



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN
Y SERVICIO EN ZOOTECNIA**

POSGRADO EN PRODUCCIÓN ANIMAL

SUPLEMENTACIÓN DE COBRE A OVEJAS CRIOLLAS

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN INNOVACIÓN GANADERA**

PRESENTA:

Eloisa Cruz Huerta

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



Julio de 2009

Chapingo, Estado de México.

SUPLEMENTACIÓN DE COBRE A OVEJAS CRIOLLAS

Tesis realizada por Eloisa Cruz Huerta bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

DIRECTOR:

Ph. D. Maximino Huerta Bravo

ASESOR:

Ph. D. Pedro Arturo Martínez Hernández

ASESOR:

Ph. D. José Guadalupe García Muñiz

ASESOR:

Ph. D. Raymundo Rangel Santos

Sinceramente Eloisa

AGRADECIMIENTOS

A Dios por concederme inteligencia para entender, memoria para retener, método para aprender y sobre todo, por bendecirme cada día.

A mi *Alma Mater* la Universidad Autónoma Chapingo, especialmente al Posgrado en Producción Animal por darme la oportunidad y facilidades para alcanzar una meta más en mi vida.

Al Ph.D. Maximino Huerta Bravo, por su amistad, apoyo, comprensión y confianza. Además de sus sabios consejos, amplio conocimiento y tiempo invertido en esta investigación.

Al Ph.D. Pedro Arturo Martínez Hernández por su apoyo, recomendaciones y sugerencias, pero sobre todo por brindarme parte de su valioso tiempo.

Al Ph.D. José Guadalupe García Muñiz, por sus recomendaciones y sugerencias, pero sobre todo por brindarme parte de su valioso tiempo.

Al Ph.D. Raymundo Rangel Santos por su confianza, apoyo y acertadas sugerencias para el mejoramiento de esta tesis.

A los profesores y personal administrativo del Posgrado en Producción Animal, por brindarme su apoyo y contribuir en mi formación académica integral.

Al CONACYT y al COMECYT por el financiamiento facilitado para el desarrollo de mis estudios de posgrado.

Al Sr. Indalecio Flores y Ing. Pedro Ramos por su apoyo en la fase de laboratorio.

Al personal de la granja de la UACH, alumnos del Dr. Max y a todos quienes me brindaron su apoyo en la fase de campo, especialmente a Chayo y Elías.

A todos mis amigos y compañeros quienes hicieron grata la estancia en el posgrado.

Sinceramente Eloisa.

DEDICATORIAS

Quiero dedicar esta tesis especialmente a mi hija Yamel Itai, que llenó mi vida de alegría, paz, ternura, amor, pero sobre todo, me ha dado mucha felicidad, tiempo y comprensión.

A mis padres Modesta y Cayetano quienes además de darme la vida son los mejores amigos que Dios puso en mi camino y son mi ejemplo de responsabilidad, honestidad, amor y humildad.

A mis hermanos Javier, Nicacio, Angelina, Eli, Valentin, Arturo, Carmina y A. Adalberto por su apoyo, cariño, comprensión, amistad y confianza en todo momento, mil gracias los quiero mucho.

A mi abuelita Fortunata y mi madrina Carmen por sus oraciones y consejos.

A mis sobrinos: Javier, N. Usiel, Olga, Eli, Emmanuel, Diana, *Zoe Y. ^(†), A. David fuente de alegría, inspiración y *luz mi pequeño gran angelito.

A mis cuñadas: Hermelinda, Miriam, Maribel y Adela por su apoyo, consejos y felicidad que me han compartido.

A las familias Carrillo Moreno y Fernández Rincón por su apoyo incondicional.

A Isai por tu confianza, amistad, amor y comprensión. Por estar ahí compartiendo momentos especiales conmigo.

A mis amigos Marisela, Pedro, Layo, Chayo, Horte, Elías, Omar, Frank, Ervin y a todos mis seres queridos que si bien sus nombres no están en esta hoja, sí están en mi mente y corazón.

A Jovita por su apoyo, amistad y confianza. Y a Blanquita por su apoyo, consejos, paciencia y tolerancia.

...Para ustedes. Dios los Bendiga.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Eloisa Cruz Huerta

Fecha de nacimiento: 18 de enero de 1981

Lugar de nacimiento: Tetela de Ocampo, Puebla

CURP: CUHE810118MPLRRLO8

Profesión: Ingeniero Agrónomo Especialista en Zootecnia

Cédula profesional: 4967218



Desarrollo Académico

1997-2000: Preparatoria CEPGV, Chignahuapan, Puebla.

2001-2005: Licenciatura, Departamento de Zootecnia, Universidad Autónoma Chapingo.

2007-2008: Maestría, Posgrado en Producción Animal, Departamento de Zootecnia, Universidad Autónoma Chapingo.

Otros datos: Prestación de Servicio Social “Comportamiento productivo y reproductivo de los rebaños de cabras en el ejido de San José Ixtapa, Cañada Morelos, Puebla”. Estancia Pre- profesional en San Salvador Atenco “Establecimiento de un policultivo de Tilapia-Carpa”. Tesis Profesional: “Determinación del estado mineral en cabras bajo condiciones de pastoreo en agostadero”.

ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
1 INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
2 REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 Ovinocultura en México.....	3
2.2 Cobre.....	4
2.2.1 Funciones.....	4
2.2.2 Absorción.....	4
2.2.3 Metabolismo.....	6
2.2.4 Requerimientos.....	6
2.2.5 Signos de deficiencia.....	7
2.2.6 Toxicidad.....	11
2.2.7 Fuentes de cobre.....	12
2.2.7 Interacciones con otros minerales.....	12
2.3 Hierro.....	14
2.4 Zinc.....	15
2.5 Molibdeno.....	16
2.6 Azufre.....	17
2.7 Metales Pesados.....	18
2.7.1 Cadmio.....	19
2.7.2 Plomo.....	20
2.7.3 Mercurio.....	22
2.8 Respuesta a la suplementación con cobre.....	22

2.8.1 Reproducción.....	23
2.8.2 Producción.....	24
2.8.3 Inmunidad	26
2.8.4 Control de parásitos gastrointestinales	27
2.9 Literatura Citada.....	28
3 SUPLEMENTACIÓN DE COBRE A OVEJAS CRIOLLAS.....	36
3.1 Resumen.....	36
3.2 Abstract	37
3.3 Introducción.....	38
3.4 Materiales y Métodos	38
3.5 Resultados y Discusión	44
3.6 Conclusiones.....	63
3.7 Implicaciones.....	63
3.8 Literatura citada.....	64
4 AGRADECIMIENTOS	72

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Requerimientos de cobre en la dieta de ovinos.	7
Cuadro 2. Dieta experimental ofrecida a ovejas Criollas durante el estudio.	40
Cuadro 3. Medias de la concentración de minerales en alimento de ovejas Criollas.	44
Cuadro 4. Medias ^z para concentraciones (mg kg ⁻¹) de cobre, hierro, zinc, azufre (%), molibdeno, plomo y cadmio, en alimento de ovejas Criollas durante el transcurso del estudio.	47
Cuadro 5. Medias para concentración mineral en el agua ofrecida a ovejas Criollas.	49
Cuadro 6. Nivel de significancia (probabilidad) para nivel de suplemento y etapa fisiológica con respecto a la concentración mineral en el suero sanguíneo.	50
Cuadro 7. Medias ^z para concentración (mg L ⁻¹) de cobre, hierro, zinc, azufre, molibdeno, plomo y cadmio en suero sanguíneo de ovejas Criollas con diferente nivel de suplemento.	50
Cuadro 8. Medias para concentración de minerales (mg L ⁻¹) en suero sanguíneo de ovejas Criollas gestantes vs vacías.	57
Cuadro 9. Influencia de la suplementación con cobre en el porcentaje de ovejas Criollas parasitadas con <i>Trichostrongylus</i> , <i>Fasciola</i> y <i>Eimeria</i>	58
Cuadro 10. Medias para larvas de <i>Trichostrongylus</i> y cercarias de <i>Fasciola hepática</i> en heces de ovejas Criollas con cobre y testigo.	58
Cuadro 11. Peso vivo y condición corporal de ovejas Criollas suplementadas con cobre.	60
Cuadro 12. Efecto del nivel de suplemento en la fertilidad de ovejas Criollas. .	61
Cuadro 13. Efecto del cobre en la prolificidad de ovejas Criollas.	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Contenido de cobre en el alimento a través del tiempo.	47
---	----

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

Las ovejas Criollas se originan de las ovejas introducidas al continente americano durante la colonia (Fernández, 2000). En México, su manejo ha sido marginal, debido a que son pequeñas, poco productivas, longevas y de carne magra (Soto *et al.*, 2006), por lo que se utilizan como fuente de ahorro de familias rurales; sin embargo, la carne de las ovejas Criollas se distingue por su sabor apreciado para elaborar platillos típicos mexicanos como la barbacoa (Rubio *et al.*, 2003).

La mayoría de las ovejas Criollas en México se manejan en sistemas de producción extensivos, aprovechando como alimento recursos propios del lugar, por lo que es común que las ovejas sean sujetas a deficiencias nutricionales que se reflejan en bajo rendimiento productivo (McClure, 1994).

El desbalance nutricional debido a la insuficiencia de energía, proteína y minerales, a menudo es la causa de la baja producción en el ganado (McDowell *et al.*, 1997). El estado mineral de los rumiantes depende de las características del suelo, tipo de forraje, especie animal y prácticas de manejo utilizadas (Huerta, 1999); y si no hay la precaución las ovejas Criollas pueden tener desbalance de minerales, ya que la suplementación es nula o casi nula en la mayoría de las unidades de producción.

Los requerimientos de minerales se ven afectados por parásitos, ya que éstos pueden reducir a nivel intestinal la absorción de minerales e incrementar su requerimiento (McDowell y Arthington, 2005). Tanto los macrominerales como los microminerales pueden influir en la relación parasito-huésped (Coop y Holmes, 1996).

Bang *et al.* (1990) señalan que ovinos infestados con nematodos mostraron un diferente metabolismo del cobre; este mineral se usa como un antihelmíntico (Watkins, 2003). La deficiencia de cobre es común en los rumiantes de México (Huerta, 2003).

El cobre es un elemento traza esencial para el funcionamiento de varios sistemas enzimáticos (McDowell y Arthington, 2005); cuando los sistemas se deterioran pueden ocasionar directa o indirectamente signos de deficiencia. La detección temprana de la deficiencia ayuda a corregirla, incluso antes de que se manifieste visualmente y por tanto a reducir su efecto en el animal (Underwood y Suttle, 2003).

Los signos de deficiencia de cobre son anemia, diarrea, desórdenes óseos, problemas neonatales, ataxia, caída y despigmentación de la lana, infertilidad, desórdenes cardiovasculares, reducción del metabolismo de la glucosa y los lípidos, además de debilitamiento general del sistema inmunológico (McDowell y Arthington, 2005).

La necesidad de suplementar cobre en rumiantes ha sido identificada por varios años; sin embargo, las necesidades de cobre en ovinos no están bien definidas (Suttle, 2003). El diagnóstico del estado nutricional del cobre en los rumiantes es controversial, debido a las interacciones con zinc, hierro, azufre, molibdeno, cadmio y mercurio (Underwood y Suttle, 2003). El objetivo de la investigación fue determinar el estado mineral y comportamiento productivo de ovejas criollas suplementadas con cobre en diferente etapa fisiológica.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Ovinocultura en México

La ovinocultura en México se desarrolla en tres sistemas de producción: subsistencia, pasatiempo y empresarial. En el sistema empresarial se cuida la eficiencia productiva y reproductiva del rebaño para ser rentable (Soto *et al.*, 2006). En la actualidad hay una demanda creciente de carne ovina; sin embargo, la industria tiene un fuerte reto que es satisfacer la demanda interna y explorar nuevos nichos de mercado en el exterior.

El inventario ovino nacional es de 7.2 millones de cabezas; por otro lado, el consumo de carne ovina ha incrementado de 26,300 toneladas en 1991 a 90,000 toneladas en 2006; y la producción nacional fue de 38,000 toneladas; por tanto, la diferencia se cubre con importaciones (SIAP-SAGARPA, 2007).

En la zona centro de México los recursos genéticos ovinos se basan mayormente en el fenotipo Criollo, el cual se origina principalmente de cruza de ovejas Criollas con sementales Suffolk y Hampshire (Galina *et al.*, 1986). Los estados más productores son el Estado de México e Hidalgo; sin embargo, ahí predominan los sistemas tradicionales o de subsistencia con algunas carencias nutricionales (Soto *et al.*, 2006).

La nutrición juega un papel importante ya que la insuficiencia en energía y proteína es a menudo la responsable de la producción animal sub-óptima; sin embargo, los desbalances de minerales (deficiencias o excesos) originan baja producción y problemas productivos (McDowell y Arthington, 2005). Por ello es importante que los rebaños de ovejas estén bien manejados y alimentados para mejorar la eficiencia productiva.

2.2 Cobre

El cobre es uno de los elementos minerales esenciales requeridos para el soporte vital en los procesos biológicos de los seres vivos; es considerado como un mineral traza ya que sólo se requiere en cantidades pequeñas para satisfacer las necesidades nutritivas de los animales (Cousins, 1985).

2.2.1 Funciones

El cobre es necesario para la respiración celular, la formación de huesos, una adecuada función cardíaca, el desarrollo del tejido conectivo, mielinización de la medula espinal, queratinización y pigmentación de pelo y lana (McDowell *et al.*, 1997). También es cofactor de sistemas enzimáticos, componente de la citocromo oxidasa, importante en la fosforilación oxidativa (McDonald *et al.*, 1999), elemento esencial de varias metaloenzimas entre las cuales están: lisil oxidasa, superóxido dismutasa, dopamino- β -hidroxilasa y tirosinasa. Las enzimas ceruloplasmina y superóxido dismutasa, contienen en su estructura al mineral, poseen capacidad desinflamatoria y por tanto, efectos en el sistema inmune (Kincaid, 1999).

El Cu reduce la susceptibilidad a las infecciones en los corderos (Puls, 1988). Otra función en la cual interviene el Cu es en la protección contra oxidantes, mediante dos vías, una relacionada con el equilibrio del metabolismo del hierro, y la otra, a través de la enzima superóxido cobre-zinc dismutasa (CuZn SOD) (McDonald *et al.*, 1999; Underwood y Suttle, 2003).

2.2.2 Absorción

La eficiencia de absorción del Cu varía ampliamente no sólo entre especies, sino también entre fenotipos, sexos, estado fisiológico y edad. Cuando el rumen ya es funcional la composición de la dieta es importante para la absorción del Cu (Shorrocks y Alloway, 1985). Mullis *et al.* (2003) reportan que los bovinos Simmental presentan una absorción más baja que los Angus. Así mismo Littledike y Young (1993), señalan que ovinos Texel tienen mayor absorción de

Cu que ovinos de las razas Montadale y Romanov, por tanto, los ovinos de raza Texel son más susceptibles a sufrir intoxicación.

Existen dos mecanismos de absorción del Cu: uno es saturable (activo), que se presenta cuando existen bajas concentraciones de Cu en la dieta; y el otro insaturable (difusión simple) que entra en juego a altas concentraciones de Cu (Huerta, 2003). La absorción del Cu es mayor en animales jóvenes (80–90%) que en animales adultos (6-8%). Los alimentos concentrados presentan mas absorción que los henos o forrajes frescos (McDowell y Arthington, 2005).

Huerta (2003) menciona que el Cu se absorbe en todo el tracto gastrointestinal, aunque en mayor grado en el intestino delgado. Un porcentaje alto del cobre liberado durante la digestión ruminal suele precipitarse en forma de sulfuro de cobre y permanecer sin absorberse, mientras que es liberado durante la digestión post-ruminal (Underwood y Suttle, 2003). Las concentraciones altas de carbonato de calcio, hierro, azufre, cadmio o molibdeno reducen la absorción de cobre. El carbonato de cobre y los compuestos hidrosolubles como sulfatos, nitratos y cloruro de cobre, se absorben en mayor grado que el óxido de cobre (Hidiroglou *et al.*, 1990).

Cousins (1985) examinó el papel potencial de la metalotionina como reguladora de la absorción del cobre y como el sitio de interacción entre cobre y zinc. La metalotionina en intestino es inducida por excesos intra-celulares de Cu o Zn, para impedir el transporte de éstos minerales en la sangre (Reyes, 1999). El Zn es un inductor potente de la síntesis de metalotionina, mientras que ésta tiene mayor afinidad por Cu, de tal manera que el efecto de metalotionina sobre la absorción será mayor para Cu que para Zn (Huerta, 2003). Estos efectos se manifiestan con dosis elevadas de los minerales divalentes que interfieren en su metabolismo (Reyes, 1999).

3.2.3 Metabolismo

El metabolismo del Cu se ve influido por factores de la dieta, presencia de minerales como azufre, molibdeno, zinc, hierro, cadmio, plata, selenio y nivel de proteína. Por lo cual, resulta difícil determinar requerimientos precisos de cobre en la dieta y predecir niveles potencialmente tóxicos para los rumiantes en diferentes programas de alimentación (Ammerman, 1970; Underwood y Suttle, 2003).

El paso del Cu al torrente sanguíneo está facilitado por su unión con albúmina. En el hígado el Cu es captado en dos etapas, la primera es la unión a superóxido dismutasa (SOD) y la segunda a la metalotionina, previo a que sea repartido entre la secreción biliar, síntesis de ceruloplasmina y almacenamiento en tejidos (Underwood y Suttle, 2003).

La adaptación de los animales a variaciones en el aporte de Cu se realiza fundamentalmente mediante el almacenamiento hepático y la secreción biliar del elemento; pero la proporción de Cu almacenado en el hígado varía ampliamente según la especie (Underwood, 1977). Los rumiantes son especies con mayor riesgo para presentar deficiencia de Cu y almacenar los excesos. En cambio, los no rumiantes tienen menor riesgo ya que mantienen bajas las concentraciones hepáticas y se excreta el exceso de Cu vía biliar (Underwood, 1977; Underwood y Suttle, 2003).

En la mayoría de las especies de los mamíferos el sistema biliar se ha identificado como la principal vía de excreción del Cu absorbido, debido a que su concentración es más alta que en sangre (Underwood, 1981). Así mismo, el sistema biliar es el principal mecanismo homeostático del Cu en el cuerpo, pues el nivel de este elemento en orina es mínimo (McDowell y Arthington, 2005).

2.2.4 Requerimientos

Los requerimientos de Cu dependen de factores dietéticos, genéticos y de las condiciones de explotación (Puls, 1988). Los requerimientos minerales de los

ovinos se ven afectados por diferentes factores, algunos relacionados con el propio ovino como son: raza, edad, sexo, peso vivo, nivel de producción; otros asociados con el ambiente como el clima, tipo de suelo, dieta, calidad del alimento, etc. Así como las interacciones entre minerales y de éstos con otros nutrientes (Domínguez, 2003). En ovinos, el contenido de Cu en suero sanguíneo varía de 0.8 a 2.0 mg L⁻¹, además, está en estrecha relación con su concentración en hígado ya que es el principal reservorio de este elemento; si los niveles son menores puede haber respuesta a la suplementación (Puls, 1988).

Los requerimientos de Cu para ovinos en crecimiento, preñez y lactación se han establecido en función del contenido del molibdeno en la dieta (Cuadro 1); el requerimiento de Cu de 8 ppm (NRC, 2007) puede no ser apropiado, porque los excesos de hierro, azufre y molibdeno interfieren con su metabolismo y las necesidades son mayores (McDowell y Arthington, 2005). Por otro lado, deficiencias de azufre o molibdeno incrementan la absorción de Cu, disminuyendo el requerimiento (Underwood y Suttle, 2003).

Cuadro 1. Requerimientos de cobre en la dieta de ovinos.

Contenido de Mo (mg kg ⁻¹)	Contenido de cobre recomendado (mg kg ⁻¹ de materia seca)		
	Crecimiento	Preñez	Lactación
<1.0	8-10	9-11	7-8
>3.0	17-21	19-23	14-17

Fuente: NRC, 2007.

