and sources of selenium supplementation on performance, some blood parameters, and nutrient digestibility in lambs. *Biological Trace Element Research*, 154(1), 45–54. <https://doi.org/10.1007/s12011-013-9698-4>
- Almaraz-Buendía, Isaac, Razo-Rodríguez, O. Enrique Del, Salinas-Martínez, J. Armando, Campos-Montiel, Rafael, & Ramírez-Bribiesca, Efrén. (2018). Concentraciones de selenio que inhiben la actividad microbiana ruminal durante la fermentación *in vitro* de heno de avena. *Agrociencia*, 52(4), 511-521.
- Alonso, M. L., Miranda, M., Hernandez, J., Castillo, C., & Benedito, J. (1997). Glutathión peroxidasa (GSH-Px) en las patologías asociadas a deficiencias de selenio en rumiantes. *Archivos de Medicina Veterinaria*, 29(2). <https://doi.org/10.4067/s0301-732x1997000200001>
- Al-Taie, Y. a. M. (n.d.). Effect of Selenium and Zinc Doses and Interaction between Them on Production Performance and Some Carcass Traits of Awassi Lambs ProQuest. <https://www.proquest.com/openview/5f9cf9df7f63f34a37a205c968fad91cf/1.pdf?pq-origsite=gscholar&cbl=2031963>
- Antunović, Z., Klir, Ž., Šperanda, M., Zdenko, L., Mioč, B., Nina, Č. K., Samac, D., & Novoselec, J. (2020). Productive traits, selenium status and blood metabolic status in fattening lambs affected by selenium biofortified corn. CROSB. <https://www.bib.irb.hr:8443/1078135>
- Antunović, Z., Novoselec, J., Klapac, T., Čavar, S., Mioč, B., & Šperanda, M. (2009). Influence of different selenium sources on performance, blood and meat selenium content of fattening lambs. *Italian Journal of Animal Science*, 8(sup3), 163–165. <https://doi.org/10.4081/ijas.2009.s3.163>
- AOAC International. (2023). Official Methods of Analysis of AOAC International. 22nd ed. *AOAC International*.

-
- Appuhamy, J. R. N., Strathe, A. B., Jayasundara, S., Wagner-Riddle, C., Dijkstra, J., France, J., & Kebreab, E. (2013). Anti-methanogenic effects of monensin in dairy and beef cattle: A meta-analysis. *Journal of Dairy Science*, 96, 5161–5173.
- Arshad, M. A., Ebeid, H. M., & Hassan, F. (2020). Revisiting the Effects of Different Dietary Sources of Selenium on the Health and Performance of Dairy Animals: a Review. *Biological Trace Element Research*, 199(9), 3319–3337. <https://doi.org/10.1007/s12011-020-02480-6>
- Beckett, G. J., & Arthur, J. R. (2005). Selenium and endocrine systems. *Journal of Endocrinology*, 184(3), 455–465. <https://doi.org/10.1677/joe.1.05971>
- Burk, R. F. (2007). Selenium in Nutrition and Health edited by PF Surai, 2006, 974 pages, hardcover. Nottingham University Press, Nottingham, United Kingdom. *American Journal of Clinical Nutrition*, 86(1), 270. <https://doi.org/10.1093/ajcn/86.1.270>
- Burk, R. F., & Hill, K. E. (2015). Regulation of selenium metabolism and transport. *Annual Review of Nutrition*, 35(1), 109–134. <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-071714-034250>
- Cabello, G., & Wrutniak, C. (1989). Thyroid hormone and growth: relationships with growth hormone effects and regulation. *Annales De Biologie Animale Biochimie Biophysique*, 29(4), 387-402. <https://doi.org/10.1051/rnd:19890401>
- Camacho, L. E., Meyer, A. M., Neville, T. L., Hammer, C. J., Redmer, D. A., Reynolds, L. P., Caton, J. S., & Vonnahme, K. A. (2012). Neonatal hormone changes and growth in lambs born to dams receiving differing nutritional intakes and selenium supplementation during gestation. *Reproduction*, 144(1), 23–35. <https://doi.org/10.1530/rep-11-0302>
- Cárdenas-Ramírez, L. R., Real, C. S., Ruíz-Flores, A., Pérez-Hernández, G., López-Ordaz, R., Vite-Cristóbal, C., & Ordaz, R. L. (2023). Efecto de la fuente de selenio en el comportamiento productivo, contenido de selenio en suero y músculo, y nivel sérico de albúmina, α -, β - y γ -globulinas en ovinos Pelibuey.

