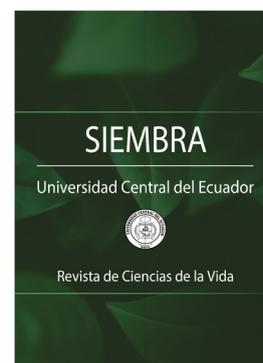


Suplementación de micronutrientes, salud y eficiencia de la reproducción asistida en la hembra bovina

Micronutrient supplementation, health and efficiency of assisted reproduction in the female bovine

Junior German Campozano Zambrano¹, Rodolfo Pedroso Sosa², Felicia Roller Gutiérrez³



Siembra 12 (1) (2025): e7195

Recibido: 12/09/2024 / Revisado: 07/01/2025 / Aceptado: 27/01/2025

¹ Universidad Técnica de Manabí. Maestría en Zootecnia, Mención Producción Ganadera Sostenible. Portoviejo, Ecuador.

✉ Juniorger1997@hotmail.com

 <https://orcid.org/0009-0006-1858-6179>

² Universidad Técnica de Manabí Facultad de Ciencias Veterinarias. Portoviejo, Ecuador.

✉ rodolfo.pedroso@utm.edu.ec

 <https://orcid.org/0000-0001-6789-2654>

³ Universidad Técnica de Manabí Facultad de Ciencias Veterinarias. Portoviejo, Ecuador.

✉ roller61@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-5287-1268>

* Autor de correspondencia:
Juniorger1997@hotmail.com

Resumen

La nutrición es un factor que limita la productividad del ganado bovino. Dado que es escasa la información referente a las deficiencias de micronutrientes y su relación con la eficiencia en el uso de las tecnologías aplicadas en la reproducción asistida en vacas criadas en pastoreo, esta revisión bibliográfica tuvo como objetivo conocer la influencia de la vitamina E, A, el β -caroteno y los minerales trazas, tales como: el Selenio, el Cobre, el Zinc, el Manganeso y el Hierro sobre la salud y eficiencia en las técnicas de reproducción asistida de hembras bovinas. Estos componentes de la dieta juegan un importante papel en el mecanismo antioxidante y la capacidad de respuesta del sistema inmunológico en el organismo, y están relacionados con el estado de salud, el desempeño reproductivo y la eficiencia de las técnicas de reproducción asistida. Las carencias de algunos de estos nutrientes reducen la respuesta inmunológica, aumenta la sensibilidad a las infecciones, disminuye la fertilidad y la eficacia de las nuevas biotecnologías reproductivas, especialmente en vacas criadas en pastoreo en el trópico. La suplementación de estos micronutrientes puede contribuir a mejorar la salud, el desempeño reproductivo y las tecnologías de inducción y sincronización del celo, la transferencia y la producción *in vitro* de embriones en las hembras bovinas en aquellas áreas donde persistan estas deficiencias nutricionales.

Palabras clave: micronutrientes, salud, reproducción, biotecnología.

Abstract

Nutrition is a limiting factor in cattle productivity. Since information on micronutrient deficiencies and on the efficiency of the use of technologies applied in assisted reproduction technologies in pasture raised cows is scarce, it is important to know the influence of vitamin E, A, β -carotene and trace minerals such as selenium. The aim of this bibliographic review was to determine the influence of vitamin E, A, β -carotene and trace minerals such as selenium, copper, zinc, manganese and iron on the health and efficiency of assisted reproduction techniques in female cattle. These dietary components play an important role in the antioxidant mechanism and the responsiveness of the immune system in the body and are associated with parameters such as health status, reproductive

SIEMBRA

<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/SIEMBRA>

ISSN-e: 2477-8850

Periodicidad: semestral

vol. 12, núm 1, 2025

siembra.fag@uce.edu.ec

DOI: <https://doi.org/10.29166/siembra.v12i1.7195>



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial

performance and efficiency of assisted reproduction techniques. Deficiencies of some of these nutrients reduce the immune response, increase susceptibility to infections, reduce fertility and the efficacy of new reproductive biotechnologies, especially in pasture-raised cows in the tropics. Supplementation of these micronutrients can help improve the health, reproductive performance and technologies for estrus induction and synchronization, embryo transfer and *in vitro* embryo production in female cattle in areas where these nutritional deficiencies persist.

Keywords: micronutrients, health, reproduction, biotechnology.

1. Introducción

La nutrición es un elemento que limita el estado de salud y la reproducción, siendo un factor que tiene una notable incidencia sobre el correcto funcionamiento al momento de incorporar las biotecnologías de reproducción asistida dentro del hato (Anchordoquy, 2012; Spears y Weiss, 2008).

La Vitamina E, A el β -caroteno y los minerales trazas, tales como: el Selenio, Cobre, Hierro, Manganeseo y el Zinc, son necesarios para el mantenimiento de la salud reproductiva del ganado bovino (Arthington y Ranches, 2021). Por consiguiente, son objeto de múltiples estudios con el fin de identificar sus carencias y el efecto de su suplementación en la salud (Figueredo Rodríguez et al., 2017; Illek et al., 2021; Suttle, 2022), producción y eficiencia de las técnicas de sincronización del celo (Pedroso Sosa y Roller Gutiérrez, 2024), y sobre el desarrollo de nuevos procesos biotecnológicos de reproducción (Rosa, 2015; Šmigoc et al., 2023).

Estos micronutrientes juegan un papel importante en los mecanismos exógeno y endógeno del estado antioxidante del organismo y, por tanto, como contribuye a mitigar el estrés oxidativo, el cual es un término asociado a la acción de Radicales libres [ROS] y Especies Reactivas de oxígeno [ERO], los cuales afectan las funciones de las células que forman los tejidos, órganos y sistema del cuerpo. En este sentido, cuando no existe una correcta relación entre la producción de ROS o ERO o de diferentes especies reactivas y la actividad biológica de antioxidantes exógeno (micronutrientes) y enzimático (endógeno) del organismo, ocurre el estrés oxidativo [EO], el cual puede ocurrir por la carencia de algunos de estos micronutrientes o como consecuencia de ciertos estados fisiopatológicos generadores de ROS o ERO (Coronado et al., 2015).

En este contexto, resulta importante conocer el estado de algunos micronutrientes que forman parte del sistema antioxidante del cuerpo dado el rol que desempeña en el mantenimiento de la salud y producción y la eficiencia de las técnicas de reproducción asistida (Pedroso Sosa y Roller Gutiérrez, 2024).

Esta revisión tiene como objetivo mostrar el efecto de la suplementación de Vitamina E, Selenio [Se], Vitamina A, β -caroteno, Cobre [Cu], Hierro [Fe], Manganeseo [Mn] y Zinc [Zn], en la salud y la eficiencia de la reproducción asistida en la hembra bovina.

2. Materiales y Métodos

Para el desarrollo del presente estudio se realizó una búsqueda de información bibliográfica en las bases de datos electrónicas PubMed, Scopus, Web of Science y Web Animal Science, de donde se extrajeron diferentes artículos relacionados con la utilización de micronutrientes y de sus principales impactos sobre salud, reproducción y eficiencia de las tecnologías de reproducción asistida. Se utilizaron como criterios de búsqueda palabras claves como: estrés oxidativo, micronutrientes, minerales, transición, salud, fertilización, maduración, ovocito, suplementación, biotecnología y reproducción asistida.

3. Resultados y Discusión

3.1. Efecto de la suplementación de vitamina E, Selenio, β -caroteno, Cobre, Hierro, Manganeseo y el Zinc en la salud, el desempeño y eficiencia de la reproducción asistida en la hembra bovina

En la ganadería bovina se ha determinado con adecuada precisión los principales micronutrientes que influyen en la productividad del ganado bovino (Palomares, 2022). Pero, escasean los datos sobre su efecto al momento de aplicar las técnicas de reproducción asistida (Gao et al., 2007; Kendall et al., 2006), En ese contexto,

identificar las deficiencias y conocer el efecto de la aplicación de estos micronutrientes resulta de gran interés en la ganadería mestiza cuya cría se efectúa mediante pastoreo en climas tropicales (Pedroso Sosa y Roller Gutiérrez, 2024).

3.2. Efecto de la suplementación de Vitamina E y Selenio

La vitamina E y el Se actúan sinérgicamente y son uno de los micronutrientes más importantes y esenciales para el funcionamiento del mecanismo antioxidante y de defensa inmunológico del organismo (Lizarraga, 2021). Este proceso constituye una de las primeras etapas del proceso de peroxidación de ácidos grasos poliinsaturados al transferir hidrógeno fenólico a radicales peróxidos libres (Xiao et al., 2021).

