



Enseñar la explotación de la tierra,
no la del hombre

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA,
INVESTIGACIÓN Y SERVICIO EN ZOOTECNIA
POSGRADO EN PRODUCCIÓN ANIMAL

SUPLEMENTACIÓN ORAL MINERAL
ESTRATÉGICA EN VACAS CÁRNICAS EN
PASTOREO

TESIS

Que como requisito
parcial para obtener el
grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

Presenta:
RUTH MANZAYANI GARCIA FUERTE

Bajo la supervisión de: **Maximino Huerta Bravo, Ph. D.**



Chapingo, Estado de México, 12 de junio de 2026



**SUPLEMENTACIÓN ORAL MINERAL
ESTRATÉGICA EN VACAS CÁRNICAS EN
PASTOREO**

Tesis realizada por **Ruth Manzayani Garcia Fuerte** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

DIRECTOR:



Ph. D. Raymundo Rodríguez de
Lara

CO-DIRECTOR



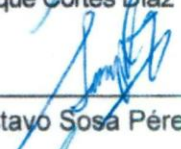
Ph. D. Maximino Huerta Bravo

ASESOR:



Dr. Enrique Cortés Díaz

ASESOR:



Dr. Gustavo Sosa Pérez

ASESOR:



Dra. Laura Haydée Vallejo
Hernández

LECTOR EXTERNO:



Ph. D. Ernesto Onías Riquelme
Villagrán

CONTENIDO

Lista de cuadros	IV
Lista de figuras	V
Dedicación	VI
Agradecimientos	VII
Datos biográficos	VIII
Resumen general	IX
General abstract	X
1 Introducción general	1
2 Importancia de los minerales traza en la reproducción de las vacas; una revisión	6
3 Diagnóstico mineral de vacas de carne en pastoreo	37
4 Trace element supplementation coupled to an estrus synchronization protocol in beef cows	64
5 Trace mineral supplementation of beef cows	88
6 Conclusión General	93

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Título	Página
2.1	Minerales, en que hormona incide y los requerimientos de los bovinos en ciclo estral	17
3.1	Concentración mineral en suero sanguíneo de vacas productoras de carne.	40
3.2	Índice de clasificación de deficiencia de cobre con relación a las diferentes concentraciones minerales en suero sanguíneo de vacas productoras de carne.	41
3.3	Índice de deficiencia de cobre con relación al porcentaje de animales que presentaban signos característicos de deficiencias de minerales.	41
3.4	Concentraciones minerales en base seca del forraje (mg/Kg para micro minerales y porcentaje para macrominerales)	42
3.5	Concentración mineral en las diferentes fuentes de agua	42
4.1	Concentraciones de Cu, Se y Zn en suero sanguíneo de vacas suplementadas con minerales	62
4.2	Estimaciones ($\pm$ error estándar) para coeficientes de regresión fijos para concentraciones de Cu, Se y Zn en suero sanguíneo de vacas de carne suplementadas con un Oral Drench oral o Multimin® 90	63
5.1	Coefficients ($\pm$ standard error) of fixed regression per supplement	78
5.2	Concentrations of Cu, Se and Zn in blood serum of cows supplemented with minerals	78

LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Página
4.1	Trayectorias de las concentraciones de Cu (a), Se (b) y Zn (c) en el suero sanguíneo de vacas de carne en pastoreo suplementadas con un Oral Drench o Multimin®90.	65
4.2	Porcentaje de vacas de carne preñadas que reciben el Oral Drench o Multimin®90.	70
5.1	Trajectories of the concentrations of Cu (a), Se (b) and Zn (c) in blood serum of beef cows supplemented with an oral drench or MultiminR 90 (Multimin North America, Inc. Fort Collins, CO 80528, EUA)	79

DEDICATORIAS

A *Dios*, por darme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa, por iluminar mi camino en los momentos de incertidumbre.

A *mi familia en especial a mi mamá, mis hermanos y Minerva*, por su amor incondicional, por apoyarme siempre y por ser mi motor en cada paso que doy. A mis sobrinos, por ser la chispa de luz en mi vida, llenándome de alegría incluso en los días más difíciles.

Al *Dr. Maximino Huerta Bravo*, por brindarme su amistad, su invaluable guía, sus enseñanzas y por regalarme su tiempo y paciencia para culminar este trabajo. Sus lecciones van más allá dejan huella tanto en lo personal como en lo académico.

A la señora *Ana Bugallo*, por arroparme como si fuera parte de su familia. Su cariño hizo que este camino fuera más llevadero.

A la *Dra. Laura Guadalupe Sánchez y Dr. José Luis Solorio*, por motivarme a dar el paso hacia el posgrado, por escucharme siempre con paciencia. Su confianza en mí fue el impulso que necesitaba para alcanzar esta meta.

A mis amigos por estar siempre presentes, por regalarme momentos de alegría y risas.

“A mi yo del pasado, que soñó con este momento; a mi yo del presente, que lo hizo realidad.”

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma Chapingo**, y al **Departamento de Zootecnia** por abrirme las puertas para seguir mi formación académica.

Mi más sincero agradecimiento a mis asesores, **Maximino Huerta Bravo, Ph. D.; Enrique Cortés Díaz, Dr.; Laura Haydée Vallejo Hernández, Dra.; Gustavo Sosa Pérez, Dr.** por sus aportaciones para que se llevara a cabo esta investigación, y sus enseñanzas durante mis estudios de doctorado.

A la **Secretaría de Ciencias Humanidades Tecnología e Innovación (SECIHTI)** por la beca otorgada.

Al **Laboratorio de Nutrición en Rumiantes** del Departamento de Zootecnia de la Universidad Autónoma Chapingo, por brindarme apoyo y espacio para poder realizar los análisis requeridos.

AL **Rancho Los Fresnos y la señora Marisa Candiani Castañeda** por facilitar el rancho y sus animales para poder realizar esta investigación.

“Insistir, persistir, resistir y nunca desistir”

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Ruth Manzayani Garcia Fuerte
Fecha de nacimiento	19 de septiembre de 1991
Lugar de nacimiento	Morelia, Michoacán de Ocampo
CURP	GAFR910919MMNRRT03
Profesión	Médica Veterinaria Zootecnista

Desarrollo académico

Doctorado en Ciencias (2023-2026)	DEIS en Zootecnia Posgrado en Producción Animal Universidad Autónoma Chapingo
Maestría en Producción Agropecuaria (2020-2022)	Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo Cédula Profesional 13511047
Licenciatura (2010-2015)	Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo Cédula Profesional 11583966
Técnico Agropecuario (2007-2010)	CBTA 7, Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario "Lic. José Vasconcelos Calderón Cédula Profesional 6877758

RESUMEN GENERAL

SUPLEMENTACIÓN ORAL MINERAL ESTRATÉGICA EN VACAS CÁRNICAS EN PASTOREO¹

Los minerales traza son nutrientes esenciales para el funcionamiento metabólico, inmune y reproductivo. El objetivo de esta investigación fue diagnosticar el estado mineral de vacas en pastoreo, elaborar un suplemento oral líquido y evaluar dos estrategias de suplementación mineral acopladas a un protocolo de sincronización de estros. En la primera fase se realizó un diagnóstico mineral, determinando las concentraciones de minerales en agua, forraje, suero sanguíneo y signos clínicos de vacas en pastoreo. La determinación de minerales se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica y espectrofotometría ultravioleta visible. La mayoría de las vacas tenía deficiencias severas de cobre y zinc. Siendo el cobre la deficiencia más severa, se elaboró un índice de clasificación de deficiencia de cobre: severa, moderada y ligera. Se identificó que la mayoría de los animales (68 %) tenían una deficiencia severa de Cu. Además, presentaron signos característicos de varias deficiencias minerales. De acuerdo con estos resultados se realizó un suplemento mineral líquido (Oral Drench) con minerales traza: cobre, zinc, selenio, yodo y cobalto. Posteriormente se realizó una evaluación del suplemento mineral líquido acoplado a un protocolo de sincronización de estros vs. una aplicación de un suplemento mineral inyectable Multimin 90 en vacas de pastoreo. Se tomaron muestras de sangre los días 1 y 9 para determinar las concentraciones minerales y se analizaron por la técnica anteriormente mencionada y el diagnóstico de gestación se realizó 35 días post IA. Las concentraciones minerales no fueron afectadas por el suplemento, pero el grupo Oral Drench tuvo una menor disminución de Cu y un incremento de selenio vs. el grupo Multimin al día 9 ($P < .05$). El grupo Oral Drench obtuvo mejor ($P < .05$) tasa de preñez 68 vs 40 % con Multimin. En conclusión, con base en lo analizado es que una suplementación estratégica mejora la reproducción de los bovinos.

Palabras clave: Copper, reproducción, selenio, deficiencias.

¹ Tesis de Doctorado en Ciencias en Innovación Ganadera, Posgrado en Producción Animal, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Ruth Manzayani Garcia Fuerte
Director de tesis: Ph. D. Raymundo Rodríguez De Lara

GENERAL ABSTRACT

STRATEGIC ORAL MINERAL SUPPLEMENTATION IN BEEF COWS²

Trace minerals are essential nutrients for metabolic, immune, and reproductive functioning. The objective of this research was to diagnose the mineral status of grazing cows, to develop a liquid oral supplement and to evaluate two mineral supplementation strategies coupled to an estrus synchronization protocol. In the first phase, a mineral diagnosis was conducted, determining the concentrations of minerals in water, forage, blood serum, and clinical signs of grazing cows. The determination of minerals was performed by atomic absorption spectrophotometry and visible ultraviolet spectrophotometry. Most of the cows had severe copper and zinc deficiencies. Since copper was the most severe deficiency, a classification index of copper deficiency was developed: severe, moderate, and mild. It was identified that most of the animals (68%) had a severe Cu deficiency. In addition, they presented characteristic signs of several mineral deficiencies. According to these results, a liquid mineral supplement (Oral Drench) was made with trace minerals: copper, zinc, selenium, iodine, and cobalt. Subsequently, an evaluation of the liquid mineral supplement coupled to an estrus synchronization protocol vs. an application of an injectable mineral supplement Multimin 90 in pastured cows was conducted. Blood samples were taken on days 1 and 9 to determine mineral concentrations and analyzed by the techniques mentioned previously and the diagnosis of pregnancy was made 35 days after AI. Mineral concentrations were not affected by the supplement, but the Oral Drench group had a smaller decrease in Cu and an increase in selenium vs. the Multimin group ($P < .05$). The Oral Drench group obtained a better ($P < .05$) pregnancy rate of 68 vs 40% with Multimin. In conclusion, based on what has been analyzed, strategic supplementation improves cattle reproduction.

Keywords: Copper, Reproduction, Selenium, Deficiencies.

² Doctor of Science Thesis in Livestock Innovation, Graduate Program in Animal Production, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Ruth Manzayani García Fuerte
Advisor: Ph. D. Raymundo Rodríguez De Lara

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La ganadería en México abarca un 60 % del país y representa una de las actividades pecuarias que tiene mayor relevancia para la economía y la seguridad alimentaria de la nación (Pacheco-Hernández, 2025). Existen diversos sistemas de producción de bovinos carne, pero en México el más común es el sistema vaca-cría que se desarrolla de manera extensiva y se lleva a cabo bajo condiciones de pastoreo (Martínez-González et al., 2017). En este tipo de sistemas, la nutrición del ganado dependerá de los forrajes y pastizales y, es muy común que estos sean insuficientes en minerales traza (cobre, zinc, cobalto, yodo y selenio) y no logran cubrir sus requerimientos (Martínez-González et al., 2017).

Los minerales traza son nutrientes esenciales para el funcionamiento del metabolismo del rumiante, participan como cofactores enzimáticos, síntesis de hormonas, en el crecimiento, moduladores en el sistema inmunológico y en procesos de la reproducción (Bhalakiya et al., 2019). En este último, los minerales que tienen mayor relevancia en la reproducción de los bovinos son: cobre, zinc, cobalto, yodo, selenio y manganeso (Bhalakiya et al., 2019). La insuficiencia de estos minerales afectará los parámetros productivos como ganancia diaria de peso y producción de leche (Kumar et al., 2011). La deficiencia de estos minerales se ha descrito que repercuten en los parámetros reproductivos; interfiere sobre disminución de síntesis de gonadotropinas, anestros prolongados, disminución de la tasa de concepción y alteraciones de patologías postparto (Sharma et al., 2007).

A pesar de que existe un gran número de investigaciones relacionadas con la problemática ocasionada por la deficiencia mineral, la suplementación no es tan común y menos el realizar diagnósticos minerales en el hato (Mohebbi-Fani et al., 2010; Arthington y Ranches, 2021). Estos diagnósticos minerales ayudarán a tener más información, pues deben de incluir análisis de suero sanguíneo, agua y forraje, lo que permitirá determinar deficiencias primarias, secundarias y excesos minerales, y de esta manera se podrá realizar una suplementación

estratégica adecuada (Sager y Van Saun, 2023).

La relación nutrición-reproducción impactará la sostenibilidad del sistema de producción (Rosillón, 2023). La suplementación mineral estratégica en protocolos de sincronización es cada día más implementada debido a que los sucesos biológicos de la vaca requieren mayor cantidad de nutrientes, se incrementa la demanda metabólica para mantenimiento y desarrollo de los folículos y ovulación y, la ausencia de una suplementación limita la eficiencia del protocolo de sincronización (Cargile y Tracy, 2021).

Diversos estudios demuestran que una suplementación mineral estratégica acoplada a protocolos de sincronización de estro aumenta la tasa de preñez. Por lo cual, se han desarrollado productos diversos, como mezclas minerales, bolos intraruminales e inyectables, esto con el fin de garantizar la disponibilidad de los minerales en este momento crucial del ciclo reproductivo. Estas estrategias ayudan a optimizar el manejo y mejora la eficiencia reproductiva en vacas en pastoreo (Del Río-Avilés et al., 2022; Syaiful et al., 2024; Nascimento et al., 2025).

Hipótesis

La suplementación con minerales traza estratégica acoplada a un protocolo de sincronización de estros, tiene un efecto sobre los parámetros reproductivos, logrando obtener mejor tasa de gestación en vacas bajo condiciones de pastoreo.

Objetivo

Objetivo general

Evaluar un suplemento de minerales traza en vacas productoras de carne durante el periodo de transición, para determinar su efecto en la eficiencia reproductiva.

Objetivos específicos

- Formular y fabricar un suplemento con selenio, iodo y cobalto, cobre y zinc.

- Determinar concentraciones séricas de I, Co, Se, Fe, Cu y Zn en vacas en pastoreo con y sin suplementación de minerales traza.
- Determinar la gestación en vacas con suplementación y sin suplementación de minerales traza, mediante la ultrasonografía.

Estructura de la tesis

Esta tesis comprende seis capítulos. El **Capítulo 2** aborda una revisión bibliográfica del rol de los minerales traza como el cobre, zinc, cobalto, yodo y selenio, en los procesos reproductivos, en el ciclo estral y las interacciones que pueden llegar a tener entre ellos.

En el **Capítulo 3** se abordó un diagnóstico mineral determinando las concentraciones de minerales en agua, forraje, suero sanguíneo y signos clínicos de vacas en pastoreo.

Para el **Capítulo 4** de esta tesis se realizó una evaluación de un suplemento mineral líquido (Oral Drench) acoplado a un protocolo de sincronización de estros vs una aplicación de un suplemento mineral inyectable Multimin 90 en vacas de pastoreo.

El **Capítulo 5** de la tesis comprende el artículo corto presentado en el Journal Animal Science, sobre la evaluación del suplemento Oral Drench vs una aplicación de un suplemento mineral inyectable.

Capítulo 6 aborda una conclusión general de la investigación doctoral, teniendo como base lo vertido en los capítulos anteriores

Literatura citada

- Arthington, J. D., y Ranches, J. (2021). Trace mineral nutrition of grazing beef cattle. *Animals*, 11(10), 2767.
- Bhalakiya, N., Haque, N., Patel, P., & Joshi, P. (2019). Role of trace minerals in animal production and reproduction. *International Journal of Livestock Research*, 9(9), 1–12.

- Cargile, B., y Tracy, D. (2021). Interaction of nutrition and reproduction in the dairy cow. In: *Bovine Reproduction*, pp. 389–398.
- Del Río-Avilés, A.D., Correa-Calderón, A., Avendaño-Reyes, L., Macías-Cruz, U., Thomas, M.G., Enns, R.M. & Mellado, M. (2022). Mineral supplementation (injectable) improved reproductive performance in Holstein cows managed in a warm summer environment. *Reproduction in Domestic Animals*, **57**(8): 839–848.
- Kumar, S., Pandey, A.K., Razzaque, W.A.A. & Dwivedi, D.K. (2011). Importance of micro minerals in reproductive performance of livestock. *Veterinary World*, **4**(5): 230–233.
- Martínez-González, J., Castillo-Rodríguez, S., Villalobos-Cortés, A. & Hernández-Meléndez, J. (2017). Sistemas de producción con rumiantes en México. *Ciencia Agropecuaria*, **26**: 132–152. Disponible en: <http://www.revistacienciaagropecuaria.ac.pa/index.php/ciencia-agropecuaria/article/view/78>
- Mohebbi-Fani, M., Nazifi, S., Ansari-Lari, M. & Namazi, F. (2010). Mixed mineral deficiencies in a dairy herd with subclinical production disorders. *Comparative Clinical Pathology*, **19**(1): 37–41.
- Nascimento, M.S., Rossini, S.G., Dos Santos, C.M.P., Sousa, C.E.L., da Silva, É.B.R., Viana, R.B. et al. (2025). Pregnancy rate of Nelore heifers under artificial insemination combined with mineral and vitamin supplementation. *Revista de Salud Animal*, **47**.
- Pacheco-Hernández, A. (2025). Importancia social del Pastoreo Racional Voisin como una herramienta para garantizar la seguridad alimentaria en los sistemas de ganadería de pastoreo en México. *Pasado Abierto*, **0**(21). Disponible en: <https://fh.mdp.edu.ar/revistas/index.php/pasadoabierto/article/view/8049>
- Rosillón, M.N. (2023). Sostenibilidad y desempeño financiero en Sistemas de Ganadería de Doble Propósito: Un enfoque integral de las perspectivas agroecológicas. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, **8**(2), 62–79.
- Sager, B. y Van Saun, R.J. (2023). Trace mineral supplementation for beef cows: Dry range environment. *Veterinary Clinics: Food Animal Practice*, **39**(3), 471–489.
- Sharma, M.C., Joshi, C., Das, G. & Hussain, K. (2007). Mineral nutrition and reproductive performance of the dairy animals: a review. *The Indian Journal of Animal Sciences*, **77**(7), 599-608
- Syaiful, F.L., Jaswandi, J., Mundana, M., Yendraliza, Y. & Udin, Z. (2024). Estrus response and pregnancy rate of swamp buffalo: The use of multivitamins in different estrus synchronization hormone protocols. *Journal of Advanced Veterinary and Animal Research*, **11**(3), 729-737.

Capítulo enviado a la Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias

2. IMPORTANCIA DE LOS MINERALES TRAZA EN LA REPRODUCCIÓN DE LAS VACAS; UNA REVISIÓN

IMPORTANCE OF TRACE MINERALS IN COW REPRODUCTION; A REVIEW

Ruth Manzayani García-Fuerte ^{a*} Maximino Huerta Bravo ^a Laura Haydée

Vallejo Hernández ^a Enrique Cortés Díaz ^b y Gustavo Sosa Pérez ^c

Universidad Autónoma Chapingo. Posgrado en Producción Animal,
Departamento de Zootecnia. Carretera México-Texcoco km 38.5, C.P. 56230,
Chapingo, Estado de México, México.

^b Universidad Autónoma Chapingo. Centro Regional Universitario Anáhuac.
Chapingo, Estado de México, México.

^c Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de preparatoria agrícola.
Chapingo, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia: manzayani28@gmail.com

RESUMEN

IMPORTANCIA DE LOS MINERALES TRAZA EN LA REPRODUCCIÓN DE LAS VACAS; UNA REVISIÓN

IMPORTANCE OF TRACE MINERALS IN COW REPRODUCTION; A REVIEW

RESUMEN

Los minerales traza se requieren en cantidades mínimas para desarrollar funciones metabólicas de mantenimiento, producción, inmunidad y reproducción en los bovinos. El objetivo de esta revisión es describir como los minerales traza intervienen de manera fortuita en la reproducción de las vacas. El cobre es fundamental en la dinámica folicular y la liberación de gonadotropinas, su deficiencia puede causar ciclos anovulatorios y anestros. El zinc también interviene en la respuesta hormonal y ayuda a prevenir el daño oxidativo generado por los radicales libres, su deficiencia ocasiona embriones de baja calidad y también interferencia en la meiosis. Las incidencias de estos minerales traza también son en el metabolismo energético con el cobalto y la síntesis de vitamina B12, y el yodo con su influencia indirecta a través de las hormonas tiroideas. La deficiencia de ambos puede ocasionar problemas en la reactivación ovárica. Y, por último, el selenio que aún sigue siendo un paradigma debido a que los resultados de las investigaciones son muy contradictorios, pero sus resultados sobre efectos positivos en las patologías reproductivas son abundantes. Además de esto, también se muestran como los requerimientos de los

minerales cambian durante el ciclo estral y como se debe de tener un buen diagnóstico mineral para poder definir la suplementación adecuada y dependerá también el sistema de producción. En conclusión, una suplementación mineral adecuada y estratégica mejorará los parámetros reproductivos del ganado bovino y el sistema inmunológico reflejándose en una mejora en la producción y rentabilidad del hato.

ABSTRACT

Trace minerals are required in minimal quantities to develop metabolic functions of maintenance, production, immunity, and reproduction functions in cattle. The aim of this review is to describe how trace minerals intervene in cow reproduction. Copper is critical in follicular dynamics and gonadotropin release, and its deficiency can cause anovulatory and anestrus cycles. Zinc is also involved in the hormonal response and helps prevent oxidative damage caused by radicals, and its deficiency causes low-quality embryos and interference with meiosis. The incidences of these trace minerals are also in energy metabolism with cobalt and the synthesis of vitamin B₁₂, and iodine with its indirect influence through thyroid hormones. The deficiency of both can cause problems in ovarian reactivation. Finally, selenium remains a paradigm because the results of research are very contradictory, but its results on the positive effects of reproductive pathologies are abundant. In addition to this, it is also shown how mineral requirements change during the estrous cycle and how a good mineral diagnosis must be had to define the appropriate supplementation and will also depend on the production system. In conclusion, adequate and strategic mineral supplementation will improve the reproductive parameters of cattle as well as the immune system reflecting an improvement in the production and profitability of the herd.

Keywords: Minerales, Reproducción, Ciclo Estral, Deficiencias.

INTRODUCCIÓN

Los minerales son nutrientes esenciales que desempeñan diversas funciones dentro del organismo, ya que participan en procesos como la digestión, la reproducción, el funcionamiento del sistema inmune, el desarrollo óseo y muscular, además de influir en la eficiencia reproductiva y productiva^(1,2). Los minerales se dividen en dos grupos principales según la cantidad que requiere el organismo: macrominerales y minerales traza⁽³⁾. Ambos grupos intervienen en funciones vitales; sin embargo, los microminerales cumplen roles más específicos, como mantener el equilibrio ácido-base, actuar como componentes catalíticos de enzimas, síntesis de hormonas, y regular procesos como la replicación celular⁽¹⁾. Estas funciones demandan un suministro constante de minerales y están directamente relacionadas con eventos reproductivos como el ciclo estral, el periodo posparto, la lactancia y la reactivación de la actividad ovárica^(2,4).

