



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA

“CONCENTRACIÓN MINERAL Y PARÁMETROS PRODUCTIVOS DE
BOVINOS LECHEROS CON DISTINTOS MOMENTOS DE PASTOREO”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

Presenta:

DANIEL LIMON HERNANDEZ

ASESORES:

Dr. ERNESTO MORALES ALMARAZ
Dr. en C. IGNACIO A. DOMÍNGUEZ VARA
M en C. RODOLFO VIEYRA ALBERTO

Revisores:

Dr. ALBERTO BARBABOSA PLIEGO
Dr. JOSÉ LUIS BORQUEZ GASTELUM



Toluca México, enero de 2016.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIAS	iii
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Los sistemas de producción de leche bovina.....	3
2.2. Composición química de la leche de vaca.....	4
2.2.1. Proteínas	5
2.2.2. Lactosa.....	5
2.2.3. Grasa.....	6
2.2.4. Sales minerales	6
2.3. Importancia de los minerales en la nutrición de los bovinos.....	7
2.4. Requerimientos de minerales para el ganado lechero.....	8
2.5. Clasificación de los minerales y su función en el organismo.....	8
2.5.1. Macrominerales	10
2.5.1.1. Calcio (Ca).....	10
2.5.1.2. Fósforo (P).....	11
2.5.1.3. Magnesio (Mg)	13
2.5.1.4. Potasio (K).....	14
2.5.1.5. Sodio (Na).....	15
2.5.2. Microminerales	16
2.5.2.1. Cobre (Cu)	16
2.5.2.2. Hierro (Fe)	17
2.5.2.3. Zinc (Zn).....	19
2.5.2.4. Selenio (Se).....	20
2.5.2.5. Cobalto (Co)	21
2.6. Fuente de minerales para el animal	21
2.6.1. Suelo	21

2.6.2. Agua.....	22
2.6.3. Alimento	23
2.7. Factores que afectan el consumo de nutrientes.....	23
III. JUSTIFICACIÓN	26
IV. HIPÓTESIS	27
V. OBJETIVOS	28
VI. LÍMITE DE ESPACIO.....	29
VII. LÍMITE DE TIEMPO	30
VIII. MATERIAL Y MÉTODO.....	31
8.1. Animales, dieta y tratamientos	31
8.2. Desarrollo experimental.....	31
8.3. Análisis de laboratorio.....	34
8.4. Análisis estadístico	35
IX. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
9.1. Composición química de los alimentos	36
Cuadro 4. Composición química y contenido de minerales en los alimentos.	36
9.2. Desempeño productivo: consumo de alimento y producción de leche.....	37
9.3. Consumo de minerales.....	38
9.3.1. Consumo de macrominerales.....	38
9.3.2. Consumo de microminerales	39
9.4. Concentración mineral en suero sanguíneo de bovinos.....	40
9.4.1. Macrominerales en suero sanguíneo.....	40
9.4.2. Microminerales en suero.....	42
9.5. Correlación entre minerales	43
9.5.1. Correlación entre el consumo de minerales y concentración mineral en suero sanguíneo de bovinos.....	44
9.5.2. Correlación entre el consumo de minerales y la producción de leche.....	45
9.5.3. Correlación entre la concentración mineral en suero sanguíneo y la producción de leche	47
X. CONCLUSIONES	49
XI. LITERATURA CITADA	50

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Título	Página
1-	Componentes de la leche de bovino.....	4
2-	Contenido de sales minerales en la leche de vacuno.....	7
3-	Requerimientos de minerales de vacas lecheras en lactación.....	9
4-	Composición química y contenido de minerales en los alimentos.....	36
5-	Ingestión diaria de alimento (kg MS) y producción de leche (kg/d) de vacas Holstein con diferente tiempo de permanencia en la pradera del valle de Toluca, México.....	37
6-	Consumo de macro (g/d) y microminerales (ppm/d) de vacas Holstein con diferente tiempo de permanencia en la pradera del valle de Toluca, México.....	38
7-	Concentración de minerales en suero sanguíneo de vacas Holstein con diferente tiempo de permanencia en la pradera del valle de Toluca, México.....	41
8-	Coeficientes de correlación entre el consumo de minerales, la concentración mineral en suero sanguíneo y la producción de leche de vacas Holstein en pastoreo en el valle de Toluca, México.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1-	Distribución de bovinos lecheros en México.....	3
2-	Factores que influyen en el consumo de alimento por los animales.....	24
3-	Eventos de manejo en el ganado lechero que limitan el consumo de alimento y en consecuencia la producción de leche.....	24