Las deficiencias de vitamina E y Se produce una significativa disminución de la actividad y vida de los neutrófilos, los macrófagos y los leucocitos (Suttle, 2022) y ocasiona una mayor sensibilidad a los agentes infecciosos, el deterioro del estado de salud de las vacas. Así, estas deficiencias nutricionales se relacionan con el aumento de las infecciones uterinas, las retenciones placentarias, el aborto, la mortalidad embrionaria, menor calidad del calostro en las vacas, dando origen al incremento de la morbilidad y mortalidad, en la presencia de la enfermedad del músculo blanco en los terneros y al aumento de la prevalencia de mastitis clínicas y subclínicas (Ceballos-Marquez et al. 2010; Illek et al., 2021).

La suplementación oral o inyectable de Vitamina E y Se, antes y posterior al parto, mejora la respuesta inmune de las vacas lecheras y sus crías (LeBlanc et al., 2014). Por tanto, la suplementación de esta vitamina y Se, durante la gestación tardía, disminuyó la incidencia de retención de placenta (Bourne et al., 2007; Gupta et al., 2005; Silvestre, 2008), y redujo significativamente la prevalencia de mastitis clínica y subclínicas (Thatcher et al., 2010). Mientras en la lactación temprana reforzará el sistema inmune de la vaca y la adecuada entrega de inmunoglobulinas al ternero a través del calostro, disminuyendo la morbilidad y mortalidad perinatal en las crías (Salles et al., 2022). Pero, cabe destacar que existen algunos resultados divergentes donde no se ha podido dejar esclarecido si esta acción era a través del Selenio o su acción sinérgica con la Vitamina E (Horn et al., 2010; Rutigliano et al., 2008).

Estudios desarrollados en la República Checa, en áreas donde se ha confirmado la carencia de Se, demostraron tener un importante efecto de la suplementación de Se con fuentes orgánicas en la producción de inmunoglobulinas confirmado en su contenido en la sangre materna y el calostro suministrado a sus crías. Este hecho disminuyó significativamente la morbilidad y la mortalidad de los terneros (Andělová et al., 2024; Illek, 2021).

El impacto de la sustitución de vitamina E y Se en la eficacia de la sincronización del celo en búfalas con anestro posterior al parto fue estudiada por Mujawar et al. (2019), los resultados de este experimento arrojaron una tasa de preñez mayor (12%) en el grupo de vacas suplementadas al ser comparadas con el grupo testigo no suplementado.

El estrés de calor puede cambiar las condiciones fisiológicas y productivas de los mamíferos y es una de las causas que ha originado la infertilidad de bovino en el trópico. Así, se ha postulado, que dada la contribución de la vitamina E y Se en la producción de progesterona a nivel del ovario y su papel en el sistema enzimático del mecanismo antioxidante de organismo, es posible afirmar que su suplementación pueda contribuir al aumento de la tasa de concepción y disminuir el efecto del estrés oxidativo que acompaña al estrés calórico en los climas cálidos. Al respecto, se demostró que el suministro de Se y Vitamina E previo la sincronización del celo en vacas durante la época de mayor temperatura ambiental mejora la actividad que ejercen las enzimas con propiedades antioxidantes y consigue reducir el impacto del estrés oxidativo y además aumenta la tasa de preñez durante la época de calor (Shaarawy et al., 2024).

Con respecto a la influencia de la suplementación de Selenio en la eficiencia de las técnicas de transferencia de embriones, Moraes et al. (2012) desarrollaron una investigación enfocada en evaluar el efecto de la suplementación de Selenio y demostraron como resultados que la aspiración folicular de Ovocito [OPUS] y el proceso de Producción *in vitro* en donante de la raza Jersey, al utilizar la suplementación de 9,6 mg de selenio diario en la dieta, produjo el incremento del número total de Ovocito colectados de los grado I y II con respecto a un grupo control ($p < 0.05$). Este resultado puede ser atribuido al efecto de protección que ejerce este micro elemento contra el daño oxidativo. Basado en estos hallazgos recomendaron la implementación de esta estrategia de suplementación con el objetivo de mejorar la cantidad y la calidad de los Ovocito recolectados y aumentar la tasa de embriones obtenidos durante el proceso de producción *in vitro* (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados de la colección y calidad de los ovocitos obtenidos por OPUS y la producción de embriones mediante el proceso de Fertilización *in vitro* en vacas Jersey suplementadas con Selenio 3,2 mg d⁻¹ o 9,6 mg d⁻¹ durante 119 días.

Table 1. Results of oocyte collection and quality of oocytes obtained by OPUS and embryo production by *in vitro* fertilization process in Jersey cows supplemented with selenium 3.2 mg d⁻¹ or 9.6 mg d⁻¹ for 119 days.

Características	Suplementadas con 3,2 mg d ⁻¹ de Selenito de sodio	Suplementadas con 9,6 mg d ⁻¹ de Selenito de sodio
Ovocitos viables	23,10±2,16 ^b	35,11±2,65 ^a
Ovocito grado-I	4,75±0,97 ^b	11,61±1,58 ^a
Ovocito grado II	4,57±0,98	7,17±1,32
Ovocito grado III	8,90±1,32 ^b	16,40±2,10 ^a
Ovocitos desnudos	//////////	//////////
Ovocito no Viables	5,48±1,16 ^b	11,23±1,65 ^a
Ovocito Atrésicos	4,49±1,08 ^b	10,68±1,62 ^a

Fuente / Source: Modificado de / Modified from Moraes et al. (2012).

En resumen, resulta evidente que sería adecuada efectuar la suplementación de Vitamina E y Se durante el período de transición y previo a la implementación de tecnologías de reproducción asistida en las hembras, enfatizando su importancia en las áreas donde se compruebe su carencia y en hatos bajo condiciones de estrés calórico. Ello puede contribuir a mejorar la salud de las vacas, sus crías, el desempeño reproductivo posparto y la eficiencia de la reproducción asistida.

3.3. Efecto de la suplementación de vitamina A y β -caroteno

La vitamina A y el β -caroteno son sustancias conocidas por su actividad antioxidante, atribuible a su papel sobre la eliminación de radicales simples de oxígeno y sobre la presencia de radicales thiol, considerando que la vitamina A es esencial en la integridad de los epitelios, la funcionalidad del sistema inmunológico y las funciones reproductivas. Mientras, el β -caroteno es importante durante el proceso de síntesis de vitamina A, en la reproducción y las funciones del tiroides (Ikeda et al., 2005). La deficiencia de estos micronutrientes, se han relacionado con el retraso en la ovulación y en un aumento proporcional de abortos, mortalidad embrionaria y el riesgo de padecer quistes ováricos.

Estos componentes de la dieta intervienen en el crecimiento folicular de esteroides generados por las células de la granulosa y la teca, y forman parte de la composición del ambiente del oviducto y el útero. Ellos protegen a las células ováricas y del útero de los efectos del estrés oxidativo. Además, tienen un efecto beneficioso en la función del cuerpo lúteo.

Dentro los parámetros productivos, la presencia de vitamina A en el ganado bovino se encuentra entre 25 a 85 $\mu\text{g dl}^{-1}$ mientras que los de β -carotenos oscilan entre 300 a 1.200 $\mu\text{g dl}^{-1}$, respectivamente. Por su parte, valores inferiores de 7 $\mu\text{g dl}^{-1}$ de vitamina A o 100 $\mu\text{g dl}^{-1}$ de β -caroteno supondría una deficiencia. El diagnóstico puede establecerse mediante la determinación de sus valores en el suero sanguíneo o las reservas del hígado.

En diferentes estudios ha demostrado que la suplementación de Vitamina A y el β -caroteno por más de 40 días puede reducir el efecto negativo del estrés del calor, mejorar la tasa de concepción, la supervivencia embrionaria y el reinicio de la actividad ovárica después del parto. Este resultado probablemente está asociado al papel de estos compuestos en el mecanismo de control del estrés oxidativo, especialmente en las vacas lecheras criadas en los climas cálidos.

En algunos estudios se ha informado que la suplementación con vitamina A de las vacas previo al tratamiento super ovulatorio ha logrado un incremento significativo del número total de embriones de calidad (Rani y Panneerselvam, 2001; Sales et al., 2008). En esta dirección se ha descrito una correlación positiva entre el nivel de β -caroteno en la sangre de vacas lecheras con el número de embriones transferibles obtenidos tras un tratamiento Super ovulatorio. En este contexto, se ha planteado que estos micronutrientes tienen una marcada influencia en la competencia de los ovocitos y el medio uterino (Ikeda et al., 2005; Livingston et al., 2004).