- Ceballos y Wittwer. (1996). Metabolismo del selenio en rumiantes. *Archivos de Medicina Veterinaria*, 28(2), 5.
- Cui, X., Wang, Z., Tan, Y., Chang, S., Zheng, H., Wang, H., Yan, T., Guru, T., & Hou, F. (2021). Selenium Yeast Dietary Supplement Affects Rumen Bacterial Population Dynamics and Fermentation Parameters of Tibetan Sheep (*Ovis aries*) in Alpine Meadow. *Frontiers in Microbiology*, 12, 663945. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.663945>
- Dai, X., Tian, Y., Li, J., Su, X., Wang, X., Zhao, S., Liu, L., Luo, Y., Liu, D., Zheng, H., Wang, J., Dong, Z., Hu, S., & Huang, L. (2014). Metatranscriptomic analyses of plant cell wall polysaccharide degradation by microorganisms in the cow rumen. *Applied and Environmental Microbiology*, 81(4), 1375–1386. <https://doi.org/10.1128/aem.03682-14>
- Davis, P. A., McDowell, L. R., Wilkinson, N. S., Buergelt, C. D., Van Alstyne, R., Weldon, R. N., & Marshall, T. T. (2006). Tolerance of inorganic selenium by range-type ewes during gestation and lactation^{1,2,3}. *Journal of Animal Science*, 84(3), 660–668. <https://doi.org/10.2527/2006.843660x>
- Davis, P.A., McDowell, L. R., Wilkinson, N. S., Buergelt, C. D., Van Alstyne, R., Weldon, R. N., Marshall, T. T., & Matsuda-Fugisaki, E. Y. (2008). Efectos comparativos de varios niveles dieteticos de Se como selenito de sodio o levadura de Se sobre las concentraciones de Se en sangre, lana y tejidos de ovejas castradas. *Small Ruminant Res.* 74: 149-158.
- Del Razo-Rodriguez, O. D., Ramirez-Bribiesca, J. E., Lopez-Arellano, R., Revilla-Vazquez, A. L., Gonzalez-Munoz, S. S., Cobos-Peralta, M. A., Hernandez-Calva, L. M., & McDowell, L. R. (2013). Effects of dietary level of selenium and grain on digestive metabolism in lambs, *Czech Journal of Animal Science*, 58(6):253-261. doi: 10.17221/6823-CJAS

-
- DerSimonian, R., & Laird, N. (2015). Meta-analysis in clinical trials revisited. *Contemporary Clinical Trials*, 45, 139-145. <https://doi.org/10.1016/j.cct.2015.09.002>
- Dhari, E. A., & Kassim, W. Y. (2019). Effect of Adding Selenium with or Without Vitamin E and Combination of them on some of Productive and Physiological Characteristics of Awassi Lambs. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 32(2), 115–125. <https://doi.org/10.37077/25200860.2019.202>
- Díaz-Zarco, S., De Oca-Jiménez, R. M., & Rodríguez-Domínguez, M. C. (2022). Niveles de Selenio en suelo, pasto y en ovejas: Influencia del suplemento de Selenio en la concentración de IgG en ovejas gestantes y corderos. *Terra Latinoamericana*, 40. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.950>
- Domínguez-Vara, I., González-Muñoz, S., Pinos-Rodríguez, J., Bórquez-Gastelum, J., Bárcena-Gama, R., Mendoza-Martínez, G., Zapata, L., & Landois-Palencia, L. (2009). Effects of feeding selenium-yeast and chromium-yeast to finishing lambs on growth, carcass characteristics, and blood hormones and metabolites. *Animal Feed Science and Technology*, 152(1–2), 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2009.03.008>
- Enrique, O. M. (2021, November 1). *Meta-análisis de dietas para rumiantes con diferentes niveles de cascarilla y pulpa de café*. <http://193.122.196.39:8080/xmlui/handle/10521/4799>
- Erwin, E. S., Marco, G. J., & Emery, E. (1961): Volatile fatty acids analysis of blood and rumen fluid by gas chromatography. *Journal of Dairy Science*. 44:1768–1771. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(61\)89956-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(61)89956-6)
- Faixová, Z., Faix, Š., Leng, L., Váczi, P., Maková, Z., & Szabóová, R. (2007). Haematological, Blood and Rumen Chemistry Changes in Lambs Following Supplementation with Se-yeast. *Acta Veterinaria Brno*, 76(1), 3–8. <https://doi.org/10.2754/avb200776010003>
- Fan, Q., Wanapat, M., Yan, T., & Hou, F. (2020). Altitude influences microbial diversity and herbage fermentation in the rumen of yaks. *BMC Microbiology*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12866-020-02054-5>

Farm Health Online – Centro de conocimientos sobre salud y bienestar animal – Deficiencia de selenio. (n.d.). https://www.farmhealthonline.com/disease-management/cattle-diseases/selenium-deficiency/?utm_source=chatgpt.com

Filippini, T., Fairweather-Tait, S., & Vinceti, M. (2022). Selenium and immune function: a systematic review and meta-analysis of experimental human studies. *American Journal of Clinical Nutrition*, 117(1), 93–110. <https://doi.org/10.1016/j.ajcnut.2022.11.007>

Galbraith, M. L., Vorachek, W. R., Estill, C. T., Whanger, P. D., Bobe, G., Davis, T. Z., & Hall, J. A. (2015). Rumen microorganisms decrease bioavailability of inorganic selenium supplements. *Biological Trace Element Research*, 171(2), 338–343. <https://doi.org/10.1007/s12011-015-0560-8>