RESUMEN

CONCENTRACIÓN MINERAL Y PARÁMETROS PRODUCTIVOS DE BOVINOS LECHEROS CON DISTINTOS MOMENTOS DE PASTOREO

Con el objetivo evaluar el efecto del momento de pastoreo sobre el contenido mineral en suero sanguíneo y la respuesta productiva de bovinos productores de leche se utilizaron seis vacas multíparas Holstein agrupadas al azar en un cuadro latino repetido 3x3, con tres periodos experimentales de 15d. En pradera se asignaron 22 kg MS/vaca/d, y se suplementaron en la estabulación 5.0 kg de concentrado y ensilado de maíz *ad libitum*. Los tratamientos fueron: 1) **8h** = ocho horas continuas de pastoreo (07:00 a 15:00h); 2) **4+4h** = ocho horas de pastoreo fraccionadas en dos momentos de 4h (de 07:00 a 11:00h y de 16:00 a 20:00h); y 3) **12h** = doce horas de pastoreo (de 07:00 a 15:00h y de 16:00 a 20:00h). Los tratamientos no afectaron ($P>0.05$) al consumo de MS total (17.29 ± 0.37 kg/d) ni la producción de leche (21.76 ± 1.18 kg/d). Se observó mayor ($P<0.05$) consumo de P, Mg, K, Na y Cu en vacas que estuvieron 12h en la pradera comparado con las vacas que estuvieron 8h, esta diferencia coincidió con el mayor ($P<0.05$) consumo de pasto. No obstante, el consumo de algunos minerales (P, Mg, K y Zn) no cubrió los requerimientos de los bovinos lecheros. La concentración de minerales en suero sanguíneo no mostro diferencias ($P>0.05$) entre tratamientos y estuvo dentro del rango normal para la mayoría de los minerales, a excepción de niveles deficientes de Zn y Mg y excesivo de K. No se encontró correlación ($P>0.05$) entre el consumo de minerales con la concentración de minerales en suero sanguíneo, tampoco de ésta con la producción de leche; sin embargo, hubo una correlación positiva importante del consumo de P, Mg, K, Na, Cu, Fe y Zn con la producción de leche ($P<0.05$; $r=0.83, 0.55, 0.73, 0.59, 0.56, 0.55$ y 0.62 , respectivamente). Se concluye que en bovinos productores de leche en condiciones de pastoreo el consumo de minerales tiene importante relación con la producción de leche, con lo cual, es necesario atender el déficit mineral aportado con la dieta con una adecuada suplementación.

I. INTRODUCCIÓN

La nutrición es parte fundamental para cualquier tipo de explotación pecuaria. En bovinos lecheros, la nutrición mineral tiene importancia especial porque gran parte de su ración son forrajes, en su mayoría pastos nativos o residuos de cosechas que en determinadas circunstancias no cubren los requerimientos o pueden llegar a tener exceso de algún mineral para los animales en producción. Los desequilibrios minerales son muy frecuentes, mientras que la suplementación mineral en vacas lecheras gestantes o en producción es limitada. McDowell *et al.* (1993), postularon que después de controlar las enfermedades críticas, la nutrición mineral adecuada es el factor con el mayor potencial y el menor costo para incrementar la producción de leche en pastoreo.

La nutrición mineral tiene importancia sobre todo si se desconoce el estado mineral del ganado; dietas con deficiencias de calcio y fósforo reflejarán una reducción en la producción láctea, sin alterar sus concentraciones minerales en la leche. La no reposición de minerales al suelo lo empobrece debido la extracción continua de nutrientes para dar origen a productos animales, la intensificación de la producción mediante sistemas de pastoreo o prácticas de fertilización con macroelementos provoca que las reservas de microelementos disminuyan; por otro lado, el incremento de la producción mediante el mejoramiento genético incrementa las demandas de minerales de los animales, con lo cual puede surgir la necesidad de suplementar minerales al ganado en pastoreo (Huerta, 1997).

La principal fuente de minerales para los rumiantes en pastoreo son los alimentos y el forraje que consumen, aquellos rumiantes que se explotan bajo estas condiciones, la suplementación mineral es escasa o nula, limitándose a proporcionar esporádicamente sal común (McDowell y Arthington, 2005).