Trojačanec et al. (2012) encontraron una alta correlación en los valores de β -caroteno, el día de la inseminación y siete días posteriores al servicio, con la concentración de progesterona ($r = 0,33$, $p < 0,05$) y la tasa de concepción ($r = 0,51$, $p < 0,01$). Estos datos sugieren que el tratamiento mejoró la capacidad de síntesis

y la secreción de progesterona por el cuerpo lúteo. Estos hallazgos fueron posteriormente corroborados por Aguiar-Zalzano y Rojas-Bourrillon (2015), quienes hallaron una correlación positiva entre los niveles de β -caroteno y la instauración de la preñez temprana. Las vacas con niveles de β -caroteno superiores a 587 mg dl⁻¹ tuvieron un mayor índice de preñez.

En este mismo sentido resultaría beneficioso y de gran ayuda entender el estado y la calidad de estos elementos específicos que conforman la dieta de las vacas mestizas de doble propósito que son criadas en sistemas de pastoreo, especialmente considerando que hay una escasez notable de información disponible sobre este tema particular en las regiones del trópico seco.

3.4. Efecto de la suplementación de Cobre, Hierro, Manganeso y Zinc

Estudios recientes indican que los cambios metabólicos y endocrinos en la sangre afectan el contenido del líquido folicular y los fluidos uterinos, influyendo en la fertilización y desarrollo del embrión (De Bie, 2017; LeBlanc, 2014; Leroy et al., 2015). En esa dirección, es importante destacar que existe poca información científica sobre vacas de pastoreo en áreas con deficiencias de micronutrientes (Kor et al., 2013; Pedroso y Roller, 2009). En consecuencia, se puede apreciar que las carencias de estos nutrientes afectan la eficiencia de las nuevas biotecnologías de reproducción y que este efecto puede ser minimizado mediante la suplementación de estos micronutrientes.

La suplementación de microelementos en hembras bovinas deficientes mejora la tasa de pariciones y preñez, reduce los intervalos entre partos y disminuye los abortos (García Díaz et al., 2013; Pedroso Sosa y Roller Gutiérrez, 2024). Similares resultados se han obtenido mediante la suplementación oral o parenteral de Cobre, Zinc, Hierro y Manganeso (García et al., 2007). Sin embargo, no en todas las investigaciones efectuadas se ha podido demostrar el efecto benéfico de esta suplementación en la dinámica de crecimiento y desarrollo del folículo ovárico, la tasa de preñez y la calidad embrionaria (Hackbart et al., 2010; Vanegas et al., 2004) cuando la dieta básica proporciona niveles adecuados de estos componentes y no concurren factores que conduzcan a la manifestación de estas deficiencias. Esto sugiere que el diagnóstico previo de estas carencias es prioritario para obtener resultados satisfactorios en las diferentes estrategias de suplementación.

Existen evidencias experimentales que sustentan que las deficiencias de estos micronutrientes en la sangre y tejidos de reserva se reflejan en la composición del licor folicular y el ambiente uterino (Nocek et al., 2006; Rabiee et al., 2010). Es probable que su carencia pueda afectar la competencia del ovocito y el útero (Leroy et al., 2015).

Uno de los estudios más significativo realizado con esta finalidad fue el desarrollado por Sales et al., (2011), que demostraron que la inclusión de microelementos (Cu, Fe, Mn y Zc) mejora el desempeño en la reproducción de vacas lecheras y de manera directa sobre los resultados de la reproducción asistida. De acuerdo con los datos de este experimento, la suplementación parenteral de estos microelementos previo a la transferencia de embriones de vacas cruzadas (*Bos indicus x Bos taurus*) en Brasil, provocó un aumento significativo de la tasa de supervivencia embrionaria (Tabla 2).

Tabla 2. Efecto de la administración de subcutánea de 5 ml de un preparado inyectable de microelementos en la tasa de supervivencia embrionaria (%) de novillas cruzadas (*Bos indicus x Bos taurus*) a los 23 y 48 días posterior a la transferencia de embriones.

Table 2. Effect of subcutaneous administration of 5 ml of an injectable microelement preparation on the embryo survival rate (%) in crossbred heifers (*Bos indicus x Bos taurus*) at 23 and 48 days post embryo transfer.

Variables	N	Testigo*	Grupo tratado*
Supervivencia embrionaria a los 23 días.	276	36 ^a	48 ^a
Supervivencia embrionaria a los 48 días	219	30 ^b	43 ^b

Fuente / Source: Adaptado de / Adapted from Sales et al. (2011).

* Letras diferentes por líneas difieren entre sí $p < 0,005$. El tratamiento fue administrado 17 días previo la transferencia de los embriones; el compuesto inyectable de micro elementos contenía 100 mg Zn, 100 mg Mn, 50 mg Cu y 25 mg Se (Multimin®, Minerthal, Brasil) / Different letters per line differ from each other at $p < 0.005$. The treatment was administered 17 days prior to embryo transfer; the injectable microelement compound contained 100 mg Zn, 100 mg Mn, 50 mg Cu and 25 mg Se (Multimin®, Minerthal, Brazil).

La deficiencia de Cobre es un problema habitual en rumiantes, siendo la segunda más frecuente en bovinos pastando después del fósforo (Picco et al., 2005), en varios países productores de ganado bovino: Gran Bretaña, Holanda, Escocia, Nueva Zelanda, Canadá, Australia y EEUU y en la Republica Checa. En América Latina

se han reportado casos en Argentina, Brasil y México (Picco et al., 2005).

En Cuba la deficiencia de cobre ha sido encontrada en rebaños bovinos en todo el país (García Díaz et al; 2013). Estos estudios hallaron bajos valores en suero y tejido hepático, asociados al anestro, repetición de servicio, retención de placentas, aborto, retraso en pubertad y mayor prevalencia de mastitis (Torres et al., 2016) y baja eficiencia en la aplicación de técnicas de reproducción asistida (Rosa, 2015; Pedroso Sosa y Roller Gutiérrez, 2024). En estos territorios la carencia de Cu fue asociada al consumo de agua salobre, la baja disponibilidad en la combinación de los minerales y el contenido en las pasturas. Además, al estado de acidosis metabólica (Pedroso y Roller, 2009). Estos hallazgos, fueron más comunes durante la época lluviosa, en el período de transición de las vacas en los genotipos mestizos *Bos indicus* x *Bos Taurus*.

El diagnóstico de hipocuprosis se aborda al identificar la deficiencia en animales y al investigar sus causas. El primero revela el balance de Cu en animales y el segundo incluye estudios ambientales que identifican zonas de riesgo y el comportamiento epidemiológico de la enfermedad. Sin embargo, no se ha determinado un parámetro claro que indique cuándo los animales sufren alteraciones por hipocuprosis (Nicastro et al., 2021).

En diversos experimentos desarrollados con base a la suplementación oral o parenteral de cobre en vacas mestizas en pastoreo (Tabla 3, Figuras 1 y 2) se demostró que los diferentes procedimientos de suministro adecuado de este micro elemento contribuyó a mejorar la eficiencia reproductiva (García Díaz et al., 2013), la capacidad de respuesta inmunológica, disminuyó la prevalencia de mastitis y mejoró significativamente la fertilidad de los tratamientos de inducción y una mejor sincronización del celo en vacas lecheras, vacas hipocuprémicas en las condiciones climáticas del trópico húmedo mantenidas en pastoreo (Torres et al., 2016; Pedroso Sosa y Roller Gutiérrez, 2024).

Tabla 3. Efecto de la suplementación de cobre (50 mg) vía parteral antes y después del parto en el índice de riesgo de contraer mastitis en vacas 5/8 Holstein x 3 /8 Brahman bajo condiciones climáticas del trópico.

Table 3. Effect of prenatal copper supplementation (50 mg) before and after calving on the risk index of contracting mastitis in 5/8 Holstein x 3/8 Brahman cows under tropical climatic conditions.

Riesgo	Estimación	IC (95%)	
Riesgo en expuestos	0,37	-	-
Riesgos en no expuestos	0,62	-	-
Riesgo relativo	0,59	0,35	0,97
Diferencia de riesgos	-0,25	-0,48	-0,03
Fracción prevenida expuestos	0,40	0,02	0,64
Fracción prevenida poblacional	0,20	0,01	0,32

Fuente / Source: Figueredo Rodríguez et al. (2017).

Respecto a la suplementación de estos micros elementos en los medios de producción *in vitro* de embriones, en la actualidad se han desarrollado varios estudios dirigidos a evaluar el papel de este microelemento en la competencia del Ovocito para la maduración fertilización, desarrollo del embrión.

En este sentido, Kendall et al. (2006) efectuaron un estudio con el fin de determinar el efecto de la suplementación con Cu a medios de cultivos en las funciones de las células de la teca. De acuerdo con los datos de la investigación se demostró que la suplementación con Cu en cultivos libres, sin suero, mejora la diferenciación de células de la teca *in vitro*. Estos hallazgos pueden explicar casos de infertilidad relacionados con trastornos funcionales del eje Hipotálamo–Hipófisis–Ovario. Los cuales se manifiestan clínicamente como anestro, ciclos irregulares y anovulatorios, influenciados por la presencia de hormonas ováricas y su efecto en la liberación de GnRH y las hormonas FSH y LH.