Los microminerales son elementos químicos presentes en pequeñas cantidades en el organismo, pero que, a pesar de su baja concentración, son vitales para el correcto funcionamiento de los sistemas en los animales. Entre los minerales traza más importantes se encuentran el cobre (Cu), el zinc (Zn), el hierro (Fe), el selenio (Se) y el manganeso (Mn)⁽⁵⁾. La deficiencia de minerales traza en los bovinos ocasiona algunas alteraciones en la actividad reproductiva y esta puede llegar a causar infertilidad o subfertilidad, anestro o inadecuada función ovárica, retardo de la involución uterina, abortos, mortalidad embrionaria⁽⁶⁾. Al ocurrir en un desbalance en el eje-hipotálamo-hipófisis-gónada se ve limitada la respuesta hormonal^(7,8).

La reproducción es un evento fisiológico que permite la creación de nuevos individuos con el fin de asegurar la prevalencia de la especie⁽⁹⁾. Comprende: la pubertad, los ciclos

estrales, la fecundación, el desarrollo embrionario, la implantación, la formación de un gameto, la embriogénesis y el mantenimiento del feto hasta que se despliegue el parto⁽¹⁰⁾. Para que todo esto sea posible, es importante que exista un buen estado nutricional, balance energético, equilibrio mineral y respuesta hormonal apropiada⁽¹¹⁾.

Intervención mineral en la pubertad de las vaquillas

La pubertad es uno de los principales eventos reproductivos, es la etapa donde inicia la vida reproductiva de la vaquilla y, se considera que para que no tenga problemas reproductivos, debe obtener un peso ideal⁽¹⁰⁾. Las vaquillas de ganado *Bos indicus* llegan a la pubertad a los 14-15 meses y, es en ese momento que tienen presencia del ciclo estral, para que este proceso se realice adecuadamente es fundamental la presencia de minerales en la dieta⁽¹²⁾. El calcio (Ca) y magnesio (Mg) son minerales que se destacan por el equilibrio en reproducción, debido a que colaboran en un balance energético; Mg es determinante en la activación enzimática en el metabolismo de lípidos y carbohidratos^(13, 14).

En el inicio de la pubertad se establece que el Zn, Se y Mn son primordiales para un desarrollo sexual adecuado, específicamente crecimiento de gametos y desarrollo de órganos sexuales. También se determina que la deficiencia de yodo (I), cobre (Cu), cobalto (Co) retrasa la pubertad⁽¹⁵⁾. Aunado a esto, se sabe que los requerimientos de energía son esenciales para que las vaquillas logren su peso crítico a la pubertad (350-375 kg) y, además, tener depósitos de grasa en la glándula mamaria; mientras que la proteína se relaciona con el desarrollo corporal desde la pre-pubertad⁽¹⁶⁾.

Para que la pubertad se inicie se requiere la presencia de un ciclo estral, en donde interviene el eje-hipotálamo-hipófisis y la nutrición es relevante para el desarrollo hormonal y de gametos⁽¹⁷⁾. El Zn, Cu, Mn son relacionados con la producción de

hormonas de la reproducción como lo es la hormona luteinizante (LH) y la hormona folículo estimulante (FSH) y las prostaglandinas⁽¹⁸⁾. El Cu además de ello tiene injerencia en la estereoidogénesis y la función del estradiol y progesterona^(19, 20). El yodo indirectamente a través de su estímulo en las hormonas tiroideas interviene en la liberación de las gonadotropinas⁽²¹⁾. Otros minerales como lo son calcio, fósforo, sodio y potasio deben mantener el equilibrio para evitar afectar que se realicen estos acontecimientos, retrasando la primera ovulación o limitación de la disponibilidad de GnRH⁽²²⁾.

Los minerales y la gametogénesis

En el inicio del ciclo reproductivo es importante tomar en cuenta la gametogénesis: espermatogénesis y ovogénesis en donde se entiende que se requiere mayor o gran cantidad de nutrientes, existe mayor demanda de energía, proteína y minerales⁽²³⁾. Estos últimos tienen mayor influencia en este proceso debido a su demanda en la meiosis, maduración de los gametos⁽²³⁾. El zinc es el micro elemento que se considera tiene mayor efecto debido a que es cofactor de un gran número de enzimas que están interrelacionadas con el ADN y ARN polimerasas, así como en la replicación de ADN durante la fase de meiosis⁽²⁴⁾. En los espermatozoides regula la estructura de la cromatina, estabilizando las protaminas⁽²⁵⁾.

El cobre en este proceso se relaciona en el metabolismo energético a través de las enzimas citocromo c oxidasa y lisil oxidasa, fundamentales en la energía mitocondrial^(26,27). En relación con la energía, el hierro es considerado componente importante de estructura de los citocromos que son fundamentales en la respiración celular de los gametos⁽²⁸⁾. El yodo tiene una intervención indirecta ya que su deficiencia afecta el desarrollo gonadal⁽²⁹⁾. Los macrominerales, relacionados en este proceso son calcio y fósforo el primero tiene que ver en la señalización intracelular, activación de los ovocitos y capacitación espermática

y el P al ser una parte estructural del ATP y su acción en la energía de los gametos^(30, 31).

Minerales que intervienen en la implantación embrionaria

La implantación embrionaria se define como un proceso determinante, ya que de ello dependerá que exista una mejor tasa de gestación⁽³²⁾. En este evento se definen diferentes etapas iniciando cuando se da la fijación del blastocito al útero y culmina cuando la placenta se termina de formar⁽³²⁾. Para que la implantación se lleve con éxito se requiere que se logre una interacción entre el endometrio y el embrión, lo que dependerá de adaptaciones fisiológicas, hormonales y celulares entre ambos⁽³³⁾. Los procesos mencionados influirán en el crecimiento del embrión y en este momento los estrógenos y progesterona serán esenciales⁽³³⁾.

En este evento biológico, la nutrición y cubrir el requerimiento de nutrientes es fundamental debido a la gran demanda de estos por el crecimiento celular y demanda de energía, es ahí donde intervienen de manera indirecta los minerales⁽²⁴⁾. El fósforo, es componente esencial del ATP, interviene en el metabolismo energético por consecuente se requiere en el incremento de demanda energética por la división celular embrionaria y los requerimientos metabólicos del rumen y placenta⁽³⁵⁾. Una de las funciones más importantes es la fosforilación de las proteínas lo que va a sistematizar la señalización intracelular entre el epitelio del endometrio y el trofoblasto y favorecerá que se dé el anclaje embrionario⁽³⁶⁾.

El calcio interviene indirectamente en el transporte embrionario para que se pueda dar la implantación esto es a través de las contracciones y la relajación del miometrio, también está relacionado con la secreción de las prostaglandinas⁽³⁷⁾. También es fundamente en factores adherentes de la implantación como lo son las Integrinas $\alpha\beta3$, $\alpha4\beta1$, $\alpha5\beta1$, que ayudarán a que se dé la adhesión entre el epitelio endometrial y el trofoblasto⁽³⁸⁾.

Selectinas como es L-selectina y ligandos al endometrio, que interviene en el reconocimiento del endometrio al embrión y la unión de ambos dependerá del calcio a través de los dominios de lectina que requieren este mineral para mantener su estructura⁽³⁹⁾.

Las cadherinas, E-cadherina y N-cadherina, ambas son estructurales en la adhesión de célula- célula⁽³⁹⁾. Además, también es importante las citocinas endometriales moduladas por el Ca: la interleucina 1 induce la invasión trofoblástica y la adaptación del endometrio y la interleucina 6 interfiere en los procesos de inflamación⁽⁴⁰⁾. Leukemia Inhibitory Factor (LIF) interactúa en que el endometrio este receptivo y la supervivencia del embrión se desarrolle⁽³⁹⁾. Otro de los factores de mayor importancia es el Factor de Necrosis Tumoral alfa (TNF- α), quien va a participar en la comunicación materno-embriónica⁽³⁹⁾. Por último, el TGF- β , participa en la proliferación y modulación celular e inmune para que el embrión sea tolerado por la madre⁽³⁹⁾.

De los minerales traza se conoce que, en el proceso de implantación, el zinc modula actividades de las metaloproteínas, estas ayudan a facilitar la remodelación del endometrio para que se pueda dar el crecimiento trofoblástico⁽⁴¹⁾. Además, siendo cofactor en las enzimas superóxido dismutasa (SOD), protege al embrión y al endometrio del daño oxidativo. Otro mineral que ayuda a combatir el daño oxidativo es el selenio componente de las enzimas glutatión peroxidasas⁽⁴²⁾, mejorará las funciones inmunes en el endometrio a través de la liberación de las citoquinas para la tolerancia materno fetal⁽⁴²⁾.

El cobre actúa en la síntesis de prostaglandina E2 (PGE2) y es cofactor en la enzima lisil oxidasa que ayuda en dos procesos: el primero es en la replicación celular y el segundo como estimulante en la generación de colágeno y elastina lo que ayudará al endometrio a tener mayor receptividad y elasticidad⁽⁴³⁾. El Cu también está relacionado con la

embriogénesis ya que promueve el desarrollo temprano del embrión, aumenta el porcentaje de blastocitos, y se menciona que podrían existir transportadores de Cu en el complejo cúmulo-ovocito^(44,45). Existen algunas investigaciones que definen que la insuficiencia de este mineral disminuye la producción de prostaglandinas y ocasiona alteración en la luteólisis, lo que provocará que no se realice la implantación⁽⁴⁵⁾.

El yodo al tener intervención en las hormonas tiroideas se dice que tiene un efecto indirecto debido a que ellas influyen en proteínas de adhesión; SPP1 (osteopontina), fibronectina, laminina y las integrinas $\alpha v \beta 3$ y $\alpha 5 \beta$ ⁽⁴⁶⁾. Algunos estudios en humanos describen que influye en la diferenciación y migración celular debido a que incrementa la expresión de GCM-1/Glial Cell Missing-1 que es un marcador que define la diferenciación placentaria⁽⁴⁶⁾. El hierro es fundamental para que se dé el aporte adecuado de oxígeno para la diferenciación trofoblástica y el nicho placentario⁽⁴⁷⁾.

Metabolismo de los minerales en el proceso de la gestación

Para abordar el proceso de la gestación, está será abordada por tercios; Primer tercio comprende los procesos de fecundación, implantación y organogénesis temprana 0-95 días⁽⁴⁸⁾. Los minerales son fundamentales en este primer episodio de la gestación como el zinc que es elemental para la activación del cigoto y el desarrollo preimplantacional, también actúa en los mecanismos de los factores de transcripción: zinc-metalotioneinas y zinc-transportadores⁽⁴⁸⁾. Selenio favorece que la gestación se mantenga debido a sus propiedades antioxidantes a través de las enzimas Glutación peroxidasa y Tiorredoxina reductasa^(49,50). El manganeso también ayuda y combatir el daño oxidativo mitocondrial debido a las enzimas Mn-SOD⁽⁵¹⁾.

El cobre es elemental en diferentes aspectos, el primero es angiogénesis y como ya se mencionó antes como cofactor de la lisil oxidasa para contribuir a la matriz extracelular

del endometrio⁽⁵²⁾. Además, favorece la vascularización del tejido embrionario⁽⁵²⁾. El yodo es requerido para las hormonas tiroideas materno-fetales ya que van a regular la diferenciación celular y expresión genética iniciando con diferenciación 1 que es en el desarrollo neurológico embrionario⁽⁵³⁾.

En el segundo tercio de la gestación se lleva a cabo la organogénesis avanzada y el crecimiento placentario, el cual comprende del día 96 al 190⁽⁵⁴⁾. En este proceso se requiere Cu, Zn, Mn y cobalto debido a que se inicia el transporte mineral materno fetal, inicia el desarrollo de la inmunidad posnatal y transferencia al hígado fetal⁽⁵⁴⁾. El cobre y zinc siguen trabajando como antioxidantes, maduración de los tejidos y la síntesis proteica. El zinc además de ello impulsa la remodelación tisular y proliferación celular⁽⁵⁵⁾. El Hierro empieza a dar el soporte de la eritropoyesis del feto e incrementa el volumen sanguíneo de la madre y conforme aumenta la gestación se va regulando este proceso en la placenta⁽⁵⁶⁾.

En el último tercio de la gestación se da el mayor crecimiento fetal y el parto del día 191 al parto⁽⁵⁴⁾. calcio y fósforo son importantes en la mineralización ósea y la señalización muscular-nerviosa, ambos minerales son fundamentales en la formación del esqueleto fetal⁽⁵⁷⁾. En este proceso los minerales traza siguen fungiendo como antioxidantes, maduración de los tejidos y transferencia de calostro⁽⁵⁸⁾.

En este momento se habla que una suplementación será efectiva debido a que ayudará a una mayor transferencia pasiva de la madre al feto, no es posible que cambie el peso a nacer, pero si la adaptación secundaria⁽⁵⁸⁾. El yodo seguirá en los procesos de neurodesarrollo, una suplementación en este periodo puede llegar a prevenir secuelas neurológicas⁽⁵⁹⁾.

Implicaciones minerales en el desarrollo de la placenta

El desarrollo de la placenta es fundamental y éste también se divide de acuerdo con los tercios de la gestación⁽⁵⁴⁾. En el primero inicia el desarrollo de la placenta⁽⁵⁴⁾. El zinc es importante para el transporte en la placenta a través de los transportadores ZnT1, ZIP14 en los trofoblastos, del cobre en los transportadores CTR1 Y ATOX1, manganeso y el hierro se movilizan a través de la placenta unidos a la transferrina (TfR1)⁽⁶⁰⁾.

El yodo y selenio favorecen el GH-IGF (Hormonas del crecimiento), regulan que la hormona tiroidea embrionaria sea activada a través de las selenoproteínas deiodinasa⁽⁶¹⁾. Los macrominerales calcio y potasio ayudarán en el potencial de la membrana y la modulación de la expresión de canales iónicos y proveer una adecuada irrigación⁽⁶²⁾.

En el segundo tercio se da el crecimiento y vascularización placentaria, y el zinc sigue siendo fundamental para que se pueda desarrollar la proliferación celular y el mantenimiento de la estructura placentaria⁽⁶³⁾. Tanto calcio, magnesio y fósforo tienen funciones en la regulación de las hormonas PTHrP, PTH y Calcitriol e indirectamente en la absorción y balance mineral en portal materno-fetal a través de cAMP⁽⁶⁴⁾.

En el tercer tercio se da la maduración de la placenta y la secreción del lactógeno placentario para la lactancia feto-materna⁽⁶⁵⁾. El lactógeno placentario lo producen las células trofoblásticas y binucleadas y es secretado en la circulación feto-materna, algunos autores describen que está implicado en la mamogénesis, distribución de los nutrientes madre-feto y regulación del crecimiento del feto a través de la IGF, los minerales pueden llegar a potenciarlo, mejorando la función hormonal de las tiroideas⁽⁶⁶⁾. Micro minerales como el zinc, cobre y manganeso contribuyen a la integridad de la estructura placentaria y maximiza la producción de lactógeno placentario y su actividad en el tejido mamario y metabolismo del feto⁽⁶⁷⁾.

Nutrición mineral de la madre y los efectos sobre el feto

La nutrición de la vaca determinará el desarrollo embrionario pre y postparto no solo influirá en el peso al nacer, sino que también afectará la expresión génica del becerro mediante procesos epigenéticos y podrá ocasionar problemas subsecuentes⁽⁶⁸⁾. Los periodos críticos son el primer tercio gestación y la disponibilidad de minerales como el Cu, I, Mn, Se y Zn disminuirán las pérdidas embrionarias⁽⁶⁸⁾. Minerales como en Zn, Cu y Se en el segundo tercio ayudarán a proveer un mejor funcionamiento inmune, mejorará la eficiencia placentaria y el microbioma intestinal del feto será más diverso⁽⁷⁰⁾.

Interferencias minerales en el ciclo estral de la vaca

El ciclo estral es un evento fisiológico que influyen efectos directos en el eje hipófisis-ovario donde los minerales traza son importantes para que se pueda llevar a cabo este proceso, el ciclo comprende una duración de 21 días y está dividido en cuatro fases: proestro, estro, metaestro y diestro⁽⁷¹⁾. Este proceso está regulado por las hormonas: estrógenos, LH, FSH y progesterona (P4). La primera fase considera el crecimiento de folículos, seguido de la presentación de celo y la ovulación; el metaestro es caracterizado por la formación del Cuerpo Lúteo (CL), donde se produce P4 y el útero se prepara para una gestación⁽⁷²⁾. Cada etapa requiere diversos nutrientes, los minerales no son la excepción incluso se pudiera definir que los minerales traza pueden llegar a decirse reguladores funcionales de la reproducción bovina. Sin embargo, van a variar dependiendo de la etapa reproductiva⁽⁷²⁾. Los minerales influyen de forma indirecta, como el cobre, zinc, selenio, cobalto y yodo. Estos minerales contribuyen a la salud reproductiva, apoyando funciones hormonales, desarrollo celular y el bienestar general⁽⁷⁴⁾. En la Tabla 1. Se identifica en que hormona o etapa del desarrollo celular interviene cada mineral traza en el ciclo estral.

Tabla 1. Minerales, en que hormona incide y los requerimientos de los bovinos en ciclo estral.

Mineral	Incidencia en el ciclo estral
Zinc	Interviene indirectamente en la síntesis y liberación de FSH, LH y P4.
Cobre	Prostaglandinas y esteroides. También interviene indirectamente en la síntesis y liberación de FSH, LH
Selenio	Mantenimiento del cuerpo lúteo, como antioxidante celular.
Yodo	Hormonas tiroideas, interviene en procesos de desarrollo folicular
Manganeso	Precursor hormonal, síntesis del colesterol y hormonas esteroideas

COBRE

El cobre es un mineral traza que se ha demostrado ser la segunda deficiencia a nivel mundial en animales de pastoreo⁽⁹⁾. Este mineral tiene relación con la eficiencia reproductiva interviene en la relación positiva del eje hipotálamo-hipófisis-ovario puesto que está implicado en la reducción de estrés oxidativo en el ovario, así como el mantenimiento, síntesis y secreción de las gonadotropinas y la modulación de liberación de la LH, reducción en el número y frecuencia de los pulsos de LH y disminución del pico de LH⁽⁷⁶⁾. También se le atribuyen procesos de la integridad del tracto reproductor y muerte embrionaria de aquí que, los efectos causados por la hipocuprosis se asocian a: disminución de la concepción, ciclos anovulatorios y anestros; lo que provoca un incremento en los días abiertos⁽⁷⁶⁾.

Existe un gran número de autores que evidencia que el Cu interviene en los procesos reproductivos de la vaca, puesto que está implicado en la reducción de estrés oxidativo en el ovario, ya que participa en inhibir los radicales libres, esto beneficiará al ovario porque permitirá que la dinámica folicular se desarrolle de manera adecuada^(76,77). Por otro lado, también relacionan que la unión del glutatión peroxidasa existe mayor vínculo con la

síntesis y secreción de las gonadotropinas, la modulación de liberación de la LH, la reducción en el número y frecuencia de los pulsos de LH^(9,76,77,78).

El Cu también está relacionado con la embriogénesis ya promueve el desarrollo temprano del embrión, aumenta el porcentaje de blastocitos, y se menciona que podrían existir transportadores de cobre en el complejo cúmulo-ovocito^(78,79). La enzima cuprodependiente, citocromo-c-oxidasa, actúa como intermediaria en la transferencia de electrones en la cadena respiratoria-mitocondrial participando en la obtención de energía, por lo que la suplementación de cobre genera mejor metabolismo energético y se ve reflejado en la condición corporal y ello a su vez en la reproducción⁽⁷⁹⁾.

Las investigaciones previas dan resultados diversos; en novillas de primer servicio, que tenían una tasa de preñez del 76 %, fueron tratadas con Cu inyectable y éste aumentó el índice al 91 %, y Cu suministrado por vía oral al 82 %⁽⁸⁰⁾. En vacas suplementadas con Cu inyectado encontraron que el 40% presentó múltiples folículos en primeros estadios y el índice de preñez fue del 6% mayor que el control. Analizando el pos-tratamiento, los niveles sanguíneos del micromineral incrementaron (0.66 ± 0.1 mg/dl), se logró un alto porcentaje de preñez (73%) y una disminución del número de días abiertos⁽⁸¹⁾.

En una investigación en donde se analizó el efecto del cobre inyectado sobre los parámetros y trastornos reproductivos, encontraron que al suplementar con este mineral en una dosis de 50 mg demostró que existía prevalencia del 53.7 % de las vacas suplementadas con trastornos reproductivos, un 28% de las vacas eran repetidoras de celo y un 25% mostró anestro prolongado, por lo que concluyó que no había un efecto positivo sobre estos parámetros⁽⁸²⁾. Otra investigación manejó 3 diferentes grupos; 2

suplementados a diferentes dosis y un testigo, los grupos suplementados aumentan la tasa de gestación y se redujo el porcentaje de abortos⁽⁸³⁾.

ZINC

El zinc es un micro mineral esencial, desarrolla funciones a nivel celular como estructurales, regulatorias y catalíticas⁽⁸⁴⁾. También interviene en la estabilización de proteínas, se considera que entre el 3 y el 10 % de las proteínas en la que interfiere son involucradas en el genoma^(84,85). El zinc además participa como cofactor enzimático y se establece que más de 300 enzimas son zinc-dependientes^(86,87). Por ello, una deficiencia de este mineral afectará las expresiones genéticas^(86, 87).

Una de las enzimas que se considera que tanto el cobre como el zinc son esenciales para su activación es la enzima superóxido dismutasa dependiente de Cobre-Zinc (Cu-Zn SOD), esta es considerada una enzima prioritaria en los procesos de óxido- reducción⁽⁸⁸⁾. Otra enzima que es la piruvatocinasa es dependiente del zinc y está involucrada en el ciclo de la glucólisis, así como también en el metabolismo de la insulina, algunos autores refieren que es aquí donde el zinc interviene en el metabolismo energético^(88, 89). El zinc también se ha relacionado con algunas hormonas que tiene incidencia en la regulación metabólica como lo son la tiroides, el factor de crecimiento semejante a la insulina 1 y el neuropéptido Y, algunos de estos relacionados con el crecimiento y el apetito del animal, al incrementar el apetito mejora drásticamente la condición corporal^(90, 91).

El zinc ha sido estudiado por bastante tiempo, pero en relación con sus efectos reproductivos se ha encontrado que es elemental para que los bovinos alcancen su madurez sexual, interviene en disminución de ciertos eventos reproductivos, como lo son

estrogenio, gestación y lactancia⁽⁸⁶⁾. La deficiencia de éste influye mucho en el desarrollo del embrión, causando muerte de estos o momificación y, en caso de que la gestación llegue a su fin, la cría tendrá un bajo peso⁽¹⁾.

Este mineral traza también interviene en la regulación de la meiosis en los ovocitos⁽⁸⁷⁾. En algunos estudios donde se suplementa con zinc, se puede relacionar como el número de ovocitos morfológicamente normales incrementa, no solo mejorando los ovocitos sino también folículos disponibles, simultáneamente cuando existe menores concentraciones de iones del zinc, el desarrollo del folículo se ve limitado^(91, 92). Se considera que cuando el nivel de concentración de zinc es adecuado, promueve la expansión del cúmulo-ovocito, ya que tiene actividad antioxidante, de regulación y diferenciación celular, lo cual contribuye a la disminución de apoptosis celular⁽⁹³⁾.

Estudios *in vitro* analizados con anterioridad han demostrado cómo la adición de zinc aumenta y mejora la actividad de Cu/Zn-SOD, también embriones implantados mejoran su calidad e integridad^(86,94). La deficiencia de Zn en las células de la granulosa puede afectar la activación de la vía de señalización pSMAD2/3, lo que va a dificultar la expansión del cúmulo y bloquear la meiosis de los ovocitos⁽⁹⁵⁾. Las células de la granulosa y los ovocitos mantienen una comunicación continua durante el desarrollo folicular y realizan transferencia bidireccional de nutrientes y señalización paracrina⁽⁹⁶⁾.