Hansen, J. C., & Deguchi, Y. (1996). Selenium and Fertility in Animals and Man—A Review. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 37(1), 19–30. <https://doi.org/10.1186/bf03548116>

Hedges L. V. (1981). Distribution theory for Glass's estimator of effect size and related estimators. *Journal of Educational Statistics*, 6(2):107-128. <https://doi.org/10.2307/1164588>

Hendawy, A. O., Sugimura, S., Sato, K., Mansour, M. M., El-Aziz, A. H. A., Samir, H., Islam, M. A., Bostami, A. B. M. R., Mandour, A. S., Elfadadny, A., Ragab, R. F., Abdelmageed, H. A., & Ali, A. M. (2021). Effects of selenium supplementation on rumen microbiota, rumen fermentation, and apparent nutrient digestibility of ruminant animals: a review. *Fermentation*, 8(1), 4. <https://doi.org/10.3390/fermentation8010004>

Herrera-Pérez, J., Velez-Regino, L. G., Sánchez-Santillán, P., Torres-Salado, N., Rojas-García, A. R., & Maldonado-Peralta, M. (2018). Fermentación *in vitro* de consorcios bacterianos celulolíticos ruminales de búfalos de agua en sustratos fibrosos. *Revista MVZ Córdoba*, 23(3), 6860-6870. <https://doi.org/10.21897/rmvz.1374>

-
- Higgins, J.P., Thompson, S. G., Deeks, J. J., & Altman, D. G. (2003). Measuring inconsistency in meta-analyses. *BMJ* 327(7414):557–560. <https://doi.org/10.1136/bmj.327.7414.557>
- Iannotti, E. L., Kafkewitz, D., Wolin, M. J., & Bryant, M. P. (1973). Glucose Fermentation Products of *Ruminococcus albus* Grown in Continuous Culture with *Vibrio succinogenes*: Changes Caused by Interspecies Transfer of H₂. *Journal of Bacteriology*, 114(3), 1231–1240. <https://doi.org/10.1128/jb.114.3.1231-1240.1973>
- Iannotti, EL, Kafkewitz, D., Wolin, MJ y Bryant, MP (1973). Productos de fermentación de glucosa de *Ruminococcus albus* cultivados en cultivo continuo con *Vibrio succinogenes*: cambios causados por la transferencia de H₂ entre especies. *Journal of Bacteriology* , 114 (3), 1231-1240.
- Ibrahim, E., & Mohamed, M. (2018). Effect of different dietary selenium sources supplementation on nutrient digestibility, productive performance and some serum biochemical indices in sheep. *Egyptian Journal of Nutrition and Feeds*, 21(1), 53–64. <https://doi.org/10.21608/ejnf.2018.75398>
- Jamal Rajab, W., Rudiansyah, M., Kadhim, M. M., Tolmasovich Shamsiev, A., Prakaash, A. S., Hadi Lafta, M., Aravindhan, S., & Fakri Mustafa, Y. (2023). The Role of Selenium on the Status of Mineral Elements and Some Blood Parameters of Blood Serum of Lambs. *Archives of Razi Institute*, 78(1), 135-144. <https://doi.org/10.22092/ARI.2022.359471.2427>
- Juniper, D. T., Phipps, R. H., Givens, D. I., Jones, A. K., Green, C., & Bertin, G. (2007). Tolerance of ruminant animals to high dose in-feed administration of a selenium-enriched yeast¹. *Journal of Animal Science*, 86(1), 197–204. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-773>
- Kiremidjian-Schumacher, L., & Stotzky, G. (1987). Selenium and immune responses. *Environmental Research*, 42(2), 277–303. [https://doi.org/10.1016/s0013-9351\(87\)80194-9](https://doi.org/10.1016/s0013-9351(87)80194-9)
- Klein, G. S., Leal, K. W., Rodrigues, C. A., Draszevski, T. M. R., Brunetto, A. L. R., Vitt, M. G., Klein, M. S., Cauduro, V. H., Flores, E. M. M., Da Silva, G. B.,