Distintas regiones presentan deficiencias naturales de minerales en sus plantas, las cuales pueden ser agravadas por las prácticas de manejo, otros factores son el género, la especie, variedad de la planta, el tipo de suelo en el cual se desarrolla, el clima, la estación del año, el estado de madurez y el manejo aplicado al forraje y granos de cereales (Underwood, 1981), lo cual repercutirá en la ingestión y estado mineral de los animales que lo consumen. La influencia real de estos factores en la concentración de un elemento mineral en los tejidos vegetales varía con los distintos minerales y con los tratamientos impuestos por el hombre en su esfuerzo por aumentar el rendimiento de las cosechas o de los pastizales, tales tratamientos incluyen el uso de fertilizantes, el riego, la selección plantas con mayores rendimientos que pueden diferir ampliamente en su composición mineral con respecto a las

variedades que sustituyen (Underwood, 1981; McDowell *et al.*, 1993; Underwood y Suttle, 1999). El fósforo, sodio, calcio, cobre, selenio y zinc contenidos en los forrajes no cubren los requerimientos minerales para una producción óptima del ganado en pastoreo (McDowell *et al.*, 1985; Morales-Almaráz *et al.*, 2007; Domínguez y Huerta, 2008; Vieyra-Alberto *et al.*, 2013).

Algunas investigaciones realizadas en distintas zonas del Valle de Toluca, Estado de México (Morales-Almaraz *et al.*, 2007; Domínguez y Huerta, 2008), han observado variaciones en la concentración mineral de forrajes destinados al pastoreo del ganado, lo cual ha sido asociado al efecto de las condiciones climáticas y madurez de la planta. Sin embargo, aquellas investigaciones han sido enfocadas a evaluar el contenido mineral de los alimentos y suero sanguíneo del ganado pero no ha sido considerada la evaluación de la relación del estado mineral del animal con la respuesta productiva (consumo de alimento, producción y composición de la leche), en muchos casos solo se infiere que los desbalances de minerales observados en la concentración mineral en tejidos o fluidos del animal podrían afectar la productividad del ganado más tal suposición no fue evaluada. El objetivo del presente trabajo es evaluar el efecto que tiene la estrategia de alimentación sobre el contenido mineral del animal y su influencia sobre la respuesta productiva de bovinos productores de leche con distintos momentos de pastoreo.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Los sistemas de producción de leche bovina

El territorio nacional tiene una extensión de cerca de dos millones de kilómetros cuadrados (INEGI, 2013), donde se encuentran más de 32 millones de cabezas de ganado bovino (SIAP, 2013) este ganado está distribuido en todo México. El número de cabezas y con ello el sistema de producción va a depender, entre otras cosas, principalmente del clima y recursos forrajeros para la explotación.

De manera muy general los climas del territorio nacional van a depender de dos factores, 1) según la temperatura en cálido y templado, y 2) de acuerdo con la humedad existente en el medio en húmedo, subhúmedo y muy seco (INEGI, 2013), cabe mencionar que algunos Estados pueden tener más de dos climas en su área territorial. Tradicionalmente el país se ha dividido en cinco regiones de acuerdo al clima: 1) región árida y semiárida, 2) región templada, 3) región tropical húmeda, 4) región tropical seca y 5) región montañosa, cada una de ellas cuenta con características específicas que las distinguen.

El sistema de información agroalimentaria y pesquera (SIAP, 2013) ha tomado en cuenta dos grandes líneas de producción de bovinos, 1) especializados en la producción de carne y, 2) especializados en la producción de leche. Los Estados que contabilizan el mayor número de cabezas de bovinos lecheros son: Jalisco, Chihuahua, Durango, Coahuila e Hidalgo, estas cinco entidades representan alrededor del 52% del total. El Estado de México se encuentra en el octavo lugar con 115,607 cabezas que representa el 4.9% del total (Figura 1)