En relación con las respuestas hormonales, se ha encontrado que la aplicación vía parenteral del Zn aumenta el diámetro del folículo preovulatorio, regula la secreción de progesterona de las células de la granulosa^(96,97). La suplementación con zinc (40 ppm) promueve la producción de FSH y mejora la actividad gonadal y la retroalimentación de esteroides⁽⁹⁸⁾. En fertilización *in vitro* la adición de zinc a los medios de maduración

ocasiona un aumento en la división celular y las concentraciones de GSH, además se disminuye el daño al ADN tanto en los ovocitos como en las células del cumulo⁽⁹⁹⁾. Una deficiencia de zinc en vacas provoca alteraciones en la secreción de algunas hormonas relacionadas con el ciclo estral, abortos, distocias preeclampsia y en las crías se ha identificado toxemia y bajos pesos al nacer⁽¹⁰⁰⁾.

COBALTO

El cobalto es esencial para la síntesis de vitamina B₁₂, la cual debe ser sintetizada en el rumen por las bacterias, ahí es donde juega el papel importante ya que les permite a los rumiantes metabolizar el ácido propiónico lo que significa que la falta de cobalto en la dieta del ganado puede provocar anemia perniciosa^(100, 101). Es importante para la salud y la productividad, las tasas de fertilidad, retrasar la pubertad y disminuir la concepción y el rendimiento⁽¹⁰²⁾.

En una investigación se encontró que las vacas y novillas suplementadas con microminerales mostraron un aumento del 15.7% en las tasas de concepción durante el período de inseminación artificial⁽¹⁰³⁾. El Co puede afectar el comportamiento ovárico y la embriogénesis. En otra investigación encontraron que vacas suplementadas con B₁₂ (Co) y ácido fólico tenían una reducción de las retenciones placentarias, además, las vacas suplementadas entraban a su primer servicio 3.8 días antes⁽¹⁰⁴⁾.

YODO

El yodo es un oligoelemento responsable del correcto desarrollo del organismo de la vaca, la producción de leche y la reproducción, asegura el funcionamiento normal de la glándula tiroideas y es necesario para la síntesis de las hormonas tiroideas triyodotironina y tiroxina, responsables del metabolismo saludable, especialmente de la energía⁽¹⁰⁵⁾. Al igual que otros minerales, el Yodo se describe que incide de manera indirecta en los problemas

reproductivos, más como una reacción secundaria de un déficit de la glándula tiroides y esto es causado por una deficiencia principalmente en la dieta⁽¹⁰⁶⁾.

Desde los años 50 se encontró que una deficiencia de yodo ha causado en algunos hatos incidencias en problemas reproductivos; como lo son natimortos, abortos y crías débiles^(106, 107). Existen algunos estudios donde, con base al análisis la hormona T4, presenta una correlación negativa con los parámetros de intervalos entre partos, por lo que se puede entender que niveles bajos de la hormona no solo limitarían actividades funcionales del organismo si no, también, afecta la reactivación ovárica⁽¹⁰⁷⁾. En vacas lecheras también la deficiencia de concentraciones de estas hormonas afecta la producción de leche⁽¹⁰⁸⁾.

La deficiencia de yodo en vacas puede ser ocasionada por una alimentación bociógena y un exceso de calcio en la dieta⁽¹⁰⁶⁾. La deficiencia en las vacas también puede provocar hipotiroidismo, que sus efectos suelen ser terneros muertos o débiles, crecimiento excesivo de la glándula tiroides (bocio), trastornos reproductivos y una mayor incidencia de mastitis y enfermedades del hígado y de las pezuñas⁽¹⁰⁹⁾.

SELENIO

El selenio es un mineral que es considerado por ser componente estructural de 25 selenoproteínas, es uno de los principales en el sistema de defensa antioxidantes, interviene en la síntesis de las hormonas tiroideas y mejora la salud gastrointestinal y en la reproducción en animales que están sometidos al estrés térmico⁽¹¹⁰⁾. Este mineral es llamado de los controversiales, debido a que se han demostrado casos de toxicidad, pero por ello, su deficiencia se ha convertido en un gran problema⁽¹¹¹⁾. Es considerado que los requerimientos diarios de Se en el ganado bovino se estiman en 100 µg/kg de MS⁽¹¹⁰⁾.

La suplementación con selenio y sus efectos en la reproducción se ha estado estudiado durante las últimas dos décadas, de acuerdo con varias investigaciones han encontrado que se llega a reducir la tasa de infertilidad, anomalías en la embriogénesis y alguna patología postparto y puede mejorar la tasa de éxito del primer servicio en vacas^(112,113). La mayoría de los autores determina que cuando se suplementa con selenio, disminuye la muerte embrionaria durante el primer mes de gestación debido a que aumenta la GPx-1, aumenta las células de la granulosa como consecuencia de una mayor expresión de selenoproteínas en folículos, promueve el eficaz desarrollo de folículos secundarios, debido al incremento de GPx^(114, 115).

También se disminuye hasta en un 35% la metritis, quistes ováricos y retención placentaria esto suplementando selenio pre y post-parto, y no solo en disminución de casos si no en futuros partos la incidencia disminuyó^(116,117,118). En un estudio analizando una suplementación con dos fuentes de selenio en la dieta se observó que la endometritis subclínica no fue afectada por el tratamiento, aunque la endometritis subclínica aumentó, y esto se vio más en vacas que tenían antecedentes de retención placentaria siendo un 95 %⁽¹¹⁹⁾. Algunos autores describen que estas patologías en su mayoría son por efectos de estrés o baja inmunidad y es ahí donde minerales como el zinc o selenio ayudan a disminuirlas^(120, 121).

Recientemente se informó que la suplementación con Se aumenta complejos cúmulo-ovocitos, la viabilidad de las células del cúmulo y la tasa de eclosión de ovocitos en el ganado^(117;122,123). La suplementación con nanoselenio podía promover el desarrollo de estos folículos secundarios en cabras^(115,124). Existe un gran número de estudios de la suplementación de selenio para mejorar la reproducción, pero también se dice que su respuesta por si solas son limitadas y requiere que la suplementación sea con algún otro

mineral o con la vitamina E, la combinación de ambos tiene un efecto directo sobre las contracciones uterinas, llega a disminuir el intervalo de parto concepción y ayuda al transporte de los espermatozoides^(125, 126).

Las vacas que tienen deficiencia de selenio y son suplementadas mejoran la tasa de éxito al primer servicio⁽¹²⁷⁾. Vacas suplementadas con selenio tuvieron una mejor respuesta reproductiva, teniendo mejores porcentajes de detección de estro, 44.1 % y concepción del 40.8%, las vacas suplementadas también produjeron más calostro ($2,27 \pm 1,07$ L vs a $1,26 \pm 0,54$ L)⁽¹²⁸⁾. En estudios, analizando el efecto de este mineral sobre la recuperación postparto en la función lútea, se encontró que, al analizar progesterona, las concentraciones plasmáticas de P4 en el periodo posparto de las vacas suplementadas con Se fueron significativamente mayores⁽¹²⁹⁾.

Otras investigaciones donde se ha analizado la P4 en vacas suplementadas sugieren que la función del Cl funcional estará definida vacas que son suplementadas pre y postparto⁽¹³⁰⁾. Kamada, relaciona que esto se debe a que existe mayor proliferación de células en el CL al degradarse los peróxidos ocasionando un incremento en la concentración de P4⁽¹³¹⁾. En relación la disminución peróxidos una suplementación con Se favorece la GSHPx, lo que ayuda a disminuir las patologías postparto, y las inyecciones de Se-vitamin E aumentan la GSHPx, lo que favorece al ganado⁽¹³²⁾. Otra investigación que duró un periodo de 6 meses utilizó 2 fuentes de selenio: una levadura de selenio y la segunda fue selenito de sodio. Las concentración séricas de selenio fueron mejores con levadura de selenio, por lo que se cree que tiene mayor biodisponibilidad en el organismo del rumiante⁽¹³³⁾.

La suplementación de selenio y propionato de calcio durante 60 días no mejoró los parámetros reproductivos y productivos de ganado en pastoreo, pero existieron diferencias

en la tasa de preñez respecto a el grupo control, teniendo mejor respuesta las vacas suplementadas (33.33 vs 43.7 %)⁽¹³⁴⁾. Suplementos de selenio y Vit E con 20 y 40 ml (cada ml contenía 0.5 mg de Se y 50 UI de d, l -alfa-tocoferil acetato) mejoraron el número de servicios por concepción y disminuyeron los días abiertos en novillas respecto al grupo control⁽¹³⁵⁾. En otras suplementaciones agregando zinc se encontró que la suplementación de Se y vitamina E su intervalo al primer servicio fue más corto⁽¹³⁶⁾.

La actividad fagocítica aumentó a las -1, 0 y 3 a 8 semanas posparto ($P < 0,05$), lo que ayudó a disminuir las incidencias de problemas reproductivos y ayudó a un reinicio de actividad ovárica temprana⁽¹³⁷⁾. Una selenosis crónica ayuda al crecimiento de quistes ovarios y por subsecuente incrementará el anestro⁽¹³⁸⁾. Existen contradicciones sobre la suplementación del selenio y sus efectos en la reproducción, pero esto se le ha atribuido al grado de deficiencia que se muestre en el ganado⁽¹³⁹⁾. Existen algunas otras interferencias con el selenio como lo son; nitratos, calcio, cianuro, azufre y el hierro^(116,122,138).

MANGANESO

El manganeso es un mineral traza que se desenvuelve como un cofactor de enzimas de la esteroidogénesis, y en glicoproteínas de la matriz extracelular⁽¹⁴⁰⁾. Además, como la mayoría de los traza tiene efecto antioxidante como cofactor de la enzima superóxido dismutasa mitocondrial, con esta función ayuda a que se disminuya el estrés oxidativo en los ovocitos y en el embrión⁽¹⁴¹⁾. Se le atribuye funciones en la fase lútea y el desarrollo primario del embrión en el ovocito el manganeso interviene en la maduración del citoplasma y competencia celular en los complejos del cúmulo ovocito- bovino⁽¹⁴²⁾.

La deficiencia de este mineral está relacionada con baja calidad de los ovocitos, anestros, menores tasas de concepción, abortos, becerros con bajo peso al nacer⁽¹⁴²⁾. En las

investigaciones reportadas la mayoría no habla de una suplementación solamente de este mineral si no, como un conjunto de los minerales traza⁽¹⁴³⁾. En vacas suplementadas con dos dosis diferentes de Manganeso, 80 y 40 mg/kg de materia seca existió diferencia tanto para una menor incidencia de quistes ováricos y para los servicios por concepción fue menor para vacas suplementadas con 40 mg^(144, 145). En una suplementación mineral con distintos minerales traza los primeros servicios de gestación fueron 36% mayores en el grupo que no se suplementó, y el 96% de las vacas quedaron preñadas en el grupo suplementado⁽¹⁴⁵⁾.

CONCLUSIÓN

La eficiencia reproductiva del ganado bovino está ligada a diversos procesos pero el de mayor peso es el nutricional, es en este proceso donde los minerales traza intervienen, desde la síntesis de hormonas, maduración de ovocitos, mejorar actividad del cuerpo lúteo y hasta la prevención de patologías reproductivas, esta revisión evidencia como las deficiencias de estos minerales provocan alteraciones reproductivas y afectarán la producción y rentabilidad de los hatos, la recomendación siempre es tener un buen diagnóstico mineral y así no ocasionar mayores deficiencias o excesos de los minerales.

AGRADECIMIENTOS Y CONFLICTO DE INTERESES

A la Secretaría de Ciencias Humanidades Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada. A la Universidad Autónoma Chapingo por las facilidades prestadas para este trabajo.

Los autores declaramos que no existe ningún conflicto de intereses para la divulgación de los resultados, discusión, análisis de datos y conclusiones presentados en el presente

trabajo.

Literatura citada

1. Córdova-Izquierdo, A., Espinosa-Cervantes, R., Peña-Betancurt, S.D., Villa-Mancera, E., Huerta-Crispín, R., Juárez-Mosqueda, M.D. y Rojas-Maya, S. (2017). Efecto de la retención placentaria sobre días abiertos en vacas. *REDVET*, 18(9): 1–4.
2. Campo D. Algunas anotaciones sobre la importancia del cobre en la reproducción bovina. *Rev Colomb Cienc Anim*. 2019;11(1):80-89.
3. Calderón MFP, Bosa LFP, Yasnó JDC, Saldaña LYM. Relación nutrición-fertilidad en hembras bovinas en clima tropical. *REDVET*. 2017;18(9):1-19.
4. Patiño R, Da Silva-Filho J, Pérez J. Modelos de predicción de exigencias minerales para rumiantes. *Rev Colomb Cienc Anim*. 2011;3(2):344-365.
5. Giacomel A, Freitas TC, Costa ALB, Sbardelotto EM, Bergmann E, Debortoli EC. Suplementação mineral para bovinos de corte: uma revisão sistemática. 2022.
6. Salamanca A. Suplementación de minerales en la producción bovina. *REDVET*. 2010;11(9):1-10.
7. Lee C, Copelin JE, Dieter PA, Berry EA. Effects of trace mineral supply from rumen boluses on performance, carcass characteristics, and fecal bacterial profile in beef cattle. *Anim Feed Sci Technol*. 2020;269:114626.
8. Roberts SL, May ND, Brauer CL, Gentry WW, Weiss CP, Jennings JS, et al. Effect of injectable trace mineral administration on health, performance, and vaccine response of newly received feedlot cattle. *Prof Anim Sci*. 2016;32(6):842-848.
9. Osorio JH, Vinasco Rodríguez J, Suárez YJ. Hormonas tiroideas en bovinos: artículo de revisión. *Biosalud*. 2014;13(1):76-84.
10. Lenis Sanín YY, Tamayo Arango LJ, Rodríguez Osorio N, Duque Muñoz L, Naranjo Nicholls JI, Carrillo González DF, et al. Reproducción de la vaca: manual didáctico sobre la reproducción, la gestación, la lactancia y el bienestar de la hembra bovina. Corporación Universitaria Remington. 2014.
11. Castellanos Puerto E. La nutrición, su relación con la respuesta inmunitaria y el estrés oxidativo. *Rev Habanera Cienc Méd*. 2008;7(4):0-0.
12. Guillén-Alvarado MC, Herrera-Muñoz JI, Arroyo-Oquendo C, Rojas-Salazar S, Molina-Coto R. Evaluación de protocolos de sincronización para inseminación artificial con y sin estrógenos en novillas. *Nutr Anim Trop*. 2025;19(1):91-124.
13. Márquez AC, Villa NA, Betancourth TE, Roncancio DV. Determinación de la concentración de calcio, fósforo y magnesio en el periparto de vacas lecheras en Manizales, Colombia. *Rev Colomb Cienc Pecu*. 2004;17(2):125-133.
14. Domínguez EP, Bossa BJR, Álvarez JAC, Montes VD. Relación calcio, fósforo, magnesio y selenio sobre la reproducción en vacas lecheras durante el periodo de transición. *Rev Colomb Cienc Anim*. 2021;13(2):9.
15. Farag MA, Hamouda S, Gomaa S, Agboluaje AA, Hariri MLM, Yousof SM. Dietary micronutrients from zygote to senility: an updated review of the role and orchestration of minerals in human nutrition across the lifespan with sex differences. *Nutrients*. 2021;13(11):3740.
16. Prasad AS. Trace metals in growth and sexual maturation. *Metabolism of trace metals in man*. Vol I. 1984;79-98.
17. Ma L, Shen W, Zhang J, Ma L, Shen W, Shen W, et al. The life cycle of the ovary. In: *Ovarian aging*. Singapore: Springer Nature Singapore; 2023. p.7-33.

18. Jan MH, Singh H, Kapil S. Mineral ions in regulation of hypothalamic-pituitary-ovarian axis. In: Sustainable agriculture reviews 57: animal biotechnology for livestock production 2; 2022. p.209-228.
19. Lou Y, Yang T, Xia C, Yang S, Deng H, Zhu Y, et al. Effects of copper on steroid hormone secretion, steroidogenic enzyme expression, and transcriptomic profiles in yak ovarian granulosa cells. *Vet Sci.* 2025;12(5):428.
20. Lou Y, Yang T, Zhu Y, Xia C, Cui H, Deng H, et al. Effects of trace elements and vitamins on the synthesis of steroid hormones in follicular granulosa cells of yak. *Vet Sci.* 2024;11(12):619.
21. Arczynska K, Swierczynski G. Iodine in cattle-review. *Journal of Elementology.* 2023;28(1).
22. Keitiretse M, Mulunda M. Minerals, serum metabolites, hormones, and bovine reproduction: a review. *Animal Health Research Reviews.* 2023;1–31.
23. Singh SK, Baidya S, Das P, Biswas P. Functional role of dietary supplements on reproductive physiology of fishes. In: recent updates in molecular endocrinology and reproductive physiology of fish: an imperative step in aquaculture. Singapore: Springer Singapore; 2021. p. 243-258.
24. Garner TB, Hester JM, Carothers A, Diaz FJ. Role of zinc in female reproduction. *Biology of Reproduction.* 2021;104(5):976–994. <https://doi.org/10.1093/biolre/ioab023>
25. Björndahl L, Kvist U. Human sperm chromatin stabilization: a proposed model including zinc bridges. *MHR: Basic Science of Reproductive Medicine.* 2009;16(1):23-29.
26. Acetoze G, Champagne J, Ramsey JJ, Rossow HA. Liver mitochondrial oxygen consumption and efficiency of milk production in lactating Holstein cows supplemented with copper, manganese and zinc. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition.* 2018;102(2):e787-e797.
27. Brewer NR. Comparative metabolism of copper. *Journal of the American Veterinary Medical Association.* 1987;190(6):654-658.
28. Ferrer M, Palomares R, Maldonado-Estrada J. Role of trace minerals in bull reproductive physiology and semen quality. *Clinical Theriogenology.* 2024;16.
29. Khudair A, Khudair A, Niinuma SA, Habib H, Butler AE. From deficiency to excess: the impact of iodine excess on reproductive health. *Frontiers in Endocrinology.* 2025;16:1568059.
30. Alam F, Rehman R, eds. Fundamental principles of oxidative stress in metabolism and reproduction: prevention and management. Elsevier; 2024.
31. Jan MH, Singh H, Kapil S. Mineral ions in regulation of hypothalamic-pituitary-ovarian axis. *Sustainable Agriculture Reviews 57: animal biotechnology for livestock production 2.* 2022;209-228.
32. Lacconi V, Massimiani M, Carriero I, Bianco C, Ticconi C, Pavone V, et al. When the embryo meets the endometrium: identifying the features required for successful embryo implantation. *International Journal of Molecular Sciences.* 2024;25(5):2834.
33. Deryabin PI, Borodkina AV. The role of the endometrium in implantation: a modern view. *International Journal of Molecular Sciences.* 2024;25(17):9746.
34. Velazquez MA. Nutritional strategies to promote bovine oocyte quality for in vitro embryo production: do they really work?. *Veterinary Sciences.* 2023;10(10):604.
35. Halloran KM, Stenhouse C. Key biochemical pathways during pregnancy in livestock: mechanisms regulating uterine and placental development and function. *Reproduction and Fertility.* 2025;6(3).
36. Kulus M, Sibiak R, Stefańska K, Zdun M, Wieczorkiewicz M, Piotrowska-Kempisty H, et al. Mesenchymal stem/stromal cells derived from human and animal perinatal tissues—origins, characteristics, signaling pathways, and clinical trials. *Cells.* 2021;10(12):3278.
37. Das PK, Mukherjee J, Banerjee D. Fertilisation, gestation and parturition. In: textbook of veterinary physiology. Singapore: Springer Nature Singapore; 2023. p. 569-613.

38. Johnson GA, Burghardt RC, Bazer FW, Seo H, Cain JW. Integrins and their potential roles in mammalian pregnancy. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2023;14(1):115.
39. Guin SK, Velasco-Torrijos T, Dempsey E. Explorations in a galaxy of sialic acids: a review of sensing horizons, motivated by emerging biomedical and nutritional relevance. *Sensors & Diagnostics*. 2022;1(1):10-70.
40. Machairiotis N, Vasilakaki S, Thomakos N. Inflammatory mediators and pain in endometriosis: a systematic review. *Biomedicines*. 2021;9(1):54.
41. Dring, J. C., Forma, A., Chilimoniuk, Z., Dobosz, M., Teresiński, G., Buszewicz, G., & Baj, J. Essentiality of trace elements in pregnancy, fertility, and gynecologic cancers A state-of-the-art review. *Nutrients*. 2021;14(1), 185. <https://doi.org/10.3390/nu14010185>
42. Wróblewski M, Wróblewska W, Sobiesiak M. The role of selected elements in oxidative stress protection: Key to healthy fertility and reproduction. *Int J Mol Sci* 2024;25(17):9409. <https://doi.org/10.3390/ijms25179409>
43. Charkiewicz AE. Is copper still safe for us? What do we know and what are the latest literature statements? *Curr Issues Mol Biol* 2024;46(8):8441-8463. <https://doi.org/10.3390/cimb46080441>
44. Keane JA, Ealy AD. An overview of reactive oxygen species damage occurring during in vitro bovine oocyte and embryo development and the efficacy of antioxidant use to limit these adverse effects. *Animals* 2024;14(2):330. <https://doi.org/10.3390/ani14020330>
45. Choi H, Lee J, Yoon JD, Hwang SU, Cai L, Kim M, et al. The effect of copper supplementation on in vitro maturation of porcine cumulus-oocyte complexes and subsequent developmental competence after parthenogenetic activation. *Theriogenology* 2021;164:84-92. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2021.01.023>
46. Davis PJ, Mousa SA, Lin HY. Nongenomic actions of thyroid hormone: The integrin component. *Physiol Rev* 2021;101(1):319-352. <https://doi.org/10.1152/physrev.00038.2019>
47. Roberts H, Bourque SL, Renaud SJ. Maternal iron homeostasis: Effect on placental development and function. *Reproduction* 2020;160(4):R65-R78. <https://doi.org/10.1530/REP-20-0236>
48. Benagiano G, Mancuso S, Guo SW, Di Renzo GC. Events leading to the establishment of pregnancy and placental formation: The need to fine-tune the nomenclature on pregnancy and gestation. *Int J Mol Sci* 2023;24(20):15420. <https://doi.org/10.3390/ijms242015420>
49. Grzeszczak K, Kwiatkowski S, Kosik-Bogacka D. The role of Fe, Zn, and Cu in pregnancy. *Biomolecules* 2020;10(8):1176. <https://doi.org/10.3390/biom10081176>
50. Sattar T. Selenium role in reproduction, pregnant/postpartum women and neonates: A current study. *Curr Nutr Food Sci* 2021;17(1):28-37. <https://doi.org/10.2174/1573401316999200610153643>
51. Chandra S, Roychoudhury A. Role of selenium and manganese in mitigating oxidative damages. In: *Protective chemical agents in the amelioration of plant abiotic stress: Biochemical and molecular perspectives*. Springer; 2020:597-621. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1831-7_23
52. Conforti RA, Delsouc MB, Zorychta E, Telleria CM, Casais M. Copper in gynecological diseases. *Int J Mol Sci* 2023;24(24):17578. DOI: [10.3390/ijms242417578](https://doi.org/10.3390/ijms242417578)
53. Grossklaus R, Liesenkötter KP, Doubek K, Völzke H, Gaertner R. Iodine deficiency, maternal hypothyroxinemia and endocrine disrupters affecting fetal brain development: A scoping review. *Nutrients* 2023;15(10):2249. <https://doi.org/10.3390/nu15102249>
54. Van Saun RJ. Trace mineral metabolism: The maternal-fetal bond. *Vet Clin Food Anim Pract* 2023;39(3):399-412. DOI: [10.1016/j.cvfa.2023.06.003](https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2023.06.003)
55. Molenda M, Kolmas J. The role of zinc in bone tissue health and regeneration: A review. *Biol Trace Elem Res* 2023;201(12):5640-5651. <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03789-8>
56. Fisher AL, Nemeth E. Iron homeostasis during pregnancy. *Am J Clin Nutr* 2017;106(Suppl. 6):1567S-1574S. <https://doi.org/10.3945/ajcn.117.155812>