Más tarde, Gao et al. (2007) evaluaron el efecto del cobre en la maduración y crecimiento de ovejitas fertilizadas *in vitro*, donde se determinó el contenido de estos minerales en el licor folicular de varios diámetros antes y después del tratamiento. Según los resultados de esta investigación, el añadir Cu al medio de maduración mejoró la tasa de maduración y el número de embriones en el proceso de producción *in vitro* de embriones [PIE]. De acuerdo con los resultados es probable que la subfertilidad se origina a partir de las deficiencias de Cu, sea consecuencia de la alteración en los patrones de crecimiento y desarrollo de los folículos ováricos, así como en el proceso de esteroidogénesis (Kendall et al., 2006). Es evidente que la incorporación de Cu, en cantidades que son comparables a aquellas que han sido reportadas como normales para un animal sano,

cuando se utiliza en diferentes medios de PIE, podría tener un impacto positivo y beneficioso en el proceso de maduración y en el desarrollo del embrión que ha sido producido mediante técnicas *in vitro*.

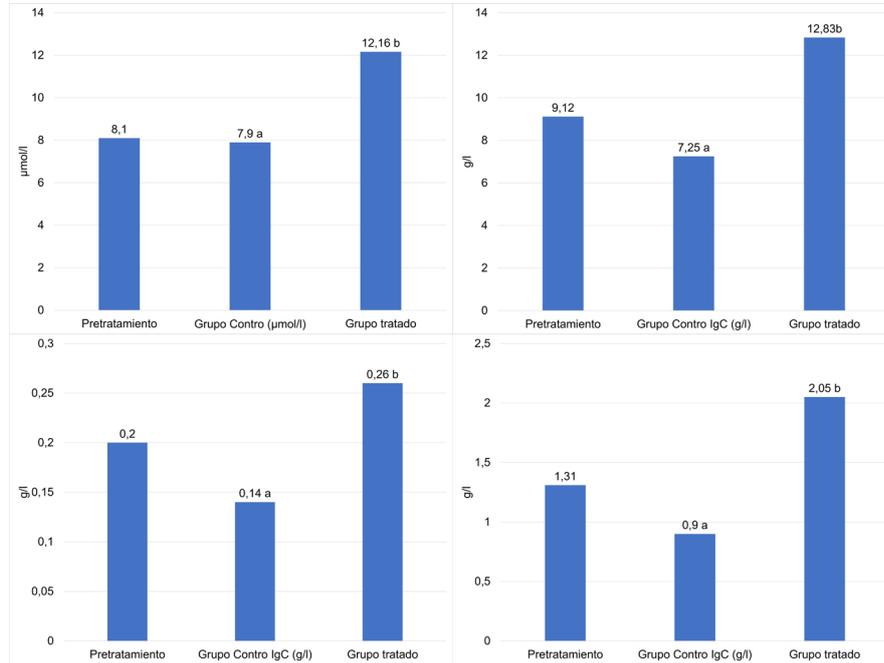


Figura 1. Efecto de la suplementación de cobre (50 mg) vía parenteral en vacas hipocuprémicas (leve) en los niveles de inmunoglobulinas y cobre del suero sanguíneo de vacas 5/8 Holstein x 3/8 Brahman en el trópico húmedo. Letras diferentes por columnas difieren entre sí ($p < 0,05$).

Figure 1. Effect of parenteral copper supplementation (50 mg) in hypocupraemic (mild) cows on immunoglobulin and copper levels in the blood serum of 5/8 Holstein x 3/8 Brahman cows in the tropics. Different letters per column are significantly different at $p < 0,05$.

Fuente / Source: Figueredo Rodríguez et al. (2017).

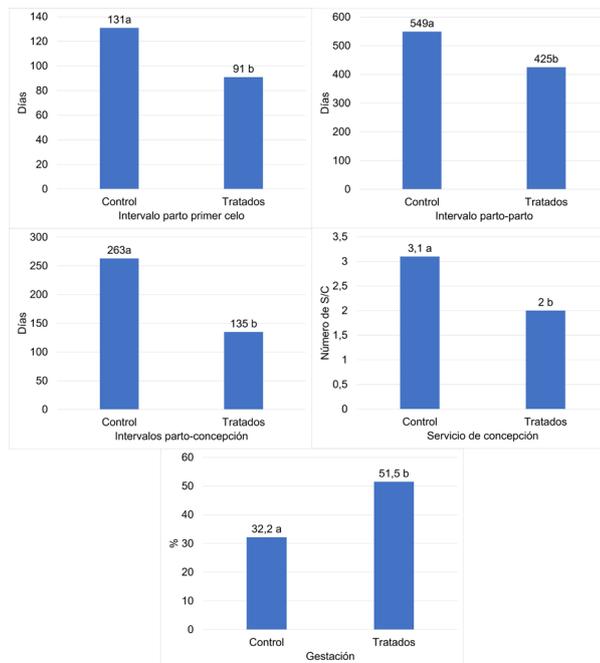


Figura 2. Respuesta reproductiva de vacas 5/8 Holstein x 3/8 Brahman hipocuprémicas suplementadas con cobre parenteral antes y después del parto en el trópico húmedo.*

Figure 2. Reproductive response of 5/8 Holstein x 3/8 Brahman hypocupraemic cows supplemented with parenteral copper before and after calving in the humid tropics.*

Fuente / Source: Figueredo Rodríguez et al. (2017).

* Letras diferentes por columnas difieren entre si a $p < 0,05$ / Different letters per column are significantly different at $p < 0,05$.

En este contexto, Rosa (2015) señaló, que el estado del Cu en el plasma sanguíneo determina el contenido del fluido folicular en el ovario en la hembra bovina. Por consiguiente, en animales deficientes en este microelemento puede disminuir la eficiencia del cultivo *in vitro* de embriones. Los estudios indican que la adición de Cu en el medio de maduración aumentó la concentración de GSH-GSSG, redujo la apoptosis y el daño en el ADN, y mejoró la tasa y calidad de blastocitos (Santiago Hernández, 2020).

Esto significa que el agregar Cu a los medios de cultivo *in vitro* en un rango de normalidad a los valores del plasma sanguíneo, por una parte, contribuyó a mejorar la capacidad de respuesta antioxidante de las células y, por la otra, favoreció el desarrollo embrionario (Figura 3). Este hecho pudiera explicar por qué los embriones obtenidos durante la época de verano, donde se manifiesta con mayor magnitud el estrés calórico y oxidativo en trópico, tienen una menor competencia para la implantación y sostenimiento de la preñez y crío conservación.

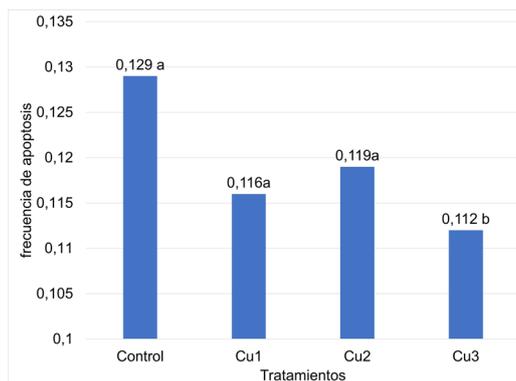


Figura 3. Efecto de las distintas concentraciones de cobre durante la PIE sobre la tasa de apoptosis de las células de los cúmulos.*

Figure 3. Effect of different copper concentrations during PIE on the apoptosis rate of cumulus cells.*

Fuente / Source: Rosa (2015).

* Los COC bovinos se incubaron en medio de MIV sin suplementar (Control) o suplementado con Cu: Cu1) 20 $\mu\text{g dl}^{-1}$; Cu2) 40 $\mu\text{g dl}^{-1}$ y Cu3) 60 $\mu\text{g dl}^{-1}$. Se maduraron 800 COC distribuidos en cuatro repeticiones en días diferentes (200 COC por repetición, 50 COC por tratamiento). Se analizó un total de 500 CC por tratamiento. / Bovine COCs were incubated in IVM medium unsupplemented (Control) or supplemented with Cu: Cu1) 20 $\mu\text{g dl}^{-1}$; Cu2) 40 $\mu\text{g dl}^{-1}$ and Cu3) 60 $\mu\text{g dl}^{-1}$. 800 COCs distributed in four replicates were matured on different days (200 COCs per replicate, 50 COCs per treatment). A total of 500 COCs per treatment were analysed.