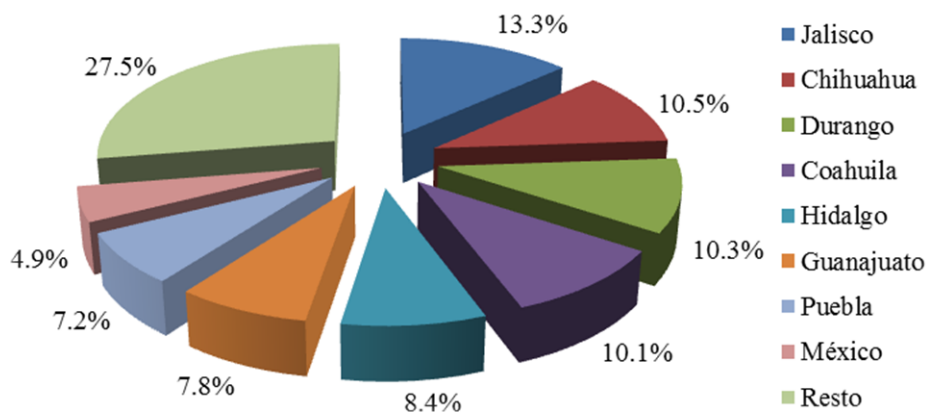


Figura 1. Distribución de bovinos lecheros en México

2.2. Composición química de la leche de vaca

La leche es un complejo en dispersión acuosa heterogénea que contiene grasa en emulsión, gotas de grasa rodeadas por una membrana lipoproteica que se mantiene en emulsión por la carga de su envoltura, proteínas en estado coloidal, caseínas, albúminas, globulinas y proteínas del suero en solución, junto con compuestos solubles de naturaleza orgánica e inorgánica que incluyen minerales, vitaminas hidrosolubles y compuestos nitrogenados no proteicos (Gravert, 1987). En el cuadro 1 se observan los componentes de la leche bovina.

Cuadro 1. Componentes de la leche de bovino

Componente	Porcentaje
Agua	86.0 – 88.0
Materia grasa	3.0 – 6.0
Proteínas	3.2 – 3.6
Lactosa	4.6 – 4.8
Sales minerales	0.7 – 1.0

Ávila y Gutiérrez, 2010

Desde el punto de vista cualitativo, la leche de todas las especies tiene una composición semejante, aunque cuantitativamente, la composición de las diversas fracciones como proteína y grasa, varía en las distintas especies, lo cual puede deberse a diferentes factores: raza, periodo de lactación, alimentación, manejo, etc., por ello es difícil hablar de una composición constante (Ávila y Gutiérrez, 2010).

La mayor parte de los principales componentes de la leche se sintetizan en la glándula mamaria a partir de diversos precursores que se absorben selectivamente de la sangre. Asimismo, la glándula ejerce un filtrado selectivo sobre ciertas proteínas, minerales y vitaminas que no son elaboradas en este lugar, sino que pasan directamente de la sangre a la leche (Gangliostro, 2004).

2.2.1. Proteínas

Aproximadamente el 95 % del nitrógeno de la leche se encuentra en forma de proteína, el resto se encuentra en forma de urea, creatina, glucosalina, amoníaco, etc., que pasan de la sangre a la leche. En la leche se distinguen tres grupos de proteínas:

- Caseína: es la proteína más abundante de la leche, normalmente está en cantidades de 2.6 a 3.0%.
- Lactoalbúmina: la leche contiene aproximadamente 0.5% de albuminas, las que son solubles en agua.
- Lactoglobulina: se encuentra en la leche en pequeñas cantidades en forma de englobulina y pseudoglobulina. Es menos soluble que las otras proteínas de la leche.

De estos grupos de proteínas sintetizados en las células epiteliales de la glándula se distinguen seis subgrupos principales: α_1 , α_2 , β y γ -caseínas, β -lactoalbuminas y α -lactoalbuminas (Mephan, 1982). Estas proteínas mayoritarias se complementan con proteínas procedentes del plasma (plasminas y plasmógenos) y por fosfolípidos y péptidos procedentes de diversos procesos metabólicos.

2.2.2. Lactosa

Es un componente característico, que en la naturaleza solamente se encuentra en la leche de los mamíferos, y por lo tanto también se denomina azúcar de la leche. La lactosa es un disacárido presente en la leche de los mamíferos que supone la mayor fuente de hidratos de carbono durante la lactancia. La lactosa, principal carbohidrato de la leche, se sintetiza en la glándula mamaria a partir de la glucosa y galactosa, y su contenido varía en las diferentes especies entre 2.8 y 7.0%.