57. Mo C, Wang Z, Bonewald L, Brotto M. Bone and muscle. In: Bone toxicology. Springer; 2017:281-316. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46189-2_10
58. Yadav DK, Somagond YM, Das P, Lathwal SS, Kamboj A, Alhussien MN, Dang AK. Injection of antioxidant trace minerals/vitamins into peripartum crossbred cows improves the nutritional and immunological properties of colostrum/milk and the health of their calves under heat stress conditions. *Trop Anim Health Prod* 2024;56(7):225. <https://doi.org/10.1007/s11250-024-03914-5>
59. Velasco I, Bath SC, Rayman MP. Iodine as essential nutrient during the first 1000 days of life. *Nutrients* 2018;10(3):290. <https://doi.org/10.3390/nu10030290>
60. Cottin SC, Roussel G, Gambling L, Hayes HE, Currie VJ, McArdle HJ. The effect of maternal iron deficiency on zinc and copper levels and on genes of zinc and copper metabolism during pregnancy in the rat. *Br J Nutr* 2019;121(2):121-129. <https://doi.org/10.1017/S0007114518001705>
61. Köhrle J. Selenium and the control of thyroid hormone metabolism. *Thyroid*. 2005;15(8):841–853.
62. Grzeszczak K, Kapczuk P, Kupnicka P, Cecerska-Heryć E, Kwiatkowski S, Chlubek D, et al. Calcium, potassium, sodium, and magnesium concentrations in the placenta, umbilical cord, and fetal membrane from women with multiple pregnancies. *Life*. 2023;13(1):153.
63. Schlafer DH, Fisher PJ, Davies CJ. The bovine placenta before and after birth: placental development and function in health and disease. *Animal Reproduction Science*. 2000;60:145–160.
64. Kovacs CS. Bone development and mineral homeostasis in the fetus and neonate: roles of the calciotropic and phosphotropic hormones. *Physiological Reviews*. 2014;94(4):1143–1218.
65. Takahashi T. Biology of the prolactin family in bovine placenta. I. Bovine placental lactogen: expression, structure and proposed roles. *Animal Science Journal*. 2006;77(1):10–17.
66. Palmieri C, Loi P, Ptak G, Della Salda L. A review of the pathology of abnormal placentae of somatic cell nuclear transfer clone pregnancies in cattle, sheep, and mice. *Veterinary Pathology*. 2008;45(6):865–880.
67. Fadlalla IM. The interactions of some minerals elements in health and reproductive performance of dairy cows. *New Advances in the Dairy Industry*. 2022.
68. Wathes DC, Taylor VJ, Cheng Z, Mann GE. Follicle growth, corpus luteum function and their effects on embryo development in postpartum dairy cows. *Reproduction Supplement*. 2003;61:219–237.
69. Hostetler CE, Kincaid RL, Miranda MA. The role of essential trace elements in embryonic and fetal development in livestock. *The Veterinary Journal*. 2003;166(2):125–139.
70. Farias PM, Marcelino G, Santana LF, de Almeida EB, Guimarães RDC, Pott A, et al. Minerals in pregnancy and their impact on child growth and development. *Molecules*. 2020;25(23):5630.
71. Carvajal A, Martínez E, Tapia M, Ayke IT. El ciclo estral en la hembra bovina y su importancia productiva. *Inst Investig Agropec*. 2020;246:1–4.
72. Aréchiga-Flores C, Cortés-Vidauri Z, Hernández-Briano P, Flores-Flores G, Rochín-Berumen F, Ruiz-Fernández E. Revisión: función y regresión del cuerpo lúteo durante el ciclo estral de la vaca. *Abanico Vet*. 2019;9.
73. Toquica-Díaz ML, Otálvaro-Palomino DL. Influencia de los minerales en procesos reproductivos en hembras bovinas [tesis doctoral]. Ibagué: Universidad Cooperativa de Colombia; 2020.
74. León-Cruz M, Ramírez-Bribiesca E, López-Arellano R, Miranda-Jiménez L, Rodríguez-Patiño G, Díaz-Sánchez VM, et al. Bolos intrarruminales con liberación controlada de minerales traza: revisión. *Rev Mex Cienc Pecu*. 2020;11(2):498–516.
75. Hernández S, Montiel Palacios FC, Ahuja Aguirre CC, López de Buen L. Efecto de la administración parenteral de minerales traza sobre la respuesta de ovulación múltiple en

- donadoras bovinas bajo condiciones de trópico [tesis de maestría]. Veracruz: Universidad Veracruzana; 2020. Disponible en: <https://cdigital.uv.mx/handle/1944/50892>.
76. Mion B, Madureira G, Spricigo JFW, King K, Van Winters B, Lamarre J, et al. Effects of supplemental trace element source in pre- and postpartum diets on reproductive biology and performance of dairy cows. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22784>
 77. Gómez-Rendón J, Del Campo M, González-Tous M. Algunas anotaciones sobre la importancia del cobre en la reproducción bovina. *Rev Colomb Cienc Anim.* 2019;11(1). <http://dx.doi.org/10.24188/recia.v11.n1.2019.716>. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22784>
 78. Rosa DE, Fazzio LE, Picco SJ, Furnus CC, Mattioli GA. Metabolismo y deficiencia de cobre en caprinos. *Analecta Vet.* 2008;28(2):34–44.
 79. Rodríguez MS, Flores SD, León MA, Pérez HLM, Aguilar AJ. Diagnóstico de sistemas de producción de bovinos para carne en Tejupilco, Estado de México. *Rev Mex Cienc Agríc.* 2018;9(2):465–471. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i2.1086>.
 80. García JD, Cuesta MM, Pedroso SR, Rodríguez MJ, Gutiérrez PM, Mollineda TA, et al. Suplementación parenteral de cobre en vacas gestantes: efecto sobre posparto y terneros. *Rev MVZ Córdoba.* 2007;12(2):985–995.
 81. Hernández-Arroyave W, Ocampo-Ortiz PE, Montoya-Flórez LM, Bustamante-Cano JJ. Suplementación parenteral de cobre y su relación con índices de fertilidad en bovinos de regiones con altos niveles de molibdeno en el Magdalena Medio colombiano. *Rev Vet Zootec.* 2016;10(1):1–12. <https://doi.org/10.17151/vetzo.2016.10.1.1>.
 82. Torres G, Páez R, Azúm J, Roller F, González N, Acosta J, Pedroso R. Uso del sulfato de cobre por vía parenteral en vacas hipocuprémicas con mastitis y su efecto en la fertilidad. *La Técnica.* 2016;(16):56–63.
 83. Sosa RP, Cabrera NG, Gutiérrez FR. Efecto de la suplementación con cobre en la reproducción de la hembra bovina en pastoreo. *La Técnica.* 2014;(13):26–31.
 84. Kong BY, Bernhardt ML, Kim AM, O'Halloran T, Woodruff TK. Zinc maintains prophase I arrest in mouse oocytes via regulation of the MOS-MAPK pathway. *Biol Reprod.* 2012;87:11–12. <https://doi.org/10.1095/biolreprod.112.099390>.
 85. Rosa DE, Fazzio LE, Picco SJ, Furnus CC, Mattioli GA. Metabolismo y deficiencia de zinc en bovinos. *Analecta Vet.* 2008;28.
 86. Tapiero H, Tew KD. Trace elements in human physiology and pathology: zinc and metallothioneins. *Biomed Pharmacother.* 2003;57(9):399–411.
 87. Sekler I, Sensi SL, Hershfinkel M, Silverman WF. Mechanism and regulation of cellular zinc transport. *Mol Med.* 2007;13(7–8):337–343.
 88. Miller AF. Superoxide dismutases: active sites that save, but a protein that kills. *Curr Opin Chem Biol.* 2004;8(2):162–168.
 89. Jing MY, Sun JY, Wang JF. The effect of peripheral administration of zinc on food intake in rats fed Zn-adequate or Zn-deficient diets. *Biol Trace Elem Res.* 2008;124(2):144–156.
 90. MacDonald RS. The role of zinc in growth and cell proliferation. *J Nutr.* 2000;130(5 Suppl):1500S–1508S.
 91. Geravandi S, Azadbakht M, Pourmoradi M, Nowrouzi F. Zinc supplementation of the vitrification medium improves in vitro maturation and fertilization of oocytes derived from vitrified-warmed mouse ovaries. *Cryobiology.* 2017;74:31–35. <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2016.12.007>.
 92. Anchordoquy JM, Anchordoquy JP, Galarza EM, Farnetana NA, Giuliodori MJ, Nikoloff N, Fazzio L, Furnus JJ. Parenteral zinc supplementation increases pregnancy rates in beef cows. *Biol Trace Elem Res.* 2019;192(2):175–182. <https://doi.org/10.1007/s12011-019-1651-8>.
 93. El-Hayek S, Clarke HJ. Control of oocyte growth and development by intercellular communication within the follicular niche. *Results Probl Cell Differ.* 2016;58:191–224. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31973-5_8.

94. Picco SJ, Anchordoquy JM, De Matos DG, Anchordoquy JP, Seoane A, Mattioli GA, Errecalde A, Furnus CC. Effect of increasing zinc sulfate concentration during in vitro maturation of bovine oocytes. *Theriogenology*. 2010;74(7):1141–1148. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2010.05.015>.
95. Ito K, Fujie T, Shimomura M, Nakano T, Yamamoto C, Kaji T. TGF- β 1 potentiates the cytotoxicity of cadmium by induction of a metal transporter, ZIP8, mediated by the ALK5-Smad2/3 and ALK5-Smad3-p38 MAPK signal pathways in cultured vascular endothelial cells. *Int J Mol Sci*. 2021;23(1):448.
96. Liao X, Wu L, Yin D, et al. The role of zinc in follicular development. *Mol Biol Rep*. 2023;50:4527–4534. <https://doi.org/10.1007/s11033-023-08331-6>.
97. Marques RS, Cooke RF, Rodrigues MC, Cappellozza BI, Mills RR, Larson CK, et al. Effects of organic or inorganic cobalt, copper, manganese, and zinc supplementation to late-gestating beef cows on productive and physiological responses of the offspring. *J Anim Sci*. 2016;94(3):1215–26.
98. Fazel-Torshizi F, Chamani M, Khodaei HR, Sadeghi AA, Hejazi S, Heravi-Rad M. Effects of zinc-methionine on reproductive and thyroid hormones in rats with polycystic ovary syndrome. *Adv Biomed Res*. 2020. https://doi.org/10.4103/abr.abr_144_20.
99. Zambrano JGC, Sosa RP, Gutiérrez FR. Suplementación de micronutrientes, salud y eficiencia de la reproducción asistida en la hembra bovina. *Siembra*. 2025;12(1):6.
100. Bedwal RS, Bahuguna A. Zinc, copper and selenium in reproduction. *Experientia*. 1994;50:626–40. doi:10.1007/BF01952862.
101. Ventura RA, Cuzzuol GD, Da Silva TB, Malegoni ACS, Roque LZ, De Oliveira SFC, et al. Cobalt deficiency in cattle: a review. *Pubvet*. 2020;15:134.
102. Gharibzahedi, S. M. T., Moghadam, M., Amft, J., Tolun, A., Hasabnis, G., & Altintas, Z. Recent advances in dietary sources, health benefits, emerging encapsulation methods, food enrichment, and new sensor-based monitoring of vitamin B12: A critical review. *Molecules*, 2023; 28(22):7469. <https://doi.org/10.3390/molecules2822746>
103. Ranaweera, S., Silva, S. S. H., & Manatunga, D. C. Cobalt and copper deficiency and molybdenosis. In: *Medical Geology: Pathway to One Health*. 2023. p. 235-252.
104. Duplessis, M., Girard, C., Santschi, D., Laforest, J. P., Durocher, J., & Pellerin, D. Effects of folic acid and vitamin B12 supplementation on culling rate, diseases, and reproduction in commercial dairy herds. *Journal of Dairy Science*, 2014; 97:2346-2354.
105. Susicley, M., Teixeira, L., & Oliveira, C. Dynamics of changes in iodine concentration in dairy cow milk. *Revista Científica Facultad de Ciencias Veterinarias*, 2019; 29(5):1381-1386.
106. González, J. S. Iodine in cattle nutrition. *Nutrición Animal Tropical*, 1995; 2(1):95-120.
107. Díez-Monforte, C., Fernández-Celadilla, L., & Abad-Gavin. Thyroid hormones in dairy cattle: relationship with reproductive activity. *Archivos de Zootechnia*, 1993; 42(160):435-440.
108. Djokovic, R., Samanc, H., Bojkovski, J., & Fratric, N. Blood concentrations of thyroid hormones and lipids of dairy cows in the transition period. *Lucrări Științifice Medicină Veterinară*, 2010; 43(2):43-50.
109. Tenjo-Morales, M. D. P., & Cardona-Jaramillo, J. P. Effect of parenteral supplementation with a chelated multimineral on open days in beef females in the Llanos Orientales. *Revista Ciencia Animal*, 2008; 1(1):77-83.
110. Zheng, Y., Xie, T., Li, S., Wang, W., Wang, Y., Cao, Z., et al. Effects of selenium as a dietary source on performance, inflammation, cell damage, and reproduction of heat-stressed cattle: A review. *Frontiers in Immunology*, 2022; 12:820853. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.820853>
111. Portilla DEC, Reyes BB, Cardona-Álvarez JA, Monter-Vergara D. Relación calcio, fósforo, magnesio y selenio sobre la reproducción en vacas lecheras durante el periodo de transición. *Rev Colomb Cienc Anim*. 2021;13(2):e889. doi:10.24188/recia.v13.n2.2021.889.

112. Kommisrud E, Østerås O, Vatn T. Blood selenium associated with health and fertility in Norwegian dairy herds. *Acta Vet Scand.* 2005;46(4):229-40.
113. Machado V, Bicalho M, Pereira R, Caixeta L, Knauer W, Oikonomou G, et al. Effect of an injectable trace mineral supplement containing selenium, copper, zinc, and manganese on the health and production of lactating Holstein cows. *Vet J.* 2013;197(2):451-6.
114. Qazi IH, Angel C, Yang H, Zoidis E, Pan B, Wu Z, et al. Role of selenium and selenoproteins in male reproductive function: a review of past and present evidence. *Antioxidants.* 2019;8(8):268.
115. Alpizar-Bonilla JF. La suplementación mineral del ganado: revisión de principios y tecnologías aplicadas, para mejorar el desempeño productivo. *Yulök Rev Innov Acad.* 2023;7(2):119-29.
116. Miller J, Brzezinska-Slebodzinska E, Madsen F. Oxidative stress, antioxidants, and animal function. *J Dairy Sci.* 1993;76:2812-22. doi:10.3168/jds.S0022-0302(93)77620-1.
117. Wilde D. Influence of macro and micro minerals in the peri-parturient period on fertility in dairy cattle. *Anim Reprod Sci.* 2006;96(3-4):240-9.
118. Maddox JF, Reddy CC, Eberhart RJ, Scholz RW. Dietary selenium effects on milk eicosanoid concentration in dairy cows during coliform mastitis. *Prostaglandins.* 1991;42(4):369-78. doi:10.1016/0090-6980(91)90085-T.
119. Rutigliano HM, Lima FS, Cerri RL, Greco LF, Vilela JM, Magalhães V, et al. Effects of method of presynchronization and source of selenium on uterine health and reproduction in dairy cows. *J Dairy Sci.* 2008;91(9):3323-36.
120. Arshad MA, Ebeid HM, Hassan FU. Revisiting the effects of different dietary sources of selenium on the health and performance of dairy animals: a review. *Biol Trace Elem Res.* 2021;199(9):3319-37.
121. Xiao J, Khan MZ, Ma Y, Alugongo GM, Ma J, Chen T, et al. Antioxidant properties of selenium and vitamin E: Their role in regulating dairy cow health during the periparturient period. *Antioxidants.* 2021;10(10):1555. doi:10.3390/antiox10101555.
122. Spears JW, Weiss WP. Role of antioxidants and trace elements in health and immunity of transition dairy cows. *Vet J.* 2008;176:70-6. doi:10.1016/j.tvjl.2007.12.015.
123. Wu X, Yao J, Yang Z, Yue W, Ren Y, Zhang C, et al. Improved fetal hair follicle development by maternal supplement of selenium at nano size (Nano-Se). *Livest Sci.* 2011;142(1-3):270-5.
124. Ceko M, Hummitzsch K, Hatzirodos N, Bonner W, Aitken J, Russell D, et al. Correction: X-ray fluorescence imaging and other analyses identify selenium and GPX1 as important in female reproductive function. *Metallomics.* 2015;7(1):188.
125. Van Emon M, Sanford C, McCoski S. Impacts of bovine trace mineral supplementation on maternal and offspring production and health. *Animals.* 2020;10(12):2404. doi:10.3390/ani10122404.
126. Arechiga CF, Ortiz O, Hansen PJ. Effect of prepartum injection of vitamin E and selenium on postpartum reproductive function of dairy cattle. *Theriogenology.* 1994;41(6):1251-8. doi:10.1016/0093-691X(94)90482-X.
127. Kommisrud E, Østerås O, Vatn T. Blood selenium associated with health and fertility in Norwegian dairy herds. *Acta Vet Scand.* 2005;46:229-40. doi:10.1186/1751-0147-46-229.
128. Hoque MN, Das ZC, Rahman ANMA, Hoque MM. Effect of administration of vitamin E, selenium and antimicrobial therapy on incidence of mastitis, productive and reproductive performances in dairy cows. *Int J Vet Sci Med.* 2016;4(2):63-70.
129. Behne D, Hilmert H, Scheid S, Gessner H, Elger W. Evidence for specific selenium target tissues and new biologically important selenoproteins. *Biochim Biophys Acta.* 1988;966(1):12-21.

130. Kamada H. Effects of selenium-rich yeast supplementation on plasma progesterone levels in postpartum dairy cows. *Asian-Australas J Anim Sci.* 2016;30(3):347.
131. Kamada H, Ikumo H. E. Effect of selenium on cultured bovine luteal cells. *Anim Reprod Sci.* 1997;46:203-11.
132. Spears JW, Harvey RW, Segerson EC. Effects of marginal selenium deficiency and winter protein supplementation on growth, reproduction, and selenium status of cattle. *J Anim Sci.* 1986;63(2):586-94.
133. Slavík P, Illek J, Rajmon R, Zelený T, Jílek F. Selenium dynamics in the blood of beef cows and calves fed diets supplemented with organic and inorganic selenium sources and the effect on their reproduction. *Acta Vet Brno.* 2008;77(1):11-5.
134. Sánchez-Arciniega C, Ramírez-Godínez JA, Domínguez-Díaz D, Corral-Flores G, Grado-Ahuir JA, Flores-Mariñalarena A, et al. Respuesta de vacas Criollas de Rodeo a la suplementación con selenio y propionato de calcio, y a la sincronización de la ovulación. *Tecnociencia Chihuahua.* 2020;7(3):132-8. doi:10.54167/tch.v7i3.655.
135. Moeini MM, Karami H, Mikaeili E. Effect of selenium and vitamin E supplementation during late pregnancy on reproductive indices and milk production in heifers. *Animal Feed Science and Technology.* 2009;114(1-3):109-114.
136. Chen YH, Chen YM, Tu PA, Lee KH, Chen JY, Hsu JT. Effect of vitamin E, selenium, copper, zinc, and manganese supplementation during the transition period on reproductive performance and immune function in dairy cows. *Veterinary Sciences.* 2023;10(3):225. doi:10.3390/vetsci10030225
137. Khatti A, Mehrotra S, Patel PK, Singh G, Maurya VP, Mahla AS, et al. Supplementation of vitamin E, selenium and increased energy intake mitigates transition stress and improves postpartum reproductive performance in crossbred cows. *Theriogenology.* 2017;104:142-148.
138. Mehdi Y, Dufrasne I. Selenium in cattle: A review. *Molecules.* 2016;21(4):545. doi:10.3390/molecules21040545.
139. Hefnawy AEG, Tórtora-Pérez JL. The importance of selenium and the effects of its deficiency in animal health. *Small Ruminant Research.* 2010;89(3):185-192. doi:10.1016/j.smallrumres.2009.12.042.
140. Studer JM, Schweer WP, Gabler NK, Ross JW. Functions of manganese in reproduction. *Anim Reprod Sci.* 2022;238:106924.
141. Griffiths LM, Loeffler SH, Socha MT, Tomlinson DJ, Johnson AB. Effects of supplementing complexed zinc, manganese, copper and cobalt on lactation and reproductive performance of intensively grazed lactating dairy cattle on the South Island of New Zealand. *Anim Feed Sci Technol.* 2007;137(1-2):69-83.
142. Teixeira AGV, Lima FS, Bicalho MLS, Kussler A, Lima SF, Felipe MJ, et al. Effect of an injectable trace mineral supplement containing selenium, copper, zinc, and manganese on immunity, health, and growth of dairy calves. *J Dairy Sci.* 2014;97(7):4216–26.
143. Qashqai H, Amanlou H, Farahani TA, Farsuni NE, Bakhtiary MK. Effects of supplemental manganese on ovarian cysts incidence and reproductive performance in early lactation Holstein cows. *Anim Feed Sci Technol.* 2020;269:114660.

3. Diagnóstico mineral de vacas de carne en pastoreo

Ruth Manzayani Garcia-Fuerte ^{a*} Maximino Huerta Bravo ^a José Ricardo-
Álvares Rodríguez ^a Enrique Cortés Díaz ^b Laura Haydée Vallejo Hernández ^a y
Gustavo Sosa Pérez ^c

Universidad Autónoma Chapingo. Posgrado en Producción Animal,
Departamento de Zootecnia. Carretera México-Texcoco km 38.5, C.P. 56230,
Chapingo, Estado de México, México.

^b Universidad Autónoma Chapingo. Centro Regional Universitario Anáhuac.
Chapingo, Estado de México, México.

^c Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de preparatoria agrícola.
Chapingo, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia: manzayani28@gmail.com

Diagnóstico mineral de vacas de carne en pastoreo

Ruth Manzayani Garcia-Fuerte ^{a*}

Maximino Huerta Bravo ^a

José Ricardo-Álvares Rodríguez ^a

Enrique Cortés Díaz ^b

Laura Haydée Vallejo Hernández ^a

Gustavo Sosa Pérez ^c

^a Universidad Autónoma Chapingo. Posgrado en Producción Animal, Departamento de Zootecnia. Carretera México-Texcoco km 38.5, C.P. 56230, Chapingo, Estado de México, México. ^b Universidad Autónoma Chapingo. Centro Regional Universitario Anáhuac. Chapingo, Estado de México, México. ^c Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de preparatoria agrícola. Chapingo, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia: manzayani28@gmail.com

Resumen:

El objetivo de la presente investigación fue determinar las concentraciones minerales en forraje, agua, suero sanguíneo; así como signos clínicos de vacas en pastoreo. Se analizaron 25 vacas de raza Angus y Hereford de diferentes

estados fisiológicos, a las cuales se les tomaron muestras sanguíneas por venopunción. Las muestras de forraje se colectaron mediante la técnica de “hand-plucking” y el agua se colectó de las fuentes disponibles. La determinación de minerales se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica y espectrofotometría ultravioleta visible. El suero sanguíneo de las vacas presentó concentraciones deficientes de cobre (100 %), zinc (88 %), sodio (52 %), potasio (36 %) y fósforo (16 %). El hierro y manganeso estaban en concentraciones por arriba del rango normal. Se generó un Índice de clasificación de la deficiencia de cobre (IDCU): severa 0.41-0.48 mg L⁻¹, moderada > 0.48-0.54 mg L⁻¹ y ligera > 0.54 -0.79 mg L⁻¹. El 68, 20 y 12 % de las vacas correspondían a la clasificación dada respectivamente. Se identificaron los siguientes signos; abortos, cojeras, pelo: opaco, hirsuto y descolorido, lagrimeo, pelo acerado, bocio y pica. Para forraje se encontraron niveles deficientes de cobre (1.27 mg kg⁻¹) y zinc (24.5 mg kg⁻¹). En agua, cobre y zinc no fueron detectables y había exceso de hierro 0.345 (mg L⁻¹). En conclusión, la deficiencia primaria es cobre, ocasionada por las deficiencias en forraje, agua y posibles desbalances causados por otros minerales.