El Hierro es un componente vital en el metabolismo animal especialmente en los procesos de respiración celular. Este microelemento existe en el organismo en forma compleja enlazado con proteínas y enzimas. Los requerimientos de hierro entre 30 a 60 ppm. Aunque las necesidades en los terneros de menos de tres meses de edad, alimentados exclusivamente con leche, pueden alcanzar la cifra de 100 ppm dado que el contenido de Fe en la leche es bajo (Suttle, 2022).

La deficiencia de hierro es rara en los bovinos en pastoreo, excepto cuando es elevada la incidencia de infestaciones parasitarias. Esto está motivado porque la principal fuente de Fe es el forraje y este contiene aproximadamente 200 mg kg^{-1} de Fe. Esta cifra puede cubrir ampliamente las exigencias del organismo en esta especie. No obstante, resulta importante destacar que el hierro contenido en la tierra puede tener poca biodisponibilidad.

En general, la carencia de hierro provoca anemia hipocrómica microcítica y disminuye la capacidad de saturación de la transferrina, aunque no existe mucha información respecto al efecto de la carencia de hierro y el comportamiento reproductivo de los rumiantes. Aunque, niveles bajos de hemoglobina y hematocrito se han asociado con elevada incidencia de repeticiones del celo y aumento de la incidencia de parasitosis por garrapatas (Pedroso, 2003).

Para el diagnóstico de las deficiencias de Fe se puede usar la concentración en el suero sanguíneo, los valores de hemoglobina, el hematocrito, aunque estos indicadores no se modifican hasta que está afectada las reservas hepáticas. Por consiguiente, la determinación del valor de saturación de la transferrina es el medio más apropiado para establecer un diagnóstico profiláctico (McDowell y Arthington, 2005).

Las deficiencias de Hierro no son comunes en el ganado en pastoreo. Sin embargo, resulta de interés los recientes estudios realizados por Gao et al. (2007) con el objetivo de determinar el papel del hierro en el medio de FIV. En este experimento, se comprobó que la demanda de este microelemento era mayor a las 48 horas de iniciado el proceso y que la adición de una concentración de Fe de 1,96 mg l^{-1} a los medios de FIV mejora la tasa de desarrollo del blastocito y reduce la incidencia de apoptosis en los embriones del bovino (Tabla 4).

Tabla 4. Efecto de la concentración de Fe en el medio de cultivo *in vitro* de embriones en la tasa de maduración y subsiguiente desarrollo embrionario.*Table 4. Effect of Fe concentration in in vitro embryo culture medium on the rate of maturation and subsequent embryonic development.*

Concentración de (Fe mg l ⁻¹) adicionado al medio	Número de ovocitos madurados		Porcentaje de embriones desarrollados*			
	Ovocito	Número (%) de ovocitos madurados	2 células	8 células	Mórula	Blastocitos
3,26	254	208	122 (58,7)	108(51,9) ^a	101(48,0) ^a	65 (31,2) ^a
1,96	243	185	123(66,5)	114(61,6) ^a	94(50,8) ^a	78(42,2) ^b
0,81	271	209	128 (61,1)	118 (56,5) ^a	73(34,9) ^b	55(26,3) ^a
0,45	240	193	122 (63,4)	102(52,3) ^a	65(33,7) ^b	47(24,3) ^a
Control	201	158	101(63,9)	60 (38,0) ^b	35(22,2) ^c	22(13,9) ^c

Fuente / Source: Adaptado de / Adapted from Gao et al. (2007).

* Letras diferentes por columnas difieren entre si a $p < 0,05$ / Different letters per column are significantly different at $p < 0,05$.

Las deficiencias de Manganeso no son frecuentes en el trópico (McDowell y Arthington, 2005). Pero, este microelemento es necesario para la conformación de la estructura de los huesos, la reproducción y la función normal del sistema inmunitario, nervioso y el mecanismo enzimático del sistema antioxidante (Wang et al., 2017).

El manganeso actúa principalmente como activador de enzimas como hidrolasas, quinasas, descarboxilas y transferasas; las cuales se activan al unirse el metal directamente a la proteína o al sustrato. Muchas activaciones son inespecíficas, por lo que el Mn puede ser sustituido por magnesio, una excepción es la glicosiltransferasa, que solo se activa con Mn. La deficiencia de Mn reduce la actividad de glicosiltransferasa, disminuyendo la síntesis de mucopolisacáridos en el cartílago epifisario y afectando el crecimiento óseo; uno de los signos clínicos más comunes en jóvenes con falta de este mineral es la deformación esquelética (Anchordoquy, 2012).

El Mn activa diversas enzimas, como la piruvato-carboxilasa, la arginasa y la glutamina sintetasa, las cuales están firmemente asociadas a la porción proteica y no se pueden remover sin perder actividad enzimática (Vásquez Loaiza y Molina Coto, 2021). El piruvato carboxilasa cataliza el primer paso de la gluconeogénesis y regula el metabolismo de carbohidratos. La arginasa es una enzima que convierte L-arginina en L-ornitina y urea, la cual es fundamental en el ciclo de la urea y elimina residuos nitrogenados del catabolismo de proteínas (di Costanzo et al., 2010). En este sentido la falta de Mn conlleva a la reducción de la actividad de la enzima, aumentando el amonio en sangre y disminuyendo la urea plasmática.

Recientemente se considera que el papel más importante del Mn en la reproducción del bovino es mediante su capacidad antioxidante al formar parte estructural de la enzima Superóxido Dismutasa manganeso dependiente [SOD-Mn], localizada en el licor intracelular y las mitocondrias de las células del ovario, protegiendo a estas del estrés oxidativo [EO]. Dado que los procesos de crecimiento y desarrollo del folículo, la ovulación, la síntesis y producción de esteroides llevan implícitos eventos inflamatorios que generan sustancias reactivas de oxígenos [ROS] (Bidne et al., 2018)

Esta enzima es un importante factor que contribuye al establecimiento entre la producción de ROS y el mecanismo antioxidante, contribuyendo al adecuado crecimiento y desarrollo del folículo preovulatorio, maduración del ovocito, producción y síntesis de esteroides por las células ováricas, con énfasis en la producción de progesterona del cuerpo lúteo y la supervivencia embrionaria (Wang et al., 2017; Rodríguez-Campos et al., 2020).

Algunos estudios fueron dirigidos a evaluar el efecto de la suplementación de manganeso (Mn) a los medios de producción *in vitro* de embriones. En este sentido, Anchordoquy (2012) realizaron una investigación con el fin de determinar los niveles de Mn en plasma y licor folicular y evaluar el efecto de la suplementación de Mn a los medios de maduración de Ovocito cultivados *in vitro*. Acorde con los resultados no se encontró diferencias significativas en la concentración de Mn entre el plasma sanguíneo y los hallados en el licor folicular. Sin embargo, en ambos casos estos fueron superiores a las existentes en los medios de cultivo *in vitro*. La adición de Mn al medio de maduración (2,3, 4,3 y 6,3 $\mu\text{mol L}^{-1}$), incrementó la concentración de glutatión [GSH], y la actividad de la SOD en el Ovocito y las células del cúmulo, disminuyó el daño del ADN y la tasa de apoptosis. Pero, aunque no se modificó la tasa de clivaje, la calidad de los embriones y la velocidad de desarrollo fue superior en el medio donde se suplementó el Mn. Estos hallazgos experimentales han aportado conoci-

mientos que permiten explicar en parte, uno de los posibles mecanismos mediante los cuales las deficiencias de manganeso afectan la reproducción y la eficiencia de la tecnología de fertilización *in vitro* en el ganado vacuno.

En un experimento donde se efectuó la suplementación de la dieta basal con 80 mg de Mn kg⁻¹ de MS utilizando glicina de manganeso se encontró un aumento de las concentraciones séricas de glucosa y disminuyó las pérdidas de BCS. La suplementación de la dieta basal con 80 mg de Mn kg⁻¹ de MS aumentó la presencia de CL en los ovarios y mejoró la tasa de preñez en el segundo servicio (Qashqai et al., 2020).

El Zinc es un componente esencial de la dieta para el mantenimiento de la salud y el desarrollo en los rumiantes. Su función primaria parece estar relacionada con su asociación a la actividad de múltiples enzimas, y a la estabilización de las estructuras del ARN, ADN y ribosomas. Además, tiene muchas interacciones con la producción, almacenamiento y secreción de varias hormonas que participan en todos los procesos reproductivos de la hembra y el macho en la especie bovina (Suttle, 2022).