2.2.5 Signos de deficiencia

El diagnóstico de una deficiencia de cobre en animales depende de tres condiciones: presencia de signos clínicos, evidencia bioquímica de concentraciones anormales de cobre en tejidos y sangre, y finalmente, la mejoría de aquellos animales tratados con cobre respecto a aquellos no

tratados (Underwood y Suttle, 2003). La deficiencia del mineral puede presentarse por su ausencia, o por la concentración alta de molibdeno, azufre, hierro, zinc y deficiencia de selenio (McDowell *et al.*, 1997).

Ward (1978) categorizó la deficiencia de Cu en cuatro grupos, cuando el alimento contiene:

- ☞ Concentraciones altas de molibdeno (más de 20 ppm).
- ☞ Concentración baja de Cu pero con un contenido de Mo considerablemente alto (relación menor de 2:1).
- ☞ Deficiencia de Cu (menos de 5 ppm).
- ☞ Concentración normal de Cu y bajo en Mo, con un contenido alto de proteína soluble.

McDowell *et al.* (1997) señalan que los signos clínicos en rumiantes asociados a una deficiencia de cobre, incluyen:

Anemia. Es una expresión común de la deficiencia de Cu en todas las especies aunque únicamente suele desarrollarse cuando la deficiencia es extensa o prolongada. En estas circunstancias, el contenido de Cu desciende a valores reducidos (1.5 a $3 \mu\text{mol L}^{-1}$), lo que impide el mantenimiento de una hematopoyesis normal (Underwood, 1981; McDowell y Arthington, 2005).

Alteraciones óseas. Las anomalías en el desarrollo óseo varían ampliamente entre especies y razas de animales. Alteraciones de la osificación endocondral que provoca crecimiento óseo anormal (osteocondrosis) sólo puede afectar a los animales en crecimiento, de forma que la morfología ósea depende del ritmo de crecimiento, la distribución del peso corporal, el movimiento e incluso el ritmo de crecimiento de las pezuñas (Underwood y Suttle, 2003). En corderos jóvenes, estabulados, nacidos de ovejas deficientes en Cu, puede aparecer osteoporosis y una reducción en la actividad osteoblástica pero sin cambios morfológicos de los huesos (Suttle *et al.*, 1972).

Ataxia neonatal. Existen dos tipos de ataxia: la forma neonatal, en la que los animales son afectados al nacer; y la forma retardada, en la cual los signos tardan algunas semanas en aparecer (Ward, 1978; McDowell y Arthington, 2005). Los corderos afectados al nacer son incapaces de levantarse y mueren en poco tiempo. Este problema se manifiesta por movimientos descoordinados del cuarto trasero, paso tambaleante y balanceo (Huerta, 2003).

En las cabras jóvenes predomina la ataxia tardía donde es característica la hipoplasia cerebelosa. Según progresa la forma tardía de la enfermedad se evidencian movimientos descoordinados de las extremidades posteriores, marcha tambaleante y debilidad del tercio posterior (Underwood y Suttle, 2003).

La alta sensibilidad del cordero a ataxia neonatal se puede explicar porque durante la fase final de la gestación, cuando la mielina se está depositando más rápidamente en el cerebro del feto, la deficiencia del cobre causa una depresión de citocromo oxidasa que da lugar a inhibición del metabolismo aeróbico y síntesis de fosfolípidos (McDowell y Arthington, 2005). Esto provoca inhibición de la síntesis de mielina, debido a que la mielina está compuesta principalmente por fosfolípidos. Este proceso es irreversible (Huerta, 2003).

Despigmentación. La acromatríquia suele ser el signo clínico más precoz de la deficiencia de Cu en todas las especies animales con excepción del cerdo (Shorrock y Alloway, 1985). La falta de pigmentación en la lana de las ovejas negras y la formación de pelo gris en el ganado bovino, alrededor de los ojos, se explica probablemente por la pérdida de la capacidad para transformar la tirosina en melanina (Underwood, 1981; McDonald *et al.*, 1999).

La pigmentación del pelo y lana se debe a melanina y otros pigmentos, que son polímeros sintetizados a partir de tirosina, en cuya formación interviene la enzima tirosinasa, que contienen Cu (Underwood y Suttle, 2003). La deficiencia de Cu ocasiona que esta enzima no funcione y por tanto, el pelo o lana no se pigmenta adecuadamente (Huerta, 2003).

Queratinización. El crecimiento y la apariencia física de la lana y el pelo son modificados cuando existen niveles inadecuados de Cu (Underwood, 1981). La deficiencia de Cu en las ovejas origina el no rizado de las fibras de la lana, lo cual tiene como consecuencia una fibra casi lisa conocida como lana de acero o lana fibrosa (McDowell *et al.*, 1997).

McDonald *et al.* (1999), afirman que el cobre realiza el rizado de la lana. El elemento se encuentra en una enzima responsable de la formación de puentes disulfuro entre las moléculas adyacentes de cisteína. Si falta la enzima, las moléculas protéicas de la lana no forman estos puentes, y la lana, carente de rizado recibe los adjetivos mencionados anteriormente por McDowell *et al.*, (1997).

Diarrea. La diarrea se desarrolla en los animales de forma rápida y severa. Se presenta usualmente más en ganado vacuno que en ovinos (McDowell y Arthington, 2005). En las cabras se ha observado cuando pastorean a los animales en praderas con forrajes deficientes en Cu (Underwood, 1981). A pesar de que no existe una clara relación entre los cambios histoquímicos y ultra-estructurales, la diarrea es aparente. Estas observaciones representan los primeros indicios de cambios patológicos, los cuales podrían tener importancia sobre la incidencia de diarreas en rumiantes deficientes en Cu (Suttle, 2003).

El exceso de Mo provoca deficiencia de Cu y diarrea en borregos, que se manifiesta como heces blandas (Underwood y Suttle, 2003). Estos problemas se pueden agravar cuando se ingiere forraje tierno, especialmente al inicio de la época de lluvias o durante el invierno (Huerta, 2003).

Infertilidad. Los problemas reproductivos en ovinos consisten en menor porcentaje de pariciones, fallas en la implantación del embrión, muerte fetal y abortos (Puls, 1988). La infertilidad del ganado bovino puede ser un signo en animales que consumen pastos deficientes en Cu, asociada con retrasos o anulación del celo y en algunos casos, con el aborto, como se ha observado en ovejas sometidas a una deficiencia experimental de Cu (Howell y Hall, 1970).

Sin embargo, no se ha establecido una relación estricta entre un contenido bajo de Cu y la infertilidad en campo. Otros signos en vacas deficientes de Cu son: dificultad al parto, retención placentaria, retardo del estro y terneros nacidos con raquitismo congénito (McDowell y Arthington, 2005). En ratas y cerdos de guinea la deficiencia de Cu causa mayor incidencia de muerte fetal y reabsorción (Shorrocks y Alloway, 1985).

Alteraciones cardiovasculares. El ganado con deficiencia de Cu puede morir de forma repentina al esforzarse, y el examen postmortem puede revelar pequeñas lesiones en el corazón (McDowell *et al.*, 1997). La lesión principal de la enfermedad es una degeneración lenta y progresiva del miocardio con fibrosis, sustitución y acumulación de hierro (McDowell y Arthington, 2005).

En los animales afectados los niveles de Cu en hígado y sangre son muy reducidos ($32 \mu\text{mol kg}^{-1}$ MS y $1.6 \mu\text{mol L}^{-1}$, respectivamente) y reflejan valores normalmente bajos del elemento. (Underwood y Suttle, 2003). Shorrocks y Alloway (1985), mencionan que el indicio más fuerte de la deficiencia de Cu es el debilitamiento y ruptura súbita de la arteria mayor o incluso del corazón, efectos que se han observado en cerdos, pollos, gatos, conejos y bovinos.

2.2.6 Toxicidad

La intoxicación por Cu tiene dos fases: la primera consiste en la acumulación de cobre en hígado y puede durar días o meses, dependiendo de la cantidad de Cu en la dieta, el porcentaje de absorción y factores que aceleran el depósito y movilización del Cu hepático (Underwood y Suttle, 2003). Durante este tiempo se considera que no existe ningún efecto sobre el comportamiento animal.

La segunda fase se conoce como crisis hemolítica y consiste en apoptosis de las células hepáticas y liberación del Cu al torrente sanguíneo (Larry, 1993). El Cu circulante destruye los glóbulos rojos hasta un 60%, con la consecuente liberación de hemoglobina; el animal está sediento, deja de comer y muere. Los productos de degradación de la hemoglobina se depositan en los tejidos, de tal

manera que el riñón adquiere un color negro metálico, el hígado, la canal y el rumen adquieren tonalidades amarillentas o acafetadas (Huerta, 2003).

A la toxicidad por Cu también se le conoce como hipercupremia, (McDonald *et al.*, 1999; McDowell y Arthington, 2005); los animales intoxicados presentan signos como náuseas, vómito, salivación, convulsiones, distrofia muscular, parálisis, colapso y muerte (Puls, 1988).

La intoxicación de ovejas se presenta con mayor frecuencia cuando se adiciona a la dieta excretas de aves o cerdos (Pacheco *et al.*, 2003). De igual forma, cuando los animales consumen plantas hepatotóxicas (Raubaudi *et al.*, 2005). Para ganado ovino, el nivel de tolerancia es de 15 ppm de Cu (NRC, 2007).

2.2.7 Fuentes de cobre

La hierba fresca y las pajas son fuente pobre de Cu, mientras que las plantas del género *brassica* y cereales son fuentes ricas en Cu (McDonald *et al.*, 1999; Underwood y Suttle, 2003). El contenido normal de este mineral en los pastos oscila entre 4 y 8 mg kg⁻¹ MS (McDowell y Arthington, 2005). La aplicación de fertilizantes que contienen Cu (sulfato, carbonato, cloruro, óxido y nitrato cúprico) puede ser un medio efectivo para incrementar la concentración de Cu en el pasto, con lo cual se puede mejorar el nivel de cobre en los animales (McDowell *et al.*, 1997).

2.2.7 Interacciones con otros minerales

La nutrición del cobre no es sencilla, es decir, no se puede cuantificar de manera precisa determinando el nivel de cobre en la dieta basal o bien, adicionando una fuente disponible del mineral (Iván y Veira, 1985). Debido a su absorción y metabolismo se puede ver afectado por molibdeno, azufre calcio, zinc, hierro, manganeso, cobalto, plomo, cadmio y selenio; por tanto, decidir cuanto suplemento de cobre se requiere no es siempre fácil (Larry, 1993; Larson, 2005).

En ovinos, los niveles en dieta de molibdeno pueden ser el principal factor que afecta las necesidades de cobre. Si los niveles de molibdeno son bajos ($<1 \text{ mg kg}^{-1}$), las ovejas son más susceptibles a intoxicación por cobre. No obstante, si la ingesta de molibdeno es superior a 10 mg kg^{-1} , la deficiencia de cobre puede ocurrir con dietas que normalmente serían adecuadas (Iván y Veira, 1985). Este ha sido un problema importante en pastoreo de ovejas en praderas con pastos bajos en cobre pero altos en molibdeno y azufre (Larry, 1993). Corderos nacidos de ovejas en estos pastos frecuentemente presentan ataxia neonatal y tienen una baja tasa de supervivencia (Ward, 1978).

McDonald *et al.* (1999) indican que el efecto del Mo limita la retención del Cu en los animales, únicamente si existe azufre. Los microorganismos del rumen forman sulfuros, éstos reaccionan con el molibdato para formar tiomolibdatos que, a su vez, se combinan con el Cu para formar tiomolibdatos de cobre (CuMoS_4), compuestos que impiden la absorción del cobre ya que lo vuelven insoluble (Larson, 2005). En monogástricos esto no ocurre, porque los sulfatos son estables en el estómago (Larry, 1993).

El consumo de suelo con altas concentraciones de hierro afecta la absorción del cobre porque en el rumen se forma FeS (Underwood y Suttle, 2003), en el abomaso el S es liberado y forma compuestos con el Cu los cuales no son solubles a nivel intestinal (Suttle *et al.*, 1984). La alimentación con alto contenido de aminoácidos azufrados inhibe la absorción de cobre en ratas (Larson, 2005). Niveles altos de calcio reducen la absorción de cobre por el aumento del pH en el contenido intestinal (Larry, 1993).

Animales que se alimentan con vegetación que crece en suelos con excesos de molibdeno, aluminio, titanio y sulfatos, presentan deficiencia de cobre aunque tengan consumo frecuente del mineral en la dieta, Tiffany *et al.* (2000) señalan que puede deberse a las interacciones de los minerales y a la absorción del cobre por las plantas y por tanto en el animal. De manera diferente, el zinc en bajas proporciones mejora los niveles séricos del Cu al aumentar la absorción intestinal (Mahmound y Ford, 1983).

Tiffany *et al.* (2002), determinaron el estado mineral de vacas en pastoreo al consumir forraje cosechado en praderas abonadas con lodo de aguas residuales, donde encontraron deficiencia de Cu originada por consumo de forraje con concentraciones altas de azufre, cadmio, níquel y molibdeno. Por lo anterior, Lee *et al.* (2002) mencionan que el diagnóstico del estado nutricional del cobre en los animales es un enigma (Quiroz y Bouda, 2001).

2.3 Hierro

El hierro es un componente esencial de la hemoglobina y la mioglobina para el transporte de oxígeno (Puls, 1988). También es importante en el metabolismo de la energía, ya que facilita la transferencia de electrones para la formación de trifosfato de adenosina (ATP), de igual manera es importante en algunas enzimas tales como catalasas, peroxidases, citocromos en las mitocondrias, etc. (Underwood y Suttle, 2003; McDowell y Arthington, 2005).

La absorción del hierro se lleva a cabo en todo el sistema digestivo, pero principalmente en duodeno y yeyuno; se elimina por heces, orina, sudor, pelo y cuando los animales tienen alguna hemorragia (McDowell *et al.*, 1997). La absorción del hierro depende de factores como el *estatus* del hierro en el organismo y la edad; además de fosfatos, fitatos y taninos en dieta (McDowell y Arthington, 2005).

La absorción es mayor en animales deficientes que en animales sanos (Puls, 1988). Los rumiantes jóvenes son más susceptibles a la deficiencia de Fe debido a que la leche contiene bajos niveles de este mineral ($< 1\text{mg L}^{-1}$ MS para todas las especies) y las elevadas tasas de crecimiento de los animales lactantes (McDowell *et al.*, 1997; Underwood y Suttle, 2003).

El hierro absorbido se transporta en forma de hierro férrico donde se une a la transferrina (Underwood y Suttle, 2003). La ceruloplasmina funciona como una ferroxidasa, facilita la liberación del hierro de la ferritina a los enterocitos y hepatocitos parenquimatosos, además de la unión del hierro a la transferrina

(Frieden, 1971). La transferrina transporta el hierro a los tejidos y el que está almacenado lo distribuye al sistema retículo endotelial (Refsun y Schreiner, 1984).

Los signos de deficiencia de Fe incluyen anemia, disminución del apetito, respiración difícil, cansancio y disminución de la resistencia a las infecciones (Puls, 1988). Además, McDowell *et al.* (1997) señalan que los ovinos presentan menor ganancia de peso, letargo, incapacidad de soportar el esfuerzo circulatorio, atrofia de las papilas de la lengua y despigmentación de las mucosas.

La suplementación con Fe es justificada cuando los forrajes contienen menos de 100 mg kg⁻¹ o existe una pérdida de sangre significativa (Underwood y Suttle, 2003). Las fuentes más comunes que se usan son sulfato o carbonato ferroso, plantas con muchas hojas, semillas de leguminosas y granos de cereales (McDowell *et al.*, 1997).

La intoxicación crónica por Fe causa diarrea y acidosis metabólica, retraso del crecimiento, además interfiere con el metabolismo de otros minerales como el cobre y el fósforo (Minson, 1990; McDowell *et al.*, 1997).

2.4 Zinc

El zinc (Zn) es indispensable para el crecimiento y salud de los animales (Dana *et al.*, 2002). Además es componente de las estructuras del ADN, ARN y los ribosomas, forma parte del sistema inmune y balance de electrolitos; es activador de varios sistemas enzimáticos (Maynard *et al.*, 1981; McDonald *et al.*, 1999), importante en la utilización y producción de aminoácidos; almacenamiento y producción de hormonas como la testosterona, insulina y corticoides. Asimismo interviene en el desarrollo testicular, espermatogénesis, proceso reproductivo de la hembra y lactancia (McDowell *et al.*, 1997; Underwood y Suttle, 2003).

Los signos iniciales de la deficiencia de Zn son disminución en el consumo de alimento, tasa de crecimiento y eficiencia alimenticia, seguido por desórdenes en la piel, tales como piel seca, escamosa y abierta: en cabeza, cuello, estómago, escroto y piernas (Underwood y Suttle, 2003). También se pueden observar lesiones en nariz y boca, endurecimiento de las articulaciones, pérdida de pelo y aspereza del mismo (McDowell *et al.*, 1997). Además, puede afectar la espermatogénesis, el crecimiento testicular, el crecimiento de órganos primarios y secundarios en el macho; en la hembra pueden verse afectadas las fases del ciclo reproductivo (McDowell *et al.*, 1997; McDonald *et al.*, 1999). Además, cuando los niveles de Zn disminuyen durante el último tercio de la gestación, aumenta la incidencia de partos distócicos (Dana *et al.*, 2002).

El zinc puede ser suministrado en forma de bolos o de inyecciones con carbonato, cloruro, sulfato u óxido de zinc (McDowell y Arthington, 2005). Otra alternativa es utilizar fertilizante que contiene zinc en la producción del forraje (Minson, 1990). Este mineral está presente en la levadura y en harina de pescado (McDonald *et al.*, 1999). Niveles altos de Zn en la dieta pueden ocasionar deficiencia de Fe y Cu, e influir en los procesos de absorción y utilización de calcio y cadmio (McDowell *et al.*, 1997).

2.5 Molibdeno

El molibdeno (Mo) forma parte de varias enzimas como la xantina oxidasa, aldehído oxidasa, sulfito oxidasa, además es importante para el transporte de electrones y metabolismo de purinas, pirimidinas, aldehídos y en la oxidación de sulfitos (McDowell *et al.*, 1997; Underwood y Suttle, 2003).

El Mo se absorbe en intestino delgado principalmente en duodeno y yeyuno; se elimina por orina y en menor cantidad por heces y leche (Ward, 1978). No se ha identificado algún signo de deficiencia de molibdeno en rumiantes debido a que no han sido establecidos los requerimientos exactos, además, por la interacción que tiene con el cobre y azufre (McDowell *et al.*, 1997).

El principal signo de toxicidad en corderos es pérdida de peso y diarreas (McDonald *et al.*, 1999; McDowell y Arthington, 2005). Underwood y Suttle (2003), señalan que los efectos de toxicidad por el molibdeno son muy parecidos a la deficiencia de cobre. Boila y Golfman (1991), observaron que en novillos alimentados con niveles excesivos de Mo tuvieron una reducción de proteína cruda absorbida después del rumen. Pinto-Santini *et al.* (2007) señalan que con dietas altas en Mo (20 mg kg^{-1}) las vacas presentaron una disminución en cobre hepático.

2.6 Azufre

El azufre (S) es constituyente de varias proteínas, por lo que en caso de deficiencia se puede presentar una síntesis limitada de los aminoácidos cisteína, cistina y metionina (McDonald *et al.*, 1999). En general, la proteína de los alimentos contiene 16% de nitrógeno y 2% de azufre, es decir que si el forraje tiene 9% de proteína, tendrá de S 0.18% (Underwood y Suttle, 2003). El S forma parte de los cartílagos, huesos, tendones y paredes de venas (McDowell *et al.*, 1997)

Las funciones importantes que tiene el azufre son síntesis y metabolismo de proteínas, lípidos y carbohidratos, coagulación de la sangre, funciones endócrinas y equilibrio ácido base dentro y fuera de la célula (Bouchard y Conrad, 1975; McDowell *et al.*, 1997). El S es incorporado al animal por medio de la dieta, y metabolizado por los microorganismos del rumen (Underwood, 1977).