-
- Bagatini, M. D., De M Chitolina, A. B., Baldissera, M. D., & Da Silva, A. S. (2025). Organic zinc and selenium supplementation of late lactation dairy cows: effects on milk and serum minerals bioavailability, animal health and milk quality. *Animals*, 15(4), 499. <https://doi.org/10.3390/ani15040499>
- Lei, X. G., Combs, G. F., Sunde, R. A., Caton, J. S., Arthington, J. D., & Vatamaniuk, M. Z. (2022). Dietary selenium across species. *Annual Review of Nutrition*, 42(1), 337–375. <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-062320-121834>
- López-Ojeda, J. C., Vallejo-Hernández, L. H., Paredes-Díaz, D., Mendoza-Pedroza, S. I., Ramírez-Mella, M., & Ramírez-Bribiesca, J. E. (2022). Implementación de la técnica de hexafluoruro de azufre (SF6) para determinar las emisiones de metano en ovinos. *Agro-Divulgación*, 2(5). Recuperado a partir de <https://agrodivulgacion-colpos.org/index.php/1agrodivulgacion1/article/view/116>
- MacDonald, D. W., Christian, R. G., Strausz, K. I., & Roff, J. (1981). Acute selenium toxicity in neonatal calves. *The Canadian veterinary journal = La revue veterinaire canadienne*, 22(9), 279–281.
- Mackie, R. I., McSweeney, C. S., & Aminov, R. I. (2022). Rumen. *Encyclopedia of Life Sciences*, 1–19. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0029419>
- Malyugina, S., Skalickova, S., Skladanka, J., Slama, P., & Horky, P. (2021). Biogenic selenium nanoparticles in Animal Nutrition: A review. *Agriculture*, 11(12), 1244. <https://doi.org/10.3390/agriculture11121244>
- Mariezcurrana-Berasain, M. D., Mariezcurrana-Berasain, M. A., Lugo, J., Libien-Jiménez, Y., Pinzon-Martinez, D. L., Salem, A. Z. M., & García-Fabila, M. (2022). Effects of dietary supplementation with organic selenium-enriched yeast on growth performance, carcass characteristics, and meat quality of finishing lambs. *Tropical Animal Health and Production*, 54(1), 49. <https://doi.org/10.1007/s11250-021-02992-w>
- Mcdowell, L. (2003). Selenium. In *Elsevier eBooks* (pp. 397–448). <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-51367-0.50016-7>

-
- Mehdi, Y., Hornick, J., Istasse, L., & Dufrasne, I. (2013). Selenium in the environment, metabolism and involvement in body functions. *Molecules*, 18(3), 3292–3311. <https://doi.org/10.3390/molecules18033292>
- Micheloud, J. F., Araoz, V., Delgado, F. O., Colque-Caro, L. A., Rosa, D. E., & Mattioli, G. A. (2018). Distrofia muscular nutricional en corderos de raza Dorper en el Noroeste Argentino. *Revista de Medicina Veterinaria*, 99(2), 13-16. https://www.someve.org.ar/images/revista/2018/N2-2018_Articulo-03.pdf
- Milewski, S., Sobiech, P., Błażej-Gabowska, J., Wójcik, R., Żarczyńska, K., Miciński, J., & Ząbek, K. (2021). The efficacy of a Long-Acting Injectable selenium preparation administered to pregnant ewes and lambs. *Animals*, 11(4), 1076. <https://doi.org/10.3390/ani11041076>
- Miltko, R., Rozbicka-Wieczorek, J. A., Więsyk, E., & Czauderna, M. (2016). The influence of different chemical forms of selenium added to the diet including carnosic acid, fish oil and rapeseed oil on the formation of volatile fatty acids and methane in the rumen, and fatty acid profiles in the rumen content and muscles of lambs. *Acta Veterinaria*, 66(3), 373–391. <https://doi.org/10.1515/acve-2016-0032>
- Monterrosa, R. G. C., Bribiesca, E. R., Peralta, M. a. C., Vázquez, A. L. R., Galván, M. M. C., & Mora, J. L. C. (2011). Disponibilidad de selenio complementado con selenito de sodio y selenometionina en corderos. Redalyc.org. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=95918054006>
- Myers, W. D., Ludden, P. A., Nayigihugu, V., & Hess, B. W. (2004). Technical Note: A procedure for the preparation and quantitative analysis of samples for titanium dioxide¹. *Journal of Animal Science*, 82(1), 179–183. <https://doi.org/10.2527/2004.821179x>
- Nabzo, S., & Fau, C. (2020). Metaanálisis: bases conceptuales, análisis e interpretación estadística. *Revista Mexicana De Oftalmología*, 94(6S), 260–273. <https://doi.org/10.24875/rmo.m2>
- National Research Council (2007). Nutrient Requirements of small ruminants: sheep, goats, cervids and new world. National Academy Press.