Las deficiencias de zinc provocan la disminución del consumo de alimentos, la tasa de crecimiento y eficiencia alimentaria. El zinc juega un importante papel en el sistema inmune (Spears y Weiss, 2008) y es requerido para el adecuado funcionamiento de la enzima Superóxido dismutasa del sistema antioxidante. Es fundamental en la integridad del tejido epitelial y la formación de queratina con lo cual proporciona una poderosa barrera fisiológica ante la infección. Este microelemento es un componente de factores de transcripción incluyendo proteína que se unen al ADN y más de 300 enzimas que incluye la Superóxido Dismutasa y juega un rol importante en la protección de la célula al daño oxidativo y del ADN. Por consiguiente, está envuelto en la función y estabilidad genética, aumento del riesgo a la prevalencia de anestro, repeticiones del celo, el aborto espontáneo (Ceylan et al., 2008) y el desarrollo embrionario.

En el presente hay pocos estudios dirigidos a determinar el efecto de la deficiencia de zinc en la eficacia de la tecnología de fertilización *in vitro*. Es probable, que las hembras destinadas para estos fines requieren ser suplementadas previamente con este microelemento, por el papel que este juega en la función celular y el desarrollo embrionario.

Las insuficiencias de este microelemento provocan una rápida disminución de su contenido en la sangre, tejidos (hígado, hueso, pelos) y se acompaña de una disminución significativa en la actividad de la enzima fosfatasa del plasma sanguíneo. El diagnóstico de esta deficiencia puede ser establecido mediante la determinación de Zinc en muestras de sangre, hígado, hueso o el pelo. El Zn está formando un complejo binario y terciario con el Glutatión. Las carencias de Zn pueden causar una disminución significativa del glutatión reducido. El estado del Zn en el ganado vacuno se define como marginal y normal cuando las concentraciones en el plasma se encuentran entre 0,2 a 0,4 y 0,5 a 0,8 g ml⁻¹, respectivamente.

La influencia de las deficiencias de Zinc en la eficacia de las nuevas biotecnologías de la reproducción fue abordada por Picco et al. (2012), quienes estudiaron el efecto de la suplementación de Zinc en los medios de maduración de ovocitos bovinos *in vitro* y evaluaron las consecuencias en la integridad del ADN y las células del cúmulo, la concentración intracelular de Glutatión-Peroxidasa zinc dependiente en los ovocitos, las células del cúmulo y además, la capacidad de desarrollo de los ovocitos maduros. De acuerdo con los resultados de este experimento, la suplementación de 0,7, 1,1 y 1,5 µg ml⁻¹ de Zn a los medios de maduración indujo un aumento significativo de la división celular y la concentración de Glutatión [GSH] y disminuyó el daño del ADN en los ovocitos y las células del cúmulo. Esto indica que si se proporciona un valor apropiado de Zn a los medios de maduración y fertilización *in vitro* de ovocitos de la especie bovina es probable mejorar la actividad intracelular de la enzima GSH y potenciar su función en el mecanismo de defensa antioxidante, contribuyendo al mantenimiento de la integridad del ADN durante el proceso de maduración *in vitro* de los ovocitos y contribuyendo al desarrollo del embrión (Tabla 5).

Tomando como base estos informes sería beneficioso efectuar investigaciones con el fin evaluar el impacto de la suplementación de estos micronutrientes en la respuesta a los tratamientos de inducción y sincronización del estro, el proceso de fertilización *in vitro* y la transferencia de embriones bajo las condiciones del trópico. Estos estudios pudieran contribuir al desarrollo de nuevas estrategias para mejorar la eficiencia de estos procedimientos de control reproductivo y eficacia de las nuevas biotecnologías, especialmente en regiones donde los animales son alimentados a base de pastos y es frecuente encontrar las deficiencias de estos micro nutrientes.

Los estudios dirigidos a modificar el contenido de vitaminas y micro elementos en los medios de maduración, fertilización de ovocitos y desarrollo de embriones durante el proceso de FIV, pueden ayudar a corregir en parte las consecuencias de las deficiencias de estos micro nutrientes en la dieta sobre la estructura y expresión de algunos genes (Picco et al., 2005) y aportar nuevos conocimientos a los mecanismo fisiopatológicos

mediante los cuales el estrés oxidativo y las deficiencias de micro nutrientes afectan la salud, la reproducción y la eficacia de las tecnologías de reproducción asistida en el trópico.

Tabla 5. Capacidad de desarrollo del Ovocito bovino fertilizado y madurado *In vitro* con varias concentraciones de Zinc.
Table 5. Development capacity of the bovine oocyte fertilized and matured *in vitro* with various concentrations of Zinc.

	Concentraciones de Zn ($\mu\text{g ml}^{-1}$)*			
	0	0.7	1.1	1.5
No. de Ovocito	313	339	309	304
Ovocitos divididos	67,16 \pm 1,17 a	73,15 \pm 1,15b	74,0 \pm 1,23b	72,76 \pm 0,74b
Relación Ovocito/Blastocitos	17,83 \pm 2, 15 ^a	21,95 \pm 0, 95 ^a	27,05 \pm 1,61b	30,33 \pm 2,78c
Relación Ovocito divididos/blastocitos	26,62 \pm 3,24b	29,99 \pm 1,07 ^a	36,48 \pm 3,09 ^a	41,82 \pm 4,09b

Fuente / Source: Adaptado de / Adapted from Picco et al. (2012).

* Letras diferentes por columnas difieren entre si a $p < 0,05$ / Different letters per column are significantly different at $p < 0,05$.

En este contexto, es imprescindible destacar que en la actualidad es la tendencia suplementar los micronutrientes mediante complejos de minerales y vitaminas. Estos son suministrados por vía parenteral o mezclas minerales enriquecidas o bloques nutricionales. El fin de esta suplementación es estimular la respuesta inmune, mitigar el balance energético negativo, el EO, evitar cambios epigénéticos y mejorar la eficiencia de la reproducción asistida (De et al., 2014; Pedroso Sosa y Roller Gutiérrez, 2024). Generalmente estos compuestos contienen vitamina A, E, Se, Cu, Zn, Fe y Mn; y son suministrados durante el periodo de transición. Pero muchas veces no se conoce con precisión si existe o no la deficiencia de estas carencias en la dieta. Por consiguiente, es común que se encuentren divergencias en cuanto a la eficacia de la suplementación de micronutrientes (Rodríguez-Campos, 2020; Studer et al., 2022).

4. Conclusiones

Las deficiencias de Vitamina E, Se, Cu, Fe, Mn y Zn, están relacionados con la capacidad antioxidante del organismo. Su carencia se asocia con la capacidad de respuesta inmunológica, y a eficiencia de las técnicas de reproducción asistida. La suplementación corregida *in vivo*, previo los tratamientos de inducción del celo o su adición a los medios de producción *in vitro* de embriones bovino, pueden contribuir a mejorar las eficiencias de esta tecnología. Por consiguiente, sería útil identificar las deficiencias de estos micronutrientes en las vacas criadas en pastoreo bajo las condiciones del trópico y evaluar el efecto de la suplementación en la reproducción y la eficacia de las tecnologías de reproducción asistida.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los docentes de las Facultades de Veterinaria y Agrocencias Universidad Técnica de Manabí por las sugerencias efectuadas en el desarrollo de la presente revisión.

Contribuciones de los autores

- Junior German Campozano Zambrano: conceptualización, visualización, redacción – borrador original.
- Rodolfo Pedroso Sosa: conceptualización, visualización, redacción – borrador original.
- Felicia Roller Gutiérrez: conceptualización, visualización, redacción – borrador original.

Implicaciones éticas

Los autores declaran que no existen implicaciones éticas.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés financieros o no financieros que podrían haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Referencias