Palabras clave: Bovinos, Minerales, Deficiencia, Cobre y Zinc.

Recibido: 07/11/2024

Aceptado: 13/01/2025

Introducción

La ganadería en México es una actividad que se desarrolla en aproximadamente el 60 % del territorio nacional con una amplia diversidad de sistemas de producción⁽¹⁾. El sistema vacacría es el más importante en México, aunque también es el más vulnerable, ya que generalmente se desarrolla en condiciones de pastoreo, lo que lo vuelve dependiente de factores ambientales⁽²⁾. En estos

sistemas de producción la calidad de los forrajes puede ser oscilante y, por consiguiente, los aportes nutricionales son variables⁽³⁾.

Generalmente, el forraje no logra satisfacer los requerimientos nutricionales del ganado. Estos forrajes son insuficientes en minerales, los cuales son nutrientes esenciales para el desarrollo, crecimiento y reproducción⁽⁴⁾. La deficiencia de minerales en los bovinos ocasiona algunas alteraciones en la actividad reproductiva y metabólica, para evitar estas alteraciones es recomendable realizar una suplementación mineral^(5,6). Los animales en pastoreo presentan deficiencias de fósforo, cobre y zinc, principalmente, por esta razón se han realizado diversas investigaciones sobre la suplementación en este tipo de sistemas de producción^(7,8,9).

En la actualidad existen diversos métodos de suplementación mineral directos e indirectos y la elección del método más adecuado dependerá del tipo de sistema de producción, economía y disponibilidad^(9,10,11). Para poder realizar una suplementación efectiva y precisa es necesario conocer el estado del sistema de producción mediante un diagnóstico mineral completo que incluya suelo, agua, forraje, suero sanguíneo, objetivo de producción, época del año y manejo de los animales. La implementación de diagnósticos bioquímicos y minerales ayudan a efectuar una mejor evaluación del estado nutricional⁽¹⁰⁻¹³⁾. El objetivo de la presente investigación fue determinar las concentraciones minerales en forraje, agua, suero sanguíneo; y signos clínicos de vacas en pastoreo en Lagos de Moreno, Jalisco, México.

Material y métodos

La presente investigación se realizó en un sistema de producción vaca-cría, ubicado en el municipio de Lagos de Moreno, Jalisco, México 21° 21' 24" N 101° 56' 16" O. El clima es semiárido templado, la temperatura media anual es de 15.1 °C, y su temperatura mínima y máxima promedio oscila entre los 5.4 °C y 28.5

°C. La precipitación media anual es de 665 mm, mientras que la precipitación promedio acumulada es de 536.31 mm⁽¹⁴⁾.

Manejo de los bovinos. Se tomaron muestras sanguíneas de 25 animales de las razas Angus y Hereford en diferentes estados fisiológicos: gestantes, vacías, recién paridas y vaquillas, con diversas condiciones corporales y se manejaron en una manga y prensa para ganado. También se registró la presencia de signos asociados a las deficiencias minerales.

Manejo de muestras sanguíneas. La recolección de muestras sanguíneas se realizó por medio de la técnica de venopunción de la vena yugular, extrayendo 10 ml por vaca siguiendo los procedimientos definidos por Fick *et al*⁽¹⁵⁾. Dichas muestras se colocaron en tubos al vacío sin anticoagulante y se centrifugaron a 2,500 rpm durante 15 min. Después se obtuvo el suero sanguíneo, el cual se refrigeró y almacenó a -4 °C hasta el momento de su análisis.

Manejo de muestras de forraje. Se recolectaron 24 muestras de forraje en un agostadero compuesto de: banderilla (*Bouteloua curtipendula*), navajita (*Bouteloua gracilis*), bermuda (*Cynodon dactylon*) y guinea (*Panicum máximum*) en una superficie de 50 ha, dichas muestras fueron colectadas por la técnica de hand plucking ⁽¹⁶⁾, se mantuvieron en una bolsa de papel. Posteriormente se secaron en una estufa de aire forzado a 60 °C durante 48 h. Consecutivamente, se molieron, y mediante análisis proximal⁽¹⁶⁾ se determinó materia seca (MS), proteína cruda (PC), extracto etéreo y cenizas. Además, se determinó fibra detergente neutro (FDN) acorde a la metodología de Van Soest^(16,17). Para las determinaciones minerales se realizaron acorde a lo descrito por la metodología de Fick *et al*⁽¹⁵⁾.

Manejo de muestras de agua. Se colectaron 3 muestras de agua de cada fuente disponible para los animales (2 bordos y un bebedero que se encontraba dentro del corral de manejo), éstas se almacenaron en botes de plástico de 50 ml

previamente desmineralizados. Dichas muestras se filtraron antes de su determinación siguiendo la metodología descrita por Fick *et al*⁽¹⁵⁾. El muestreo se realizó en el mes de mayo (época seca).

Análisis de laboratorio. La determinación de concentraciones en suero, agua y forraje para los minerales Cu, Fe, Zn, Ca, Mg, Na, K y Mn se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica. La concentración de P de las muestras se determinó por medio de espectrofotometría ultravioleta visible, en ambas siguiendo la metodología descrita por Fick *et al*⁽¹⁵⁾.

Análisis estadístico. Los datos se analizaron con el procedimiento GLM en SAS⁽¹⁸⁾. Dado que la concentración de cobre en suero sanguíneo fue la más deficiente de los minerales estudiados se generó un índice de clasificación de deficiencia de cobre (IDCU): severo (0.41-0.48 mg L⁻¹), moderado (0.48-0.54 mg L⁻¹) y ligero (0.54 -0.79 mg L⁻¹). El IDCU se consideró como la variable dependiente y las concentraciones del resto de los minerales como variables independientes.

El modelo estadístico incluyó los siguientes parámetros:

$$Y_{ijk} = \mu + A_j + e_{ij}.$$

Donde Y = variable dependiente, μ = media global, A_j = (Concentraciones minerales) e_{ij} = error residual. La comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey.

Resultados

Concentración mineral en suero sanguíneo

Se encontraron concentraciones deficientes en suero sanguíneo de la mayoría de los minerales analizados. En el Cuadro 1 se observa que los minerales más

deficientes en las vacas son cobre (100 %), zinc (88 %) y sodio (52 %). Para los minerales potasio y fósforo existen algunos animales deficientes, sin embargo, la media general se encuentra dentro de los niveles adecuados. Cabe destacar que hierro y manganeso en suero sanguíneo se encontraron en concentraciones por encima de lo apropiado según Puls⁽¹⁹⁾.

Cuadro 1: Concentración mineral en suero sanguíneo de vacas productoras de carne

Mineral	Concentración mineral (mg L⁻¹)	Rango normal	Vacas deficientes (%)
Cobre	0.48 ± 0.07	0.8 - 1.5	100
Hierro	2.58 ± 0.57	1.3 - 2.5	0
Zinc	0.70 ± 0.09	0.8 - 1.4	88
Calcio	65.28 ± 10.30	37.6 - 48.8*	0
Magnesio	34.65 ± 10.53	18 - 30	0
Sodio	2879.80 ± 744.30	3100 - 3450	52
Potasio	167.54 ± 35.07	160 - 215	36
Manganeso	2.40 ± 22.51	0.006 - 0.070	0
Fósforo	56.38 ± 0.91	40 - 60	16

(19,20*)

Índice de clasificación de deficiencia de cobre (IDCU)

Uno de los minerales más deficientes fue el Cu, para el cual se generó un índice de clasificación de acuerdo con la severidad de la deficiencia, basado en las concentraciones de Cu en suero sanguíneo: severa, moderada y ligera. Dado que se trata de una deficiencia primaria, provoca diversos efectos, como la disminución del consumo de alimento y alteración entre la interacción, lo que a

su vez afecta el metabolismo de otros elementos. Sin embargo, tras analizar todos los elementos, no se encontró un efecto significativo, lo que podría atribuirse al número de animales presentes en cada grupo.

La mayoría de los animales muestreados se encontraban en la categoría de deficiencia severa (68 %). El 20 % de los animales se clasificó en la categoría de deficiencia moderada ($> 0.48-0.54 \text{ mg L}^{-1}$) y, por último, solo el 12 % de las vacas se detectaron con deficiencia ligera ($> 0.54 -0.79 \text{ mg L}^{-1}$) (Cuadro 2). Las concentraciones en suero sanguíneo de zinc, hierro, calcio, magnesio, sodio, potasio, fósforo y manganeso no fueron afectadas por el IDCU ($P>0.05$).

Cuadro 2: Índice de clasificación de deficiencia de cobre con relación a las diferentes concentraciones minerales en suero sanguíneo de vacas productoras de carne

IDCU	Rango (mg L^{-1})	AD (%)	Concentraciones minerales de acuerdo con cada clasificación (mg L^{-1})							
			Zn	Fe	Ca	Mg	Na	K	P	Mn
Severo	0.41- 0.48	68	0.68	2.8	65.5	34.6	2750	166	53	2.36
Moderado	0.48- 0.54	20	0.74	2.3	63.2	34.0	3154	159	66	2.70
Ligero	0.54- 0.79	12	0.71	1.9	67.8	36.1	3357	204	67	2.00
Probabil.	-	-	0.47	0.30	0.85	0.97	0.37	0.28	0.42	0.63

IDCU= índice de deficiencia de cobre; AD= animales deficientes; Zn= zinc; Fe= hierro; Ca= calcio; Mg= magnesio; Na= sodio; K= potasio; P= fósforo; Mn= manganeso; Probabil.= probabilidad.

En el índice de deficiencia de cobre se identificaron los signos más característicos

de deficiencias de minerales, donde el pelo opaco, hirsuto y descolorido se observó en el 100 % de los animales en clasificación severa y ligera. Pica está presente en cualquiera de las categorías: 50 a 60 % de los animales lo presentaban. Para el caso del lagrimeo, éste solo se presenta en el índice de deficiencia severa y ligera. Cabe recalcar que una vaca puede mostrar más de dos signos y todos los signos se observan en la clasificación de severo (Cuadro 3).

Cuadro 3: Índice de deficiencia de cobre con relación al porcentaje de animales que presentaban signos característicos de deficiencias de minerales

IDCU	Rango (mg L ⁻¹)	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Severo	0.41-0.48	33	17	100	39	29	39	33	50	22
Moderado	0.48-0.54	20	20	80	0	20	20	20	60	0
Ligero	0.54 -0.79	0	0	100	50	19	50	0	50	0

IDCU= índice de deficiencia de cobre; A = abortos; B = cojeras; C= pelo opaco, hirsuto y descolorido; D=

lagrimeo; E= pelo o lana acerada; F=bocio; G= inflamación de la ubre; H= pica; I= salivación excesiva.

Composición del forraje

El forraje analizado fue banderilla (*Bouteloua curtipendula*), navajita (*Bouteloua gracilis*), bermuda (*Cynodon dactylon*) y guinea (*Panicum máximum*) en una superficie total de 50 ha y se encontró seco y maduro tenía concentraciones deficientes de PC (<6 %), altos niveles de FDN (71.97 %), lo cual puede ser un indicio de que el forraje disponible está altamente lignificado, y concentraciones bajas de extracto etéreo (0.93 %). Se identificaron niveles deficientes de Cu (1.27 mg kg⁻¹) caso diferente para los demás minerales (Cuadro 4).

Cuadro 4: Concentraciones minerales en base seca del forraje (mg/kg para micro minerales y porcentaje para macrominerales)

	Cu	Fe	Zn	Mn	Na	K	Ca	Mg	P
Nivel		20	30	40					
crítico	10				0.06	0.8	0.3	0.1	0.25
Promedio	1.275 ± 23	± 24.5	± 176		± 0.03	± 0.33	± 0.40	± 0.20	± 0.38
+ DE	0.33	8.25	2.65	76.15	0.01	0.16	0.10	0.03	0.05

Cu= cobre; Fe= hierro; Zn= zinc; Mn= manganeso; Na= sodio; K= potasio; Ca= calcio; Mg= magnesio; P= fósforo.

Niveles críticos de minerales en forraje basados en necesidades de rumiantes⁽²¹⁾.

Minerales en agua de bebida

Los minerales, cobre y zinc en el agua fueron indetectables. El resto de ellos se encontraron dentro del rango normal sugerido por Puls⁽¹⁹⁾, con excepción del hierro, el cual sobrepasa los niveles máximos tolerables (349 mg L⁻¹) (Cuadro 5).

Cuadro 5: Concentración mineral en las diferentes fuentes de agua

Minerales	Cu	Fe	Zn	Mn	Na	K	Ca	Mg	P
Máximo tolerable	>1.0	<0.3	<25	<0.05	<800	<20	<1000	<1000	<0.7
Promedio	± ND	0.35 ±	ND	57.76 ±	1.71 ±	37.5 ±	18.84 ±	4.82 ±	711 ±
DE		0.05		20.24	0.34	12.1	3.25	0.06	277

Cu= cobre; Fe= hierro; Zn= zinc; Mn= manganeso; Na= sodio; K= potasio; Ca= calcio; Mg= magnesio; P= fósforo.

ND= no detectable; DE= desviación estándar.

Niveles máximos tolerables en agua⁽¹⁹⁾.

Discusión

En sistemas donde se analizan adecuadamente los componentes de la dieta para definir la suplementación mineral, se logran respuestas favorables en la producción con incrementos hasta de 16 % en ganancia diaria de peso⁽²²⁾. De acuerdo con los resultados de este trabajo, el cobre es un mineral que se encuentra deficiente en todos los animales analizados ($0.48 \pm 0.07 \text{ mg L}^{-1}$); esta deficiencia es relevante debido a que interviene en diversas funciones enzimáticas como cofactor, una de las más importantes es la ceruloplasmina, enzima dependiente del cobre⁽²³⁾.

El cobre también está relacionado con la embriogénesis, ya que promueve el desarrollo temprano del embrión, aumenta el porcentaje de blastocitos, y se menciona que podrían existir transportadores de Cu en el complejo cúmulo-ovocito⁽²⁴⁾. De aquí que, los efectos causados por la hipocuprosis se asocien a disminución de la concepción, ciclos anovulatorios y anestros, lo que provoca un incremento en los días abiertos, integridad del tracto reproductor y muerte embrionaria⁽²⁵⁾. Diversos estudios en humanos han demostrado la función del cobre en el sistema nervioso central y su relación con diversas enfermedades⁽²⁶⁾.

Arthington *et al*⁽²⁷⁾ definieron como el cobre interfiere en respuestas inmunológicas, pero cuando existe deficiencia se suprime la haptoglobina y fibrinógeno, y se provoca la respuesta inmune^(28,29,30). Phillippo *et al*⁽³⁰⁾ describieron como en vaquillas suplementadas con molibdeno se encontró pubertad tardía siendo este antagonista del cobre. Algunos autores mencionaron que el manganeso puede tener efectos sobre enzimas dependientes del Cu como la lisil oxidasa, causando efectos negativos en la reproducción^(31,32).

La deficiencia de cobre se ha reportado en la mayor parte del mundo y se considera que es la segunda deficiencia más relevante de animales en pastoreo⁽³³⁾. En un estudio sobre la prevalencia de la deficiencia de Cu en Canadá encontraron que la deficiencia variaba de un 24 a 43 % de la población estudiada⁽³⁴⁾. En otro trabajo⁽³⁵⁾ diagnosticaron 80 vacas con deficiencia de cobre, las cuales después de haber sido suplementadas se encontraron respuestas reproductivas favorables y disminución en patologías reproductivas como retención placentaria, metritis, piometras y quistes. Ramírez *et al*⁽³⁶⁾ encontraron más del 50 % de animales con deficiencia de cobre severa.

Zinc

Arthington y Ranches⁽³⁷⁾ mencionaron que el zinc es el tercer elemento con mayor deficiencia en animales de pastoreo, la función más destacable de este mineral se basa en la síntesis de ADN y ARN, procesos como la espermatogénesis y en la función inmunológica. Múltiples estudios señalan que el zinc es fundamental en el desarrollo animal^(38,39,40). Este nutriente está muy relacionado en la síntesis de proteínas, carbohidratos y otras funciones bioquímicas⁽⁴¹⁾. Davy *et al*⁽⁴²⁾ encontraron deficiencias que iban desde el 23 % hasta el 47 % en la región estudiada.

Sodio

El sodio es un macromineral considerado como un mineral electrolítico debido a que se encarga de mantener el equilibrio de los fluidos corporales, así como músculos y nervios⁽⁴³⁾. También interactúa en procesos de digestión y desnaturalización de los taninos⁽⁴⁴⁾. La hiponatremia se define como deficiencia de sodio y se considera deficiente cuando existen niveles de concentración en suero de $< 3,139.5 \text{ mg L}^{-1}$ ⁽⁴⁵⁾. Davy *et al*⁽⁴²⁾ encontraron algunas zonas de California con deficiencias de sodio y Olson *et al*⁽⁴⁶⁾ encontraron vacas con niveles por debajo de $3,523 \text{ mg L}^{-1}$. La deficiencia de sodio puede presentar algunos

signos clínicos como: pérdida de condición corporal, disminución en la ganancia de peso, y pica, que es un desorden donde el animal lame, mordisquea y consume objetos⁽⁴⁷⁾.

Índice de deficiencia de cobre

El mineral más deficiente en este diagnóstico fue el cobre. Cuya deficiencia se clasificó en severo (0.41-0.48 mg L⁻¹), moderado (0.48-0.54 mg L⁻¹) y ligero (0.54-0.79 mg L⁻¹). Se identificaron diversos signos característicos de deficiencia de minerales, los cuales se presentaron cuando la deficiencia era severa: abortos, cojeras, pelo opaco, hirsuto y descolorido, lagrimeo, pelo o lana acerada, bocio, inflamación de la ubre, pica, salivación excesiva. Entre más severa sea la deficiencia, mayor es la cantidad de signos presentes. Cuando es ligera la deficiencia, los signos encontrados son menos.

Pelo opaco, hirsuto y descolorido. En la clasificación de deficiencia severa, el 100 % de los animales presentaron pelo hirsuto, opaco y descolorido. El cobre está involucrado en la transformación de melanina a través de la polifenil oxidasa; la melanina es la encargada de proporcionar las coloraciones a la piel y el pelo^(48,49,50). Algunos trabajos^(52,53) describen que tonalidades de pelaje en color negro suelen volverse rojizas, y pelajes que son rojizos adquieren tonalidades amarillentas.

Cojeras y claudicación. Este signo también se considera característico de una deficiencia de Cu, y en el diagnóstico se observó que tanto para deficiencia severa como moderada se presenta, y es debido a la interacción que tiene el cobre con la enzima lisil oxidasa; esta enzima es parte importante de la formación de cadenas polipeptídicas de colágeno^(49,50). El cobre también se ha asociado a inflamación y endurecimiento de articulaciones, otros describen que el defecto de la queratina ocasiona uñas blandas, situación observada también en deficiencias de zinc^(51,52).

Abortos y alteraciones reproductivas. El papel del Cu en la reproducción aún no es muy claro, algunos autores describen que una deficiencia de Cu puede ocasionar abortos, reabsorciones embrionarias, anestros, alteración en el ciclo estral, disminución en el número y frecuencia de las pulsaciones de LH^(52,53,54). El cobre participa en la reducción de estrés oxidativo en el ovario; también se ha mencionado que el cobre participa en la síntesis y secreción de las gonadotropinas y el crecimiento folicular⁽⁵⁵⁻⁵⁸⁾.

Pelo acerado. El aspecto rizado del pelo es debido al disulfuro que está presente en la queratina, pero para convertirlo se necesita la transformación del sulfhidrilo a disulfuro, y esto lo llevan a cabo con las enzimas dependientes de cobre; cuando existe deficiencia de cobre el pelo se observa opaco, áspero y muy frágil^(59,52). Otros signos de deficiencia de cobre son; diarrea, ataxia neonatal, anemia y disminución de la condición corporal^(52,60).

Pica. La pica es un desorden que se presenta en animales y humanos, en el cual consumen, lamen y mordisquean objetos⁽⁶¹⁾. Su causa puede ser la deficiencia de uno o varios minerales, pero en algunas investigaciones describen que es una deficiencia de sodio, mineral que se mostraba deficiente en los animales muestreados⁽⁶²⁾. La deficiencia de sodio también provoca languidez, pelo reseco, debilidad, disminución en la producción de leche^(52,62). En un estudio realizado en Saskatchewan, Canadá para ver la prevalencia de deficiencia de minerales entre 2003 y 2012, encontraron los siguientes signos: abortos, muertes, vacas caídas, pérdidas neonatales, diarreas, terneros débiles y la deficiencia más común de minerales fue Cu (47.2 %)⁽⁶³⁾.

Forraje y agua

Los forrajes tenían concentraciones bajas de proteína (< 6 %), y altos para FDN (71.97 %), considerándose concentraciones típicas de los forrajes⁽⁶⁴⁾. Muñoz-

González *et al*⁽⁶⁵⁾ encontraron niveles de FDN de 64.6 a 66.4 %. También se identificaron deficiencias de Cu y Zn. En un estudio realizado en el trópico encontraron que casi el 91 % de forrajes tenía deficiencias de cobre y un 16 % de zinc y ninguno de los forrajes analizados alcanzó los niveles requeridos por los bovinos⁽⁶⁶⁾. En el agua, el hierro (349 mg L^{-1}) se encontró por encima de los niveles máximos tolerables y de acuerdo con algunos estudios, existe una contaminación de este mineral, el cual puede provocar antagonismo con algunos otros⁽⁶⁷⁾.

Antagonismo del hierro y cobre

El hierro es uno de los minerales esenciales para los animales y más abundante en la tierra; se considera que está presente en todas las fuentes de alimento, así que los animales que se encuentran en pastoreo consumen grandes cantidades de éste^(68,69). El hierro es antagonista de algunos minerales como lo son Cu, Mn y Zn⁽⁷⁰⁾. El metabolismo del cobre se ve afectado por concentraciones elevadas de Fe, Zn y S; se ha descrito que ganado que tenía niveles de hierro arriba del rango normal, mostraban una deficiencia de cobre, lo que desencadenó hipocupremia, situación reportada en aguas ricas en Fe^(70,71).

Resultados previos encontrados de México

En un estudio hicieron evaluación de suero sanguíneo y encontraron que, la concentración de Cu fue deficiente por debajo del nivel crítico, principalmente en las localidades Benito

Juárez 0.36 mg dl^{-1} y Jilotepec 0.46 mg dl^{-1} , del estado de México; en esta última, el Cu también fue bajo en el forraje⁽⁷²⁾. Así también, en la misma localidad se encontró deficiencias de zinc en suero sanguíneo: 0.55 mg dl^{-1} . Como se puede identificar misma situación que pasó con el ganado muestreado⁽⁷²⁾. En Chihuahua, en un estudio desarrollado en varias localidades se encontró deficiencia de fósforo y hierro y en tres localidades, y deficiencia de cobre⁽⁷³⁾. Las

deficiencias de Cu son generalizadas en todo el país, tanto en bovinos, ovinos y caprinos. En un estudio realizado en el estado de Yucatán se encontró en zonas que hasta el 99 % de los animales tenían esta deficiencia con un contenido promedio de Cu inferior a 2 ppm⁽⁷⁴⁾.