El S es absorbido en su mayoría por transporte activo en el intestino delgado (Ramírez, 2003), a excepción de los aminoácidos que son primero liberados mediante digestión proteolítica en el intestino delgado y posteriormente absorbidos (Underwood y Suttle, 2003). El azufre se excreta en orina y heces (Ramírez, 2003). El S excretado en heces es predominantemente de naturaleza orgánica, y es eliminado vía orina en forma de sulfato (Underwood y Suttle, 2003).

La falta de S en la dieta aumenta el ácido láctico en sangre, lo cuál puede usarse como diagnóstico de una deficiencia. Los signos producidos por la deficiencia de azufre en rumiantes no son específicos. Ovejas y cabras deficientes invierten más tiempo en la rumia (Pulls, 1988), disminuye la tasa de crecimiento, pierden peso, lana o pelo, presentan debilidad, lagrimación, ojos borrosos, torpeza y muerte (Underwood y Suttle, 2003).

La síntesis de proteína microbiana se reduce, por tanto el animal presenta signos de una mala alimentación proteica. Además, la población microbiana en rumen no utiliza el ácido láctico y este se acumula en orina y sangre (McDowell *et al.*, 1997). El aumento de S en la dieta tiende a reducir la producción de ácido láctico, lo que aumenta la eficiencia de utilización del alimento (Underwood, 1977).

El azufre se puede proveer por medio de hidróxido de metionina, sales de sulfato amónico o el azufre elemental (McDowell *et al.*, 1997). Niveles excesivos de este elemento en la dieta pueden causar toxicidad severa presentando signos como dolor abdominal y muscular, diarreas, deshidratación severa, aliento con olor a sulfuro, pulmones congestionados y enteritis (Bouchard y Conrad, 1975; McDowell *et al.*, 1997; Underwood y Suttle, 2003).

2.7 Metales Pesados

El enfoque de los estudios sobre metales pesados fue establecer relación dosis-respuesta para conocer la ingesta del metal, su acumulación en el cuerpo y los signos de intoxicación (Bremner, 1979). Actualmente la detección ha cobrado importancia debido a su toxicidad y capacidad de bioacumulación en el organismo (Alcocer *et al.*, 2007).

Los límites legales de sustancias indeseables en Europa son inferiores a las dosis tóxicas (NRC, 2001), con la excepción del cadmio y flúor. El límite máximo legal de cadmio en los alimentos en Europa es 1 mg kg^{-1} , para evitar que aumente su consumo en los humanos (Méndez, 2001). El arsénico, cadmio y

flúor, pueden estimular el sistema inmune del animal, mejorar sus defensas, y por tanto, pueden no ser excluidos por completo de la alimentación animal (Bach y Devant, 2004).

2.7.1 Cadmio

El cadmio (Cd) es un elemento altamente reactivo y tóxico distribuido ampliamente en la mayoría de ecosistemas agrícolas (Underwood y Suttle, 2003). Una vez absorbido por el hombre o el animal, su eliminación es lenta, por lo cual se acumula fácilmente en el tracto gastrointestinal afectando riñones, huesos y el aparato reproductor (Méndez, 2001). Puede modificar el metabolismo esencial de oligoelementos como Zn, Cu, Fe, y su distribución en los tejidos (Underwood y Suttle, 2003).

Concentraciones de 3 a 7 mg de Cd kg⁻¹ en dieta disminuye la retención de Cu en hígado, modificando el rizo de la lana (Mills y Dalgarno, 1972). Phillips *et al.* (2004) señalan que con 2.6 ppm de cadmio en dieta causa urolitiasis. Al suplementar ratas con 7.15 ppm de Cd, después de los 40 días provocaron lesiones hepáticas (Weigel *et al.*, 1984).

En rumiantes donde se utilizaron concentraciones dietéticas altas de cadmio (>40 mg kg⁻¹ MS), los signos que presentaron fueron disminución en crecimiento, disminución en el desarrollo testicular, pérdida de apetito y paraqueratosis (Ammodio-Cocchieri y Fiore, 1987; Underwood y Suttle, 2003; Larry, 2006). El control sobre la retención de cadmio se produce gracias a la metalotionina, ya que ésta proteína se une al Cd y lo almacena en hígado y riñón (Galván-Bobadilla, 2005). La exposición al cadmio induce la síntesis de metalotionina en la mucosa intestinal y en hígado; por ello se cree que tiene un papel protector aunque el complejo Cd-metalotionina es nefrotóxico (Bremner, 1979).

La fuente exógena más importante de cadmio es el fertilizante superfosfatado que varía su concentración (< 5 a 134 mg Cd kg⁻¹), dependiendo del país o

región de origen (Bramley, 1990). Las concentraciones de Cd en los forrajes puede mantenerse dentro de los límites aceptables si se evitan las fuentes de superfosfato ricas en el mineral y probablemente añadiendo cal a los pastos, para reducir la captación (Oliver *et al.*, 1996).

La ingestión de tierra y fertilizante por los animales durante el pastoreo aumenta la concentración del elemento en el organismo (Underwood y Suttle, 2003). Otra fuente son las aguas residuales y de riego contaminadas. La contaminación simultánea con zinc, puede limitar la captación de cadmio procedentes de aguas residuales, minería o fundición de metales (Bramley, 1990).

2.7.2 Plomo

El plomo (Pb) puede provocar retraso del desarrollo mental e intelectual en los niños y causar hipertensión y enfermedades cardiovasculares en los adultos. La absorción de plomo vía oral es cercana a 10% en adultos, en niños se incrementa hasta el 50% (Alfvén *et al.*, 2002). El plomo absorbido se distribuye en distintos órganos y tejidos como riñón, hígado y huesos (Underwood y Suttle, 2003).

El plomo compite con los metales esenciales, modificando sus concentraciones intracelulares (calcio, hierro, zinc y cobre). Tiene afinidad por los grupos (-SH) de las proteínas, produciendo una serie de alteraciones fisiológicas en el organismo (NRC, 2001; Alfvén *et al.*, 2002). Altera el transporte de iones esenciales e inhibe la síntesis del grupo hemo en los eritroblastos de la médula ósea, nefronas, neuronas y sistemas transportadores de O₂, por inhibición específica de la α -aminolevulínico-deshidratasa (ALAD), coproporfirinógeno-oxidasa y ferroquelatasa, con acúmulo de metabolitos tóxicos (Méndez, 2001). Disminuye la velocidad de conducción del impulso nervioso por inhibición de ATPasas y despolarización celular (Underwood y Suttle, 2003).

Los suelos con aguas residuales y fangosas son fuente importante de plomo ya que pueden tener hasta 500 mg kg⁻¹ MS o más (Suttle *et al.*, 1991); sin

embargo, no es fácil que las plantas y los forrajes absorban el metal ya que estos no exceden una concentración mayor de 5 mg kg^{-1} MS. El principal peligro para el ganado es el consumo de suelo, forraje regado con aguas residuales y la pintura de las instalaciones (Ammodio-Cocchieri y Fiore, 1987; Méndez 2001).

La intoxicación aguda por plomo se caracteriza por hemorragia gastrointestinal, anemia, necrosis hepática y daño renal (Alfvén *et al.*, 2002). En una exposición crónica, no se observan lesiones en el tracto gástrico ni anemia, pero son evidentes los problemas óseos como osteoporosis que frecuentemente es acompañada por hidronefrosis en corderos, en ovejas el principal signo de deficiencia es la depresión y anorexia (Ammodio-Cocchieri y Fiore, 1987). Factores que estimulan la mineralización ósea como suplementos dietéticos de calcio y de fósforo reducen la intoxicación por plomo (Underwood y Suttle, 2003).

La absorción de plomo por los animales es baja, inferior al 1% (Underwood, 1977; Méndez 2001) y parece existir un cierto mecanismo de regulación de forma que al aumentar la exposición a fuentes de plomo, no aumenta linealmente la retención en el organismo (Underwood y Suttle, 2003).

Exposiciones crónicas a bajos niveles de plomo no causan síntomas clínicos en vacunos, porque los huesos secuestran el plomo y lo liberan lentamente a sangre para que sea excretado (NRC, 2001). El plomo se acumula más en huesos que en tejidos blandos, por esta razón los aportes de las carnes en plomo a la dieta son muy bajos. Así se disminuye el riesgo para el hombre al consumir carne de animales expuestos al mineral; sin embargo, en Europa si los niveles en vísceras son mayores a $2 \text{ y } 1 \text{ mg kg}^{-1}$ peso fresco en hígado y riñón, las canales pueden ser rechazadas (Ammodio-Cocchieri y Fiore, 1987; Underwood y Suttle, 2003).

2.7.3 Mercurio

El mercurio ejerce varios efectos tóxicos en el organismo, peroxidación lipídica, daño en el ADN, agotamiento de la glutatión peroxidasa y estrés por oxidación con Hg causando la intoxicación (Sener *et al.*, 2003). El metil-mercurio puede causar alteraciones del desarrollo normal del cerebro de los lactantes y a niveles más elevados puede causar modificaciones neurológicas en los adultos. El mercurio inorgánico es poco tóxico pero en la cadena trófica marina es transformado en metil-mercurio (Méndez, 2001).

Las harinas de pescado son la única vía probable de entrada de Hg en la cadena de los animales al ser una fuente del mineral orgánico que se absorbe y acumula en músculo en porcentajes altos (Underwood y Suttle, 2003). Sener *et al.* (2003), señalan que la melatonina o N-acetilcisteína protege hígado, riñón, pulmón y cerebro contra el daño oxidativo inducido por cloruro de mercurio en ratas.

El metabolismo del Hg es diferente si se presenta en forma orgánica o inorgánica. Las formas orgánicas se absorben poco, con rangos de 1 a 15% de la ingestión (Kostial *et al.*, 1978). Las formas orgánicas son liposolubles con mayor absorción, el cloruro de metil-mercurio en vacas en lactancia presentó absorción de 59%; en derivados de mercurio se han obtenido valores de absorción de hasta 90% (Clark, 1987). Por tanto, las formas orgánicas son más tóxicas y las responsables de la mayoría de los casos de intoxicación por mercurio.

Los signos clínicos de toxicidad por mercurio son: anorexia, diarrea sanguinolenta, sed excesiva, salivación, ceguera, ataxia e hipersensibilidad, postración y muerte (Clark, 1987; Underwood y Suttle, 2003).

2.8 Respuesta a la suplementación con cobre

El tratamiento de una deficiencia de cobre normalmente se corrige con el suministro de cobre suplementario en la dieta o por medios sistémicos

(McDowell y Arthington, 2005). La administración de cobre se ha realizado vía oral, parenteral o sistémica. La forma oral es por medio de la dieta o con preparaciones de cobre como cápsulas; el tratamiento de cobre por vía parenteral se basa en la administración de quelatos de cobre en solución o pasta. Para la suplementación sistémica se han usado niveles excesivos de cobre, que tienen que ser administrados por medio de inyecciones, éstas pueden causar daño al tejido (Underwood y Suttle, 2003), además, una inyección no proporciona una adecuada respuesta para mantener los niveles normales de cobre en los animales.

2.8.1 Reproducción

Los problemas reproductivos en ovinos consisten en menor porcentaje de pariciones, fallas en la implantación, muerte fetal y abortos (Puls, 1988). Las deficiencias y/o excesos de minerales en los animales son de difícil identificación. Las deficiencias de minerales pueden confundirse con deficiencias energéticas o proteicas, o bien con la presencia de parásitos internos y externos, entre otras (Underwood y Suttle, 2003).

Los desórdenes reproductivos pueden ocurrir por deficiencia de cobre, yodo, manganeso, fósforo, selenio y zinc. En general, son varios los reportes sobre el efecto del cobre y molibdeno en la reproducción. McDonald *et al.* (1999) señalan que menos de 3 mg de Cu kg⁻¹ de MS en la dieta pueden prolongar el intervalo entre partos en vacas. Así mismo el exceso de molibdeno puede retrasar el celo, el cual se presenta con menor intensidad, posiblemente por reducir la secreción de LH.

Xin *et al.* (1993) evaluaron el efecto del nivel de cobre y molibdeno sobre la secreción de LH en vaquillas donde concluyen que la suplementación con molibdeno reduce hasta 11%, la concentración de LH en suero sanguíneo. Así mismo, la concentración de LH en la adenohipófisis disminuye en 28%. La deficiencia de cobre producida por molibdeno afecta la síntesis de LH pero no su secreción. Phillippo *et al.* (1987b) evaluaron la aparición de los primeros

síntomas de la pubertad y algunas variables reproductivas postpubertad en hembras Hererford-Friesian suplementadas con 500 mg de Fe kg⁻¹ MS y 5 mg de Mo kg⁻¹ MS; concluyendo que la pubertad no es afectada por la concentración de cobre. En cambio, la suplementación con molibdeno redujo las ganancias de peso y atrasó la edad de la pubertad de las hembras en 30 días (Phillippo *et al.*, 1987a). Las deficiencias de Cu, causadas por Mo y S, reducen la concentración de gonadotropinas en ovejas a nivel que suprimen la actividad cíclica en animales jóvenes (Plessis *et al.*, 1999).

Los resultados de estas investigaciones permiten inferir que el cobre por sí solo no afecta la reproducción. Una aproximación pudiera ser que un bajo nivel de cobre puede ser un prerrequisito para afectar la pubertad y la fertilidad por parte del molibdeno (Underwood y Suttle, 2003).

La suplementación con niveles recomendados por el NRC (2001) de Cu, Zn, Mn en vacas lecheras aumentó el porcentaje de hembras preñadas en un 5%. (Ahola *et al.*, 2004). Además, Yost *et al.* (2002) reportan que en vacas gestantes suplementadas con 50 mg de Cu kg⁻¹ de MS y 80 mg de Cu kg⁻¹ de MS los becerros tienen un aumento del 6 y 9% de cobre en plasma; sin embargo, para la madre no tiene efecto. Al suplementar 125 mg de Cu kg⁻¹ en dieta durante el último tercio de la gestación, es suficiente para corregir el nivel de Cu en sangre de las vacas, pero no es óptimo para mejorar la inmunidad de los terneros (Fazzio *et al.*, 2006).

Olson *et al.* (1999) señalan que la suplementación con cobre orgánico reduce el comportamiento reproductivo de vacas de primer parto. En vacas posparto, no mejora la tasa de preñez, pero incrementa la concepción temprana (Muehlenbein *et al.*, 2001).

2.8.2 Producción

Los beneficios en las unidades de producción animal dependen de la ganancia de peso y conversión alimenticia. Los niveles inadecuados de minerales afectan

el crecimiento (Underwood y Suttle, 2003). Debido al papel de los minerales en los sistemas enzimáticos que se asocian al metabolismo de carbohidratos y proteínas, tales como el manganeso, cobre y zinc (Spears y Kegley, 1991).

El manganeso es importante en el crecimiento y desarrollo del esqueleto; el cobre se requiere para la síntesis de fibras del colágeno y de la elastina, que proporcionan la estructura y la elasticidad al tejido conectivo y a los vasos sanguíneos (McDowell y Arthington, 2005). El zinc es esencial para la integridad del tejido, división y reparación de la célula, además para el mecanismo de transporte absorción y utilización de las vitaminas A y E (Niederman *et al.*, 1994; Underwood y Suttle, 2003).

Engle y Spears (2000), señalan que con 20 mg de Cu kg⁻¹ de dieta disminuye la eficiencia alimenticia en novillos en finalización, pero no afecta la ganancia diaria de peso. En contraste, al suplementar 30 mg Cu Kg⁻¹ de dieta en ovejas Rambouillet, con una dieta base que contenía 5 mg de Cu Kg⁻¹ de dieta, 113 mg de Fe kg⁻¹ de dieta, 1 mg Mo kg⁻¹ de dieta y 0.17% de S kg⁻¹ de dieta, durante 73 días mejoran la ganancia de peso en un 5% (Eckert *et al.*, 1999).

El uso de fuentes orgánicas de cobre mejora el crecimiento y ganancia de peso de 0.82 a 0.92 kg y conversiones de 3.17 a 3.07 en cerdos en finalización (Spears y Kegley, 1991). Sin embargo, Eckert *et al.* (1999), Ahola *et al.* (2004) y Arthington (2005) reportan que no hay diferencia al suplementar Cu orgánico e inorgánico en rumiantes.

En ovejas suplementadas con 10 mg de Cu Kg⁻¹ en dieta durante 90 días, la concentración de Zn en hígado aumentó, pero no afectó las concentraciones de Cu en hígado. En heces encontraron que había 5% más cobre en los animales suplementados que en los no suplementados (Hatfield *et al.*, 2001). Arthington (2005) reporta que en novillos suplementados con bolos de óxido de cobre se deprime la digestibilidad del forraje.

Arthington y Spears (2007), suplementaron vaquillas con 100 mg de Cu kg⁻¹ de dieta con melaza y maíz para medir su efecto en el consumo de forraje y no encontraron ningún efecto en el consumo de forraje; sin embargo, se observó una disminución en ganancia diaria de peso y menor concentración de Cu en suero. Lo anterior se pudo deber a la cantidad de azufre que contienen la melaza y el grano.

2.8.3 Inmunidad

El cobre en el sistema inmune tiene algunas funciones como regular actividad enzimática, antioxidante, desarrollo de anticuerpos, neutrófilos y réplica del linfocito (Niederman *et al.*, 1994). Dos enzimas dependientes de cobre, la ceruloplasmina y la superóxido dismutasa, tienen actividad anti-inflamatoria, desempeñan funciones esenciales en la prevención de daños por oxidantes en los tejidos, causados por procesos infecciosos e inflamatorios (Suttle y Jones, 1989). Cuando el ganado vacunado sufre alguna infección o es estresado, las concentraciones de Cu en plasma se incrementan y las concentraciones en hígado disminuyen (Xin *et al.*, 1991). En ovinos, la concentración máxima de Cu en plasma se logra a los 3 y 7 días después del estrés y retorna a la normalidad en tres semanas (Suttle, 2003).

Los efectos virales y bacterianos del cobre se han demostrado en el ganado. Cuando el animal tiene niveles adecuados de cobre y ceruloplasmina en los tejidos, las enfermedades infecciosas disminuyen en un 25% con respecto a los animales con deficiencia de mineral (Xin *et al.*, 1991; Stabel *et al.*, 1993). Sin embargo, la suplementación de Cu en concentraciones normales no mejora la respuesta inmune. También indican que la exposición prolongada a Mo y S, puede disminuir la función inmune (Ward *et al.*, 1993).

El nivel bajo de cobre ha ocasionado que la inmunidad humoral transmitida se deprima, además la actividad de los neutrofilos en bovinos también disminuye (Jones y Suttle, 1981). Las actividades *in vitro* de los linfocitos aislados en ratas adultas alimentadas con una dieta marginal en cobre, fueron suprimidas

notablemente; pero no presentaron alteraciones en indicadores del estado de cobre (Hopkins y Failla, 1995). En becerros recién nacidos la incidencia de úlceras abomasales, poco después del nacimiento y los problemas respiratorios se han atribuido a niveles inadecuados de cobre (Naylor *et al.*, 1989).

2.8.4 Control de parásitos gastrointestinales

Las especies de nemátodos que afectan a la mayoría de las ovejas pertenecen a la subfamilia Trichostrongyloidea e incluyen *Haemonchus*, *Trichostrongylus*, *Cooperia*, *Ostertagia*, y *Oesophagostomum* (Bowman *et al.*, 2003).

El control de nemátodos y parásitos es esencial para maximizar la productividad y la eficiencia alimenticia. Sin embargo, el control se está convirtiendo en un problema con la creciente resistencia de los parásitos comunes a los compuestos antihelmínticos (Barriga, 1997). Actualmente ha aparecido resistencia en parásitos que afectan a diferentes especies animales e incluso el humano. La resistencia de parásitos helmintos a antihelmínticos se está convirtiendo en un problema grave en la cría de ovejas (Urquhart *et al.*, 1996).