En el vacuno, su contenido presenta un rango menor 4.8-5.2% (Johnson, 1978), y constituye entre 50-52% de los sólidos totales de la leche. Los principales precursores de la lactosa son la D-glucosa plasmática (80%) y la D-galactosa. El resto se origina a partir de otros precursores plasmáticos (galactolípidos, cerebrósidos y galactoproteínas). La lactosa se sintetiza junto con las proteínas de la leche en el aparato de Golgi (Kuhn *et al.*, 1980); los procesos bioquímicos que ocurren en la formación de la lactosa han sido extensamente revisados (Nickerson, 1978).

2.2.3. Grasa

La grasa de la leche de los mamíferos está predominantemente compuesta por un 98% por triglicéridos, el resto de los lípidos incluyen fosfolípidos (0.5-1%), glicolípidos (0.06%), colesterol (0.3%) y trazas de ácidos grasos libres (0.1-0.4%) (Renner, 1982). Los lípidos de la leche bovina se encuentran empaquetados dentro de glóbulos grasos. Su origen inicia con la síntesis de triglicéridos en el retículo endoplasmático liso, seguido por su agregación en el retículo endoplasmático rugoso, conformando al núcleo del glóbulo de grasa que se encuentran casi exclusivamente compuesto por triglicéridos con pequeñas cantidades de colesterol, vitaminas y otros componentes (Angulo *et al.*, 2009).

La grasa de la leche y los productos lácteos contribuyen de modo importante al consumo de ácidos grasos y vitaminas en la dieta humana, asimismo tiene un papel crítico en los atributos sensoriales de estos alimentos (Demment y Allen, 2004; Chen *et al.*, 2004; Chilliard y Ferlay, 2004). Existe una apreciación del consumidor de que los productos de los rumiantes, como la leche, tienen un alto contenido de grasa y son considerados causantes de algunas enfermedades de humanos; en este sentido, en países desarrollados, el alto consumo de ácidos grasos saturados (AGS) está asociado con la leche y productos lácteos (Valsta *et al.*, 2005), lo cual ha contribuido a una imagen negativa para estos productos. La grasa en leche típicamente contiene una alta proporción de AGS (70-75%), ácidos grasos monoinsaturados (20-25%) y cantidades pequeñas de ácidos grasos poliinsaturados (5%) (Lock y Shingfield, 2004). Menos de 40% de los AGS están considerados dentro de la categoría de ser poco saludables (Elgersma *et al.*, 2006).

La grasa de la leche se caracteriza por la existencia de ácidos grasos de longitud media (C8:0 a C12:0), que son específicos de la glándula mamaria. En los rumiantes predominan los ácidos grasos (AG) de bajo peso molecular como el butanoico (C4:0) y hexanoico (C6:0) que constituyen el 0.05% de los ácidos grasos volátiles sobre una base molar. Los AG en leche tienen un doble origen: 1) Los triglicéridos circulantes en sangre en forma de lipoproteínas procedentes de la grasa de la ración, y 2) Las reservas corporales, cuando el animal se encuentra en balance de energía negativo (Angulo *et al.*, 2009).

2.2.4. Sales minerales

Los minerales representan una pequeña fracción de los sólidos de la leche. Su concentración es de aproximadamente 7 a 10 g/kg. Esta fracción tiene una gran importancia nutricional, en particular por los aportes de calcio y fósforo (Cuadro 2). La digestibilidad

del calcio y fósforo es generalmente alta, en parte debido a que se encuentran en asociación a otros componentes como la caseína. En una leche sin alteraciones, el 65% de calcio, el 60% de magnesio y el 50% de fósforo se encuentran asociados a las caseínas (en forma coloidal) (Ávila y Gutiérrez, 2010).

Cuadro 2. Contenido de sales minerales en la leche de vacuno

Mineral	Concentración (g/L)
Potasio	1.50-1.15
Calcio	1.20-1.25
Fósforo	0.25-1.00
Sodio	0.40-0.50
Azufre	0.30
Magnesio	0.10-0.12
Cloro	1.10
Ácido cítrico	Hasta 2

(Adaptado de Ávila y Gutiérrez, 2010)

2.3. Importancia de los minerales en la nutrición de los bovinos.

Los minerales existen en las células y tejidos del organismo animal en diversas combinaciones y concentraciones, dependiendo del tipo de tejido. Una ingestión inadecuada de un mineral provoca cambios en la forma o concentración de este en tejidos y fluidos corporales, llegando a alcanzar valores por debajo o por encima de los límites permisibles (McDowell y Arthington, 2005). Como consecuencia de una mala administración de los minerales en la alimentación, aparecen desordenes nutritivos, por deficiencia o toxicidad mineral, estos desordenes pueden ir desde cambios ligeros y transitorios difíciles de diagnosticar, hasta causar alta mortalidad en el ganado (McDowell y Arthington, 2005).