Al analizar el forraje en San Luis Potosí encontraron que existió más Fe ($P \leq 0.05$) en la época seca, lo cual coincide con lo encontrado, y se coincide que las concentraciones de los minerales encontrados en el forraje no satisfacen los requerimientos del ganado en pastoreo⁽⁷²⁾. Muñoz-González *et al*⁽⁷⁵⁾, encontraron que el forraje estaba por debajo del nivel mínimo para Cu, el 100 %; Zn, el 28 %; y P, el 72 %⁽⁷⁵⁾.

Conclusiones e implicaciones

El ganado del rancho estudiado, que se ubica en la zona árida y semiárida del país presenta deficiencia de cobre, la cual está relacionada con la deficiencia existente de este mineral en forraje y agua. Cuando la deficiencia de cobre es severa, aparecen más signos clínicos en el animal como: abortos, cojeras, pelo opaco, hirsuto y descolorido, lagrimeo, pelo o lana acerada, bocio, y pica. Otro problema en el ganado es la deficiencia de zinc que también puede contribuir a la presencia de signos clínicos y desbalances minerales. El exceso de hierro en forraje y agua contribuye a las deficiencias de cobre por el antagonismo que existe entre ellos.

Agradecimientos y conflicto de intereses

A la Secretaría de Ciencias Humanidades Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada. AL Rancho Los Fresnos y la señora Marisa Candiani Castañeda por el apoyo para trabajar con su ganado. Por último, al Laboratorio

de Nutrición en Rumiantes del Departamento de Zootecnia de la Universidad Autónoma Chapingo.

Los autores declaramos que no existe ningún conflicto de intereses para la divulgación de los resultados, discusión, análisis de datos y conclusiones presentados en el presente trabajo.

Literatura citada:

1. Enríquez-Quiroz JF, Esqueda-Esquivel VA, Martínez-Méndez D. Rehabilitación de praderas degradadas en el trópico de México. *Rev Mex Cienc Pecu* 2021;243(60).
2. Bautista-Martínez Y, Granados-Zurita L, Joaquín-Cancino S, Ruiz-Albarrán M, GarayMartínez JR, Infante-Rodríguez F, *et al*. Factores que determinan la producción de becerros en el sistema vaca-cría del Estado de Tabasco, México. *Nova Scientia* 2020;12(25). <http://dx.doi.org/10.21640/ns.v12i25.2117>.
3. Almeraya SS, Mora FJS, García SJA, Hernández MO, Almeraya QSX. Caracterización de la cadena de abasto de ganado bovino producida en la zona norte de Veracruz. *Agricultura Sociedad y Desarrollo* 2024;21(2). <http://dx.doi.org/10.22231/asyd.v21i2.1602>.
4. Navas PA, Aragón HLF, Triana VJF. Efecto del componente arbóreo sobre la dinámica de crecimiento y calidad nutricional de una pradera mixta en trópico alto. *Rev Med Vet* 2020;1(41):71–82. <https://doi.org/10.19052/mv.vol1.iss41.7>.
5. Da Silva CEI. Suplementação e formulação de sal mineral y mistura múltipla para bovinos. *Rev Universitaria Brasileira* 2024;2(1)(10.5281/zenodo.11069052). (hal-04543118).

6. Anchordoquy JM, Anchordoquy JP, Galarza EM, Farnetano NA, Giuliadori MJ, Nikoloff N. Parenteral zinc supplementation increases pregnancy rates in beef cows. *Biol Trace Element Res* 2019;192(2):175–82. <http://dx.doi.org/10.1007/s12011-019-1651-8>.
7. Depablos L, Ordóñez J, Godoy S, Chicco CF. Suplementación mineral proteica de novillas a pastoreo en los Llanos Centrales de Venezuela. *Zoot Trop* 2009;27(3):249-262.
8. Jiménez-Páez JO, Huerta BM, López AR, Ruíz FA, Rodríguez PG. Bolos intrarruminales para suplementar minerales traza en rumiantes. Revisión. *Avances Invest Agropec* 2020;24(1):35-46.
9. León-Cruz M, Ramirez-Bibriesca E, López-Arellano R, Miranda-Jiménez L, RodríguezPatiño G, Díaz-Sánchez VM, *et al.* Bolos intrarruminales con liberación controlada de minerales traza. Revisión. *Rev Mex Cienc Pecu* 2020;11(2):498-516.
10. Acosta Portillo M, Uran N, Britez L, Pedrozo Prieto R. Perfil bioquímico mineral en vacas cruzadas de Cebú preñadas y vacías de un establecimiento de Caragatatay (Paraguay). *Compendio Cient Vet* 2020;10(2):5-11.
11. Duffy R, Yin M, Redding LE. A review of the impact of dietary zinc on livestock health. *J Trace Elements Minerals* 2023;5(100085):100085. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtemin.2023.100085>.
12. Salamanca, A. Suplementación de minerales en la producción bovina. *REDVET*. 2010;11(9):1-10. <https://www.redalyc.org/pdf/636/63615732008.pdf>.
- 13 Ruiz-Albarran M, Balocchi O, Wittwer F, Pulido RG. Evaluación de la fermentación ruminal en vacas lecheras en pastoreo otoñal utilizando muestras de líquido ruminal obtenidas por rumenocentesis. *Vet Prod* 2024;1(2):5-14. <https://cienciasveterinariasyproduccionanimal.uat.edu.mx/index.php/cienciasVeterinarias/article/view/19>.

14. INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. División geoestadística municipal y población total por municipio. https://en.www.inegi.org.mx/contenidos/app/areasgeograficas/resumen/resumen_01.pdf.
15. Fick KR, McDowell LR, Miles PH, Wilkinson NS, Furik JD, Conrad JH, Valdivia R. Métodos de análisis de minerales para tejidos de plantas y animales. Florida, USA: Universidad de Florida;1979.
16. AOAC. Official methods of analysis. 15th ed. Arlington; Association of official analytical chemists, Inc; 1990.
17. Van Soest, P. Nutritional ecology of the ruminant. 2^a ed. USA: Cornell University Press; 1994.
18. SAS (versión 9.3; SAS Institute Inc., Cary, Carolina del Norte).
19. Puls R. Mineral levels in animal health: diagnostic data. Sherpa International. British Columbia, Canada. 1994.
20. Kvart C, Larsson L. Studies on ionized calcium in serum and plasma from normal cows. Its relation to total serum calcium and the effects of sample storing. Acta Vet Scand 1978;19(4):487–496.
21. McDowell LR, Arthington JD. Minerals for grazing ruminants in tropical regions. University of Florida IFAS. 2005;90.
22. Ocampos ODA, Paniagua Alcaraz PL, Tobal CF, Portillo G. Desarrollo y ajuste en campo de un modelo de simulación para cálculo y evaluación de requerimiento mineral en ganado bovino de carne mantenido sobre Pastizal nativo. Cienc Vet 2023;25(2):111–24. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S185384952023000200009&lang=pt.
23. Arthington JD, Pate FM, Spears JW. Effect of copper source and level on performance and copper status of cattle consuming molasses-based

supplements. J Anim Sci 2003;81(6):1357–62.
<http://dx.doi.org/10.2527/2003.8161357x>.

24 Gómez Rendón J, Del Campo M, González Tous M. Algunas anotaciones sobre la importancia del cobre en la reproducción bovina. Rev Colomb Cienc Anim 2019;11(1). <http://dx.doi.org/10.24188/recia.v11.n1.2019.716>.

25 Zatta P, Frank A. Copper deficiency and neurological disorders in man and animals. Brain Res Rev 2007;54(1):19–33
<http://dx.doi.org/10.1016/j.brainresrev.2006.10.001>.

26.Arthington JD, Corah LR, Blecha F. The effect of molybdenum-induced copper deficiency on acute-phase protein concentrations, superoxide dismutase activity, leukocyte numbers, and lymphocyte proliferation in beef heifers inoculated with bovine herpesvirus-1. J Anim Sci 1996;74(1):211.
<http://dx.doi.org/10.2527/1996.741211x>.

27.Heegaard PM, Godson DL, Toussaint MJ, Tjørnehøj K, Larsen LE, Viuff B, *et al*. The acute phase response of haptoglobin and serum amyloid A (SAA) in cattle undergoing experimental infection with bovine respiratory syncytial virus. Vet Immunol Immunopathol 2000;77(1–2):151–9.
[http://dx.doi.org/10.1016/s0165-2427\(00\)00226-](http://dx.doi.org/10.1016/s0165-2427(00)00226-9)
9.

28.Stokka GL, Edwards AJ, Spire MF, Brandt RT, Smith JE. Inflammatory response to clostridial vaccines in feedlot cattle. JAVMA 1994;204(3):415–9.
<http://dx.doi.org/10.2460/javma.1994.204.03.415>.

29.Arthington JD, Cooke RF, Maddock TD, Araujo DB, Moriel P, DiLorenzo N, Cordero GC Effects of vaccination on the acute-phase protein response and measures of performance in growing beef calves. J Anim Sci 2013;91(4):1831–7. <http://dx.doi.org/10.2527/jas.2012-5724>.

30.Phillippo M, Humphries WR, Atkinson T, Henderson GD, Garthwaite PH. The effect of dietary molybdenum and iron on copper status, puberty, fertility

- and oestrous cycles in cattle. *J Agric Sci* 1987;109(2):321–36. doi:10.1017/S0021859600080758.
31. Mason J. Thiomolybdates: Mediators of molybdenum toxicity and enzyme inhibitors. *Toxicology* 1986;42(2–3):99–109. [http://dx.doi.org/10.1016/0300-483x\(86\)90001-6](http://dx.doi.org/10.1016/0300-483x(86)90001-6).
32. Kendall NR, Marsters P, Scaramuzzi RJ, Campbell BK. Expression of lysyl oxidase and effect of copper chloride and ammonium tetrathiomolybdate on bovine ovarian follicle granulosa cells cultured in serum-free media *Reproduction* (Cambridge, England) 2003;125(5):657-665.
33. Waldner C, McLeod L, Parker S, Campbell J. Update on copper and selenium in Canadian cow–calf herds: regional differences and estimation of serum reference values. *Transl Anim Sci* 2023;7(1). <http://dx.doi.org/10.1093/tas/txad062>.
34. Hernández-Arroyave W, Jiménez-Arango F. Determinación de los contenidos de cobre en función de su interrelación en los suelos, forrajes y ganado bovino en la región del Magdalena Medio. *Vetzootec* 2018;12(1):01-13. <https://revistasoj.s.ucaldas.edu.co/index.php/vetzootec/article/view/3342>.
35. García JR, García-López Cuesta M, Figueredo JM, Quiñones R, Faure R, *et al.* Los niveles sanguíneos de cobre y su influencia en los indicadores reproductivos de la hembra bovina en las condiciones del trópico. *Rev Cubana Cienc Agr* 2010;44(3):239-245.
36. Ramírez CE, Tittarelli CM, Mattioli GA, Giuliadori M, Puchuri MC. Hipocupremia bovina en 5 partidos de la Provincia de Buenos Aires (Argentina). *Vet Arg* 1997;14:12-17.
37. Arthington JD, Ranches J. Trace mineral nutrition of grazing beef cattle. *Animals* 2021;11(10):2767. <http://dx.doi.org/10.3390/ani11102767>.

38. Arthington JD, Corah LR, Hill DA. The effects of dietary zinc concentration and source on yearling bull growth and fertility. *PAS* 2002;18(3):282–285. [https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)31534-5](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)31534-5).
39. Duff GC, Galyean ML. Board-Invited Review: Recent advances in management of highly stressed, newly received feedlot cattle. *J Anim Sci* 2007;85(3):823–840. <http://dx.doi.org/10.2527/jas.2006-501>.
40. Messersmith EM, Smerchek DT, Hansen SL. The crossroads between zinc and steroidal implant-induced growth of beef cattle. *Animals* 2021;11(7):1914. <http://dx.doi.org/10.3390/ani11071914>.
41. Ozturk H, Niazi P, Mansoor M, Monib AW, Alikhail M, Azizi A. The function of zinc in animal, plant, and human nutrition. *JRASB* 2023;2(2):35–43. <http://dx.doi.org/10.55544/jrasb.2.2.6>.
42. Davy JS, Forero LC, Shapero MWK, Rao DR, Becchetti TA, Koopman Rivers C, *et al*. Mineral status of California beef cattle. *Transl Anim Sci* 2019;3(1):66–73. <http://dx.doi.org/10.1093/tas/txy114>.
43. Sodium in your diet. U.S. Food and Drug Administration. FDA; 2024 <https://www.fda.gov/food/nutrition-education-resources-materials/el-sodio-en-su-dieta>.
44. Kaspari M. The seventh macronutrient: how sodium shortfall ramifies through populations, food webs and ecosystems. *Eco Lett* 2020;23(7):1153–68. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32380580/>.
- 45 Hoorn EJ, Liamis G, Zietse R, Zillikens MC. Hyponatremia and bone: an emerging relationship. *Nat Rev Endocrinol* 2012;8(1):33–9. <http://dx.doi.org/10.1038/nrendo.2011.173>.
- 46 Olson WG, Link KRJ, Otterby DE, Stevens JB. Assessment of sodium deficiency and polyuria/polydipsia in dairy cows. *The Bovine Practitioner* 1989;128–133. <http://dx.doi.org/10.21423/bovine-vol0no24p128-133>.

47. Rodríguez A, Banchemo G. Deficiencia de minerales en rumiantes. *Revista INIA* 2007;13:11-15.
48. García-Márquez LJ, Ramírez-Romero R, Martínez-Burnes J, López-Mayagoitia A, RuízRamírez JA, Loman-Zúñiga EI, *et al.* Ataxia enzoótica por deficiencia de cobre en ciervo rojo (*Cervus elaphus*) cautivo en Colima, México. *Rev Mex Cienc Pecu* 2022;12(4):1326–37. <http://dx.doi.org/10.22319/rmcp.v12i4.5750>.
49. Rosa DE, Mattioli GA. Metabolismo y deficiencia de cobre en los bovinos. *Analecta Vet* 2002;22:1. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/11140>. Consultado 8 Oct, 2024.
50. Depablos L, Godoy S, Chicco CF, Ordoñez J. Nutrición mineral en sistemas ganaderos de las sábanas centrales de Venezuela. *Zoot Trop* 2009;27(1):027–38. https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0798-72692009000100004&script=sci_arttext. Consultado 12 Oct, 2024.
51. Quiroz-Rochac G, Bouda J. Fisiopatología de las deficiencias de cobre en rumiantes y su diagnóstico. *Vet México* 2001;32(4):289-296.
52. Huerta BM. Alimentación y suplementación mineral. Sitio Argentino de Producción Animal. Engormix. 2016. Disponible en: produccion-animal.com.ar. Consultado 18 Oct, 2024.
53. Mertz W, Davis GK. Copper. In: Mertz W, editor. Trace elements in human and animal nutrition. Vol I. 5th ed. Philadelphia: Academic Press; 1986.
54. Ingraham RH, Kappel LC, Morgan EB, Srikandakumar A. Correction of subnormal fertility with copper and magnesium supplementation. *JDS* 1987;70(1):167–80. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(87\)79991-3](http://dx.doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(87)79991-3).
55. Du Z, Hemken RW, Harmon RJ. Copper metabolism of Holstein and Jersey cows and heifers fed diets high in cupric sulfate or copper proteinate.

J Anim Sci 1996;79(10):1873–80. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(96\)76555-4](http://dx.doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(96)76555-4).

56. Torres G, Paez R, Azúm J, Roller F, González N, Acosta J, *et al*. Uso del sulfato de cobre por vía parenteral en vacas hipocuprémicas con mastitis y su efecto en la fertilidad. La Técnica 2016;(16):56.
<https://agris.fao.org/search/en/providers/122436/records/64747b92425ec3c088f67abb>. Consultado 16 Oct, 2024.
57. García J, Cuesta M, Pedroso R, Gutiérrez M, Mollineda A, Figueredo J. Efecto del cobre sobre la reproducción en novillas lecheras de Cuba. Rev MVZ Córdoba 2006;11(2).
<http://dx.doi.org/10.21897/rmvz.442>.
58. Hernández-Arroyave W, Ocampo-Ortiz PE, Montoya-Flórez LM, Bustamante-Cano JJ. Suplementación parenteral de cobre y su relación con índices de fertilidad en bovinos de regiones con altos niveles de molibdeno en el Magdalena Medio colombiano. Vetzootec 2016;10(1):01-12. doi: <https://doi.org/10.17151/vetzo.2016.10.L1>.
59. Amin BY, Dar RR, Ali A, Malla JA, Shubeena S. Role of micro-nutrients in bovine reproduction. Theriogenology Insight - Int J Reprod All Anim 2016;6(1):57. <http://dx.doi.org/10.5958/2277-3371.2016.00008.5>.
60. Riaz M, Muhammad G. Deficiencia de cobre en rumiantes en Pakistán. Matrix Sci Medica 2018;2(1):18-21.
61. Jin X, Meng L, Zhang R, Tong M, Qi Z, Mi L. Effects of essential mineral elements deficiency and supplementation on serum mineral elements concentration and biochemical parameters in grazing Mongolian sheep. Front Vet Sci <http://dx.doi.org/10.3389/fvets.2023.1214346>.

62. Perdrizet U, Blakley B, Al Dissi A. Concentrations and deficiencies of minerals in cattle submitted to a diagnostic laboratory in Saskatchewan from 2003-2012: A retrospective study. *Can Vet J* 2020;61(1):57–62.
63. Villanueva-Avalos JF, Vázquez-González A, Quero-Carrillo AR. Atributos agronómicos y producción de forraje en ecotipos de *Cenchrus purpureus* en condiciones de trópico subhúmedo. *Rev Mex Cienc Agríc* 2022;(27):1–9. <http://dx.doi.org/10.29312/remexca.v13i27.3147>.
64. Muñoz-González JC, Huerta BM, Lara BA, Rangel SR, De la Rosa AJL. Producción y calidad nutrimental de forrajes en condiciones del Trópico Húmedo de México. *Rev Mex Cienc Agríc* 2016;3315–3327.
65. Muñoz-González JC, Huerta BM, Rangel-Santos R, Lara-Bueno A, De La Rosa-Arana JL. Evaluación mineral de forrajes del trópico húmedo mexicano. *Trop Subtrop* 2014; 17:285–287.
- 66 Rivas JRR, Jaramillo CAR, Baquerizo CJR, Córdova MRA. Estudio de los procesos de remoción de hierro y manganeso en aguas subterráneas: una revisión. *Polo del Conocimiento: Rev Científico-profesional* 2021;6:1384–1407.
- 67 NASEM. Nutrient requirements of beef cattle, 8th ed. Washington, DC, USA: The National Academies Press; 2016.
68. Cheng J, Kolba N, Tako E. The effect of dietary zinc and zinc physiological status on the composition of the gut microbiome *in vivo*. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2024;64(18):6432–51. <http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2023.2169857>.
69. Pinto-Santini L, Godoy S, Chicco C, Chacón T. Efecto de altos niveles de hierro y molibdeno sobre la nutrición del cobre en vacas mestizas. *Rev Cient (Maracaibo)* 2007;17(6):588–96.

70. Mullis LA, Spears, JW, McCraw, RL. Efectos de la raza (Angus vs. Simmental) y la fuente de cobre y zinc en el estado mineral de novillos alimentados con una dieta rica en hierro. *J Anim Sci* 2003;81:318–322.
71. Krueger KM, Vavrus CE, Lofton ME, McClure RP, Gantzer P, Carey CC, *et al.* Iron and manganese fluxes across the sediment-water interface in a drinking water reservoir. *Water Res* 2020;182(116003):116003. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2020.116003>.
72. Almaraz EM, Vara ID, González-Ronquillo M, Escutia GJ, Ortega OC, Sálas, NP, Huerta BM. Diagnóstico mineral en forraje y suero sanguíneo de bovinos lecheros en dos épocas en el valle central de México. *Tec Pecu Méx* 2007;45(3):329-344.
73. Maltos R, Carrete F, Rodríguez J, Turriza-Chan JL, Castellanos-Ruelas AF, RosadoRubio JG, *et al.* Concentración de minerales en el agua, suelo, forraje y ganado bovino de la región sur del Estado de Coahuila. *Agrociencia* 1989;44(4):471–480.
74. Turriza-Chan JL, Castellanos-Ruelas AF, Rosado-Rubio JG, Hetedia y Aguilat M, Cabrera-Torres E. Diagnóstico de la concentración mineral en tejido óseo de ovinos en pastoreo en el Estado de Yucatán, México. *Agrociencia* 2010;44(4):471–480.
75. Muñoz-González J, Huerta-Bravo M, Bueno AL, Santos RR, de la Rosa-Arana JL. Producción y calidad nutrimental de forrajes en condiciones del trópico húmedo de México. *REMEXCA*.2017;3315–3327. <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V0I16.399>.

Artículo en extenso del artículo corto publicado en *journal of animal science*

Garcia Fuerte & Huerta Bravo, PSXIV-1 Trace mineral supplementation of beef cows., *Journal of Animal Science*, Volume 103, Issue Supplement_3, October 2025, Pages 638–639, DOI: [10.1093/jas/skaf300.722](https://doi.org/10.1093/jas/skaf300.722)

4. Trace element supplementation coupled to an estrus synchronization protocol in beef cows

Ruth Manzayani García-Fuerte ^{a*} Maximino Huerta Bravo ^a Gustavo Sosa

Pérez^b Laura Haydée Vallejo Hernández ^a y Enrique Cortés Díaz ^c

Universidad Autónoma Chapingo. Posgrado en Producción Animal,
Departamento de Zootecnia. Carretera México-Texcoco km 38.5, C.P. 56230,
Chapingo, Estado de México, México.

^b Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de preparatoria agrícola.
Chapingo, Estado de México, México.

^c Universidad Autónoma Chapingo. Centro Regional Universitario Anáhuac.
Chapingo, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia: manzayani28@gmail.com

Suplementación de minerales traza acoplada a un protocolo de sincronización del estro en vacas productoras de carne

Trace element supplementation coupled to an estrus synchronization protocol in beef cows

El objetivo fue evaluar un suplemento de oligoelementos líquidos para vacas de pastoreo. El protocolo de sincronización consistió en la inserción de un progestágeno por 9 días (CIDR). En el primer día se insertó el progestágeno y 2 mg de cipionato de estradiol. El séptimo día del protocolo, se retiró el CIDR y a las vacas se les inyectó 400 UI de gonadotropina coriónica equina (ECG), 0,500 mg de cloprostenol sódico y 1 mg de cipionato de estradiol. Posterior a esto 48 h después se realizó la inseminación artificial a tiempo fijo (IATF). Los suplementos fueron aplicados G2 (Multimin®90) 30 días antes del inicio del protocolo de acuerdo con lo indicado por el proveedor. Y el G1 (Oral Drench) se suministró los días 1 y 7 del protocolo de sincronización. La tasa de gestación fue determinada por una ecografía el día 35. Las concentraciones de minerales no se vieron afectadas significativamente ($p > 0.05$) por la suplementación, pero los niveles de cobre y zinc fueron más bajos y deficientes en el 9º día ($p < 0.01$). El Oral Drench resultó en una menor disminución en la concentración plasmática de cobre ($p < 0.05$) y un mayor aumento en el selenio con el tiempo en comparación con G2, mientras que el zinc no cambió ($p > 0.05$). Las vacas que recibieron G1 tuvieron una tasa de preñez mayor (68 %) que las vacas G2 (40 %) ($p < 0,001$). La suplementación estratégica con minerales traza de forma líquida mejoró las tasas de preñez en vacas de carne bajo sincronización de celo.