Como alternativas en el control de parásitos Barriga (1997) señala el uso de hongos nematofagos y de tierras diatomeas que laceran la cutícula del nemátodo. Además de el uso de cobre como un antihelmíntico (Bang *et al.*, 1990; Chartier *et al.*, 2000; Watkins, 2003). Bang *et al.* (1990a) demostraron la actividad antihelmíntica del cobre en ovejas infectadas teniendo una máxima respuesta inmune y señaló que existe una interacción entre el metabolismo del cobre y nemátodos gastrointestinales.

Chartier *et al.* (2000) comprobaron que las cápsulas de óxido de cobre reducen la carga de *H. contortus* en ovinos estabulados; de igual modo, Watkins (2003) encontró una reducción de carga parasitaria de *Haemonchus contortus* en ovinos en pastoreo, lo cual pudo deberse a que en el abomaso se tienen las condiciones ácidas adecuadas para liberar los iones de Cu que tienen efecto antiparasitario (Chartier *et al.*, 2000; Waller *et al.*, 2004); además, éste es el

compartimento que utiliza el nemátodo para la fase infectiva (Watkins, 2003). Burke *et al.* (2004) mencionan que con 2 gramos de agujas de óxido de cobre es suficiente para reducir *H. contortus* y con 6 g de óxido de cobre se disminuyen los huevecillos de otros parásitos en hígado.

2.9 Literatura Citada

- Ahola, J. K., D. S. Baker, P. D. Burns, R. G. Mortimer, R. M. Enns, J. C. Whittier, T. W. Geary, and T. E. Engle. 2004. Effects of copper zinc and manganese supplementation and source on reproduction, mineral status, and performance in grazing beef cattle over a two year period. *Journal of Animal Science* 82: 3275-2383.
- Alcocer V., V. M., A. F. Castellanos R., F. Herrera Ch., L. A. Chel G., y D. A. Betancur A. 2007. Detección de metales pesados y dicloro difenil tricloro etano (DDT) en músculos y órganos de bovinos en Yucatán. *Técnica Pecuaria México* 45: 237-247.
- Alfvén, T., L. Järup, and C. G. Elinder. 2002. Cadmium and lead in blood in relation to low bone mineral density and tubular proteinuria. *Environmental Health Perspectives* 110: 699-702.
- Ammerman, C. B. 1970. Recent developments in cobalt and copper in ruminant nutrition: A review. *Journal of Dairy Science* 53: 1097-1105.
- Ammodio-Cocchieri, A., and P. Fiore. 1987. Lead and cadmium concentrations in livestock bred in Campania, Italy. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 39: 460-464.
- Arthington, J. D. 2005. Effects of copper oxide bolus administration or high-level copper supplementation of forage utilization and copper status in beef cattle. *Journal of Animal Science* 83: 2894-2900.
- Arthington, J. D., and J. W. Spears. 2007. Effects of tribasic copper choride versus copper sulfate provided in corn-and molasses-based on forage intake and copper status of beef heifers. *Journal of Animal Science* 85: 871-876.
- Bach, A., y M. Devant. 2004 Microminerales en la nutrición del rumiante: aspectos técnicos y consideraciones legales. *Curso de especialización FEDNA* pp: 327-341.
- Bang, K. S., A. S. Familton, and A. R. Sykes. 1990. Effect of copper wire particle treatment on establishment of major gastrointestinal nematodes in lambs. *Research in Veterinary Science* 49: 132-137.
- Barriga O., O. 1997. *Veterinary Parasitology for Practitioners* (2nd ed.), Burgess Publishing. 350 p.

- Boila, R. J., and L. S. Golfman. 1991. Effects of molybdenum and sulfur on digestion by steers. *Journal of Animal Science* 69: 1626-1635.
- Bouchard, R., and H. R. Conrad. 1975. Sulfur requirements of lactating dairy cows: Sulfur balance and dietary supplementation. *Agricultural Research and Development Center* 15: 72-76.
- Bowman, D. D., R. Carl-lynn, and M. L. Eberhard. 2003. *Georgis' Parasitology for Veterinarians*. Elsevier Science Missouri 142: 245-378.
- Bramley, R. G. V. 1990. Cadmium in New Zealand agriculture. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 33: 505-519.
- Bremner, I. 1979. The toxicity of cadmium, zinc and molybdenum and their effects on copper metabolism. *Proceedings of the Nutrition Society* 38: 235-242.
- Burke, J. M., J. E. Miller, D. D. Olcott, B. M. Olcott, and T. H. Terrill. 2004. Effect of copper oxide wire particles dosage and feed supplement level on *Haemonchus contortus* infection in lambs. *Veterinary Parasitology* 123: 235-243.
- Chartier, C., E. Etter, H. Heste, I. Pors, C. Koch, and B. Dellac. 2000. Efficacy of copper oxide needles for the control of nematode parasites in dairy goats. *Veterinary Research Communications* 24: 389-399.
- Clark, T. W. 1987. Mercury. *In*: Mertz W. Trace Elements in Human and Animal Nutrition. Academic Press. New York. pp: 18-45.
- Coop, R. L., and P. H. Holmes, 1996. Nutrition and parasite interaction. *International Journal for Parasitology* 26: 951-962.
- Cousins, R. J. 1985. Absorption, transport and hepatic metabolism of copper and zinc: special reference to metallothionein and ceruloplasmin. *Physiological Reviews* 45: 238-309.
- Dana J., T., M. Socha, T., C. Swenson K., y J. Bruce A. 2002. Efectos de minerales traza inorgánicos en el desempeño del ganado lechero y de engorda. *In*: Memorias XXX Reunión de la Asociación Mexicana de Producción Animal. Guadalajara, Jal., México. pp: 18-24.
- Domínguez V., I. A. 1993. Diagnóstico del estado mineral de ovinos bajo condiciones de pastoreo en Tenango del Valle, México. Tesis Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. México. 158 p.
- Eckert, G. E, L. W. Greene, G. E. Carstens, and W. S. Ramsey. 1999. Cooper status of ewes fed increasing amounts of copper from copper sulfate or copper proteinate. *Journal of Animal Science* 77: 244-249.
- Engle, T. E., and J. W. Spears. 2000. Effects of dietary copper concentration and source on performance and copper status of growing and finishing steers. *Journal of Animal Science* 78: 2446-2451.
- Fazzio L. E., E. Rosa D., J. Picco S., G. Melani, L. Minatel, y A. Mattioli G. 2006. Efecto de la suplementación parenteral con cobre durante el último tercio de gestación de vacas en zona de hipocuprosis. *Revista Veterinaria* 17: 84-87.

- Fernández, G. 2000. Situación de los recursos genéticos domésticos locales del Uruguay. *Archivos de Zootecnia* 49: 333-340.
- Frieden, E. 1971. Ceruloplasmin, a link between Copper and Iron Metabolism. Gould. R. F. eds. *Bioinorganic Chemistry*. American Chemical Society. pp: 292-231
- Galina H., C., C. Santiel A., y M. Valencia J. 1986. Reproducción de Animales Domésticos. Limusa. México. pp: 13-15.
- Galván-Bobadilla, A. I., R. M. García-Escamilla, N. Gutiérrez-García, M. L. Mendoza-Magaña, y R. Rosiles-Martínez. 2005. Concentraciones de Cadmio y Zinc en tejido de cáncer prostático y en hiperplasia prostática benigna. *Revista Mexicana de Patología Clínica* 52: 109-117.
- Hatfield, P. G., C. K. Swenson, R. W., Kott, and R. P. Ansotegui. 2001. Zinc and copper status in ewes supplemented with sulfate and amino acid-complexed forms of zinc and copper. *Journal of Animal Science* 79: 261-266.
- Hidiroglou, M., M. Iván, y L. McDowell. R. 1990. Metabolismo y estado del cobre en el ganado bovino. *In: XVI Congreso Mundial de Buiatria*. Salvador, Bahia, Brasil. pp: 25-32.
- Hopkins, R. G., and M. L. Failla. 1995. Chronic intake of a marginally low copper diet impairs *in vitro* activities of lymphocytes and neutrophils from male rats despite minimal impact on conventional indicators of copper status. *Journal of Nutrition* 125: 2658-2668.
- Howell, J. M., and G. A. Hall. 1970. Infertility associated with experimental copper deficiency in sheep, guinea-pigs and rats. *In: Symposium Trace Element Metabolism in Animals*. Livingstone. Edinburgh and London 1: 106-109.
- Huerta B., M. 1999. Diagnóstico del estado mineral de explotaciones bovinas en México. *In: Memoria del II Seminario Internacional Estrategias de Suplementación a Bovinos en Pastoreo*. 28 y 29 de octubre. Chapingo, México. pp: 153-184.
- Huerta B., M. 2003. La deficiencia y toxicidad del cobre en ovinos. *In: Memorias del XII Congreso Nacional de Producción Ovina*. AMTEO. Tulancingo, Hidalgo. pp: 48-64.
- Ivan, M., and M. D. Veira. 1985. Effects of copper sulfate supplement of growth, tissue concentration and ruminal solubilities of molybdenum and copper in sheep fed low and high molybdenum diets. *Journal of Dairy Science* 68: 891-896.
- Jones, D. G., and N. F. Suttle. 1981. Some effects of copper deficiency on leukocyte function in sheep and cattle. *Research Veterinary Science* 31: 151-156.
- Kincaid, R. L. 1999. Assessment of trace mineral status of ruminants: A review. *Proceedings of the American Society of Animal Science* 77: 1-10.
- Kostial, K., D. Kello, S. Jugo, I. Rabar, and T. Maljkovic. 1978. Influence of age on metal metabolism and toxicity. *Environmental Health Perspectives* 25: 81-86.

- Larry, L. B. 1993. Effective copper nutrition for farm animals. Salt trace Minerals. Salt Institute 25: 15-18.
- Larry, L. B. 2006. Trace minerals and cadmium toxicity. Salt trace Minerals. Salt Institute 38: 14-16.
- Larson, C. K. 2005. Role of trace minerals in animal production. *In*: Nutrition Conference of Animal Science, University of Tennessee. 12 p.
- Lee, J., S. O. Knowles, and D. M. West. 2002. Predicting copper status of cattle remains an enigma. Proceedings New Zealand Society of Animal Production 62: 319-324.
- Littledike, E. T., and D. L. Young. 1993. Effect of sire and dam breed on copper status of fat lambs. Journal Animal Science 71: 774-778.
- Mahmound, M. O., and H. E. J. Ford. 1983. Absorption and excretion of organic compounds of copper by sheep. Journal Comparative Pathology 93: 551-557.
- Maynard, L. A., K. J. Loosli, H. F. Hintz, y R. G. Warner. 1981. Nutrición Animal. 4ta ed. McGraw-Hill. México. 640 p.
- McClure, T. J. 1994. Nutritional and Metabolic Infertility in the Cow. Commonwealth Agricultural Bureaux International. CAB. Wallingford, UK. 144 p.
- McDonald, P., R. A. Edwards, J. F. D. Greenhalgh, y C. A. Morgan. 1999. Nutrición Animal. 5ª Edición. Edit. Acribia. Zaragoza, España. pp: 89-116.
- McDowell L., R., J. P. Velásquez, y G. Valle. 1997. Minerales para Rumiantes en Pastoreo en Regiones Tropicales. Universidad de Florida. Gainesville, Florida. USA. 49 p.
- McDowell L., R., y J. D. Arthington. 2005. Minerales para Rumiantes en Pastoreo en Regiones Tropicales. Universidad de Florida. Gainesville, Florida. USA. pp: 1-47.
- Méndez B., J. 2001. Metales pesados en la alimentación animal. *In*: XVII Curso de Especialización FEDNA: Avances en Nutrición y Alimentación Animal. Madrid, España. 12 p.
- Mills, C. F., and A. C Dalgarno. 1972. Copper and zinc status of ewes and lambs receiving increased dietary concentration of cadmium. Nature 239: 171-173.
- Minson, D. J. 1990. Forage in Ruminant Nutrition. Academic Press. San Diego, California, USA. 463 p.
- Muehlenbein, E. L., D. R. Brink, G. H. Deutscher, M. P. Carlson, and A. B. Johnson. 2001. Effects of inorganic and organic copper supplemented to first-calf cows on cow reproduction and calf health and performance. Journal of Animal Science 79: 1650-1659.
- Mullis, L. A., J. W. Spears, and R. L. McCraw. 2003. Effects of breed (Angus vs Simmental) and copper and zinc source on mineral status of steers fed high dietary iron. Journal of Animal Science 81: 318-322.

- Naylor, J. M., T. R. Kasari, and B. R. Blakely. 1989. Diagnosis of copper deficiency and effects of supplementation in beef cows. *Journal of Veterinary Research* 53: 343-348.
- Niederman, C. N., D. Blodgett, D. Eversole, G. G. Schurig, and C.D. Thatcher. 1994. Effect of copper and iron on neutrophil function and humoral immunity of gestating beef cattle. *Journal of American Veterinary Medical Association* 204: 1796-1800.
- NRC. 2001 Nutrient Requirements of Dairy Cattle (7th Ed.). The National Academies Press, Washington, D.C. 381 p.
- NRC. 2007. Nutrients Requirements of Small Ruminants: Sheep, Goats, Cervids, and New World Camelids. The National Academies Press. Washington, D.C. 345 p.
- Oliver, D. P., K. G. Tiller, M. K. Conyers, W. J. Slattery, A. M. Alston, and R. H. Merry. 1996. Effectiveness of liming to minimize uptake of cadmium by wheat and barley grain grow in the field. *Australian Journal of Agricultural Research* 47: 1181-1193.
- Olson, P. A., D. R. Brink, D. T. Hickok, M. P. Carlson, N. R. Schneider, G. H. Deutscher, D. C. Adams, D. J. Colburn, and A. B. Johnson. 1999. Effects of supplementation of organic and inorganic combinations of copper, cobalt, manganese, and zinc above nutrient requirement levels on postpartum two-year-old cows. *Journal of Animal Science* 77: 522-532.
- Pacheco A., J. A., J. L Rosciano G., W. A. Villegas C., V. M. Alcocer V., y A. F. Castellanos R. 2003. Cuantificación del contenido de cobre y otros minerales en pollinazas producidas en el estado de Yucatán. *Técnica Pecuaria en México* 41: 197-207.
- Phillippo, M., W. R. Humphries, and P. H. Garthwaite. 1987a. The effect of dietary molybdenum and iron on copper status and growth in cattle. *Journal of Agricultural Science* 109: 315-320.
- Phillippo, M., W. R. Humphries, and T. Atkinson. 1987b. The effect of dietary molybdenum and iron on copper status, puberty, fertility and oestrous cycles in cattle. *Journal of Agricultural Science* 109: 321-336.
- Phillips, C. J., P. C. Chi, and H. M. Omed. 2004. The effects the cadmium in beef, and its ameliotration with zinc on element balances in sheep. *Journal of Animal Science* 82: 2489-2502.
- Pinto-Santini L., S. Godoy, C. Chicco, y T. Chacón. 2007. Efectos de altos niveles de Molibdeno sobre la nutrición del cobre en vacas mestizas. *FCV-LUZ XVII(2)*: 588-596.
- Plessis, S. S., F. E. Niekerk, and W. A. Coetzer. 1999. The effect of dietary molybdenum and sulphate on the oestrus cycle and ovulation in ewes after manipulation with exogenous progesterone alone or in combination with FSH and LH. *Nutrition* 69: 708-712

- Puls, R. 1988. Mineral Levels in Animal Health: Diagnostic Data. Serpa Int. Clearbrook, BC. 240 p.
- Quiroz R., G., y Bouda J. 2001. Fisiopatología de las deficiencias de cobre en rumiantes y su diagnóstico. *Revista Veterinaria* 32: 289-296.
- Ramírez L., R. G. 2003. Nutrición de Rumiantes Sistemas Extensivos. Trillas. Monterrey, N. L, México. pp: 71-94.
- Raubaudi, R., C. Mazzani, I. Benitez, A. Martinez, O. Luzón, y C. González. 2005. Relación entre las concentraciones de hierro, cobre y zinc y la incidencia de *Aspergillus flavus*, *Fusarium moniliforme*, aflatoxinas y fumonisinas en maíz. *Fitopatología Venezuela* 18:15-18.
- Refsun, S., B., and B. Schreiner B. 1984. Regulation of iron balance by absorption and excretion. A critical review and new hypothesis. *Scandinavian Journal of Gastroenterology* 19: 867-874.
- Reyes G., R. E. 1999. Las metalotioninas como biomarcadores moleculares de la contaminación por metales pesados en organismos acuáticos. *Interciencia* 24(6): 366-371.
- Rubio M., S., N. Torres, J. Gutiérrez, and R. Méndez. 2003. Composition and sensory evaluation of lamb carcasses used for the traditional mexican lamb dish "barbacoa". *Meat Science* 67: 359-364.
- Sener, G., A. O. Sehirli, and G. Ayanoglu-Dülger. 2003. Melatonin protects against mercury (II)-induced oxidative tissue damage in rats. *Pharmacology Toxicology* 93: 290-296.
- Shorrocks, V. M., and B. J. Alloway. 1985. Copper in plant, human and animal nutrition: Copper Development Association. Technical Review. International Copper Research 80 p.
- SIAP-SAGARPA. 2007. Inventario ovino Disponible en: <http://www.siap.sagarpa.gob.mx/index.php?idCat=212&idSegCat=1>. Consultado: el 8 de julio de 2009.
- Soto, L. del C., M. Delgado, y A. Cuéllar. 2006. Situación de la ovinocultura en México. Artículos técnicos ovinos. http://www.engormix.com/s_articles_view.asp?art=908&AREA=OVI. Consultado: el 04 de diciembre de 2008.
- Spears, J. W., and E. B. Kegley. 1991. Effect of zinc and manganese methionine on performance of beef cows and calves. *Journal of Animal Science* 61: 59-64
- Stabel, J. R., J. W. Spears, and T. Jr. Brown. 1993. Effect of copper deficiency on tissue, blood characteristic, and immune function of calves challenged with infectious bovine rhinotracheitis virus and *Pasteurella hemolytica*. *Journal of Animal Science* 71: 1247-1255.
- Suttle, N. F. 2003. Meeting the copper requirements of ruminants. In: Wiseman and P. C. Garnsworthy (Eds). *Recent Developments in Ruminant Nutrition*. Nottingham University Press, Nottingham. pp: 221-236.

- Suttle, N. F., K. W. Angus, D. I. Nisbet, and A. C. Field. 1972. Osteoporosis in copper-depleted lambs. *Journal Comparative Pathology* 82: 93-97.
- Suttle, N. F., P. Abrahams, and I. Thornton. 1984. The role of soil x dietary sulphur interaction in the impairment of copper absorption by ingested soil in sheep. *Journal of Agricultural Science* 103: 81-86.
- Suttle, N. F., and D. G. Jones. 1989. Recent developments in trace element metabolism and functions: Trace elements, disease resistance and immune responsiveness in ruminants. *Journal of Nutrition* 119: 1055-1061.
- Suttle, N. F., J. Brebner, and J. Hall. 1991. Faecal excretion and retention of heavy metals in sheep ingesting topsoil from fields treated with metal rich sludge. *In*: Momcilovic, B. (ed) *Proceeding of the Seventh International Symposium on Trace Elements in Man and Animals*. Duvrovnik. IMI, Zagreb. pp: 32-34.
- Tiffany, M. E., L. R. McDowell, G. A. O'Connor, F. G. Martin, N. S. Wilkinson, E. C. Cardoso, S. S. Percival, and P. A. Rabiansky. 2000. Effects of pasture applied biosolids on performance and mineral status of grazing beef heifers. *Journal of Animal Science* 78: 1331-1337.
- Tiffany, M. E., L. R. McDowell, G. A. O'Connor, F. G. Martin, N. S. Wilkinson, S. S. Percival, and P. A. Rabiansky. 2002. Effects of residual and reapplied biosolids on performance and mineral status of grazing beef steers. *Journal of Animal Science* 80: 260-269.
- Underwood, E. J. 1977. *Trace Elements in Human and Animal Nutrition*. 4th. Ed. New York. Academic Press. pp: 245-310.
- Underwood, E. J. 1981. *Los Minerales en la Alimentación del Ganado*. Acribia. España. 380 p.
- Underwood, E. J., y N. F. Suttle 2003. *Los Minerales en la Nutrición del Ganado*. 3a ed. Acribia S.A. Zaragoza, España. 637 p.
- Urquhart, G. M., J. Armour, J. L. Duncan, A. M. Dunn, y F. W. Jennings. 1996. *Veterinary Parasitology* (2nd ed.). Blackwell Science. Oxford, UK. pp: 70-95.
- Waller, P., J. G. Bernes, L. Rudby-Martini, B. L. Ljungström, and A. Rydziki. 2004. Evaluation of copper supplementation to control *Haemonchus contortus* infections of sheep in Sweden. *Acta Veterinaria Scandinavica* 45: 149-160.
- Ward, G. M. 1978. Molybdenum toxicity and hypocuprosis in ruminants. A review. *Journal of Animal Science* 46: 1078-1085.
- Ward, J. D., J. W. Spear, and E. B. Kegley. 1993. Effect of copper level and source (copper lysine vs copper sulfate) on copper status, performance, and immune response in growing steers fed diets with or without supplemental molybdenum and sulfur. *Journal of Animal Science* 71: 2748-2755.
- Watkins, A. D. 2003. Effectiveness of copper-oxide wire particles on the control of *Haemonchus contortus* in sheep. Thesis Ph.D. Louisiana State University. 45 p.