- Aguiar-Zalzano, E., y Rojas-Bourrillon, A. (2015). Variaciones de β caroteno en sangre de vacas lecheras durante el periodo post parto. *Nutrición Animal Tropical*, 9(2), 91. <https://doi.org/10.15517/nat.v9i2.21606>
- Anchordoquy, J. M. (2012). *Efecto del Zinc sobre la maduración de los ovocitos de bovino y su impacto sobre la capacidad de desarrollo embrionario posterior*. Universidad Nacional de La Plata. <https://doi.org/10.35537/10915/19404>
- Andělová, J., Blažejak-Grabovská, J., Staffa, A., Kadek, R., Kumprechtová, D., & Illek, J. (2024). Selenium status of beef cattle in the Czech Republic. *Acta Veterinaria Brno*, 93(2), 123-128. <https://doi.org/10.2754/avb202493020123>
- Arthington, J. D., y Ranches, J. (2021). Trace Mineral Nutrition of Grazing Beef Cattle. *Animals*, 11(10), 2767. <https://doi.org/10.3390/ani11102767>
- Bidne, K. L., Dickson, M. J., Ross, J. W., Baumgard, L. H., y Keating, A. F. (2018). Disruption of female reproductive function by endotoxins. *Reproduction*, 155(4), R169-R181. <https://doi.org/10.1530/REP-17-0406>
- Bourne, N., Laven, R., Wathes, D. C., Martinez, T., y McGowan, M. (2007). A meta-analysis of the effects of Vitamin E supplementation on the incidence of retained foetal membranes in dairy cows. *Theriogenology*, 67(3), 494-501. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2006.08.015>
- Ceballos-Marquez, A., Barkema, H. W., Stryhn, H., Wichtel, J. J., Neumann, J., Mella, A., Kruze, J., Espindola, M. S., y Wittwer, F. (2010). The effect of selenium supplementation before calving on early-lactation udder health in pastured dairy heifers. *Journal of Dairy Science*, 93(10), 4602-4612. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3086>
- Ceylan, A., Serin, I., Aksit, H., y Seyrek, K. (2008). Concentrations of some elements in dairy cows with reproductive disorders. *Bulletin of the Veterinary Institute in Pulawy*, 52(1), 109-112. <https://jvetres.piwet.pulawy.pl/files/archive/20081/20081109112.pdf>
- Coronado H, M., Vega y León, S., Gutiérrez T, R., Vázquez F, M., y Radilla V, C. (2015). Antioxidantes: perspectiva actual para la salud humana. *Revista Chilena de Nutrición*, 42(2), 206-212. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182015000200014>
- De Bie, J. (2017). The follicular micro-environment of the oocyte in metabolically compromised dairy cows: impact assessment as a basis for oocyte rescue. University of Antwerp. <https://hdl.handle.net/10067/1418070151162165141>
- De, K., Pal, S., Prasad, S., y Dang, A. K. (2014). Effect of micronutrient supplementation on the immune function of crossbred dairy cows under semi-arid tropical environment. *Tropical Animal Health and Production*, 46(1), 203-211. <https://doi.org/10.1007/s11250-013-0477-1>
- di Costanzo, L., Ilies, M., Thorn, K. J., y Christianson, D. W. (2010). Inhibition of human arginase I by substrate and product analogues. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 496(2), 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2010.02.004>
- Figueredo Rodríguez, Y., Gonzáles Cabrera, N., Martínez Lemane, J., Mollineda Pérez, Á., García Gómez, I., García, J. R., Roller Gutiérrez, F., y Pedroso Sosa, R. (2017). Nivel de inmunoglobulinas, incidencia de mastitis y fertilidad de vacas lecheras hipocuprémicas suplementadas con cobre. *La Técnica: Revista de Las Agrociencias*, 18, 43-48. https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i18.808
- Gao, G., Yi, J., Zhang, M., Xiong, J., Geng, L., Mu, C., y Yang, L. (2007). Effects of iron and copper in culture medium on bovine oocyte maturation, preimplantation embryo development, and apoptosis of blastocysts in vitro. *Journal of Reproduction and Development*, 53(4), 777-784. <https://doi.org/10.1262/jrd.18109>
- García D, J., Cuesta M, M., Pedroso S, R., Rodríguez M, J., Gutiérrez P, M., Mollineda T, Á., Figueredo R, J., y Quiñones R, R. (2007). Suplementación parenteral de cobre en vacas gestantes: efecto sobre postparto y terneros. *Revista MVZ Córdoba*, 12(2). <https://doi.org/10.21897/rmvz.419>
- García Díaz, J. R., Romero Aguirregomezcora, J., Astiz Blanco, S., y Ruiz López, S. (2013). Adición de sustancias antioxidantes en los medios de cultivo empleados en la producción in vitro de embriones en

- mamíferos. *Revista de Salud Animal*, 35(1), 10-19. <https://revistas.censa.edu.cu/index.php/RSA/article/view/28>
- Gupta, S., Gupta, H. K., y Soni, J. (2005). Effect of Vitamin E and selenium supplementation on concentrations of plasma cortisol and erythrocyte lipid peroxides and the incidence of retained fetal membranes in crossbred dairy cattle. *Theriogenology*, 64(6), 1273-1286. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2005.03.008>
- Hackbart, K. S., Ferreira, R. M., Dietsche, A. A., Socha, M. T., Shaver, R. D., Wiltbank, M. C., y Fricke, P. M. (2010). Effect of dietary organic zinc, manganese, copper, and cobalt supplementation on milk production, follicular growth, embryo quality, and tissue mineral concentrations in dairy cows. *Journal of Animal Science*, 88(12), 3856-3870. <https://doi.org/10.2527/jas.2010-3055>
- Horn, M. J., van Emon, M. L., Gunn, P. J., Eicher, S. D., Lemenager, R. P., Burgess, J., Pyatt, N., y Lake, S. L. (2010). Effects of maternal natural (RRR α -tocopherol acetate) or synthetic (all-rac α -tocopherol acetate) vitamin E supplementation on suckling calf performance, colostrum immunoglobulin G, and immune function. *Journal of Animal Science*, 88(9), 3128-3135. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-2035>
- Ikeda, S., Kitagawa, M., Imai, H., y Yamada, M. (2005). The Roles of Vitamin A for Cytoplasmic Maturation of Bovine Oocytes. *Journal of Reproduction and Development*, 51(1), 23-35. <https://doi.org/10.1262/jrd.51.23>
- Illek, J., Kumprechtová, D., Tomchuk, V., Gryshchenko, V., y Kalinin, I. V. (2021). The effect of two different doses of selenium yeast and sodium selenite on selenium level in blood, colostrum, milk and metabolic. *Ukrainian Journal of Veterinary Sciences*, 12(3). <https://veterinaryscience.com.ua/en/journals/tom-12-3-2021/vpliv-dvokh-riznikh-doz-seleno-mistkikh-drizhdzhiv-ta-selenitu-natriyu-na-riven-selenu-v-krovi-molozivi-i-molotsi-ta-metaloprofil-u-molochnikh-koriv>
- Kendall, N. R., Marsters, P., Guo, L., Scaramuzzi, R. J., y Campbell, B. K. (2006). Effect of copper and thiomolybdates on bovine theca cell differentiation in vitro. *Journal of Endocrinology*, 189(3), 455-463. <https://doi.org/10.1677/joe.1.06278>
- Kor, N. M., Khanghah, K. M., y Veisi, A. (2013). Follicular fluid concentrations of biochemical metabolites and trace minerals in relation to ovarian follicle size in dairy cows. *Annual Research & Review in Biology*, 3(4), 397-404. <https://journalarrb.com/index.php/ARRB/article/view/648>
- LeBlanc, S. J. (2014). Reproductive tract inflammatory disease in postpartum dairy cows. *Animal*, 8, 54-63. <https://doi.org/10.1017/S1751731114000524>
- Leroy, J. L. M. R., Valckx, S. D. M., Jordaens, L., de Bie, J., Desmet, K. L. J., van Hoeck, V., Britt, J. H., Marei, W. F., y Bols, P. E. J. (2015). Nutrition and maternal metabolic health in relation to oocyte and embryo quality: critical views on what we learned from the dairy cow model. *Reproduction, Fertility and Development*, 27(4), 693. <https://doi.org/10.1071/RD14363>
- Livingston, T., Eberhardt, D., Edwards, J. L., y Godkin, J. (2004). Retinol improves bovine embryonic development in vitro. *Reproductive Biology and Endocrinology*, 2(1), 83. <https://doi.org/10.1186/1477-7827-2-83>
- Lizarraga, R. M. (2021). *Consecuencias productivas y reproductivas de la deficiencia de selenio en bovinos*. Universidad Nacional de La Plata. <https://doi.org/10.35537/10915/126267>
- McDowell, L. R., y Arthington, J. D. (2005). *Minerals for grazing ruminants in tropical regions* (4th ed.). University of Florida. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20073126802>
- Moraes, G. V., Azevedo, J. R., Carneiro, T. C., Cavalieri, F. L. B., Mataveli, M., Rossi, R. M., y Santos, T. C. (2012). Oocyte aspiration and in vitro embryo production in Jersey cows with selenium-supplemented diet. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 64(4), 787-795. <https://doi.org/10.1590/S0102-09352012000400001>
- Mujawar, A., Razaque, W., Ramteke, S., Patil, A., Ali, S., Bhikane, A., Khan, M., y Mogal, I. (2019). Estrus induction and fertility response in postpartum anoestrus marathwadi buffaloes using hormonal protocol along with Vitamin E and Selenium. *International Journal of Livestock Research*, 0, 1. <https://doi.org/10.5455/ijlr.20181113073117>
- Nicastro, C. N., Postma, G. C., Gazzaneo, P. D., Olivares, R. W. I., Schapira, A., y Minatel, L. (2021). Cuantificación de colágeno tipo I y tipo III en el corazón de bovinos con deficiencia secundaria de cobre. *InVet*, 23(2), 9. <https://www.fvet.uba.ar/archivos/publicaciones/invet/vol23-2-2021/art9/index.html>
- Nocek, J. E., Socha, M. T., y Tomlinson, D. J. (2006). The effect of trace mineral fortification level and source on performance of dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 89(7), 2679-2693. <https://doi.org/10.3168/jds>