-
- Novoselec, J., Šalavardić, Ž. K., Đidara, M., Novoselec, M., Vuković, R., Čavar, S., & Antunović, Z. (2022). The effect of maternal dietary selenium supplementation on blood antioxidant and metabolic status of ewes and their lambs. *Antioxidants*, 11(9), 1664. <https://doi.org/10.3390/antiox11091664>
- Oblitas, F., Contreras, P. A., Böhmwald, H., & Wittwer, F. (2000). Efecto de la suplementación con selenio sobre la actividad sanguínea de glutathion peroxidasa (GSH-Px) y ganancia de peso en bovinos selenio deficientes mantenidos a pastoreo. *Archivos De Medicina Veterinaria*, 32(1). <https://doi.org/10.4067/s0301-732x2000000100007>
- Paulson, G. D., Baumann, C. A., & Pope, A. L. (1968). Metabolism of Se-Selenite, Se-Selenate, Se-Selenomethionine and S-Sulfate by Rumen microorganisms. *Journal of Animal Science*, 27(2), 497. <https://doi.org/10.2527/jas1968.272497x>
- Plata-Pérez, G., Angeles-Hernandez, J. C., Morales-Almaráz, E., Del Razo-Rodríguez, O. E., López-González, F., Peláez-Acero, A., Campos-Montiel, R. G., Vargas-Bello-Pérez, E., & Vieyra-Alberto, R. (2022). Oilseed supplementation improves milk composition and fatty acid profile of cow milk: A Meta-Analysis and Meta-Regression. *Animals*, 12(13), 1642. <https://doi.org/10.3390/ani12131642>
- Qazi, I. H., Angel, C., Yang, H., Zoidis, E., Pan, B., Wu, Z., Ming, Z., Zeng, C., Meng, Q., Han, H., & Zhou, G. (2019). Role of selenium and selenoproteins in male reproductive Function: A review of past and present evidences. *Antioxidants*, 8(8), 268. <https://doi.org/10.3390/antiox8080268>
- Qi, Z., Duan, A., & Ng, K. (2023). Selenoproteins in health. *Molecules*, 29(1), 136. <https://doi.org/10.3390/molecules29010136>
- Qin, S., Gao, J., & Huang, K. (2007). Effects of different selenium sources on tissue selenium concentrations, blood GSH-Px activities and plasma interleukin levels in finishing lambs. *Biological Trace Element Research*, 116(1), 91–102. <https://doi.org/10.1007/bf02685922>

-
- R Core Team (2022) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org>
- Raisbeck, M. F. (2020). Selenosis in ruminants. *Veterinary Clinics of North America Food Animal Practice*, 36(3), 775–789. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2020.08.013>
- Ramírez, J. F., Sandra, P. O., & Noguera, R. (2014). Metanogénesis ruminal y estrategias para su mitigación. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 9(2), 307-323. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1900-96072014000200014
- Ramirez-Bribiesca J. E., WangY., JinL., CanamT., TownJ. R., TsangA., DumonceauxT. J., and McAllisterT. A. (2011). Chemical characterization and *in vitro* fermentation of Brassica straw treated with the aerobic fungus, *Trametes versicolor*. *Canadian Journal of Animal Science*. 91(4): 695-702. <https://doi.org/10.4141/cjas2011-067>
- Ramírez-Bribiesca, E., Hernández-Camacho, E., Hernández-Calva, L. M., & Tórtora-Pérez, J. L. (2004). Efecto de un suplemento parenteral con selenito de sodio en la mortalidad de corderos y los valores hemáticos de selenio. 8:43-51. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/298>
- Ramírez-Bribiesca, J. E., López-Ojeda, J. C., Paredes-Díaz, D., & Bárcena-Gama, J. R. (2023). Novedosa y eficiente técnica para extraer líquido del rumen por ruminocentesis en bovinos y ovinos. *Agro-Divulgación*, 3(3). <https://doi.org/10.54767/ad.v3i3.214>
- Rasmussen, M. A., Cray, W. C., Casey, T. A., & Whipp, S. C. (1993). Rumen contents as a reservoir of enterohemorrhagic *Escherichia coli*. *FEMS Microbiology Letters*, 114(1), 79–84. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1993.tb06554.x>
- Reséndiz-Hernández, M., Bárcena-Gama, J. R., Crosby-Galván, M. M., Cobos-Peralta, M., Herrera-Haro, J., Hernández-García, P. A., & Carreón-Luna, L. (n.d.). Efecto del selenio y cromo orgánicos y *Saccharomyces cerevisiae* en la degradación in situ de la dieta, fermentación ruminal y crecimiento de

-
- borregos. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952012000800001&script=sci_arttext
- Rodriguez, A. M., Schild, C. O., Cantón, G. J., Riet-Correa, F., Armendano, J. I., Caffarena, R. D., Brambilla, E. C., García, J. A., Morrell, E. L., Poppenga, R., & Giannitti, F. (2018). White muscle disease in three selenium deficient beef and dairy calves in Argentina and Uruguay. *Ciência Rural*, 48(5). <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20170733>
- Russell, J. B., & Wallace, R. J. (1997). Energy-yielding and energy-consuming reactions. In: The rumen microbial ecosystem (pp. 246-282). Springer Netherlands.
- Russell, J. B., O'Connor, J. D., Fox, D. G., Van Soest, P. J., & Sniffen, C. J. (1992). A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets I. Ruminant fermentation. *Journal of Animal Science*. 50(11), 3551–3561, <https://doi.org/10.2527/1992.70113551x>
- Sauvant, D., Schmidely, P., Daudin, J., & St-Pierre, N. (2008). Meta-analyses of experimental data in animal nutrition. *Animal*, 2(8), 1203–1214. <https://doi.org/10.1017/s1751731108002280>
- Serghiou, S., & Goodman, S. N. (2019). Random-effects meta-analysis: summarizing evidence with caveats. *JAMA*, 321(3), 301-302. doi:10.1001/jama.2018.19684
- Servicio Meteorológico Nacional (2026). Base de Datos Climatología Nacional (CLIOM). Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacionestadisticalimatologica>
- Shamberguer, J. R. 1981. Biochemistry of selenium. Plenum Press. New York and London
- Surai, P. F. (2006). Selenium in Nutrition and Health. Reino Unido: Nottingham University Press.
- Suttle N.F. (2010). Mineral Nutrition of Livestock. 4th Edition. CABI.