- Weigel, H. J., I. Elmadfa, and H. J. Jäger. 1984. The effect of low doses of dietary cadmium oxide on the disposition of elements (zinc, copper, iron), hematological parameters, and liver function in rats. *Environmental Contamination Toxicology* 13: 289-296.
- Xin, W., J. Silvia, D. F. Waterman, and R. W. Hemken. 1993. Effect of copper status on luteinizing hormone secretion in dairy steers. *Journal of Dairy Science* 76: 437-344.
- Xin, Z., D. F. Waterman, R. W. Hemken, and R. J. Harmon. 1991. Effects of copper status on neutrophil function, superoxide dismutase and copper distribution in steers. *Journal of Dairy Science* 74: 3078-3081.
- Yost, G. P., J. D. Arthington, L. R. McDowell, and F. G. Martin. 2002. Effect of copper source and level on the rate and extent of copper repletion in Holstein heifers. *Journal of Dairy Science* 85: 3297-3303.

3 SUPLEMENTACIÓN DE COBRE A OVEJAS CRIOLLAS

3.1 Resumen

El objetivo del estudio fue determinar el estado mineral y comportamiento productivo de ovejas Criollas al ofrecer cobre dietético. Los minerales determinados en alimento, agua y suero sanguíneo (SS) fueron cobre, hierro, zinc, azufre, molibdeno, plomo y cadmio. El peso vivo, condición corporal (CC), fertilidad y prolificidad también fueron evaluados. En heces se realizó conteo e identificación de parásitos. El diseño experimental fue completamente al azar. El modelo para analizar las concentraciones de minerales en SS, PV y CC incluyó los efectos de nivel de suplementación (NS; 0 ó 15 mg Cu kg⁻¹), etapa fisiológica (EF, empadre, gestación, lactancia) y su interacción; mientras que para agua, alimento, carga parasitaria, fertilidad y prolificidad sólo incluyó el NS. Las concentraciones de los minerales estudiados fueron similares ($p>0.05$) en agua y alimento en ambos NS, con excepción del cobre en alimento. Las concentraciones de cobre, hierro, zinc, y cadmio en SS fueron afectadas ($p<0.05$) por la interacción NS x EF. Las concentraciones de azufre, molibdeno, y plomo no fueron afectadas ($p>0.05$) por NS, EF o su interacción. Las concentraciones finales en SS fueron: cobre, 1.48 vs 1.72 mg L⁻¹; hierro, 13.29 vs 11.03 mg L⁻¹; zinc, 0.77 vs 0.63 mg L⁻¹; azufre, 161.57 mg L⁻¹ vs 214.99 mg L⁻¹; y molibdeno, 3.88 mg L⁻¹ vs 3.82 mg L⁻¹; para ovejas testigo y suplementadas. La suplementación con cobre disminuyó ($p<0.001$) el número de cercarias de *Fasciola* y de larvas de *Trichostrongylus* en las heces, en comparación con las provenientes de ovejas testigo. El peso vivo, CC, fertilidad y prolificidad fueron similares ($p>0.05$) en ambos grupos de ovejas. La alimentación de ovejas Criollas con dieta alta en cobre (40 mg Cu kg⁻¹) no afectó su CC, fertilidad y prolificidad, pero mejoró el estado mineral de cobre, hierro, y zinc en SS.

Palabras clave: ovejas criollas, estado mineral y comportamiento productivo.

¹, Tesis de Maestría en Ciencias en Innovación Ganadera. Universidad Autónoma Chapingo.
Autor: Eloisa Cruz Huerta.
Director de tesis: Maximino Huerta Bravo.

Copper supplementation of Criollo ewes

3.2 Abstract

The aim of this study was to determine mineral status and productive behavior in 68 Criollo ewes given copper supplementation. Minerals determined in feed, water, and blood serum (BS) were copper, iron, zinc, sulfur, molybdenum, lead, and cadmium. Animal live weight (LW), body condition (BC), fertility, and prolificacy were also recorded. Parasites in the stools were counted and identified. A completely randomized design was used. A model that included effects of supplementation levels (SL; 0 or 15 mg Cu per kg diet dry matter), physiological stage (PS, breeding, pregnancy, lactation), and their interaction was used to analyze data on mineral concentrations in serum, LW and BC. Model for water, feed, parasites, fertility, and prolificacy data included only the LS effect. Mineral concentrations were similar ($p>0.05$) in water as well as in feed, for both supplementation levels, except for copper in feed. Copper, iron, zinc, and cadmium concentration in BS were affected ($p<0.05$) by the interaction SL x PS. Sulfur, molybdenum, and lead concentrations in BS were not affected ($p<0.05$) by SL, PS, or their interaction. Final concentrations in BS were (mg L^{-1}): copper, 1.48 vs 1.72; iron, 13.29 vs 11.03; zinc, 0.77 vs 0.63; sulfur, 161.57 vs 214.99; and molybdenum, 3.88 vs 3.82; for control and copper-supplemented ewes, respectively. Copper supplementation reduced ($P< 0.01$) the number of *Fasciola cercarias* and *Trichostrongylus* larvae in the stools compared to the ones from control animals. The live weight, body condition, fertility, and prolificacy were similar ($p>0.05$) in both ewe groups. Feeding Criollo ewes with high-copper diet (40 mg Cu kg^{-1}) did not affect their body condition, but improve mineral status of copper, iron, and zinc in blood serum.

Key words: Criollo ewes, mineral status, productive behavior

²Master's of Science Thesis. Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Eloisa Cruz Huerta.

Thesis Advisor: Maximino Huerta Bravo.

3.3 Introducción

Las ovejas Criollas son un recurso genético mexicano de importancia ya que son usadas como fuente de ahorro de familias rurales (Soto *et al.*, 2006), su carne es de sabor apreciado para elaborar platillos típicos mexicanos (Rubio *et al.*, 2003). Sin embargo, el manejo de estas ovejas puede ser inadecuado evitando que manifiesten su productividad máxima. No existe información sobre sus requerimientos nutricionales y en específico de cobre para mejorar la productividad de este genotipo.

Los requerimientos por cobre en los ovinos son afectados por la raza, edad, sexo y nivel de producción del animal (Suttle, 2003); otros factores ambientales son el clima, tipo de suelo, dieta y calidad del alimento (Shorrocks y Alloway, 1985; Domínguez, 1993; Huerta, 2003); El diagnóstico del estado nutricional del cobre en el animal es un enigma (Lee *et al.*, 2002), debido a las interacciones de este elemento con zinc, hierro, azufre, molibdeno, cadmio y mercurio (Underwood y Suttle, 2003). Por lo antes mencionado, el objetivo de la investigación fue determinar el estado mineral y comportamiento productivo de ovejas Criollas suplementadas con cobre en diferente etapa fisiológica.

3.4 Materiales y Métodos

3.4.1 Localización

La fase de campo se realizó en la Granja Experimental del Departamento de Zootecnia de la Universidad Autónoma Chapingo, geoposicionada a 19° 29' N, 98°53' O W y 2250 msnm, con formula climática C (w_o)(w)b(i')g (García, 2004).

3.4.2 Características de las ovejas y duración de la fase de alimentación

La fase de alimentación del presente estudio tuvo una duración de 322 días, se utilizaron 68 ovejas Criollas, de 35±3 kg de peso vivo, con condición corporal de 3.2 y 6±3 años de edad.

3.4.3 Tratamientos

Las ovejas se distribuyeron en dos grupos, sin cobre suplementario (testigo) y con 15 mg por kg⁻¹ de cobre suplementario en la dieta.

3.4.4 Manejo de las ovejas Criollas

Las ovejas que se utilizaron para la fase de campo al inicio del estudio fueron esquiladas, desparasitadas con 10 mg de ivermectina (Ivomec, Laboratorio PISA, concentración 1% de ivermectina). También recibieron vía intramuscular, 500,000 UI de vitamina A; 75,000 UI de vitamina D₃; y 50 mg de vitamina E₁; además, se les realizó diagnóstico de gestación con el ultrasonido modelo Sonovet 600 MADISON utilizando el transductor abdominal para asegurar la etapa fisiológica (vacías). A los 90 días de estar recibiendo la alimentación con diferente nivel de suplementación, se realizó el empadre utilizando inseminación artificial por laparoscopia, para el cual se sincronizaron los celos de las ovejas con esponjas intravaginales impregnadas con acetato de fluorogestona durante 12 días; 45 días después se hizo el diagnóstico de gestación con el ultrasonido modelo Sonovet 2000 y un transductor abdominal. A las hembras que retornaron al celo se les dio monta natural.

3.4.5 Alimentación

La alimentación que se proporcionó fue con ensilado de maíz, heno de avena, heno de alfalfa, maíz amarillo, pasta de soya y minerales (Cuadro 2). La dieta fue balanceada para cubrir las necesidades de proteína y energía recomendadas para ovejas (NRC, 2007).

Cuadro 2. Dieta experimental ofrecida a ovejas Criollas durante el estudio.

Variable	Porcentaje (Base seca)
<u>Ingredientes</u>	
Maíz amarillo	15
Pasta de soya	11
Heno de alfalfa	15
Heno de avena	40
Ensilado de maíz	17
Minerales ^z	2
<u>Contenido nutrimental</u>	
Proteína cruda, %	14
Energía metabolizable, Mcal	2.3
Calcio, %	0.4
Fósforo, %	0.3

^zSe utilizó una premezcla de minerales que contenía: carbonato de calcio, 36.84%; cloruro de sodio, 8.13%; óxido de zinc, 0.21%; selenito de sodio, 0.003%; óxido de manganeso, 0.17%, etilendiamino dihidroyoduro, 0.003%; carbonato de cobalto, 0.0017%; y sulfato de cobre, 0 ó 0.29%.

3.4.6 Mediciones, muestreos y análisis de laboratorio

Cada semana se tomaron muestras de agua y alimento. Al empadre, gestación y lactancia se pesaron las ovejas, se midió condición corporal (escala 1 a 5) como lo propuso Russell (1984); y se tomaron muestras de sangre por punción directa de la vena yugular. La sangre se centrifugó a 3000 rpm durante 15 minutos, se separó el suero y después se refrigeró a -20°C para su determinación de minerales. El día 290 de la fase de campo se hizo un muestreo de heces directamente del recto (10 g) de cada oveja, para realizar análisis coproparasitoscópico.

Las concentraciones de Cu, Fe y Zn se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica con un equipo de la marca Perkin Elmer modelo AAnalyst 700 según las técnicas de Fick *et al.* (1979). La determinación de Hg se realizó por la técnica de vapor frío (Perkin Elmer Corporation, 1996), en un

espectrofotómetro de absorción atómica AAnalyst 700 equipado con un generador de hidruros modelo HMS15. Para analizar Cd, Mo y Pb se utilizó el espectrofotómetro de absorción atómica AAnalyst 700 equipado con horno de grafito modelo AS800, utilizando la técnica descrita por Perkin Elmer Corporation (1996) y Cañada (2005).

La determinación de S se realizó por colorimetría con un espectrofotómetro ultravioleta visible de la marca Perkin Elmer modelo LAMBDA 2, utilizando la metodología descrita por Letonoff y Reinhold (1935). Las concentraciones de los minerales se realizaron en el Laboratorio de Nutrición de Rumiantes en el Departamento de Zootecnia de la Universidad Autónoma Chapingo.

Las heces fueron refrigeradas hasta su procesamiento (no más de 24 h); posteriormente, fueron diluidas con una solución salina para poder observar la dilución al microscopio, para la identificación y cuantificación de huevos de acuerdo con la técnica cualitativa de McMaster modificada (Roberts y O'Sullivan, 1949; Rodríguez *et al.*, 1994). Esta determinación se realizó en el Centro Nacional de Servicios de Diagnóstico en Salud Animal en Tecamac, Estado de México.

3.4.7 Variables de respuesta

Las variables de respuesta fueron las concentraciones de cobre, hierro, zinc, azufre, molibdeno, plomo, cadmio y mercurio en agua, alimento y suero sanguíneo. Además, peso vivo, condición corporal, fertilidad, prolificidad, carga parasitaria e identificación de parásitos gastrointestinales.

3.4.8 Análisis estadístico

Para evaluar el efecto de suplementación, etapa fisiológica (empadre, mitad de gestación y lactancia) y su interacción, en la concentración de minerales en suero sanguíneo, peso vivo de ovejas y condición corporal, se realizó un análisis de varianza con un diseño completamente al azar con arreglo factorial

(nivel de suplementación y etapa fisiológica). Para analizar datos de parásitos gastrointestinales, contenido mineral en alimento y agua se utilizó un diseño completamente al azar simple; para fertilidad y prolificidad se realizó la prueba de Xi-cuadrada.

La concentración de minerales en suero sanguíneo, peso vivo y condición corporal de ovejas se analizaron con el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ijk} = \mu + NS_i + EF_j + (NS \times EF)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = Variable de respuesta en el i-ésimo nivel de suplementación, j-ésima etapa fisiológica y k-ésima oveja.

μ = Media poblacional.

NS_i = Efecto del i-ésimo nivel de suplementación ($i = 1, 2$; testigo y con cobre suplementario).

EF_j = Efecto del j-ésima etapa fisiológica ($j=1, 2, 3$; empadre, mitad de gestación y lactancia).

$(NS \times EF)_{ij}$ = Interacción del nivel de suplementación por etapa fisiológica.

ε_{ijk} = Error experimental del i-ésimo nivel de suplementación, j-ésima etapa fisiológica y k-ésima oveja ($k=1, 2, \dots, 34$)

El análisis para determinar el *status* mineral de animales gestantes vs no gestantes, en el cual los contenidos de cobre, hierro, zinc, azufre, molibdeno, plomo y cadmio, se consideraron las variables dependientes y la etapa fisiológica como la variable independiente. Además, las concentraciones de minerales en alimento, minerales en agua y carga de parásitos gastrointestinales se analizaron con el siguiente modelo estadístico.

$$Y_{ij} = \mu + NS_i + \epsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Variable de respuesta en el i-ésimo nivel de suplementación y j-ésima oveja.

μ = Media poblacional.

NS_i = Efecto del i-ésimo nivel de suplementación ($i = 1, 2$; testigo y con cobre suplementario).

ϵ_{ij} = Error experimental del i-ésimo nivel de suplementación y j-ésima oveja ($j = 1, 2, \dots, 34$).

Las concentraciones de los minerales en el alimento se agruparon por mes y se analizaron con el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ijk} = \mu + Mes_i + NS_j + (Mes \times NS)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = Variable de respuesta en el i-ésimo mes, j-ésimo nivel de suplementación, y k-ésimo alimento.

μ = Media poblacional.

Mes_i = Efecto del i-ésimo mes (1, 2, ..., 10; noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio y agosto).

NS_j = Efecto del j-ésimo nivel de suplementación ($i = 1, 2$; testigo y con cobre suplementario).

$(Mes \times NS)_{ij}$ = Interacción mes por nivel de suplementación.

ϵ_{ijk} = Error experimental del i-ésimo mes, j-ésimo nivel de suplementación y k-ésimo alimento.

Las concentraciones de los minerales por mes se analizaron para cada factor usando el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS (2004).

3.5 Resultados y Discusión

3.5.1 Contenido de minerales en alimento

Las concentraciones de los minerales determinados en el alimento de ovejas Criollas se presentan en el Cuadro 3. El cobre fue superior ($p<0.05$) en el alimento suplementado con cobre que el alimento sin cobre. Las concentraciones del resto de los minerales fueron similares ($p>0.05$) en ambas dietas.

Cuadro 3. Medias de la concentración de minerales en alimento de ovejas Criollas.

Mineral	Con Cu	Sin Cu	^z EEM	Pr>F	^y Req.	^x Máx toler.
Cu (mg kg ⁻¹)	40	24	1.1	<.0001	4-10	15
Zn (mg kg ⁻¹)	135	136	14.7	0.95	17-34	300
Fe (mg kg ⁻¹)	511	525	41.5	0.81	12-46	500
S (%)	0.50	0.52	0.1	0.72	0.18	0.50
Mo (mg kg ⁻¹)	25	27	1.3	0.42	-	5
Pb (mg kg ⁻¹)	32	31	0.08	0.65	-	100
Cd (mg kg ⁻¹)	0.13	0.12	0.12	0.54	-	10

^zError estándar de la media.

^yNRC, 2007.

^xNRC, 2005.

El contenido de cobre en el alimento fue 2.6 y 1.6 veces superior al máximo tolerable para ovejas (NRC, 2005), con cobre y sin cobre adicional, respectivamente. Probablemente esto fue porque la mayoría del heno utilizado se compró en el estado de Hidalgo, donde la mayoría de los forrajes son regados con aguas negras, las cuales contienen gran cantidad de minerales (Tiffany *et al.*, 2000). Por tanto, la cantidad de metales en las plantas que se

cultivan en esas tierras acumulan concentraciones indeseables de cobre, plomo y cadmio (McDowell *et al.*, 1997).

Los niveles de zinc fueron similares ($p>0.05$) en los dos alimentos (con cobre y testigo). Los contenidos de este mineral en el presente estudio se encontraron dentro del requerimiento establecido para ovejas (NRC, 2007). El consumo de alimento alto en zinc reduce la concentración de cobre en plasma e hígado de vacas y ovejas (Kincaid, 1999). En contraparte, los rumiantes en pastoreo presentan deficiencia de Zn al pastorear forrajes con niveles menores a 20 mg kg⁻¹ (Mayland *et al.*, 1980; White *et al.*, 1991).

Los contenidos de hierro fueron similares ($p>0.05$) en los dos alimentos. El análisis de alimento es este estudio mostró que las concentraciones de hierro estuvieron en el límite máximo tolerable recomendado (Cuadro 3; NRC, 2005). Estas concentraciones se encuentran dentro del rango en donde se han reportado problemas con ovinos y bovinos (Suttle, 1975; Humphries *et al.*, 1983; Mullis *et al.*, 2003) debido a deficiencias de cobre. Concentraciones altas de hierro interfieren con la absorción del Zn en los forrajes (McDowell y Arthington, 2005).

Las concentraciones de azufre en este estudio fueron similares ($p>0.05$) en los dos alimentos. Los contenidos de S estuvieron en el límite máximo tolerable recomendado (Cuadro 3; NRC, 2005). Resultados inferiores a los obtenidos en este estudio fueron reportados por Suttle (1975). Al ofrecer una dieta a ovejas que contenía 3 g de S kg⁻¹ y 4 mg de Mo kg⁻¹ se redujo la disponibilidad del cobre en 70%; mientras que Spears (2003) al proporcionar una dieta con 1 g de S kg⁻¹ y 0.5 mg de Mo kg⁻¹, la disponibilidad del cobre sólo se disminuyó en 40%.