La productividad animal está limitada principalmente por aportes deficientes de energía y proteína, enfermedades parasitarias e infecciosas, factores genéticos del animal, y desequilibrios en el aporte mineral (Suttle, 1991). La importancia de los minerales en la nutrición animal radica en que son necesarios para la transformación de la proteína y la energía de los alimentos en componentes del organismo, cumpliendo primeramente con las necesidades de mantenimiento y posteriormente las necesidades de crecimiento, gestación y lactación (Huerta, 1999).

2.4. Requerimientos de minerales para el ganado lechero

Un gran número de elementos inorgánicos son esenciales para el crecimiento normal y la reproducción de los animales. Los requeridos en gramos se refieren a los macrominerales y este grupo incluye el calcio, fósforo, sodio, cloro, potasio, magnesio y azufre. Los macrominerales, entre otras cosas, son componentes importantes estructurales del huesos y otros tejidos, la presión osmótica, son parte importante de los fluidos corporales, estos juegan un papel importante en el equilibrio ácido-base y contribuyen a la transmisión de impulsos nerviosos (NRC, 2001).

Los elementos requeridos en miligramos o microgramos se conocen como minerales traza; en este grupo incluye el cobalto, cobre, yodo, hierro, manganeso, molibdeno, selenio, zinc cromo y quizás flúor; estos están presentes en tejidos corporales en concentraciones muy bajas y con frecuencia sirven como componentes de metaloenzimas y cofactores enzimáticos, o bien como componentes de hormonas del sistema endocrino (NRC, 2001). El cuadro 3 muestra los requerimientos de minerales de ganado lechero con distinto nivel de producción y genotipo.

2.5. Clasificación de los minerales y su función en el organismo

Existen diversas clasificaciones de los minerales:

- Por su afinidad por ciertos órganos o tejidos específicos.
- Por su concentración en el organismo.
- Por su significancia en las funciones vitales del organismo (Giorgievskii, 1982).

La clasificación de los minerales definida por Miller (1979a), Underwood (1981) y Kinkaid (1993) es: macroelementos o mayoritarios y minerales traza o microelementos, esta clasificación depende de su concentración en el organismo animal o los requerimientos en la dieta. El cuadro 3 muestra los requerimientos de minerales de bovinos leche con distinto nivel de producción.

Cuadro 3. Requerimientos de minerales de vacas lecheras lactantes

	<i>Holstein: 680 kg PV, Grasa en leche: 3.5%, Proteína verdadera en leche: 3.0%, Lactosa en leche: 4.8%</i>		<i>Jersey: 454 kg PV, Grasa en leche: 4.2%, Proteína verdadera en leche: 3.6%, Lactosa en leche: 4.8%</i>	
Producción de leche (kg)	25	35	25	35
Ca absorbible, g/día	32.1	65.0	50.7	65.2
Ca dietético, %	0.62	0.61	0.57	0.57
P absorbible g/ día	44.2	56.5	41.4	54.1
P dietético, %	0.32	0.35	0.33	0.37
Mg, %	0.18	0.19	0.18	0.19
Cl, %	0.24	0.26	0.24	0.26
K, %	1.00	1.04	1.02	1.03
Na, %	0.22	0.23	0.20	0.20
S, %	0.20	0.20	0.20	0.20
Co, mg/kg	0.11	0.11	0.11	0.11
Cu, mg/kg	11	11	10	10
I, mg/kg	0.60	0.50	0.44	0.40
Fe, mg/kg	12.3	15	14	16
Mn, mg/kg	14	14	12	12
Se, mg/kg	0.30	0.30	0.30	0.30
Zn, mg/kg	43	48	45	49

Adaptada: NRC, 2001

Siete macrominerales (calcio, fósforo, potasio, magnesio, sodio, cloro y azufre) son esenciales para las formas superiores de vida animal (Underwood y Suttle, 1999), estos se encuentran en el cuerpo en concentraciones mayores a 100 ppm. (Miller, 1979a; Underwood, 1981). Los microminerales son quince (hierro, yodo, zinc, cobre, manganeso, cobalto, molibdeno, selenio, cromo, estaño, vanadio, flúor, silicio, níquel y arsénico) (Underwood y Suttle, 1999), la concentración de los microminerales en tejido animal es inferior a 100 ppm. (Miller, 1979a; Underwood, 1981).