Abstract

The objective was to evaluate a liquid trace element supplement for pastured cows. The synchronization protocol consisted of the insertion of a progestogen for 9 days (CIDR). On the first day, progestogen and 2 mg of estradiol cypionate were inserted. On the seventh day of the protocol, the CIDR was withdrawn, and cows were injected with 400 IU of equine chorionic gonadotropin (ECG), 0.500 mg of cloprostenol sodium, and 1 mg of estradiol cypionate. After this, 48 h later, fixed-time artificial insemination (IATF) was performed. Supplements were applied G2 (Multimin®90) 30 days prior to the start of the protocol as indicated by the provider. And G1 (Oral Drench) was administered on days 1 and 7 of the synchronization protocol. The pregnancy rate was determined by ultrasound on day 35. Mineral concentrations were not significantly affected ($p > 0.05$) by supplementation, but copper and zinc levels were lower and deficient on day 9 ($p < 0.01$). The Oral Drench resulted in a smaller decrease in plasma copper concentration ($p < 0.05$) and a greater increase in selenium overtime compared to G2, while zinc did not change (>0.05). Cows that received G1 had a higher pregnancy rate (68%) than G2 cows (40%) ($p < 0.001$). Strategic supplementation with trace minerals in liquid form improved pregnancy rates in beef cows under heat synchronization.

Palabras clave: selenio, sincronización de celo, fertilidad, gestación

Introducción

Los minerales traza (TM) como el cobre (Cu), el zinc (Zn), el selenio (Se) y el

manganeso (Mn) desempeñan un papel fundamental en diversos procesos fisiológicos, incluidas algunas funciones reproductivas del ganado⁽¹⁾. Estos minerales funcionan como cofactores para numerosas enzimas y están involucrados en los mecanismos de defensa antioxidante, la síntesis de hormonas y las respuestas inmunes, todos los cuales son fundamentales para una reproducción exitosa^(1,3). Las deficiencias o desequilibrios de los MT podrían conducir a una actividad ovárica deteriorada, tasas de concepción reducidas y mayores pérdidas de embriones, lo que afecta la eficiencia general de los programas de manejo reproductivo^(4, 5, 6).

En la producción de ganado bovino, los protocolos de sincronización se utilizan comúnmente para monitorear y mejorar el rendimiento reproductivo y se han utilizado desde hace décadas, y con el paso del tiempo se busca a través de la combinación con suplementos minerales, vitaminas o aditivos para mejorar sus efectos^(7, 8). Las investigaciones de la suplementación estratégica de MT acoplados a un protocolo de sincronización se han realizado con el fin de determinar beneficios potenciales en los resultados reproductivos⁽⁹⁾. La suplementación con minerales traza inyectables antes de la gestación o en periodos de empadre, mejora las tasas de concepción en comparación con un protocolo de inseminación artificial a tiempo fijo en vacas de carne⁽¹⁰⁾. Del mismo modo, los resultados de algunos estudios sugieren que la suplementación con MT mejoró la función inmunológica, lo cual es crucial durante el período pre y postparto y puede mejorar indirectamente el éxito reproductivo^(2, 11). Sin embargo, la eficacia de la suplementación con MT varía según factores como la

forma estructural del mineral (orgánico a inorgánico), la vía de administración (oral vs inyectable) y el momento de los eventos reproductivos (12). El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de un suplemento de oligoelementos líquidos en la eficiencia reproductiva de las vacas de pastoreo.

Material y métodos

Esta investigación se realizó en un sistema vaca-cría, ubicado en el municipio de Lagos de Moreno, Jalisco, México, a 21° 21' 24" N y 101° 56' 16" W. La región tiene un clima templado semiárido, con una temperatura media anual de 15,1 °C. La temperatura media oscila entre 5,4 y 28,5 °C. El área de estudio tiene una combinación de veranos cálidos e inviernos suaves, con patrones de precipitación típicamente concentrados durante los meses de verano⁽¹³⁾.

Protocolo

Se formuló un Oral Drench (G1) que incluía cobre, zinc, selenio, cobalto y yodo. Estos minerales proporcionaron, como mínimo los niveles requeridos de estos minerales durante cuatro días. Este suplemento de minerales traza se comparó con un suplemento mineral inyectable, MULTIMIN®90 (Multimin North America, Inc. Fort Collins, CO 80528, EUA) (G2), acoplado a un protocolo de sincronización del estro aplicado a cincuenta vacas multíparas en pastoreo. El protocolo de sincronización de estro duró nueve días.

El protocolo de sincronización consistió en la inserción de un progestágeno por 9 días (CIDR). En el primer día se insertó el progestágeno y 2 mg de cipionato de

estradiol. El séptimo día del protocolo, se retiró el CIDR y a las vacas se les inyectó 400 UI de gonadotropina coriónica equina (ECG), 0,500 mg de cloprostenol sódico y 1 mg de cipionato de estradiol. Posterior a esto 48 h después se realizó la inseminación artificial a tiempo fijo (IATF). Los suplementos minerales fueron aplicados G2 (Multimin®90) 30 días antes del inicio del protocolo de acuerdo con lo indicado por el proveedor. Y el G1 (Oral Drench) se suministró los días 1 y 7 del protocolo de sincronización.

Manejo de animales, recolección y muestras de sangre para análisis de minerales

Se recolectaron muestras de sangre de 50 vacas Angus bajo el protocolo de sincronización. Se evaluó el estado reproductivo de las vacas, ya sea que estuvieran cicladas o anéstricas. También se evaluaron estructuras ováricas, la calidad del útero y los cuernos uterinos. Las vacas se manejaron de manera segura en una manga para ganado.

Se obtuvieron muestras de sangre para su posterior análisis⁽¹⁴⁾. Las muestras de sangre se recolectaron por venopunción yugular, extrayendo 10 mL por vaca siguiendo los procedimientos descritos por Fick ⁽¹⁴⁾. Las muestras se colocaron en tubos de vacío sin anticoagulante y se centrifugaron a 3.500 rpm durante 10 min. El suero resultante se refrigeró y almacenó a -4 °C hasta su posterior análisis.

Pruebas de laboratorio

Las concentraciones séricas de Cu, Zn y Se, se determinaron mediante espectrofotometría de absorción atómica, siguiendo la metodología descrita por Fick⁽¹⁴⁾ utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica PerkinElmer A-700.

Diagnóstico de gestación

El diagnóstico de gestación se realizó el día 35 post IA y se determinó mediante ecografía con un ultrasonido SIUI CTS-800.

Análisis estadístico

Las concentraciones de minerales se analizaron mediante los procedimientos GLM y MIXED dentro de un diseño factorial 2×2, donde los dos factores fueron el tipo de suplemento mineral y el día del protocolo. Este enfoque nos permitió evaluar los principales efectos, así como la interacción entre ellos. No hubo replicación del tratamiento para visualizar las tendencias de la concentración de minerales a lo largo del tiempo. Se utilizó PROC SGPLOT para generar gráficos de trayectoria. Además, la tasa de gestación se analizó utilizando una técnica bootstrap para estimar la variabilidad y los intervalos de confianza sin depender de supuestos distributivos estrictos (SAS Institute, 2024).

Resultados y discusión

La investigación analizó los efectos del Oral Drench y la suplementación de minerales traza inyectable sobre las concentraciones en suero sanguíneo de los minerales, así como también los rendimientos reproductivos de las vacas sincronizadas.

De acuerdo con los resultados encontrados el tipo de suplementación no afectó las concentraciones séricas ($p < 0,01$). de cobre (Cu), zinc (Zn) y selenio (Se) Sin embargo, existieron diferencias significativas por el día de la suplementación para cobre y zinc las cuales se observaron en el día 9 del protocolo ($p < 0,01$). Además, el efecto de la interacción entre el método de suplementación y el día del protocolo resultó en concentraciones más altas ($p < 0,01$) de minerales en las vacas que recibieron el Oral Drench oral en el noveno día en comparación con la de Multimin®90 (Tabla 1).

Tabla 1. Concentraciones de Cu, Se y Zn en suero sanguíneo de vacas suplementadas con minerales

Minerales	Oral Drench		Multimin®90			Probabilidad		
						Pr > F		
	Día					Suplemento	Día	Suplemento
1	9	1	9	*día				
Cobre mg/L	0.52	0.36	0.52	0.29	0.033	0.9601	<.0001	0.3096
Zinc mg/L	0.99	0.48	1.00	0.51	0.044	0.8987	<.0001	0.7421
Selenio ng/L	15.42	16.65	15.60	15.12	0.21	0.5362	0.0821	0.0001

En investigaciones se han observado diferentes respuestas y no siempre hay un efecto de la suplementación sobre la concentración mineral en suero sanguíneo⁽¹⁵⁾. Con un suplemento mineral inyectable en otra investigación, la suplementación incrementó las concentraciones de Se y Cu durante 15 días, mientras que las concentraciones plasmáticas de Zn y Mn aumentaron solamente

durante 24 h⁽⁶⁾.

Concentraciones de cobre

La disminución observada en los niveles séricos de Cu durante el período de sincronización es semejante con estudios previos que muestran que las concentraciones de minerales disminuyen rápidamente en el ganado de pastoreo⁽¹²⁾. La concentración de cobre en el suero sanguíneo en el noveno día debe interpretarse como que no hay diferencia entre los dos métodos de suplementación. Sin embargo, la figura 1 ilustra que ambos grupos tenían niveles deficientes de Cu; aunque la pendiente de inclinación fue menor para los animales suplementados con el Oral Drench (G2: $-0,026 \pm 0,005$ vs. G1: $-0,011 \pm 0,005$, Tabla 2).

La aplicación parenteral de Cu y Zn aumentó la tasa de gestación en un 33 %, pero las concentraciones séricas de minerales de estos minerales no se vieron afectadas por la aplicación⁽¹⁶⁾. Los resultados encontrados en otra investigación determinaron que no existe una diferencia significativa entre los animales a los que se les administró una inyección de oligoelementos, no influyó en el comportamiento reproductivo⁽¹⁷⁾. Estos autores consideran que la aplicación de estos minerales es buena, pero solo en la medida en que satisfagan el requisito de tiempo^(16, 17).

Los minerales inyectables podrían mejorar la retención de Cu, también caso similar vaquillas inyectadas con Multimin®90 encontraron mejores niveles en concentración sérica y no solo de Cu sino también de Se ($P \leq 0,01$)^(10, 18) Sin

embargo, los resultados de esta investigación sugieren que la administración de suplementos orales puede ser más efectiva a corto plazo siendo mejores opciones para suplementaciones estratégicas⁽¹⁸⁾.

Tabla 2. Estimaciones ($\pm$ error estándar) para coeficientes de regresión fijos para concentraciones de Cu, Se y Zn en suero sanguíneo de vacas de carne suplementadas con un Oral Drench oral o Multimin®90

Suplemento	Coeficientes de regresión fijos por suplemento	
	β_0	β_1
Concentración de cobre en suero sanguíneo (mg/L)		
Multimin®90	0.53 $\pm$ 0.03	- 0.03 $\pm$ 0.005 ^a
Oral Drench	0.47 $\pm$ 0.03	-0.01 $\pm$ 0.005 ^b
Concentración de selenio en suero sanguíneo (ng/L)		
Multimin®90	15,6 $\pm$ 0,11	-0,043 $\pm$ 0,02
Oral Drench	15,4 $\pm$ 0,11	0,138 $\pm$ 0,02 ^a
Concentración de zinc en suero sanguíneo (mg/L)		
Multimin®90	1,34 $\pm$ 0,03	- 0,053 $\pm$ 0,005
Oral Drench	0,88 $\pm$ 0,03	-0,045 $\pm$ 0,005

^{a, b} Las estimaciones de los coeficientes dentro de los minerales del suero sanguíneo y la misma columna con diferentes letras son diferentes ($P \leq 0,05$)

De manera similar, informaron que las inyecciones de trazas no tuvieron un efecto significativo sobre las concentraciones de Cu en vacas con niveles basales suficientes, lo que refuerza la idea de que el estado mineral inicial juega un papel crucial en la eficacia de la suplementación⁽⁶⁾. En otros estudios, encontraron que

el ganado con niveles iniciales bajos de Cu respondió mejor a la suplementación con minerales orales que a los inyectables, ya que las inyecciones no mantienen altos niveles de Cu sérico a lo largo del tiempo⁽¹⁹⁾.

El cobre es un mineral que se relaciona con procesos reproductivos de las vacas. Autores describen que está involucrado en la reducción de estrés oxidativo en el ovario, inhibiendo los radicales libres ^(20, 21). también interviene en la unión de la enzima glutatión peroxidasa e interfiere en la síntesis y secreción de las gonadotropinas, así como en la modulación de liberación y pulsos de la LH^(20, 21, 22).

Concentraciones de zinc y su papel en la reproducción

Los niveles de Zn fueron significativamente ($p < 0,01$) más bajos en el 9º día del protocolo. Los niveles de concentración de zinc pasaron de suficientes a deficientes en el transcurso del experimento (Figura 1), con una disminución más pronunciada observada en animales suplementados con Multimin®90. La tasa de disminución fue menor en los animales suplementados con Oral Drench (G2: $-0,053 \pm 0,005$ vs. G1: $-0,045 \pm 0,005$, Tabla 2), independientemente del método de suplementación.

El zinc es crucial para las reacciones enzimáticas, la función inmune y la eficiencia reproductiva en el ganado⁽²³⁾. Estudios anteriores han destacado que las concentraciones de Zn disminuyen rápidamente en condiciones estresantes, particularmente durante los protocolos de sincronización y reproducción⁽²⁴⁾. Esto está en línea con nuestros hallazgos, ya que los animales que se sometieron a

sincronización experimentaron una caída significativa en los niveles de Zn, lo que sugiere una mayor demanda metabólica o una absorción deficiente en condiciones estresantes.

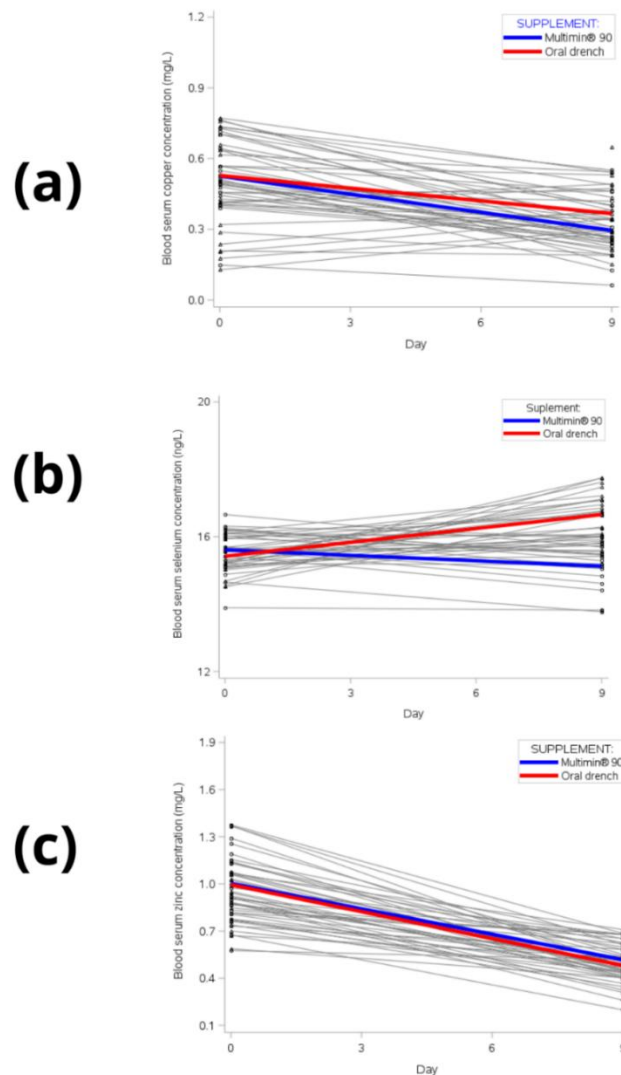


Figura 1. Trayectorias de las concentraciones de Cu (a), Se (b) y Zn (c) en el suero sanguíneo de vacas de carne en pastoreo suplementadas con un Oral

Drench o Multimin®90.

En una Investigación utilizaron una mezcla de minerales inyectables administrada 33 días antes de la temporada de reproducción junto con un protocolo CIDR de 14 días y una mayor tasa de preñez⁽⁷⁾. Estos autores atribuyeron la respuesta altamente variable a varios factores, informaron una mejora en el rendimiento reproductivo en bovinos suplementados con zinc orgánico, además, se encontró que no hay efecto sobre la reproducción, sin embargo, la prevalencia de patologías reproductivas disminuyó^(25, 26). Otras investigaciones indican que el Zn desempeña un papel en la función ovárica al influir en el desarrollo folicular y la actividad del cuerpo lúteo⁽²⁷⁾. La deficiencia de zinc se ha relacionado con el deterioro de la función lútea y la producción subóptima de progesterona en varias especies⁽²⁸⁾.

En el ganado bovino, los niveles adecuados de Zn se han asociado con una mejor función lútea y resultados reproductivos⁽²⁹⁾. Dada la disminución observada en las concentraciones de Zn en este estudio, es posible que la disponibilidad insuficiente de Zn influyera en la síntesis de progesterona, aunque no se tomaron mediciones directas de los niveles de esta hormona⁽³⁰⁾. Además, el Zn interactúa con otros minerales esenciales, como el cobre (Cu) y el manganeso (Mn), que también juegan un papel importante en la fisiología reproductiva ⁽³¹⁾.

Selenio

Los niveles de selenio (Se) en el presente estudio demostraron estabilidad con fluctuaciones menores entre tratamientos. Sin embargo, el efecto de la

interacción fue significativo ($p \leq 0,0001$). Esto indica diferencias en las concentraciones de Se entre los grupos. Específicamente, las vacas en G2 exhibieron niveles más bajos de Se en sangre (-0.043 ± 0.020) en comparación con las de G1 (0.138 ± 0.020) en el 9º día (Tabla 2). Estos resultados sugieren que las vacas que recibieron suplementos orales experimentaron un ligero aumento en la concentración de Se, lo que respalda los resultados anteriores⁽²⁾.

El selenio es un mineral esencial que participa en los mecanismos de defensa antioxidante y la función inmunológica, los cuales contribuyen a la eficiencia reproductiva^(4, 27). Los resultados actuales son similares a los de Pogge et al⁽⁶⁾, quienes observaron que las inyecciones de Se tenían efectos mínimos sobre los resultados reproductivos en vaquillas con suficientes niveles de minerales basales. Esto sugiere que la suplementación adicional con Se puede tener menos impacto en los animales que ya mantienen un estado mineral adecuado⁽⁶⁾. Determinaron que la suplementación con Se en vacas lecheras deficientes aumenta la tasa de preñez en la primera inseminación ⁽³²⁾. Sin embargo, en otro estudio encontraron que varias fuentes de selenio no afectaron la tasa de gestación⁽³³⁾.

Además, las variaciones en los resultados podrían estar relacionadas con la biodisponibilidad de minerales en el organismo⁽³⁴⁾. Esto puede explicar las diferencias observadas en las concentraciones de Se en sangre en el presente estudio. Además, el momento y el método de administración de Se podrían desempeñar un papel crucial en su eficacia. Por ejemplo, en un estudio de suplementación con selenio encontraron que los bolos de Se de liberación

sostenida proporcionaron niveles de Se más consistentes a lo largo del tiempo en comparación con las inyecciones periódicas⁽³⁵⁾.

Dado el papel del Se en la mitigación del estrés oxidativo, se justifica una mayor investigación para optimizar las estrategias de suplementación⁽³⁶⁾. Específicamente, los estudios deben evaluar la influencia de diferentes fuentes de Se, vías de administración y tiempo tanto en las respuestas metabólicas como en los resultados reproductivos en vacas lecheras⁽³⁷⁾.

Tasas de gestación

La presente investigación indica que la administración de un suplemento oral de minerales traza, en combinación con un protocolo de sincronización del estro, mejoró significativamente la tasa de preñez en vacas de carne (68 % en el grupo de Oral Drench vs. 40 % en el grupo de Multimin®90 G2; $p \leq 0,001$ (Figura 2). Este resultado sugiere que la proximidad al protocolo de sincronización y la mejora del estado del cobre y el selenio podrían ser factores clave para mejorar la fertilidad. Investigaciones recientes han explorado la relación entre la suplementación con oligoelementos y el rendimiento reproductivo en el ganado.

En una investigación evaluaron los efectos de las inyecciones de oligoelementos en vacas de carne y sus crías, las vacas recibieron inyecciones subcutáneas de una solución mineral traza que contenía cobre, selenio, manganeso y zinc, administradas 105 días antes de la fecha prevista de parto y nuevamente 30 días antes de la inseminación artificial a tiempo fijo (IATF)⁽¹⁰⁾. Los resultados mostraron que las vacas que recibieron las inyecciones tuvieron una mayor tasa

de concepción hasta IATF (60,2 %) en comparación con las vacas que recibieron solución salina placebo (51,2 %), aunque no existieron diferencias en la tasa de gestación ⁽¹⁰⁾.

Por otro lado, estudiaron el impacto de las fuentes de oligoelementos en el crecimiento y desarrollo reproductivo de las vaquillas de reemplazo⁽³⁸⁾. Las vaquillas se alimentaron con una dieta basal suplementada con cobalto, cobre, manganeso y zinc, de fuentes orgánicas o inorgánicas, desde el destete hasta la inseminación⁽³⁸⁾.

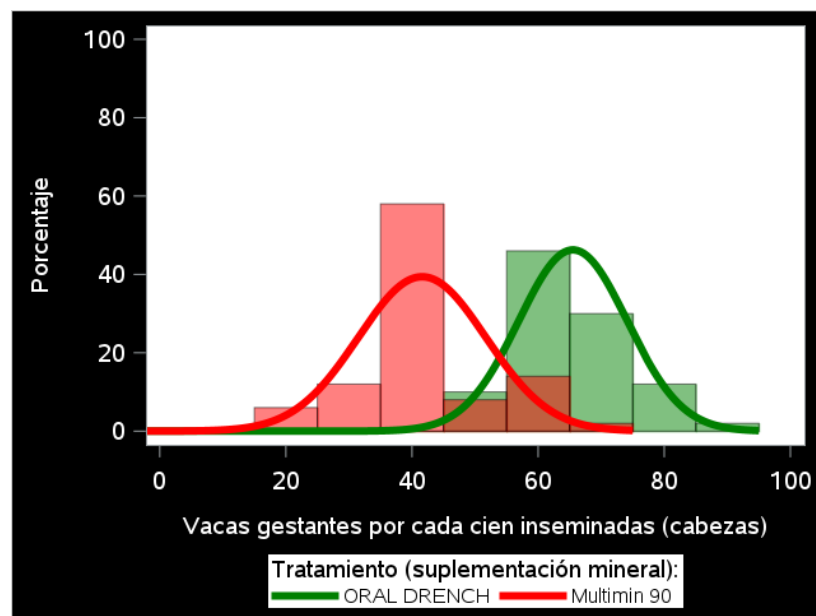


Figura 2. Porcentaje de vacas de carne preñadas que reciben el Oral Drench o Multimin®90.