Los contenidos de molibdeno encontrados en esta investigación fueron similares ($p>0.05$) para los dos alimentos (con cobre y testigo). Las concentraciones de molibdeno fueron 5 veces superiores al máximo tolerable

(NRC, 2005). El consumo de alimento con cantidades mayores a 1 mg kg^{-1} de Mo aumenta el requerimiento de cobre en ovejas (Jimeno *et al.*, 2001).

Los rumiantes que consumen forrajes con niveles de molibdeno y azufre altos, y cobre adecuado, presentan deficiencia de Cu (Suttle, 1991; Moeini *et al.*, 2008). Fader (2001) señala que al consumir forraje con niveles de 5.8 y 8.9 mg de Mo kg^{-1} , en gramíneas y leguminosas, respectivamente, causó deficiencia de cobre hepático, sin afectar el nivel sérico. El consumo de dietas con alto contenido de molibdeno inhiben la utilización del cobre (Puls, 1988); el Mo en presencia de azufre (McDonald *et al.*, 1999), forma tetratiomolibdatos, tiomolibdatos y molibdatos que se absorben por sangre y se unen al Cu endógeno para hacerlo indisponible e inhibir su metabolismo (Mason, 1982; Arthington y Spears, 2007).

Las concentraciones de plomo y cadmio que fueron halladas en ambos alimentos son inferiores al máximo tolerable (NRC, 2005). En las muestras de alimento, agua y suero sanguíneo analizadas en este estudio no se detectó el mercurio, lo que indica que es menor a 1 mg kg^{-1} , que es el mínimo detectable por el equipo. Los problemas analíticos con estos elementos han sido discutidos por Antoniou *et al.* (1995).

Las concentraciones de cobre, hierro, zinc, azufre, molibdeno, plomo y cadmio, en alimento de ovejas Criollas, durante el transcurso del presente estudio se presentan en el Cuadro 4. La concentración de todos los minerales fueron similares ($p < 0.05$) en la interacción mes por nivel de suplementación; el nivel de suplementación sólo afectó ($p > 0.05$) al cobre, como se esperaba ya que este elemento fue el de interés en la investigación, los otros minerales se mantuvieron en la misma proporción en ambos alimentos.

Cuadro 4. Medias^z para concentraciones (mg kg⁻¹) de cobre, hierro, zinc, azufre (%), molibdeno, plomo y cadmio, en alimento de ovejas Criollas durante el transcurso del estudio.

Mes	Cobre	Hierro	Zinc	Azufre	Molibdeno	Plomo	Cadmio
Noviembre	38 ^{ab}	529 ^{bc}	119 ^c	38 ^c	34 ^a	29 ^a	0.10 ^a
Diciembre	40 ^a	938 ^a	113 ^c	72 ^{ab}	33 ^a	36 ^a	0.12 ^a
Enero	38 ^{ab}	912 ^a	112 ^c	76 ^{ab}	31 ^{ab}	28 ^a	0.16 ^a
Febrero	35 ^{ab}	629 ^a	54 ^d	84 ^a	32 ^{ab}	32 ^a	0.10 ^a
Marzo	35 ^a	383 ^{cd}	84 ^{cd}	66 ^{ab}	24 ^{abc}	33 ^a	0.13 ^a
Abril	34 ^{ab}	360 ^{cd}	91 ^{cd}	79 ^{ab}	19 ^c	30 ^a	0.14 ^a
Mayo	32 ^{bc}	270 ^d	68 ^{cd}	61 ^b	23 ^{abc}	33 ^a	0.12 ^a
Junio	24 ^c	381 ^{cd}	306 ^a	24 ^c	23 ^{abc}	33 ^a	0.13 ^a
Julio	24 ^c	396 ^{cd}	264 ^{ab}	20 ^c	21 ^{ac}	34 ^a	0.12 ^a
Agosto	24 ^c	341 ^{cd}	242 ^b	25 ^c	18 ^c	28 ^a	0.12 ^a
Pr>F	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0716	0.9508

^zMedias sin una letra en común en la misma columna, dentro de cada mineral, son diferentes (p<0.05; Tukey).

Los alimentos del grupo testigo y del suplementado con cobre disminuyeron en los últimos cuatro meses, debido probablemente a cambios en la dieta, pero la diferencia entre alimentos se mantuvo (Figura 1). Las concentraciones de cobre, hierro, azufre y molibdeno fueron diferentes (p>0.05) por mes del experimento.

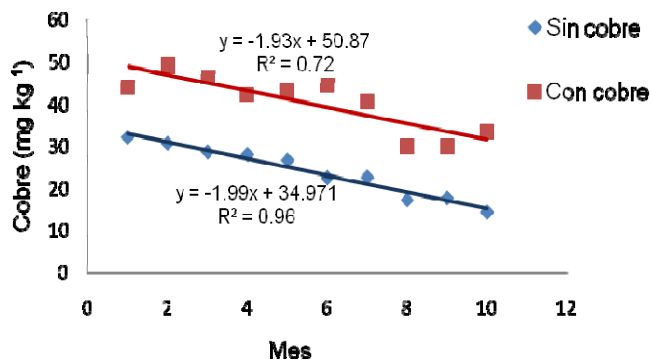


Figura 1. Contenido de cobre en el alimento a través del tiempo.

Durante los primeros cinco meses del experimento (noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo) los niveles de cobre, hierro, azufre y molibdeno, en los alimentos se encontraron altos ($p>0.05$). Este periodo coincide con el cual se trajo forraje (heno de avena) del estado de Hidalgo, pero en los últimos tres meses las concentraciones disminuyeron. En cambio, en los primeros meses los niveles de zinc en ambos alimentos estuvieron bajos ($p>0.05$) y en los últimos tres meses aumentaron. Los contenidos de plomo y cadmio en alimento se mantuvieron similares ($p>0.05$) durante el periodo del estudio (Cuadro 4).

Nguyen (1998) señala que los lodos secos de aguas negras contienen niveles altos de metales en la materia seca (mg kg^{-1}): 988 de Zn; 723 de Cu; 14737 de Fe; 7 de Cd; 57 de Pb, y 22.5 de Mo. Estos lodos se utilizan para abonar praderas. En un estudio realizado por Tiffany *et al.* (2000) señalan que al utilizar 2 y 3 ton ha^{-1} de lodos en praderas para cultivar forrajes, los niveles de minerales encontrados en este forraje fueron altos, sin originar problemas con los animales a excepción del nivel de cobre en suero sanguíneo, el cual fue bajo. En cambio, en otro estudio reportan concentraciones altas de Cu, Fe, Cd y S (0.4%) en los forrajes, llegando a originar intoxicación en vaquillas con el azufre (Tiffany *et al.*, 2001). La cantidad de plomo en suelo no es absorbido por la planta, por lo que para que un animal se intoxique debe consumir directamente suelo (Bramley, 1990).

3.5.2 Contenido de minerales en agua

La concentración de minerales en el agua de bebida de las ovejas se presenta en el Cuadro 5. Los niveles de cobre, hierro, zinc, azufre, molibdeno, plomo y cadmio fueron similares ($p>0.05$) entre las ovejas que recibieron cobre y las del grupo testigo, ya que el agua ofrecida es del mismo pozo.

Los casos de intoxicación por cobre en agua son raros, en general se deben a contaminación por plaguicidas y molusquicidas (Porath *et al.*, 2002). Los niveles de cobre en el agua de bebida de este estudio son inferiores al límite máximo recomendados para agua de bebida en ganado (Puls, 1988). Estos niveles

coinciden con los reportados por Pérez *et al.* (2007) en aguas de pozos profundos en Córdoba, Argentina, para consumo de ovejas y bovinos.

Cuadro 5. Medias para concentración mineral en el agua ofrecida a ovejas Criollas.

Mineral	Con Cobre	Sin cobre	EEM ^z	Pr>F	Limite Máximo ^y
Cu (mg L ⁻¹)	0.58	0.70	0.032*	0.07	1
Zn (mg L ⁻¹)	0.30	0.35	0.018	0.06	5
Fe (mg L ⁻¹)	4.21	4.45	0.282	0.53	0.4
SO ₄ (mg L ⁻¹)	15.36	17.86	0.994	0.07	500
Mo (mg L ⁻¹)	0.77	0.77	0.038	0.64	0.06
Pb (mg L ⁻¹)	2.70	2.63	0.109	0.27	0.05
Cd (mg L ⁻¹)	0.079	0.082	0.001	0.92	0.01

^z Error estándar de la media.

^y Límites máximos para ganado (Puls, 1988)

El zinc y SO₄ encontrados en el agua de bebida de este estudio se encuentran en baja concentración (Cuadro 5), considerando el valor máximo sugerido por Puls (1988) para ganado, y comparando con los resultados obtenidos por Pérez *et al.* (2007); 1.57 mg de Zn L⁻¹ y 564 mg de SO₄ L⁻¹.

Los contenidos de Fe, Mo, Pb y Cd son superiores a los reportados por Puls, (1988) como los límites máximos tolerables. Pérez *et al.* (2007) reportan niveles inferiores de cadmio, <0.5 ug L⁻¹; hierro, 250 ug L⁻¹; plomo, <12 ug L⁻¹; y molibdeno, 200 ug L⁻¹; en agua de bebida.

3.5.3 Minerales en suero sanguíneo

En el Cuadro 6 se presenta el nivel de significancia (probabilidad) para nivel de suplemento, etapa fisiológica y su interacción, con respecto a la concentración mineral en suero sanguíneo de ovejas Criollas. Las concentraciones de cobre, hierro, zinc y cadmio en suero sanguíneo fueron afectadas ($p > 0.05$) por nivel de suplementación, etapa fisiológica y su interacción. Las concentraciones de azufre no fueron afectadas por ninguno de los factores estudiados o su

interacción ($p < 0.05$). El molibdeno y plomo fueron afectados ($p > 0.05$) por la etapas fisiológica.

Cuadro 6. Nivel de significancia (probabilidad) para nivel de suplemento y etapa fisiológica con respecto a la concentración mineral en el suero sanguíneo.

Fuente de variación	Cu	Fe	Zn	S	Mo	Pb	Cd
Nivel de suplemento (NS)	0.0001	0.0001	0.0002	0.0895	0.7139	0.6619	0.0001
Etapa fisiológica (EF)	0.0001	0.0001	0.0001	0.5043	0.0001	0.0001	0.0001
NS × EF	0.0016	0.0001	0.0122	0.4885	0.6692	0.9645	0.0011

Las concentraciones de cobre, hierro, zinc, azufre, molibdeno, plomo y cadmio en suero sanguíneo de ovejas Criollas por nivel de suplementación y etapa fisiológica se presentan en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Medias^z para concentración (mg L^{-1}) de cobre, hierro, zinc, azufre, molibdeno, plomo y cadmio en suero sanguíneo de ovejas Criollas con diferente nivel de suplemento.

Minerales	Nivel de suplemento						
	Con Cu			Sin Cu			EEM
	Empadre	Gestación	Lactancia	Empadre	Gestación	Lactancia	
Cobre	1.05 ^{cd}	1.17 ^c	1.82 ^a	1.03 ^d	1.05 ^{cd}	1.47 ^b	0.04
Hierro	24.0 ^a	4.3 ^d	10.8 ^c	15.9 ^b	4.6 ^d	12.0 ^c	0.6
Zinc	0.75 ^{ab}	0.93 ^a	0.62 ^{bcd}	0.46 ^d	0.86 ^{ab}	0.55 ^{cd}	0.04
Azufre	210 ^{ab}	175 ^{ab}	161 ^{ab}	213 ^{ab}	237 ^a	204 ^{ab}	26
Molibdeno	7.1 ^a	4.6 ^b	3.8 ^c	6.7 ^a	4.8 ^b	3.8 ^c	0.27
Plomo	1.99 ^a	1.06 ^b	0.77 ^c	1.99 ^a	1.06 ^b	0.80 ^c	0.04
Cadmio	0.10 ^b	0.01 ^e	0.03 ^d	0.11 ^a	0.01 ^e	0.05 ^c	0.003

^z Medias sin una letra en común en la misma hilera, dentro de nivel de suplemento o etapa fisiológica, son diferentes ($p < 0.05$; Tukey).

Cobre

Las concentraciones de cobre en suero sanguíneo estuvieron dentro del rango normal (Puls, 1988) en ovejas testigo y ovejas suplementadas, en todos los muestreos. Durante el periodo experimental, las concentraciones de cobre en el

suero sanguíneo de las ovejas de ambos grupos se incrementaron (73 y 42%), probablemente como reflejo del alto contenido de este elemento en ambas dietas. Este incremento fue mayor ($p < 0.05$) en las ovejas suplementadas con cobre, únicamente durante la lactancia. Resultados similares reportan Eckert *et al.* (1999), quienes señalan que al suplementar ovejas con 10 y 20 mg Cu kg⁻¹ en dieta mejoran las concentraciones del cobre (27 vs 65%) en suero y se mantienen dentro del rango adecuado tres meses después. También Judson *et al.* (1984) encontraron que ovejas Merino suplementadas con cápsulas de óxido de cobre mejoran 58% el nivel de Cu en suero sanguíneo y esta concentración se mantiene durante 6 meses. En vacas, MacPherson (1984) suplementó a vacas con 30 mg de Cu kg⁻¹ y obtuvo un incremento de 15% en la concentración de este mineral en plasma respecto a las no suplementadas.

En el presente estudio se observó que conforme incrementó el nivel de cobre en el suero sanguíneo de las ovejas disminuyó el contenido de molibdeno ($r = -0.40$; $p < 0.01$; $n = 184$), plomo ($r = -0.49$; $p < 0.01$; $n = 184$) y cadmio ($r = -0.25$; $p < 0.01$; $n = 184$). Estas relaciones se pueden explicar porque el exceso de molibdeno en la dieta y agua de bebida, y de azufre en la dieta, ocasionan la formación de complejos con cobre (Mo-S-Cu) que son indisponibles para su absorción en el intestino, o si el molibdeno se absorbe, puede ocasionar complejos Mo-Cu en sangre que son indisponibles para el animal (Underwood y Suttle, 2003; Suttle, 2003). También, el exceso de Fe en la dieta puede ocasionar la formación de complejos insolubles con Fe-Cu-S (Humphries *et al.* (1983). Por otro lado, plomo y cadmio desplazan al cobre en su enlace con metalotionina en diversos tejidos como intestino, hígado y riñón (Cousins, 1985). Además, el plomo y el cadmio inducen la síntesis de metalotionina, situación que puede ocasionar menor entrada o disponibilidad de cobre al organismo. Por estas relaciones, la determinación del estado de Cu en los rumiantes es un enigma, ya que es difícil encontrar un criterio apropiado para su diagnóstico (Lee *et al.*, 2002).

Hierro

Los contenidos de hierro encontrados en suero sanguíneo de las ovejas en ambos tratamientos durante las tres etapas fisiológicas, fueron altos (Cuadro 7), comparados con los niveles recomendados ($1.2-2.5 \text{ mg Fe L}^{-1}$) por Puls (1988). Esto puede ser evidente por los altos contenidos de hierro en el alimento. El exceso de Fe puede deberse a deficiencia de Cu que causa hemólisis de eritrocitos, en consecuencia se incrementa el hierro en plasma (Saleh *et al.*, 2008). Aun cuando las ovejas de este estudio tenían concentraciones normales de cobre, probablemente existía una deficiencia fisiológica provocada por los excesos de molibdeno, azufre, cadmio, hierro y plomo en la dieta o agua de bebida.

Las concentraciones de hierro disminuyeron ($p < 0.05$) 82 vs 70% en suero sanguíneo de ovejas suplementadas y testigo del empadre a la gestación, mientras que en lactancia hubo un incremento ($p > 0.05$) de 38 vs 39%. Lo anterior indica que la suplementación con cobre ocasionó disminución en las concentraciones elevadas de hierro, únicamente en las primeras etapas. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Muñoz (2005). En los últimos tres meses del experimento, las concentraciones de zinc en el alimento se incrementaron en 3.6 veces en relación a los cuatro meses previos, lo cual puede agravar la deficiencia fisiológica de cobre (Cousins, 1985) y repercutir en los niveles de hierro circulante por hemólisis de eritrocitos. El cobre juega un papel clave en la utilización del hierro, la ceruloplasmina, proteína más abundante en cobre del plasma sanguíneo puede funcionar como una ferroxidasa (Underwood y Suttle, 2003). Para utilizar el hierro almacenado en hígado como ferritina requiere la presencia de ceruloplasmina, por lo que en ocasiones se pueden presentar cuadros anémicos en animales, aún con niveles adecuados de Fe en dieta y plasma (Marston *et al.*, 1971; Godoy *et al.*, 2006).

En el suero sanguíneo de las ovejas se observó que concentraciones altas de hierro estaban asociadas positivamente con las concentraciones de molibdeno

($r = 0.44$, $p < 0.01$, $n = 184$), plomo ($r = 0.59$, $p < 0.01$, $n = 184$) y cadmio ($r = 0.70$, $p < 0.01$, $n = 184$). En un estudio realizado en Venezuela, Pinto-Santini *et al.* (2007) señalan que no se observaron evidencias de sinergismos entre el Fe y Mo, relativas a la reducción del estatus de Cu en las vacas. Humphries *et al.* (1983) coinciden con estos resultados. En presencia de Fe y Mo sin suplementación de Cu los niveles en hígado de este elemento disminuyeron rápidamente hasta mantenerse constantes, tanto en vacunos (Bailey *et al.*, 2001) como en ovinos (Underwood y Suttle, 2003).

Zinc

De acuerdo con el rango adecuado (0.8 a 1.2 mg L^{-1}) propuesto por Puls (1988), los contenidos de zinc fueron bajos en ambos niveles de suplementación en el empadre y la lactancia, pero no en la gestación. El cobre y el zinc compiten por el sitio de unión con enzimas y metaloproteínas, llegando a ser antagonistas (Underwood y Suttle, 2003). De forma indirecta, el Zn acumulado en los tejidos no intestinales, ejerce una retroalimentación que inhibe a la del cobre (Hatfield *et al.*, 2001).

Las ovejas gestantes suplementadas y testigo mejoraron 23 vs 70% la concentración de zinc en suero sanguíneo de empadre a gestación; en cambio, de gestación a lactancia disminuyeron 32% vs 37%, respectivamente. Las ovejas con cobre suplementario presentaron concentraciones superiores de zinc (0.77 vs 0.61 mg L^{-1} ; $p > 0.05$) a las testigo.

Wright *et al.* (2008) mencionan que la absorción de Zn en torrente sanguíneo se produce en los tejidos ruminales. La suplementación con niveles altos de cobre en pollos de engorda reducen el contenido de zinc en plasma (Ledoux *et al.*, 1989). Las concentraciones altas de Fe al inicio de esta investigación puede atribuirse a la deficiencia fisiológica de cobre (Saleh *et al.*, 2008) y a la deficiencia de Zn, que causan daño oxidativo en la membrana celular, liberando el Fe del interior de los eritrocitos (Kincaid, 1999).

Conforme aumentó el contenido de zinc en el suero sanguíneo de los ovejas en este estudio también mejoró la condición corporal ($r = 0.18$, $p=0.013$, $n = 184$); pero los niveles de cadmio disminuyeron ($r = -0.38$, $p<0.01$, $n = 184$). Esto puede explicarse porque el cadmio es un antagonista del zinc, lo desplaza en su lugar de unión en proteínas principalmente en la metalotionina y algunas otras enzimas por medio de mecanismos indirectos (Galván-Bobadilla *et al.*, 2005). Los resultados difieren de los obtenidos por López *et al.* (2004), que señalan que existe una correlación positiva entre Cd y Zn. En ovejas, el cadmio incrementó el nivel de zinc probablemente al estimular la producción de metalotionina (Phillips *et al.*, 2004).