Además de estos 22 minerales esenciales para la vida existen alrededor de otros 20-30 elementos que no se ha demostrado que tengan funciones vitales y se sugiere que están simplemente como constituyentes accidentales, reflejando el contacto natural del animal con su ambiente (Underwood, 1997).

Se ha determinado que los minerales cumplen con cuatro funciones esenciales en el organismo. Estas funciones no son exclusivas de todos los minerales y varían de acuerdo al tipo de mineral y animal (Underwood y Suttle, 1999).

- Estructural: los minerales pueden formar componentes estructurales de órganos y tejidos corporales, como es el caso del calcio, fósforo, magnesio, flúor y silicio que forman la mayor parte de la estructura ósea (Underwood y Suttle, 1999).
- Fisiológica: algunos minerales se presentan en forma de electrolitos en tejidos y fluidos corporales, estos intervienen en el mantenimiento de la presión osmótica, del equilibrio ácido-base, de la permeabilidad de las membranas, éste es el caso del sodio y el potasio (McDowell y Arthington, 2005).
- Catalítica: funcionan como catalizadores de enzimas y determinadas hormonas, como componentes estructurales de metaloenzimas, el cobre es un ejemplo de estas funciones.
- Reguladora: se ha comprobado que los minerales intervienen en la regulación de la replicación y diferenciación celular, un ejemplo de ellos es el calcio que influye en señales de transducción y el cinc influye en la transcripción (Underwood y Suttle, 1999).

2.5.1. Macrominerales

2.5.1.1. Calcio (Ca)

El Ca es esencial en la formación del esqueleto y los dientes, interviene en la coagulación de la sangre, en la regulación de la actividad neuromuscular y cardiaca, en la regulación del equilibrio ácido-básico y en la presión osmótica (Maynard, 1992). Es el mineral más abundante del organismo del animal, representa el 2 % del peso corporal del animal, cerca del 98 % del Ca se encuentra en el esqueleto y los dientes, el 2 % restante se encuentra distribuido en tejidos blandos con una mayor concentración en plasma sanguíneo (McDowell *et al.*, 2005; NRC, 2001)

La cantidad de Ca requerida por el animal depende de diversos factores como lo es la especie, edad, peso, estado fisiológico, nivel de producción (NRC, 1998) además de la eficiencia de absorción (Minson, 1990).

Yano *et al.*, (1991) mencionan que pequeñas cantidades de Ca pueden ser absorbidas desde el rumen, pero el mejor sitio de absorción es el intestino delgado, donde se realiza

principalmente de forma iónica por mecanismos de transporte activo y difusión pasiva (Church *et al.*, 2006), controlada por la hormona paratiroidea (HTP) y la forma fisiológicamente activa de la vitamina D3 1,25-dihidroxicolecalciferol (calcitrol, 1,25-(OH)₂ D3) (Underwood y Suttle, 1999), donde actúa lentamente, abriendo los canales de Ca y facilitando su capacitación, con ayuda de la calbindina (proteína transportadora de Ca) (Hurwitz, 1996). El Ca se secreta en leche, en rumiantes se excreta por vía fecal en cantidades bajas, apenas se ven afectadas por la ingestión o el balance orgánico del Ca; su excreción en orina y sudor se vuelve importante en la acidosis metabólica de vacas en producción de leche (Georgievskii *et al.*, 1982; Church *et al.*, 2006; Underwood y Suttle, 1999)