S0022-0302(06)72344-X

- Palomares, R. A. (2022). trace minerals supplementation with great impact on beef cattle immunity and health. *Animals*, 12(20), 2839. <https://doi.org/10.3390/ani12202839>
- Pedroso Sosa, R., y Roller Gutiérrez, F. (2024). Respuesta reproductiva a la suplementación parenteral de cobre en vacas en anestro y hipocuprémicas. *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Perú*, 35(1), e25346. <https://doi.org/10.15381/rivep.v35i1.25346>
- Pedroso, R. (2003). *Métodos biotécnicos para mejorar la fertilidad del ganado bovino en los programas de inseminación artificial e inducción y sincronización del celo*. Universidad Agraria de La Habana.
- Pedroso, R., y Roller, F. (2009). Efecto de las deficiencias de cobre en la reproducción y eficacia de las nuevas biotecnologías del ganado bovino en Cuba. *Reseña. Ciencia y Tecnología Ganadera*, 3(3), 101-119. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122587/records/6473563953aa8c8963067d80>
- Picco, S. J., Fazzio, L. E., Rosa, E., Pintos, E. M., Furnus, C. C., Dulout, F. N. y Mattioli, G. A. (2005). Alteraciones oxidativas y daño en el ADN en bovinos con hipocuprosis. *Analecta Veterinaria*. 25(2),11-17. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/106974>
- Picco, S. J., Rosa, D. E., Anchordoquy, J. P., Anchordoquy, J. M., Seoane, A., Mattioli, G. A., y Furnus, C. C. (2012). Effects of copper sulphate concentrations during in vitro maturation of bovine oocytes. *Theriogenology*, 77(2), 373-381. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2011.08.009>
- Qashqai, H., Amanlou, H., Farahani, T. A., Farsuni, N. E., y Bakhtiary, M. K. (2020). Effects of supplemental manganese on ovarian cysts incidence and reproductive performance in early lactation Holstein cows. *Animal Feed Science and Technology*, 269, 114660. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114660>
- Rabiee, A. R., Lean, I. J., Stevenson, M. A., y Socha, M. T. (2010). Effects of feeding organic trace minerals on milk production and reproductive performance in lactating dairy cows: A meta-analysis. *Journal of Dairy Science*, 93(9), 4239-4251. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3058>
- Rani, P. J. A., y Panneerselvam, C. (2001). Carnitine as a free radical scavenger in aging. *Experimental Gerontology*, 36(10), 1713-1726. [https://doi.org/10.1016/S0531-5565\(01\)00116-4](https://doi.org/10.1016/S0531-5565(01)00116-4)
- Rodríguez-Campos, L. A., Arroyo-Oquendo, C., Blanco-Rojas, F., Herrera-Muñoz, J. I., y Molina-Coto, R. (2020). Efecto de suplementos minerales orales e inyectables en el desarrollo morfológico de novillas cruzadas. *Nutrición Animal Tropical*, 14(2), 1-22. <https://doi.org/10.15517/nat.v14i2.43486>
- Rosa, D. E. (2015). *Efecto del cobre durante la maduración de ovocitos bovinos: impacto sobre el desarrollo embrionario preimplantacional*. Universidad Nacional de La Plata. <https://doi.org/10.35537/10915/46266>
- Rutigliano, H. M., Lima, F. S., Cerri, R. L. A., Greco, L. F., Vilela, J. M., Magalhães, V., Silvestre, F. T., Thatcher, W. W., y Santos, J. E. P. (2008). Effects of method of presynchronization and source of selenium on uterine health and reproduction in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 91(9), 3323-3336. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1005>
- Sales, J. N. S., Dias, L. M. K., Viveiros, A. T. M., Pereira, M. N., y Souza, J. C. (2008). Embryo production and quality of Holstein heifers and cows supplemented with β -carotene and tocopherol. *Animal Reproduction Science*, 106(1-2), 77-89. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2007.04.001>
- Sales, J. N. S., Pereira, R. V. V., Bicalho, R. C., y Baruselli, P. S. (2011). Effect of injectable copper, selenium, zinc and manganese on the pregnancy rate of crossbred heifers (*Bos indicus*×*Bos taurus*) synchronized for timed embryo transfer. *Livestock Science*, 142(1-3), 59-62. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2011.06.014>
- Salles, M. S. V., Samóra, T. S., Libera, A. M. M. P. della, Netto, A. S., Junior, L. C. R., Blagitz, M. G., Faro, L. el, Souza, F. N., Batista, C. F., Salles, F. A., y de Freitas, José. E. (2022). Selenium and vitamin E supplementation ameliorates the oxidative stress of lactating cows. *Livestock Science*, 255, 104807. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104807>
- Santiago Hernández, A. (2020). *Efecto de la administración parenteral de minerales traza sobre la respuesta de ovulación múltiple en donadoras bovinas bajo condiciones de trópico*. Universidad Veracruzana. <http://cdigital.uv.mx/handle/1944/50892>
- Shaarawy, A.-M. B. M., Shehabeldin, A. M., Omar, M. E.-S. A. E.-K., Mehany, A. A., Rezk, R. A. S. A., y You-sif, H. M. (2024). Impact of Vitamin E and Selenium prior the ovsynch synchronization on reproductive performance in friesian dairy cows during hot season. *Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi*, 30(5): 595-602. <https://doi.org/10.9775/kvfd.2024.31740>
- Silvestre, F. (2008). *Nutraceutical and hormonal regulation of immunity, uterine health, fertility, and milk production of postpartum dairy cows*. University of Florida. <https://ufdc.ufl.edu/UFE0022826/00001/pdf>
- Šmigoc, J., Pavšič Vrtač, K., Jakovac Strajn, B., Stvarnik, M., y Mrkun, J. (2023). Preventive supplementation

- of vitamin E and Selenium as a factor in improving the success rate of embryo transfer in cattle. *Acta Veterinaria*, 73(1), 87-101. <https://doi.org/10.2478/acve-2023-0007>
- Spears, J. W., y Weiss, W. P. (2008). Role of antioxidants and trace elements in health and immunity of transition dairy cows. *The Veterinary Journal*, 176(1), 70-76. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2007.12.015>
- Studer, J. M., Schweer, W. P., Gabler, N. K., y Ross, J. W. (2022). Functions of manganese in reproduction. *Animal Reproduction Science*, 238, 106924. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2022.106924>
- Suttle, N. F. (2022). *Mineral Nutrition of Livestock*. (5th ed.). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781789240924.0000>
- Thatcher, W., Santos, J., Silvestre, F., Kim, I., y Staples, C. (2010). Perspective on physiological/endocrine and nutritional factors influencing fertility in post-partum dairy cows. *Reproduction in Domestic Animals*, 45(s3), 2-14. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2010.01664.x>
- Torres, G., Paez, R., Azúm, J., Roller, F., González, N., Acosta, J., y Pedroso, R. (2016). Uso del sulfato de cobre por vía parenteral en vacas hipocuprémicas con mastitis y su efecto en la fertilidad. *La Técnica: Revista de las Agrociencias*. 16, 56-63. https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i16.536
- Trojačanec, S., Boboš, S., y Pajić, M. (2012). Influence of β -carotene and vitamin A supplementation on the ovarian activity of dairy cows with chronic fertility impairment. *Veterinarski Arhiv*, 82(6), 567-575. <https://hrcak.srce.hr/93349>
- Vanegas, J. A., Reynolds, J., y Atwill, E. R. (2004). Effects of an Injectable Trace Mineral Supplement on First-Service Conception Rate of Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 87(11), 3665–3671. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73505-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73505-5)
- Vásquez Loaiza, M., y Molina Coto, R. (2021). Métodos de reproducción y parámetros reproductivos de cebuínos con registro genealógico en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 32(1), 19-33. <https://doi.org/10.15517/am.v32i1.40130>
- Wang, S., He, G., Chen, M., Zuo, T., Xu, W., y Liu, X. (2017). The role of antioxidant enzymes in the ovaries. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2017(1), 4371714. <https://doi.org/10.1155/2017/4371714>
- Xiao, J., Khan, M. Z., Ma, Y., Alugongo, G. M., Ma, J., Chen, T., Khan, A., y Cao, Z. (2021). The antioxidant properties of selenium and vitamin E; Their role in periparturient dairy cattle health regulation. *Antioxidants*, 10(10), 1555. <https://doi.org/10.3390/antiox10101555>