Azufre

El contenido de azufre presente en las muestras de suero sanguíneo no fue afectado ($p<0.05$) por el nivel de suplementación, la etapa fisiológica o su interacción. En las ovejas con cobre y testigo durante las tres etapas fisiológicas los contenidos de azufre fueron superiores (2x) al rango adecuado (81-108 mg L⁻¹) reportado por el programa de Ask Zinpro (2005). Esto puede deberse al alto contenido de S presente en el alimento ofrecido a los animales, especialmente en los primeros siete meses del estudio, en donde las concentraciones fueron de 0.68% vs 0.23% en los últimos tres meses. Hansen *et al.* (2008) reportan que dietas con 1.5 g de S kg⁻¹ y 6 mg de Mo kg⁻¹, reducen la biodisponibilidad del sulfato de cobre. En otro estudio, el aumento de azufre de 2 a 7 g kg⁻¹ de dieta originó disminución del nivel de cobre en plasma de vacas lecheras (Spears, 2003). El S disminuye la disponibilidad del Cu, al reducir la absorción de este elemento (Suttle, 1991). Esta respuesta puede ser atribuida a la formación de sulfuro de Cu que lo vuelve insoluble en el intestino (Suttle, 1991). Arthington y Pate (2002) señalan que al aumentar de 1 a 4 g de S kg⁻¹ de dieta causa deficiencia de Cu. La adición de 50% de melaza rica en azufre, en la dieta de bovinos, se debe suplementar al menos con 15 mg de Cu kg⁻¹ de dieta para evitar deficiencia de este mineral (Arthington y Spears, 2007).

Molibdeno

Los contenidos de molibdeno encontrados en las muestras de suero sanguíneo analizadas en el presente estudio, fueron cinco veces superiores al rango adecuado (0.01 a 0.7 mg L⁻¹) que indica el programa Ask Zinpro (2005). Los niveles altos en suero pueden ser reflejo del contenido del Mo presente en las dietas de las ovejas. Los niveles de Mo de empadre a gestación disminuyeron 31% (6.89 vs 4.77 mg L⁻¹; p<.05) y 19% de gestación a lactancia (4.77 vs 3.85 mg L⁻¹; p<.05) en todas las ovejas debido probablemente a que las concentraciones de azufre y molibdeno en las dietas disminuyeron en los últimos meses.

Niveles altos de Mo y Fe inducen una disminución de la concentración de Cu en el tejido hepático, por debajo de los niveles críticos, sin afectar la concentración sérica del elemento (Bailey *et al.*, 2001; Pinto-Santini *et al.*, 2007). Además, el Mo reemplaza al zinc y cobre en el ADN de receptores de estrógenos (Maciejewska-Paszek *et al.*, 2005). Cuando se presenta infertilidad en ovejas causada por niveles altos de Mo en dieta, con una inyección de Cu antes del empadre se mejora la tasa de concepción (15 a 20%), reduciendo las absorciones embrionarias (Suttle y Field, 1974).

Plomo

Los contenidos de plomo encontrados en las muestras analizadas en esta investigación están dentro del rango aceptable (0.5 a 5 mg L⁻¹) que refiere el programa Ask Zinpro (2005). Las concentraciones de plomo disminuyeron de 1.99 a 1.06 mg L⁻¹ (47%; p<0.01) de empadre a gestación, y de 1.06 a 0.79 mg L⁻¹ (25%, p<0.01) de gestación a lactancia. El plomo es un metal pesado que tomó importancia por la contaminación y facilidad para acumularse en tejidos principalmente hígado y riñón (Ammodio-Cocchieri y Fiore, 1987). Sustituye al Zn en hemoenzimas de Zn, y al cadmio en la metalotionina (Goyer, 1997). El Pb incrementa la peroxidación de lípidos en las células, principalmente las del riñón y los problemas celulares del hígado principalmente la cirrosis (Maciejewska-

Paszek *et al.*, 2005; Murawski *et al.*, 2006). En este estudio, el plomo contribuyó a menores concentraciones de Zn en plasma ($r = -0.12$, $p=0.08$; $n = 184$).

Cadmio

Los contenidos de Cd en las ovejas suplementadas fueron 17% inferiores en el empadre a las ovejas testigo, en la gestación presentaron concentraciones similares ($p>0.05$), mientras que en la lactancia nuevamente los niveles de Cd de las ovejas testigo fueron 60% mayor que en las ovejas suplementadas. Lo cual indica que la suplementación con cobre disminuyó la concentración de cadmio en el suero sanguíneo de las ovejas.

Concentraciones relativamente bajas de cadmio en alimento y suero sanguíneo, pueden alterar el nivel de Zn, lo que ocasiona deficiencias subclínicas del elemento, teniendo efectos visibles en la calidad de la lana (Phillips *et al.*, 2004). El hígado y el riñón son los principales órganos de acumulación crónica de cadmio, debido a la alta capacidad de síntesis de las metalotioninas, proteínas ligadoras del cadmio (Galván-Bobadilla *et al.*, 2005). El consumo de $5.2 \text{ mg de Cd día}^{-1}$ pueden originar deficiencia de Zn en los animales (Antoniou *et al.*, 1995). La acumulación de Cd en hígado y riñón afecta el balance de elementos traza en el organismo del animal (Nriagu *et al.*, 2009). Dietas con niveles altos de cadmio y deficientes o desbalanceadas en cobre y zinc, agravan el estado del cobre causando infertilidad en machos ya que afecta a la espermatogénesis (Akinloye *et al.*, 2006); también causan daño renal, aumentan los niveles de K, Fe, Mo, Cr y Ca en orina (Phillips *et al.*, 2004), y ocasiona problemas óseos (Alfvén *et al.*, 2002).

Las correlaciones de los minerales tóxicos (As, Cd, Hg y Pb) con los esenciales (Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Zn), probablemente indican que el equilibrio de éstos en el cuerpo es regulada por mecanismos homeostáticos importantes con elementos tóxicos, en el que al competir con los minerales esenciales incluso a niveles bajos, permiten entender la cinética de los

minerales y sus implicaciones en el metabolismo de los elementos traza (López *et al.*, 2004)

3.5.4 Estado mineral de ovejas Criollas gestantes vs no gestantes

En el Cuadro 8, se presentan las concentraciones de cobre, hierro, zinc, azufre, molibdeno, plomo y cadmio en suero sanguíneo de ovejas gestantes vs ovejas vacías. Las ovejas gestantes presentan 28% más cobre en suero sanguíneo que las ovejas vacías, mientras tanto, los niveles de hierro, molibdeno, plomo y cadmio en suero sanguíneo disminuyeron 20, 31, 44 y 33%, respectivamente, lo cual pudo favorecer el metabolismo y absorción del cobre en el organismo de las ovejas.

Cuadro 8. Medias para concentración de minerales (mg L⁻¹) en suero sanguíneo de ovejas Criollas gestantes vs vacías.

Minerales	Ovejas		Pr>F	Diferencia (%)
	Gestantes	Vacías		
Cobre	1.58	1.14	0.0001	28
Hierro	10.68	13.28	0.0494	20
Zinc	0.65	0.71	0.2570	8
Azufre	173.15	211.44	0.1143	18
Molibdeno	3.93	5.73	0.0001	31
Plomo	0.83	1.49	0.0001	44
Cadmio	0.04	0.06	0.0056	33

3.5.6 Parásitos gastrointestinales en ovejas Criollas

Los parásitos gastrointestinales encontrados en el examen coproparasitológico en las ovejas con cobre y sin cobre adicional se presentan en el Cuadro 9. La parasitosis representa un problema sanitario a nivel mundial que afecta en forma continua al ganado ovino, principalmente a animales jóvenes (Dynes *et al.*, 1998).

Cuadro 9. Influencia de la suplementación con cobre en el porcentaje de ovejas Criollas parasitadas con *Trichostrongylus*, *Fasciola* y *Eimeria*.

Nivel de suplemento	<i>Trichostrongylus</i>	<i>Fasciola hepática</i>	<i>Eimeria arloingi</i>
Con cobre	76	35	0
Sin cobre	74	41	20

Morales *et al.* (2007) señalan que el 58% de las ovejas en los rebaños tienen cargas elevadas de nemátodos gastrointestinales. Pero sólo entre 10 a 12% de ovejas presentan sintomatología clínica o disminuyen su productividad. La presencia de cualquier cantidad de huevos de *Eimeria spp.* en materia fecal es indicativo de tratamiento (Olguín, 1975; Quiroz, 1984). Morales *et al.* (2007) mencionan infestaciones con *Eimeria spp.* en el 75% de los corderos presentando mortalidad de 8% y bajas ganancia de peso.

Las larvas de *Trichostrongylus* y cercarias de *Fasciola hepática* fueron menores en las ovejas suplementadas con cobre en comparación con las ovejas testigo (Cuadro 10).

Cuadro 10. Medias para larvas de *Trichostrongylus* y cercarias de *Fasciola hepática* en heces de ovejas Criollas con cobre y testigo.

Tratamiento	<i>Trichostrongylus</i>		<i>Fasciola hepática</i>	
	Larvas por gramo en heces	EEM ^z	Cercarias	EEM ^z
Con cobre	363	315	25.8	3.0
Sin cobre	2961		46.1	
Pr>F	0.001		0.001	

^z Error estándar de la media .

En las ovejas testigo el número de larvas de *Trichostrongylus* es superior al límite mínimo aceptable de 2500 de larvas por gramo (Quiroz, 1984), lo que indica que deben recibir tratamiento nematicida. Watkins (2003) encontró una reducción de carga parasitaria de *Haemonchus contortus* de 62% en corderos y de un 69% en ovejas en pastoreo usando capsulas de óxido de cobre; en

cambio, Waller *et al.* (2004) señalan una reducción de nemátodos de 96% en corderos y 56% en ovejas adultas.

Las cápsulas de óxido de cobre reducen el establecimiento y viabilidad de larvas de nemátodos en ovinos, esto puede deberse a que en el abomaso se tienen las condiciones ácidas adecuadas para liberar los iones de Cu que tienen efecto antiparasitario (Watkins, 2003; Waller *et al.*, 2004). Cápsulas de 5 g de óxido de cobre son adecuados para disminuir las larvas infestivas de nematodos gastrointestinales, sin causar intoxicación en cabras adultas (Burke *et al.*, 2007).

En *Fasciola hepática* el número de cercarias obtenido no es suficiente para considerar una fasciolosis. Sin embargo, en primoinfecciones agudas los análisis coproparasitológicos son negativos, con hallazgos de 300 a 600 cercarias indican una infección probable patógena que requiere la aplicación de fasciolicida (Cordero *et al.*, 2002). Aún cuando la infección por cercarias fue mínima, en las ovejas testigo ($p>0.05$) fue mayor en 78% que en las ovejas que tenían el cobre suplementario.

El sulfato de cobre fue un tratamiento utilizado en los años 60 para el control de la fasciola. Se usaba en soluciones del 1% en dosis de 0.02 g kg^{-1} o dos mL de solución por kilogramo de peso vivo, administrándolo con sonda esofágica después de un ayuno de 12 h. Sin embargo, existía mucha variabilidad en los resultados (Quiroz, 1984); como se utilizaban cantidades altas de cobre, varias ocasiones se reportaron muertes (Cordero *et al.*, 2002).

La presencia de parásitos no siempre es la única causa de anemia (Quiroz, 1984). La anemia hemolítica o hipocrómica es causada por carencias nutricionales (Perea *et al.*, 2002). La deficiencia de Cu (primaria o secundaria) y la deficiencia de Se, puede afectar negativamente al sistema inmunológico de los rumiantes y consecuentemente su capacidad de respuesta a infecciones y parasitosis (Cordero *et al.*, 2002; Watkins, 2003). Existe una correlación positiva

entre niveles bajos de Zn y Cu, y niveles altos de Fe con la presencia de diarrea, infecciones respiratorias y la presencia de parásitos (Silva *et al.*, 2003).

3.5.7 Peso vivo y condición corporal

La condición corporal y el peso vivo de las ovejas Criollas fueron similares ($p>0.05$) por el nivel de cobre, etapa fisiológica y su interacción (Cuadro 11). Estos resultados no coinciden con los reportados por Eckert *et al.* (1999) que al suplementar ovejas Rambouillet con 30 mg de Cu kg^{-1} durante 73 días mejoraron su condición corporal.

Corderos Criollos en pastoreo suplementados con cobre y fósforo tienen ganancias de peso de 60 a 90 g día^{-1} (Ríos *et al.*, 2005), mejorando en 60% la tasa de ganancia de peso y en 50 % las medidas zoométricas, lo cual justifica la importancia económica de incorporar estos elementos en la ración (Dean *et al.*, 1997). La suplementación con 45 mg de Cu kg^{-1} de dieta, mejoró los niveles de cobre en plasma e hígado de camellos, pero no tuvo efecto en los parámetros productivos (Mohamed, 2006), ni hematológicos (Alexandre *et al.*, 2005).

Cuadro 11. Peso vivo y condición corporal de ovejas Criollas suplementadas con cobre.

Etapa fisiológica	Nivel de suplemento			
	Con cobre		Testigo	
	Peso vivo (kg oveja ⁻¹)	Condición corporal	Peso vivo (kg oveja ⁻¹)	Condición corporal
Empadre	35.2	3.2	36.1	3.3
Gestación	36.0	3.3	37.1	3.4
Lactancia	39.0	3.5	37.2	3.3
Pr>F	0.2	0.8	0.2	0.8

Engle y Spears (2000) señalan que 20 mg de Cu kg^{-1} de dieta no afecta la ganancia de peso en novillos durante la finalización. La suplementación con cobre en el último tercio de gestación es útil para los becerros al destete dado que mejora la ganancia de peso (Underwood y Suttle 2003; Mattioli *et al.*, 2007).

Underwood y Suttle (2003) proponen 30 μg de Cu dL^{-1} en suero sanguíneo, mientras que Kincaid (1999) propone valores menores a 20 μg de Cu dL^{-1} para la presentación clínica de deficiencia de cobre. Sin embargo, Mattioli *et al.* (2007), con 45 μg de Cu dL^{-1} , reportan disminución de 75 g de GDP día^{-1} en becerros. La suplementación con cobre al momento de la cría y en temporada de sequía es importante para no perder peso en lugares con alto nivel de Mo y Fe (Ríos *et al.*, 2005; Mattioli *et al.*, 2008).

3.5.8 Fertilidad y prolificidad

La fertilidad (Cuadro 12) fue similar ($p>0.05$), para las ovejas testigo y con cobre adicional en la dieta. La baja fertilidad obtenida en este estudio puede ser debida al alto contenido de molibdeno y azufre en suero sanguíneo de las ovejas. Los resultados de esta investigación coinciden con lo reportado por Phillippo *et al.* (1982) quienes no encontraron evidencias suficientes de beneficio a la administración de 100 mg de Cu inyectado a ovejas, indicando que la fertilidad no está relacionada con el nivel de cobre, pero que un alto consumo de molibdeno sí puede disminuir la respuesta reproductiva de ovejas.

Cuadro 12. Efecto del nivel de suplemento en la fertilidad de ovejas Criollas.

Nivel de suplemento	Número de ovejas		Fertilidad (%) ^z
	Servidas	Paridas	
Con cobre	34	13	38.23 ^a
Sin cobre	34	11	32.35 ^a

Medias sin una letra en común, dentro de columnas, son diferentes ($p<0.05$).

Dos hipótesis parecen explicar este efecto. La primera es que el molibdeno puede estar afectando la secreción de estrógenos a nivel del ovario o impidiendo la acción del cobre a nivel de este órgano y, de esta forma disminuir la secreción de LH en vacas (Phillippo *et al.*, 1987). La segunda hipótesis se refiere a una disminución en la síntesis de LH en la adenohipófisis por exceso de molibdeno, independientemente de los niveles de cobre (Xin *et al.*, 1993).

Los resultados de prolificidad se presentan en el Cuadro 13. No hubo diferencia ($p>0.05$) entre las ovejas que recibieron cobre y las testigo. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Palacios y De la Fuente (2008), quienes al suplementar cobre, manganeso, selenio y cobalto no tuvieron diferencia en prolificidad.

Cuadro 13. Efecto del cobre en la prolificidad de ovejas Criollas.

Medición	Nivel de suplemento	
	Con cobre	Sin cobre
Ovejas paridas	13	11
Corderos nacidos	14	14
Prolificidad	1.08±0.15	1.45±0.16

Estudios realizados en ovejas Criollas reportan prolificidad similar a la encontrada en esta investigación. Salas (2000) reporta prolificidad de 1.18, mientras que Córdova *et al.* (1999) encontraron una prolificidad de 1.15. Ávila (1999) señala que aplicando dosis diferentes de PMSG a ovejas Criollas, la prolificidad vario de 1.3 a 2.0. Guzmán (2008) con suplementación de ácidos grasos poliinsaturados antes del empadre obtuvo prolificidad que de 1.08 a 1.17.

La similitud en tamaño de camada observado en las ovejas con cobre y las testigo puede deberse a que el cobre por sí solo no afecta la reproducción (Underwood y Suttle, 2003). En cambio, Murawski *et al.* (2006) señalan que ovejas alimentadas con nivel alto de molibdeno disminuyen la liberación de ovocitos fértiles, causando problemas de concepción, fertilidad y prolificidad e incluso infertilidad en etapa reproductiva.

3.6 Conclusiones

La alimentación de ovejas Criollas con dietas altas en cobre (40 mg Cu kg^{-1}) no afectó su condición corporal, fertilidad y prolificidad, y mejoró las concentraciones de cobre, hierro y zinc en suero sanguíneo sin causar intoxicación. Estos niveles de cobre fueron tolerados porque la dieta tenía excesos de hierro, azufre y molibdeno, y el agua de bebida tenía exceso de molibdeno, plomo y cadmio.

La suplementación con cobre disminuyó la parasitosis de *Trichostrongylus*, *Fasciola hepática* y *Eimeria* en ovejas Criollas. La fertilidad y prolificidad de las ovejas Criollas fueron bajas, debido probablemente a deficiencias y toxicidades de minerales pesados en el agua y en el alimento. Las ovejas gestantes presentaron mayor concentración de cobre (28%) y menores niveles de hierro (20%), azufre (18%), molibdeno (31%), plomo (44%) y cadmio (33%).

3.7 Implicaciones

La nutrición apropiada de ovejas reproductoras implica conocer el contenido de nutrimentos esenciales, así como de minerales potencialmente tóxicos, tanto en alimento como en agua de bebida; esto asegurará una producción, reproducción e inmunidad adecuadas.

3.8 Literatura citada

- Akinloye, O. O. Ayodele, Arowojolus, B. Olayiwola, and J. A. Shittu. 2006. Cadmium toxicity: a possible cause of male infertility in Nigeria. *Reproductive Biology* 6: 17-30.
- Alexandre, R., F. J. Torres A., A. Aguilar C., H. Hoste, and J. J Vargas M. 2005. Effect of copper oxide wire particles (COWP) in the hair sheep grazing irrigated pastures. *In: Proc. Novel Approaches to the Control of Helminths Parasites Livestock*, 2005. Worm control or worm management: New paradigms in integrated control. Mérida, Yucatán, México. 12 p.
- Alfvén, T., L. Järup, and C. G. Elinder. 2002. Cadmium and lead in blood in relation to low bone mineral density and tubular proteinuria. *Environmental Health Perspectives* 110: 699-702.
- Ammodio-Cocchieri, A., and P. Fiore. 1987. Lead and cadmium concentrations in livestock bred in Campania, Italy. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 39: 460-464.
- Antoniou V., N. Zantopoulos, and H. Tsoukali-Papadopoulou. 1995. Selected heavy metal concentrations in goat liver and kidney. *Veterinary and Human Toxicology* 37(1): 20-22.
- Arthington J., D., and F. M. Pate. 2002. Effect of corn-vs molasses-based supplements on trace mineral status in beef heifers. *Journal of Animal Science* 80: 2787-2791.
- Arthington, J. D., and J. W. Spears. 2007. Effects of tribasic copper chloride versus copper sulfate provided in corn-and molasses-based on forage intake and copper status of beef heifers. *Journal of Animal Science* 85: 871-876.
- Ask Zinpro. 2005. Versión 1.0274.20165. Zinpro Corporation. Eden. Prairie, Minnesota. EE.UU.
- Ávila O., G. 1999. Efecto de la dosis de PMSG en la sincronización de celos de Ovejas Criollas. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. México. 54 p.
- Bailey J. D., R. P. Ansotegui, J. A. Paterson, C. K. Swenson, and A. B. Johnson. 2001. Effects of supplementing combinations of inorganic and complexed copper on performance and liver mineral status of beef heifers consuming antagonists. *Journal of Animal Science* 79: 2926-2934.
- Bramley, R.G.V. 1990. Cadmium in New Zealand agriculture. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 33: 505-519.
- Burke, J. M., T. H. Terrill, R. R. Kallu, J. E Miller, and J. Mosjidis. 2007. Use of copper oxide wire particles to control gastrointestinal nematodes in goats. *Journal of Animal Science* 85: 2753-2761.
- Cañada, R. P. 2005. Servicios de Espectrofotometría Atómica. Disponible en: http://www.uma.es/investigadores/servinv/LabEA/tec_analiticas/tec_analiticas.html Consultado: 2 de enero de 2009.