-
- Swain, B.K., Johri, T.S. and Majumdar, S. (2000) Effect of supplementation of vitamin E, selenium and their different combinations on the performance and immune response of broilers. *British Poultry Science* 41, 287–292
- Theodorou, M. K., Williams, B. A., Dhanoa, M. S., McAllan, A. B., & France, J. (1994). A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminant feeds. *Animal Feed Science and Technology*, 48(3–4), 185–197. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(94\)90171-6](https://doi.org/10.1016/0377-8401(94)90171-6)
- Ullah, H., Khan, R. U., Tufarelli, V., & Laudadio, V. (2020). Selenium: an essential micronutrient for sustainable dairy cows production. *Sustainability*, 12(24), 10693. <https://doi.org/10.3390/su122410693>
- Van Soest, P. J. (1994). Nutritional ecology of the ruminant. *Cornell university press*.
- Van Soest, P. J., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583–3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- Viechtbauer, W. (2010). Conducting Meta-Analyses in R with the metafor Package. *Journal of Statistical Software*, 36(3), 1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v036.i03>
- Villanueva GJ. Nutrición del ganado: Selenio. *Sitio Argentino de Producción Animal*. 2011. <https://www.produccion-animal.com.ar/>. Accedido enero 24, 2026.
- Zagrodzki, P., Nicol, F., McCoy, M.A., Smyth, J.A., Kennedy, D.G., Beckett, G.J. & Arthur, J.R. (1998). Iodine deficiency in cattle: compensatory changes in thyroidal selenoenzymes, *Research in Veterinary Science*, 64(3), 209-211. [https://doi.org/10.1016/S0034-5288\(98\)90127-8](https://doi.org/10.1016/S0034-5288(98)90127-8)
- Zhang, F., Li, X., & Wei, Y. (2023). Selenium and selenoproteins in health. *Biomolecules*, 13(5), 799. <https://doi.org/10.3390/biom13050799>

ANEXOS

Anexo 1. Dictamen de evaluación y aprobación del proyecto por parte del Comité Institucional para el Cuidado y Uso de Animales de Laboratorio (CICUAL) de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.



Dirección
de Servicios
Académicos

Dirección
de Bioterio



COMITÉ INSTITUCIONAL PARA EL CUIDADO Y USO DE ANIMALES DE LABORATORIO

DICTÁMEN DE EVALUACIÓN

INSTITUTO: Instituto de Ciencias Agropecuarias. Medicina Veterinaria y Zootecnia.		FOLIO: CICUAL-V-1/08/2024	
		FECHA DE SOLICITUD: 11/06/2024	
PROYECTO: Estimación de metano entérico producido por ovinos alimentados con selenometionina, selenito de sodio y levadura enriquecida con selenio.		RESPONSABLE DEL PROYECTO: Dr. Oscar Enrique del Razo Rodríguez E mail: oscare@uaeh.edu.mx Teléfono: 775 111 3951	
INVESTIGADORES QUE PARTICIPAN EN EL PROYECTO: Dr. Oscar Enrique del Razo Rodríguez, Dr. Juan Carlos Ángeles Hernández, Dr. Rodolfo Vieyra Alberto			
ALUMNOS O PASANTES QUE PARTICIPAN EN EL PROYECTO: Juan Manuel Casso Gaspar			
ASPECTOS A EVALUAR	ACEPTABLE	NO ACEPTABLE	SUGERENCIAS
JUSTIFICACIÓN DEL USO DE ANIMALES DE LABORATORIO	X		
BIENESTAR Y ESTRÉS ANIMAL	X		
PROCEDIMIENTOS Y CUIDADOS APLICADOS EN EL ANIMAL	X		
ASPECTOS ÉTICOS DEL PROTOCOLO	X		
PUNTO FINAL Y EUTANASIA	X		
OBSERVACIONES GENERALES			
FECHA DE ÚLTIMA REVISIÓN	NEGADO		FECHA DE APROBACIÓN
11/7/24	APROBADO	x	6/8/2024
Fecha de inicio: 15 de agosto 2024 Fecha de término: 15 de noviembre 2024			
CARACTERÍSTICAS DE LOS ANIMALES QUE SE PROPORCIONARÁN: Ovis aries L/ 16 / Cruza Katahdin X Suffolk/Machos/25 kg/ 70 kg aprox.			