Aunque no se observaron diferencias significativas en las puntuaciones de la pubertad, el área pélvica o el tracto reproductivo entre los tratamientos, hubo una tendencia hacia una menor pérdida embrionaria en las vaquillas que recibieron

oligoelementos de fuentes orgánicas (27%) en comparación con las que recibieron fuentes inorgánicas (38%)⁽³⁸⁾. Además, las concentraciones circulantes de glicoproteínas asociadas al embarazo tendieron a ser más altas en el grupo de minerales orgánicos a los 25 días después de la IA, lo que sugiere una mejor supervivencia embrionaria⁽³⁸⁾. En otro estudio, evaluaron el efecto de las inyecciones repetidas de oligoelementos en el desarrollo y el rendimiento reproductivo de las vaquillas de carne⁽¹⁸⁾. Las vaquillas recibieron inyecciones de una solución de oligoelementos 30 días antes de la IA, los resultados no mostraron diferencias significativas en las tasas de gestación con IA o las tasas generales de embarazo entre los grupos tratados y control⁽¹⁸⁾. Sin embargo, las vaquillas que recibieron las inyecciones tenían concentraciones hepáticas más altas de cobre y selenio 24 días después de la inyección, lo que indica una mejora en el estado de los microminerales⁽¹⁸⁾.

En una investigación de suplementación mineral por inyección no se encontraron efectos de esta sobre el diámetro de folículo, el volumen del cuerpo lúteo ni la tasa de preñez⁽³⁹⁾. En otro estudio con inyecciones de Multimin®90 se encontraron que vacas que se inyectaron se encontraron mayores tasas de preñez 62.1 % en comparación del grupo que no lo recibió (45.2) ⁽³⁹⁾.

Conclusión

La aplicación estratégica de minerales traza específicos de cobre, zinc y selenio tuvo un impacto diferencial en sus concentraciones séricas y eficiencia reproductiva en vacas de carne sometidas a un protocolo de sincronización de

celo. El Oral Drench disminuyó la caída de los niveles de cobre y zinc, además, aumentó las concentraciones de selenio, en comparación con la vía inyectable. Estos efectos fisiológicos se asociaron con un aumento significativo en la tasa de embarazo en el grupo tratado por vía oral. Estos hallazgos resaltan la relevancia de la suplementación personalizada, basada en el diagnóstico previo del estado mineral del hato y aplicada estratégicamente en momentos críticos como los protocolos reproductivos. Por lo tanto, la suplementación oral con cobre, zinc y selenio, aplicada cerca del protocolo de sincronización, está emergiendo como una herramienta eficaz para mejorar la fertilidad en los sistemas de producción ganadera extensiva.

Reconocimientos y conflicto de intereses

A la Secretaría de Ciencias Humanidades Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada. AL Rancho Los Fresnos y la Sra. Marisa Candiani Castañeda por el apoyo para trabajar con su ganado. Finalmente, al Laboratorio de Nutrición de Rumiantes del Departamento de Zootecnia de la Universidad Autónoma Chapingo.

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la difusión de los resultados, la discusión, el análisis de datos y las conclusiones presentadas en este trabajo.

Bibliografía

1. Byrne L, Murphy RA (2022). Relative bioavailability of trace minerals in

- production animal nutrition: a review. *Animals* 12(15):1981. doi:10.3390/ani12151981.
2. Arthington JD, Havenga LJ (2012). Effect of injectable trace elements on the humoral immune response to the multivalent vaccine in beef calves. *J Anim Sci* 90(6):1966-1971. doi:10.2527/jas.2011-4166.
 3. Palomares RA (2022). Trace minerals supplementation with great impact on beef cattle immunity and health. *Animals* 12(20):2839. doi:10.3390/ani12202839.
 4. Spears JW (1996). Mineral bioavailability and its role in animal nutrition. *J Anim Sci* 74(7):1729-1739. doi:10.2527/1996.7471729x.
 5. Vázquez-Armijo JF, Rojo R, Salem AZM, López D, Tinoco JL, González A, Domínguez-Vara IA (2011). Trace elements in sheep and goat reproduction: a review. *Trop Subtrop Agroecosyst* 14(1):1-13.
 6. Pogge DJ, Lonergan SM, Hansen SL (2012). Mineral concentrations of plasma and liver after injection with a trace mineral complex differ among Angus and Simmental cattle. *J Anim Sci* 90(8):2692-2698. doi:10.2527/jas.2011-4875.
 7. Stokes RS, Perry GA, Bridges GA (2017). Trace mineral injections and their impact on the reproductive success of beef heifers. *J Anim Sci* 95(4):1467-1473. doi:10.2527/jas.2016.1250.
 8. Ayantoye JO, Elghandour MMY, Adejoro FA, Salem AZM (2025). Advances in timed artificial insemination: integrating omics technologies for enhanced reproductive efficiency in dairy cattle. *Animals* 15(6):816. doi:10.3390/ani15060816.

9. Harvey KM, Cooke RF, Marques RdS (2021). Supplementing trace minerals to beef cows during gestation to enhance productive and health responses of the offspring. *Animals* 11(4):1159. doi:10.3390/ani11041159.
10. Mundell LR, Brethour JR, Jaeger JR (2012). The effect of trace mineral injections on reproductive performance in beef cows and calves. *J Anim Sci* 90(2):463-470. doi:10.2527/jas.2011-4202.
11. Springman SA, Hansen SL, Meyer AM (2018). The effect of trace mineral supplementation on immune response and reproductive performance in cattle. *J Anim Sci* 96(5):1907-1915. doi:10.1093/jas/sky119.
12. Genther ON, Hansen SL (2014). Effect of dietary supplementation with trace minerals and a multi-element trace mineral injection on transport response and growth performance of beef cattle. *J Anim Sci* 92(6):2522-2530. doi:10.2527/jas.2013-7330.
13. INEGI (2020). Climatological data of Lagos de Moreno, Jalisco. Disponible en: www.inegi.org.mx [17 Febrero 2025].
14. Puls R (1994). *Mineral levels in animal health: diagnostic data*. 2nd ed. Sherpa International, Clearbrook, British Columbia, Canada.
15. Machado VS, Bicalho MLS, Pereira RV, Caixeta LS, Knauer WA, Oikonomou G, Gilbert RO, Bicalho RC (2013). Effect of an injectable trace mineral supplement containing selenium, copper, zinc, and manganese on the health and production of lactating Holstein cows. *Vet J* 197(2):451-456. doi:10.1016/j.tvjl.2013.02.022.
16. González-Maldonado J, Ledezma-Torres RA, Gutiérrez CG, Portillo-López P, Mellado M (2017). Effect of injectable trace mineral complex

- supplementation on development of ovarian structures and serum copper and zinc concentrations in over-conditioned Holstein cows. *Anim Reprod Sci* 181:57-62. doi:10.1016/j.anireprosci.2017.04.006.
17. Springman SA, Hansen SL, Meyer AM (2018). The effect of trace mineral supplementation on immune response and reproductive performance in cattle. *J Anim Sci* 96(5):1907-1915. doi:10.1093/jas/sky119.
18. Stokes RS, Volk MJ, Ireland FA, Gunn PJ, Shike DW (2018). Effect of repeated trace mineral injections on beef heifer development and reproductive performance. *J Anim Sci* 96(9):3943-3954. doi:10.1093/jas/sky253.
19. Rodríguez-Campos LA, Hernández-Cerón J, Mellado M, García JE, Valencia J, Morales J (2020). Effect of oral and injectable mineral supplements on the morphological development of crossbred heifers. *Trop Anim Health Prod* 14(2):1-22. doi:10.15517/nat.v14i2.43486.
20. Mion B, Madureira G, Spricigo JFW, King K, Van Winters B, Lamarre J, et al. (2023). Effects of supplemental trace element source in pre- and postpartum diets on reproductive biology and performance of dairy cows. *J Dairy Sci* 106(7):5074-5095. doi:10.3168/jds.2022-22784.
21. Gómez-Rendón J, Del Campo M, González-Tous M (2019). Algunas anotaciones sobre la importancia del cobre en la reproducción bovina. *Rev Colomb Cienc Anim* 11(1). doi:10.24188/recia.v11.n1.2019.716.
22. Rosa DE, Fazzio LE, Picco SJ, Furnus CC, Mattioli GA (2008). Metabolismo y deficiencia de cobre en caprinos. *Analecta Vet* 28(2):34-44.
23. Suttle NF (2010). *Nutrición mineral del ganado*. 4ª ed. CABI, Wallingford,

Reino Unido.

24. Brasche C (2015). Impacto de los oligoelementos en el rendimiento reproductivo del ganado. *Cien Ganad* 178:48-55.
25. Formigoni A, Fustini M, Archetti L, Emanuele S, Piva A, Dell'Orto V (2011). Efectos de una fuente orgánica de cobre, manganeso y zinc sobre el rendimiento productivo, el estado de salud y la fertilidad del ganado lechero. *Cienc Tecnol Aliment Anim* 164(3-4):191-198.
26. Oconitrillo M, Hernández-Mendo O, Chacón-Hernández JC, et al. (2024). Efectos de la suplementación elevada de zinc en los parámetros de salud y producción de vacas lecheras de alta producción. *Animals* 14(3):395. doi:10.3390/ani14030395.
27. Salles MS, Silva PR, Oliveira RS, et al. (2024). Suplementación de nutrientes esenciales, selenio, hierro y vitamina E para terneros lactantes bajo desafío inmunológico. *Animals* 14(7)
28. Andrieu S (2008). ¿Existe un papel para los suplementos orgánicos de oligoelementos en la salud de las vacas en transición? *Vet Rec* 176(1):77-83. doi:10.1136/vr.176.1.77.
29. Avilés-Ruiz R, Barrón-Bravo O, Alcalá-Rico J, Salinas-Chavira J, Flores-Nájera M, Ruiz-Albarrán M (2022). Deficiencias nutricionales que afectan al reinicio de la ciclicidad posparto en bovinos doble propósito. *Abanico Vet* 12:e2022-18. doi:10.21929/abavet2022.251.
30. Pascua AM, Noguchi K, Kawashima C, et al. (2024). Effect of estrogen and progesterone on intracellular free zinc and zinc transporter expression in bovine oviduct epithelial cells. *Theriogenology* 221:18-24.

doi:10.1016/j.theriogenology.2023.12.013.

31. Ahuja A, Parmar D (2017). Role of minerals in the reproductive health of dairy cattle: a review. *Int J Livest Res* 7(10):16-26. doi:10.5455/ijlr.20170806042724.
32. Klein GS, Silva PR, Oliveira RS, et al. (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. doi:10.3390/ani15040499.
33. Hall JA, Bobe G, Vorachek WR, et al. (2024). Effects of supranutritional selenium supplementation during different trimesters of pregnancy on humoral immunity in beef cattle at parturition. *Biol Trace Elem Res* 2024:1-15. doi:10.1007/s12011-024-03866-3.
34. Weiss WP (2005). Biodisponibilidad de oligoelementos en rumiantes. *Cienc Tecnol Aliment Anim* 122(1):71-77.
35. Taylor JB, Morrill JL, Sprankle J (2019). Biodisponibilidad del selenio en bovinos: efectos de los métodos de suplementación. *Rev Cienc Anim* 101(1):112-120.
36. Khan MZ, Ahmad N, Ali A, et al. (2024). Mejora de la respuesta inmune, antioxidante y antiinflamatoria bovina con vitaminas, aminoácidos protegidos del rumen y oligoelementos para prevenir la mastitis periparto. *Front Immunol* 14:1290044. doi:10.3389/fimmu.2023.1290044.
37. Xiao M, Chen X, Li P, et al. (2024). Effects of nanoselenium on performance, blood indices and milk metabolites of dairy cows during peak lactation. *Front Vet Sci* 11:1418165. doi:10.3389/fvets.2024.1418165.

38. Perry GA, Perkins SD, Northrop EJ, Rich JJJ, Epperson KM, Andrews TN, Kline AC, Quail LK, Walker JA, Wright CL, Russell JR (2021). Impact of trace mineral source on beef replacement heifer growth, reproductive development, and biomarkers of maternal recognition of pregnancy and embryo survival. *J Anim Sci* 99(7):skab160. doi:10.1093/jas/skab160.
39. Stokes RS, Ralph AR, Mickna AJ, Chapple WP, Schroeder AR, Ireland FA, Shike DW (2017). Effect of an injectable trace mineral at the initiation of a 14-day CIDR protocol on performance and reproduction of beef heifers. *Transl Anim Sci* 1(4):458-466. doi:10.2527/tas2017.0050.

Artículo publicado en *journal of animal science*

Garcia Fuerte & Huerta Bravo, PSXIV-1 Trace mineral supplementation of beef cows., *Journal of Animal Science*, Volume 103, Issue Supplement_3, October 2025, Pages 638–639, DOI: [10.1093/jas/skaf300.722](https://doi.org/10.1093/jas/skaf300.722)

5. Trace mineral supplementation of beef cows

Ruth Manzayani García-Fuerte ^{a*} Maximino Huerta Bravo ^a

Universidad Autónoma Chapingo. Posgrado en Producción Animal,
Departamento de Zootecnia. Carretera México-Texcoco km 38.5, C.P. 56230,
Chapingo, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia: manzayani28@gmail.com

TRACE MINERAL SUPPLEMENTATION OF BEEF COWS

Ruth Manzayani Garcia-Fuerte, Maximino Huerta Bravo

Posgrado en Producción Animal, Departamento de Zootecnia, Universidad

Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, C.P. 56230,

Chapingo, estado de México, México.

*Autor de correspondencia: manzayani28@gmail.com

Keywords: selenium, estrus synchronization, fertility, gestation

Abstract: Grazing cattle usually has deficiencies in trace minerals leading to productive and reproductive problems. Therefore, the objective of this research was to evaluate a liquid trace mineral supplement for grazing cows. A previous mineral study of soil, water, forages and cows from a farm in the semi-arid region of México demonstrated copper and zinc deficiencies, and manganese excess. An oral drench (G1) that included copper, iodine, cobalt, zinc and selenium was formulated. It provided, at least, requirements of given minerals for four days. This drench was compared to injectable Multimin® 90 (G2) in an estrus synchronization protocol of fifty multiparous grazing cows. The protocol lasted nine days: on day one, the CIDR® device was placed and estradiol cypionate (2 mg) was injected. On day 7, CIDR® was withdrawn, and cows were injected with 400 IU ECG, sodium colprostenol (0.5 mg) and estradiol cypionate (1 mg). Forty-eight hours after the removal of the CIDR®, fixed-time insemination was done. G1 was given on day one and seven of the protocol, while G2 was applied 30 days before the protocol. Variables measured were mineral concentrations of copper, zinc and selenium in blood serum at days one and nine of synchronization protocol. Gestation was determined with an ultrasound Siui CTS-800® at day 35. Blood samples were centrifuged at 2500 rpm for 10 minutes to extract blood serum, which was frozen until mineral analysis. The mineral determinations were made using an atomic absorption spectrophotometry technique (PerkinElmer A700). The mineral concentrations were analyzed with the GLM and mixed procedures with 2x2 factorial arrangement (types of mineral supplements and protocol days).

The mineral trajectories were determined by proc sgplot, and pregnancy rate was analyzed using the bootstrapping technique. Concentrations of copper, zinc, and selenium in cows blood serum were not affected by the supplements ($p>0.05$). However, blood serum copper and zinc concentrations were lower ($p<0.01$) and also deficient at day 9 of the protocol vs day one. Supplemente x day interaction caused higher ($p<0.01$) concentrations in cows receiving oral drench at day 9 in comparison with all treatments. The oral drench caused a smaller decrease ($p<0.05$) in copper concentrations and a greater increase ($p<0.05$) in selenium concentrations over time, compared to cows that received G2; while zinc was not affected ($p>0.05$). The best response to oral drench was probably due to closeness to the synchronization protocol and a better status was achieved for copper and selenium. Cows that received oral drench were superior in gestation rate ($p=0.001$) than cows injected with G2: 68 vs 40 %. Strategic supplementation with a liquid product of trace minerals, coupled to an estrus synchronization program, proved to be effective to improve pregnancy rate in beef cows.

Table 1. Concentrations of Cu, Se and Zn in blood serum of beef cows supplemented with an oral drench or Multimin®90¹ at day one or nine after CIDR insertion

Minerals	Oral drench		Multimin®90		SEM	Probability, Pr > F		
	Day					Supplement	Day	Supplement *day
	1	9	1	9				
Copper, mg/L	0.52	0.36	0.52	0.29	0.033	0.9601	<.0001	0.3096
Zinc, mg/L	0.99	0.48	1.00	0.51	0.044	0.8987	<.0001	0.7421
Selenium, ng/L	15.42	16.65	15.60	15.12	0.21	0.5362	0.0821	0.0001

¹MULTIMIN NORTH AMERICA, INC. FORT COLLINGS, CO 80528, EUA.

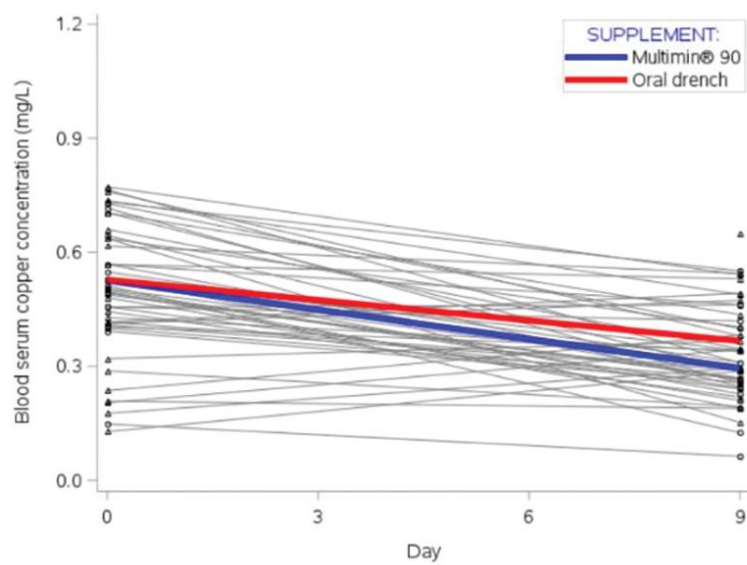
Table 2. Coefficients ($\pm$ standard error) of fixed regression for concentrations of Cu, Se and Zn in blood serum of beef cows supplemented with an oral drench or Multimin® 90

Supplement	Fixed regression coefficients by supplement	
	β_0	β_1
Blood serum copper concentration (mg/L)		
Multimin® 90	0.53 ± 0.03	-0.03 ± 0.005^a
Oral drench	0.47 ± 0.03	-0.01 ± 0.005^b
Blood serum selenium concentration (ng/L)		
Multimin® 90	15.6 ± 0.11	-0.043 ± 0.02^b
Oral drench	15.4 ± 0.11	0.138 ± 0.02^a
Blood serum zinc concentration (mg/L)		
Multimin® 90	1.34 ± 0.03^a	-0.053 ± 0.005
Oral drench	0.88 ± 0.03^b	-0.045 ± 0.005

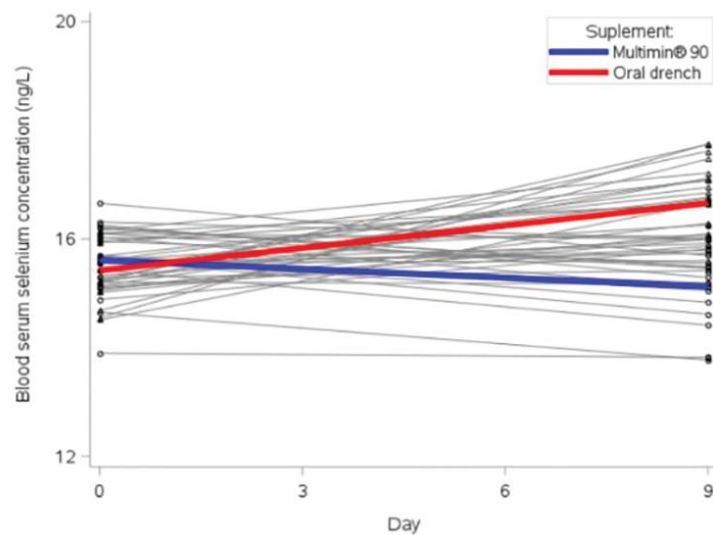
^{a, b} Coefficient means within blood serum minerals and the same column with different letters are different ($P \leq 0.05$)

Figure 1. Trajectories of the concentrations of Cu, Se and Zn in blood serum of beef cows supplemented with an oral drench or Multimin® 90. (a) Trajectory concentrations of Cu in blood serum. (b) Trajectory concentrations of Se in blood serum. (c) Trajectory concentrations of Zn in blood serum.

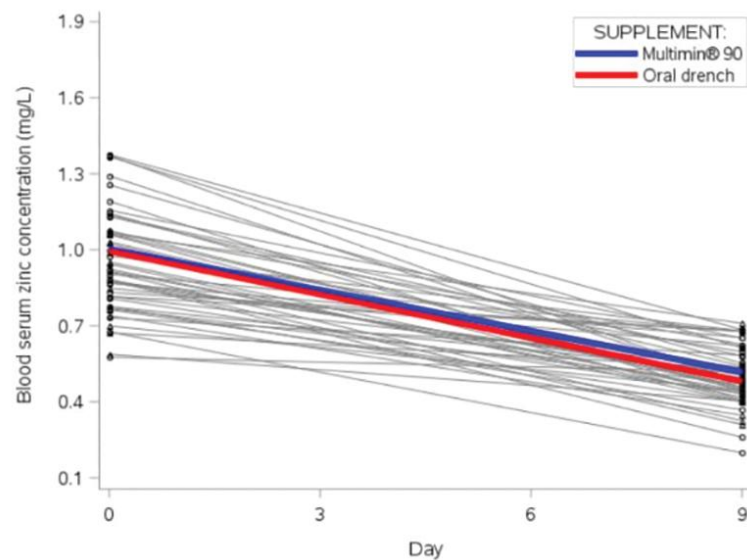
(a)



(b)



(c)



1. CONCLUSIÓN GENERAL

La eficiencia reproductiva del ganado bovino es un eje central en la producción y la nutrición desarrolla un papel esencial para que se logre esta eficiencia, en particular con los minerales traza, ya que, a pesar de requerirse en cantidades mínimas, regulan un sinfín de procesos metabólicos, reproductivos e inmunológicos. La insuficiencia de ellos provoca alteraciones en la reproducción, desde la gametogénesis, ovogénesis, fertilización, desarrollo del embrión, y mantenimiento del cuerpo lúteo. Lo anterior se traduce en baja tasa de gestación, abortos, anestros prolongados y enfermedades postparto, lo que trae consigo pérdidas económicas al productor, disminuyendo la sustentabilidad del hato.

De acuerdo con la revisión bibliográfica existen datos contundentes sobre las deficiencias de minerales traza en animales en pastoreo, siendo las más sobresalientes cobre y zinc, los que en su mayoría inciden no solo en la reproducción, sino también en el metabolismo energético, sistema inmunológico y la salud general del hato. Cabe destacar que es de gran importancia la implementación del diagnóstico de estatus mineral, porque acercará a una realidad más exacta de la problemática en los hatos.

Una suplementación mineral que está basada en un diagnóstico mineral de agua, forraje y suero sanguíneo de las vacas es más exacta, debido a que este conocimiento, además de considerar los requerimientos nutricionales de la vaca y conocer las interacciones de los minerales, va a permitir que se tenga una mejor estrategia y aborde del problema. La suplementación cada día busca ser estratégica con el fin de dar mayor exactitud y disminución de costos.

Por lo tanto, se concluye que una suplementación estratégica que proviene de un enfoque integral y es acoplada a un protocolo de sincronización de estros, establecerá una respuesta productiva favorable, incrementado la tasa de gestación, lo que se transforma en mayor cantidad becerros, mejor rentabilidad, menor emisión de metano y mayor rentabilidad.