- Cordero C., M., F. A. Rojo V., A. R. Martínez F., M. C. Sánchez A., S. Hernández R., P. Diez B., I. Navarrete L. C., H. Quiroz R., y M. Carvalho V. 2002. *Parasitología Veterinaria*. Mc. Graw Hill. Interamericana. España. pp: 266-280.
- Córdova I., A., G. Ruiz L., J. Saltijeral O. y J. F. Pérez G. 1999. Inducción y sincronización de celos en ovejas Criollas anéstricas estacionales con esponjas vaginales impregnadas con FGA y PMSG inyectable. *Archivos de Zootecnia* 48: 437-440.
- Cousins, R. J. 1985. Absorption, transport, and hepatic metabolism of copper and zinc: special reference to metallothionein and ceruloplasmin. *Physiological Reviews* 65: 238-309.
- Dean D., S. Miranda, M. Ventura, R. Lopez, and A. Quintero. 1997. Effect of the supplementation with different mineral sources on the body development of crossbred lambs. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal* 5(2): 229-231.
- Domínguez, V. I. A. 1993. Diagnóstico del estado mineral de ovinos bajo condiciones de pastoreo en Tenango del Valle, México. Tesis Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo, México 158 p.
- Dynes, R. A., D. P. Poppi, G. K. Barrell, and A. R. Syres. 1998. Elevation of feed intake in parasite infected lambs by central administration of a cholecystokinin receptor antagonist. *British Journal of Nutrition* 79: 47-54.
- Eckert, G. E., L. W. Greene, G. E. Carstens, and W. S. Ramsey. 1999. Cooper status of ewes fed increasing amounts of copper from copper sulfate or copper proteinate. *Journal of Animal Science* 77: 244-249.
- Engle, T. E., and J. W. Spears. 2000. Effects of dietary copper concentration and source on performance and copper status of growing and finishing steers. *Journal of Animal Science* 78: 2446-2451.
- Fader O., W. 2001. Los minerales en la nutrición y salud animal en la región central de la provincia de Córdoba. *In: XXVI congreso de Producción Animal*, Argentina. 8 p.
- Fick, K. R., R. L. McDowell, P. H. Miles, N. S. Wilkinson, J. D. Funk, J. H. Conrad, y R. Valdivia. 1979. Métodos de análisis de minerales para tejidos de plantas y animales. Animal Science Department. University of Florida, USA. 79 p.
- Galván-Bobadilla, A. I., R.M. García-Escamilla, N. Gutiérrez-García, M. L. Mendoza-Magaña, y R. Rosiles-Martínez. 2005. Concentraciones de Cadmio y Zinc en tejido de cáncer prostático y en hiperplasia prostática benigna. *Revista Mexicana de Patología Clínica* 52(2): 109-117.
- García A., E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. 5ta. Ed. Instituto de Geografía. UNAM. 90 p.

- García-Rubio, L., R. García-Arroyo, P. Miguez M. y F. Soler. 2000. Intoxicación por cobre en ovinos Eficacia del tratamiento y evaluación del cobre en suero. *Patología Animal. En XXV congreso de Producción Animal Argentina*. 10 p.
- Godoy, S., C. Alfaro, y C. F. Chicco. 2006. Algunas interrelaciones minerales en la nutrición de rumiantes a pastoreo en las sabanas de Venezuela. *Revista digital CENIAP HOY* 12: 357-365. Disponible en www.ceniap.gob.ve. Consultada: 10 de diciembre de 2008.
- Goyer, R. 1997. Toxic and essential metal interactions. *Annual Review of Nutrition* 17: 37-50.
- Guzmán, J. E. 2008. Comportamiento reproductivo de ovejas Criollas suplementadas con ácidos grasos poliinsaturados. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo, México. 113 p.
- Hansen, S., L. P. Schlegel, L. R. Legleiter, K. E. Lloyd, and J. W. Spears. 2008. Bioavailability of copper from copper glycinate in steers fed high dietary sulfur and molybdenum. *Journal of Animal Science* 86: 173–179.
- Hatfield, P. G., C. K. Swenson, R. W., Kott, and R. P. Ansotegui. 2001. Zinc and copper status in ewes supplemented with sulfate and amino acid-complexed forms of zinc and copper. *Journal of Animal Science* 79: 261-266.
- Huerta B., M. 2003. La deficiencia y toxicidad de cobre en ovinos. *In: XII Memorias Congreso Nacional de Producción Ovina*. AMTEO. Tulancingo. Hidalgo pp: 48-64
- Humphries, W. R., M. Phillippo, B. W. Young, and I. Bremner. 1983. The influence of dietary iron and molybdenum on copper metabolism in the calves. *British Journal of Nutrition* 49: 77-86.
- Jenkins, K. J. 1989. Effect of copper loading of preruminant calves on intracellular distribution of hepatic copper zinc, iron, and molybdenum. *Journal of Dairy Science* 72: 2346-2350.
- Jimeno, V., T. Castro, y G. Rebollar, P. 2001. Interacción nutrición-reproducción en ovinos de leche. *In: XVII Curso de Especialización. Avances en nutrición y alimentación animal*. FEDNA, Madrid. 28 p.
- Judson, G. J., T.H. Brown, D. Gray, D. W. Dewey, J. B. Edwards, and J. D. McFarlane. 1984. Oxidized copper wire particles for copper therapy in sheep. *Australian Journal of Agricultural Research* 33(6): 1073-1083.
- Kincaid, R. L. 1999. Assessment of trace mineral status of ruminants: A review. *Proceedings of the American Society of Animal Science* 10 p.
- Ledoux D. R., P. R. Henry, C. B. Ammerman, and R. D. Miles. 1989. Effect of dietary copper on tissue mineral composition as an estimate of copper bioavailability in broilers chicks. *Nutrition Reports International* 39: 11-17.

- Lee, J., S. O. Knowles, and D. M. West. 2002. Predicting copper status of cattle remains an enigma. *Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production* 62: 319-324.
- Letonoff, T. V., and J. G. Reinhold. 1935. A colorimetric method for the determination of inorganic sulfate in serum and urine. *Journal of Biological Chemistry*. pp 147-156. Online. www.jbc.org. Consultada 15 de noviembre de 2008.
- López, A., M. F. Prieto, M. M. Miranda, C. Castillo, J. Hernández, and L. J. Benedito. 2004. Interactions between toxic (As, Cd, Hg, and Pb) and nutritional essential (Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Zn) elements in the tissues of cattle from NW Spain. *Bio-Metals* 17: 389-379.
- Maciejewska-Paszek, E., M. Grochowska-Niedworok, Wardas, and M. Skiba. 2005. Iron, zinc and copper in selected tissues of rabbits under Increasing exposure to iron. *Acta Veterinaria Brunensis* 74: 551-555.
- MacPherson, A. 1984. Long term effectiveness of graded doses of copper oxide needles in suckler cows. *Veterinary Record* 115: 354-355.
- Mason, J. 1982. The putative role of thiomolybdates in the pathogenesis of Mo-induced hypocupraemia and molybdenosis: some recent developments. *Irish Veterinary Journal* 36: 164-168.
- Marston, H. R., S. H. Allen, and S. L. Swaby. 1971. Iron metabolism in copper-deficient rats. *British Journal of Nutrition* 25: 15-30.
- Mattlioli, G. A., E. Fazzio L., J. Picco S., E. Rosa D., Melani G., y Palacios A. 2007. Efecto terapéutico de la suplementación estratégica con cobre en terneros de cría. *Revista Veterinaria* 18: 9-13.
- Mattioli, G. A., E. Fazzio L., E. Rosa D., J. Picco S., D. Angelico, y E. Turic. 2008. Eficacia de la suplementación con Cu-Zn en terneros *Veterinaria Argentina* 25: 90-98.
- Mayland, H. F., R. C. Rosenau, and A. R. Florence. 1980. Grazing cow and calf responses to zinc supplementation. *Journal of Animal Science* 51: 966-974.
- McDonald, P., R. A. Edwards, J. F. D. Greenhalgh, y C. A. Morgan. 1999. *Nutrición Animal*. 5ª Ed. ACRIBIA. Zaragoza, España. pp: 89-116.
- McDowell L., R., J. P. Velásquez, y G. Valle. 1997. *Minerales para Rumiantes en Pastoreo en Regiones Tropicales*. Universidad de Florida. Gainesville, Florida. USA. 49 p.
- McDowell L., R., y J. D. Arthington. 2005. *Minerales para Rumiantes en Pastoreo en Regiones Tropicales*. Universidad de Florida. Gainesville, Florida. USA. pp: 1-47.
- Moeini, M., M. M. Souiri, and E. Nooriyan. 2008. Effect of molybdenum and sulphur on copper status and Mohair quality in merghoze goat. *Journal of Biological Science* 11: 1375-1379.

- Mohamed H., E. 2006. The influence of dietary levels of copper on copper status, cholesterol and milk profiles in camels (*Camelus dromedarius*). Journal of Animal and Veterinary Advances 5: 304-306.
- Morales, G., E. Sandoval, L. A. Pino, C. Balestrini, y F. García. 2007. El control de infestación por *Estróngilus* digestivos en rumiantes domésticos bajo principios de la "Agricultura de Presición". Revista Electrónica de Veterinaria REDVET VIII(8): 1-13. Disponible en: <http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n080807/080716.pdf> Consultado: 13 de abril de 2009
- Muehlenbein, E. L., D. R. Brink, G. H. Deutscher, M. P. Carlson, and A. B. Johnson. 2001. Effects of inorganic and organic copper supplemented to first-calf cows on cow reproduction and calf health and performance. Journal of Animal Science 79: 1650-1659
- Mullis, L. A., J. W. Spears, and R. L. McCraw. 2003. Effects of breed (Angus vs Simmental) and copper and zinc source on mineral status of steers fed high dietary iron. Journal of Animal Science 81: 318-322.
- Muñoz G., J. C. 2005. Estudios en minerales para pequeños rumiantes y su ambiente en el estado de Tlaxcala, México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo, México. 119 p.
- Murawski, M., G. Bydlon, E. Sawicka-Kapusta, M. Wierzchosa, S. Zakizewska, Włodarczyk, E. Molik, and D. Zieba. 2006. The effect of long term exposure to copper on physiological condition and reproduction of sheep. Reproductive Biology 6: 201-206.
- Nguyen, H. Q. 1998. Bahiagrass (*Paspalum notatum* Flugge) response to anaerobically digested pelletized biosolids. Thesis M. Sc. Universidad de Florida, Gainesville. 45 p.
- Nriagu, J., M. Boughanen, A. Linder, A. Howe, Ch. Grant, R. Rattray, M. Vutchkov, and G. Lalor. 2009. Levels of As, Cd, Pb, Cu, Se and Zn in bovine kidneys and livers in Jamaica. Ecotoxicology and Environmental Safety 72: 564-571.
- NRC. 2001 Nutrient Requirements of Dairy Cattle (7th Ed.). National Academies Press, Washington, D.C. 381 p.
- NRC. 2005. Mineral Tolerance of Animals: Second Revised Edition. Committee on Minerals and Toxic Substances in Diets and Water for Animals. The National Academies Press. Washington, D.C. 510 p.
- NRC. 2007. Nutrients Requirements of Small Ruminants: Sheep, Goats, Cervids, and New World Camelids. The National National Academies Press. Washington, D.C. 345 p.
- Olguín B., A. 1975. Programa de control de Fasciolosis en el centro Nacional para la Educación Investigación y Extensión de la Zootecnia. Tesis Profesional. Universidad Nacional Autónoma de México, México 45 p.
- Palacios, C., y L. F. De la Fuente. 2008. Efecto de la suplementación con Oligoelementos (Mn, Co y Se), protegidos sobre la fertilidad de ganado ovino

- churro en producción ecológica. *In: VIII Congreso SEAE Bullas, Murcia, España.* 5 p.
- Perea, J., A. Verna, C. Morsella, S. Cseh, y F. Paolicchi. 2002. Paratuberculosis bovina y su relación entre los niveles de cobre, zinc y molibdeno en sangre, pasto y agua. *In: XXLV Reunión Anual de la Asociación Argentina de Veterinarios de Laboratorios de Diagnóstico.* 8 p.
- Pérez C., A., C. Moscuza, D. Grassi, y A. Fernández-Cireli. 2007. Composición mineral de agua de bebida en sistema de producción lechera en Córdoba Argentina. *Veterinaria México* 38(2): 153-163.
- Perkin Elmer Corporation. 1996. *Analytical Methods for Atomic Absorption Spectroscopy.* USA. pp: 122-124.
- Phillippo, M., W. R. Humphries, C. B. Lawrence, and J. Price. 1982. Investigation of the effect of copper status and therapy on fertility in beef suckler herds. *Journal of Agricultural Science* 99: 359-364.
- Phillippo, M., W. R. Humphries, and T. Atkinson. 1987. The effect of dietary molybdenum and iron on copper status, puberty, fertility and oestrous cycles in cattle. *Journal of Agricultural Science* 109: 321-336.
- Phillips, C. J., P. C. Chi, and H. M. Omed. 2004. The effects the cadmium in beef, and its ameliotration with zinc on element balances in sheep. *Journal of .Animal Science* 82: 2489- 2502.
- Pinto-Santini, L., S. Godoy, C. Chicco, y T. Chacón. 2007. Efectos de altos niveles de molibdeno sobre la nutrición del cobre en vacas mestizas. *FCV-LUZ XVII(2):* 588-596.
- Porath, M. L., P. A. Momont, T. Curto, N. R. Rimbey, J. A. Tanaka, and M. McInnis. 2002. Off-stream water and trace mineral salt as management strategies. *Journal of Animal Science* 80: 346-356.
- Puls, R. 1988. *Mineral Levels in Animal Health: Diagnostic Data.* Serpa Int. Clearbrook, BC. 240 p.
- Quiroz R., H. 1984. *Enfermedades Parasitarias de Animales Domésticos.* Limusa. Zaragoza, España. 297 p.
- Ríos A., L., J. Combellas, y R. Álvarez Z. 2005. Uso de excretas de aves en la alimentación de ovinos. *Zootecnia Tropical* 23: 193-210.
- Roberts F. H. S., and P. J. O'Sullivan. 1949. Methods for Egg Counts and Larvae Cultures for Strongyles Infesting the Gastro-Intestinal Tract of Cattle. *Australian Journal of Agricultural Research* 1: 99-102.
- Rodríguez V., R. I., L. J. Domínguez A., y L. A. Cob G. 1994. Técnicas diagnósticas de Parasitología Veterinaria. Universidad Autónoma de Yucatán. México. pp: 78-81.
- Rubio M., S., N. Torres, J. Gutiérrez, y R. Méndez. 2003. Composition and sensory evaluation of lamb carcasses used for the traditional mexican lamb dish "barbacoa". *Meat Science* 67: 359-364.

- Russell, A. 1984. Body condition scoring of sheep. *In Practice* 61: 91-93.
- Salas B., G. 2000. Comportamiento reproductivo de ovejas Criollas sincronizadas. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo, México. 48 p.
- Saleh, M. A., M. B. Al-Salahy, and S. A. Sanousi. 2008. Corpuscular oxidative stress in desert sheep naturally deficient in copper. *Small Ruminant Research* 80: 33-28.
- SAS. 2004. SAS/STAT User's guide. (Release 9.1) SAS Publishing, Cary (NC). 1-7: 5180.
- Shorrocks, V. M., and B. J. Alloway. 1985. Copper in plant, human and animal nutrition: Copper development Association. A technical review. *International Copper Research*. 80 p.
- Silva, T. M., O. M. Alarcón C., A. O. Alarcón, M. Ramírez F., y J. O. Mejía A. 2003. Niveles séricos de zinc hierro y cobre de preescolares que acuden a consulta en la ciudad de Mérida. *medULA* 12: 18-25.
- Soto, L. C., M. Delgado, y A. Cuéllar. 2006. Situación de la ovinocultura en México. Artículos técnicos ovinos. disponible en http://www.engormix.com/s_articles_view.asp?art=908&AREA=OVI Consultado: el 4 de diciembre de 2008.
- Spears, J. W. 2003. Trace mineral bioavailability in Ruminants. *Journal Nutrition* 133: 1506-1509.
- Suttle, N. F. 1975. An effect of soil ingestion on the utilization of dietary copper by sheep. *Journal of Agricultural Science Cambridge* 84: 249-254.
- Suttle, N. F. 1991. The interactions between copper, molybdenum, and sulfur in ruminant nutrition. *Annual Review of Nutrition* 11: 121-140.
- Suttle, N. F. 2003. Meeting the copper requirements of ruminants. *In: Wiseman and P. C. Garnsworthy Nottingham University Press, Nottingham (ed.) Recent Developments in Ruminant Nutrition*. pp: 221-236.
- Suttle, N. F., and A. C. Field. 1974. The effect of dietary molybdenum on hypocupraemic ewes treated by subcutaneous copper. *Veterinary Record* 95: 165-168.
- Tiffany, M. E., L. R. McDowell, G. A. O'Connor, F. G. Martin, N. S. Wilkinson, E. C. Cardoso, S. S. Percival, and P. A. Rabiansky. 2000. Effects of pasture applied biosolids on performance and mineral status of grazing beef heifers. *Journal of Animal Science* 78: 1331-1337.
- Tiffany, M. E., L. R. McDowell, G. A. O'Connor, H. Nguyen, F. G. Martín, N. S. Wilkinson, and N. A. Katzowitz. 2001. Effects of residual and reapplied biosolids on forage and soil concentrations over a grazing season in North Florida. II Microminerales. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32: 2211-2226.
- Tiffany, M. E., L. R. McDowell, G. A. O'Connor, F. G. Martin, N. S. Wilkinson, S. S. Percival, and P. A. Rabiansky. 2002. Effects of residual and reapplied biosolids

- on performance and mineral status of grazing beef steers. *Journal of Animal Science* 80: 260-269.
- Underwood, E. J., y N. F. Suttle. 2003. *Los Minerales en la Nutrición del Ganado*. 3a. edición. Acribia. Zaragoza España. 495 p.
- Waller, P., J. G. Bernes, L. Rudby-Martini, B. L. Ljungström, and A. Rydziki. 2004. Evaluation of copper supplementation to control *Haemonchus contortus* infections of sheep in Sweden. *Acta Veterinaria Scandinavica* 45: 149-160.
- Watkins, A. D. 2003. Effectiveness of copper-oxide wire particles on the control on the *Haemonchus contortus* in sheep. Thesis Ph.D. Louisiana State University. 45 p.
- White, C. L., B. S. Chandler, and D. W. Peter. 1991. Zinc supplementation of lactating ewes and weaned lamb grazing improved Mediterranean pastures. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 31: 183-189.
- Wright, C. L., J. W. Spears, and K. E. Webb. 2008. Uptake of zinc from zinc sulfate and zinc proteinate by ovine ruminal and omasal epithelia. *Journal of Animal Science* 86: 1357-1363.
- Xin, W., J. Silvia, D. F. Waterman, and R. W. Hemken. 1993 Effect of copper status on luteinizing hormone secretion in dairy steers. *Journal of Dairy Science* 76: 437-344

4 AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo a la Universidad Autónoma Chapingo por las facilidades otorgadas. Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado durante los estudios de maestría y al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT), por la beca otorgada que hizo posible la culminación de esta investigación.