 INVESTIGADOR PRINCIPAL Dr. Oscar Enrique del Razo Rodríguez	 PRESIDENTE CICUAL Fernanda Navarrete Uribe	 DIRECTOR BIOTERIO Héctor Hernández Domínguez
---	--	--

Anexo 2. Técnica del Hexafluoruro de Azufre (SF₆) para la cuantificación de metano entérico en ovinos.

La técnica de SF₆ consta de utilizar un gas trazador, el cual no sufre alteración en el tiempo, por lo que el hexafluoruro de azufre es el gas más utilizado debido a su estabilidad en rumen. Como primer paso se utilizaron cápsulas de Cu que es en donde se va almacenar el gas trazador. Estas cápsulas son armadas con una cápsula, una rosca macho de cobre, una arandela, un teflón y un fritz. Las cápsulas son armadas en ese orden y se rotulan; posteriormente, estas son introducidas en un horno de secado durante 48 h a 65 °C para conocer su peso seco, una vez transcurrido este tiempo las cápsulas son llenadas, se utilizó un recipiente especial para nitrógeno líquido al cual se le vertían un aproximado de 100 ml de nitrógeno líquido para llenar 4 cápsulas. Se utilizó un tanque de 20 kg de SF₆ el cual tenía un medidor de flujo, que permitía calcular la salida del gas a la cápsula. El tiempo estimado de este proceso fue variable entre 5 y 10 minutos por cápsula, ya que el gas tenía que ser solidificado con ayuda del nitrógeno líquido, teniendo una cantidad considerable del gas, estas eran selladas con la rosca macho y eran pesadas en una balanza analítica para saber la cantidad de SF₆ que contenían las cápsulas, dependiendo del llenado, estas eran almacenadas o vaciadas al no cubrir con el estándar de peso, el cual fue de mínimo 1.5 g de gas SF₆, las cápsulas fueron estabilizadas en un refrigerados durante 48 h a 4 °C y fueron pesadas nuevamente para garantizar que no se hubieran vaciado debido a la presión que ejercían “el cambio de sólido a gas”, cumplido este paso las muestras fueron pesadas cada 3 días, con la finalidad de obtener la tasa de premiación o liberación de SF₆ diaria, se calculó r^2 , la cual alcanzó un nivel de confianza de 0.95, además se calculó el tiempo de duración de las cápsulas con gas.

Las cápsulas fueron introducidas en el rumen vía sonda y el periodo de muestreo fue realizado 15 días posterior a la introducción de las cápsulas; esto se realizó con la finalidad de homogenizar el gas con el líquido ruminal del animal, el periodo experimental duró 5 días.

Los cilindros colectores donde se depositó el gas emitido por los animales fueron sellados al vacío, estos tienen un volumen de 1 l aproximadamente, este

procedimiento se realiza en un aparato acondicionado con una bomba de vacío y un vacuómetro, la válvula es la encargada de capturar el gas, estas son calibradas con el flujómetro a 0.05 ml por hora de gas a un volumen de 950 ml.

Adicional al manejo de los animales, se buscó que los animales no rechazaran el equipo que se utilizó, para medir el CH₄, este periodo de adaptación constó de 15 días antes de realizar el muestreo.

Una vez obtenido el tiempo requerido de llenado de los cilindros colectores de gas, estos fueron estabilizados en un lugar libre de movimiento durante 7 días antes de su evaluación en el cromatógrafo de gases, con la finalidad de mantener estables los gases contenidos en su interior. Se colectaron 5 ml de muestras de los tubos colectores, los cuales fueron agitados suavemente durante 30 minutos en un agitador, con el objetivo de homogeneizar la muestra, para que fueran analizadas en un cromatógrafo especial para gases de efecto invernadero (Shimatzu Modelo GC-2014 Greenhouse gas Analyzer), los gases se separaron con una columna capilar HayeSep T (20.0 m x 0.32 mm i.d.)(Hayes Separations, Houston, TX, EE. UU.) a una temperatura del horno de 80°C, se utilizó como gas acarreador el N₂ (95 kPa). Los tiempos de retención fueron 5.2 y 7 min. para CH₄ Y SF₆, respectivamente.

Para obtener la emisión de metano, se utilizó la siguiente fórmula:

$$EM = \frac{Q_{SF_6} \times [CH_4]}{[SF_6]}$$

EM: emisión del gas SF₆ (Q) de las cápsulas por la concentración atmosférica de CH₄, entre la concentración atmosférica de este gas SF₆

Anexo 3. Gráficos de las medias de concentración molar de ácidos grasos volátiles.

Ilustración 11: Grafico de AGVs totales

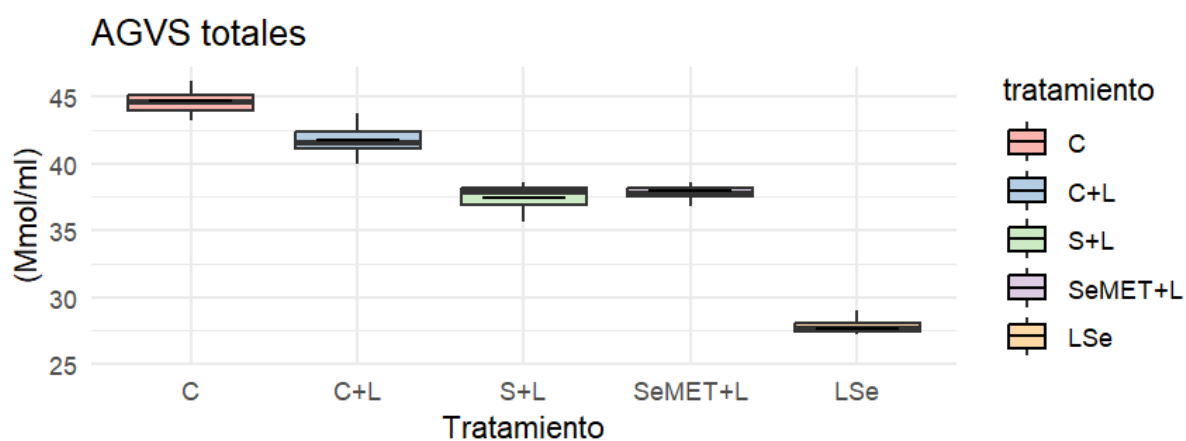


Ilustración 12: Grafico de acetato

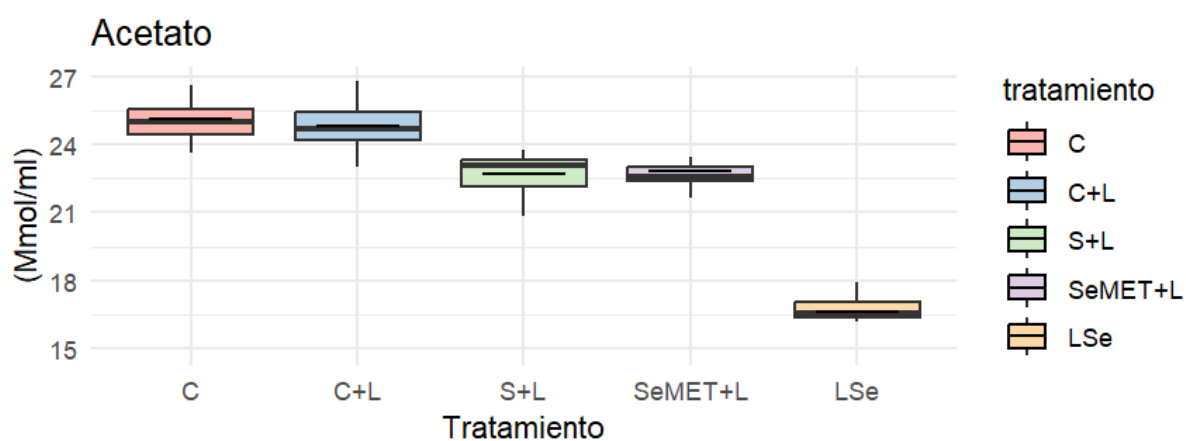


Ilustración 13: Grafico de propionato

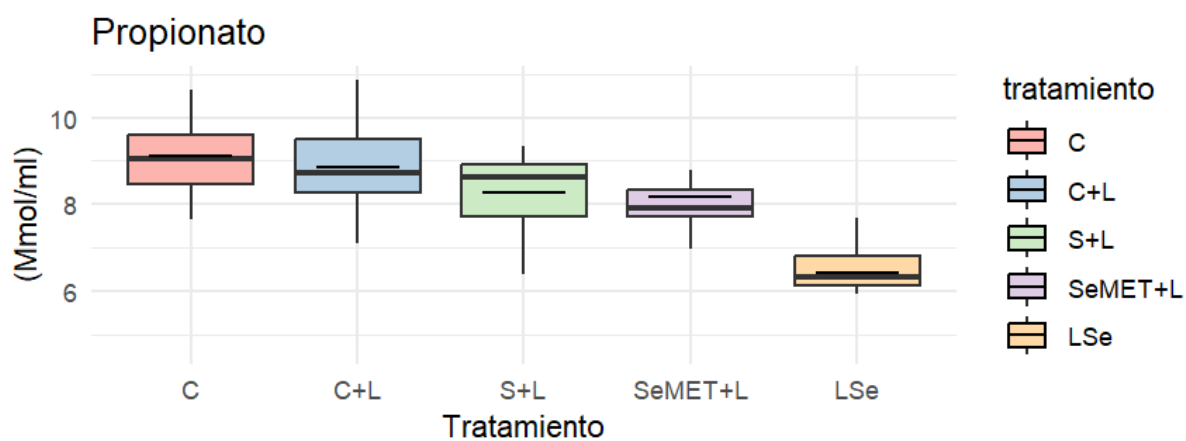


Ilustración 14: Grafico de butirato