Para la mayoría de los tipos de producción animal el Ca puede ser cubierto por el forraje que contenga aproximadamente 4.0 g Kg MS (Minson, 1990). El nivel máximo tolerable indicado por el NRC (2001) para vacas lecheras es de 2% de la MS total. El consumo deficiente de Ca es causa de debilidad ósea, crecimiento lento, baja producción láctea (McDowell y Arthington, 2005), en deficiencias crónicas hay evidencia de cambios químicos, físicos, histológicos y radiológicos, que reflejan una reducción en la mineralización de los huesos (Underwood y Suttle, 1999), raquitismo en animales jóvenes y osteomalacia en animales adultos (Church *et al.*, 2006). Cuando los animales ingieren forrajes deficientes en Ca, asociado con cantidades altas en P, se puede presentar una anomalía llamada hiperparatiroidismo nutricional secundario, que consiste en una alta movilización de calcio de los huesos, el cual es sustituido por tejido conectivo fibroso provocando un engrosamiento de los huesos faciales (Maynard *et al.*, 1981)

El nivel máximo tolerable de Ca es de 2 % para bovinos, sin embargo, niveles superiores no se consideran tóxicos, debido a que los mecanismos homeostáticos aseguran que el exceso de calcio sea excretado en heces (Underwood y Suttle, 1999). El exceso en el consumo de Ca puede evitar la absorción de algunos minerales, puede causar calcificación en sitios de daño celular, tumores en la tiroides en respuesta a la hiperactividad y cálculos urinarios (Church *et al.*, 2006)

2.5.1.2. Fósforo (P)

El P es esencial para la producción de leche, el desarrollo y mantenimiento del tejido esquelético, además contribuye en la composición de los ácidos nucleicos y en la membrana celular en forma de fosfolípidos (Church y Pound, 1987). Es el segundo mineral más abundante en el organismo, aproximadamente el 80% se encuentra en huesos y dientes,

y el 20 % restante está distribuido en fluidos y otros tejidos del organismo (ARC, 1980; NRC, 2001)

El P tiene un papel fundamental para el funcionamiento adecuado de los microorganismos del rumen, principalmente los que digieren la celulosa, así como para la regulación del pH y otros fluidos (McDowell *et al.*, 2005). La absorción de P ocurre principalmente en duodeno y yeyuno en rumiantes, pero depende de la cantidad ingerida, a mayor consumo disminuye su coeficiente de absorción, también se afecta cuando la relación Ca:P está por debajo 1:1 o por encima de 7:1 (McDowell y Arthington, 2005)

La eficiencia de absorción de P es mayor en los terneros con un 94 % en comparación con los adultos que absorben el 58 % del P disponible (ARC, 1980). En dietas con altas concentraciones de Fe, Al, Mn, K y Mg la absorción de P es baja (Underwood y Suttle, 1999). Los rumiantes mantienen la concentración de P entre 40 y 70 mg L de plasma. Los niveles de deficiencia considerados para forraje, suero y ceniza de hueso son de 0.25 y 6 mg/100 ml, y 17.6 % respectivamente (Minson 1990).

Los requerimientos de P en términos de la composición del forraje pueden ser calculados dependiendo de la cantidad del P requerido en la dieta para las diferentes formas y niveles de producción (ARC, 1980). Dietas con altos niveles de calcio incrementan los requerimientos de P. Niveles excesivos de Fe, Cu, I y Mg en la dieta disminuyen la absorción de P (Giorgievskii, 1982).

McDowell y Arthington (2005) mencionan que la deficiencia mineral más común en el mundo es la de P, en los bovinos se caracteriza por la disminución del contenido mineral en los huesos, provoca pérdida de resistencia con fracturas espontáneas, aumento en el volumen de las articulaciones, principalmente en extremidades anteriores, cojera y dificultad para caminar, deficiencia severas se manifiestan con raquitismo y osteomalacia (Vrzgula, 1990), en el ganado se observa anorexia, crecimiento lento, baja conversión alimenticia, baja producción láctea, pérdida de peso, osteofagia, hemoglobinuria puerperal, alteraciones del metabolismo energético, fragilidad eritrocitaria (NRC, 2001; Forchetti *et al.*, 2006), los parámetros reproductivos se ven alterados teniendo anestros prolongados, repetición de celos, reabsorción embrionaria y bajas tasas de concepción (Garmendia, 2007)

El exceso de P en la dieta puede causar resorción ósea, niveles altos de P en plasma y cálculos urinarios. El nivel máximo tolerable de P en la dieta para rumiantes es de 1 % de la

MS de la dieta (NRC, 2001). La alimentación excesiva de P por un largo periodo puede causar problemas en el metabolismo del calcio, induciendo una excesiva resorción ósea y cálculos renales (NRC, 1980).

2.5.1.3. Magnesio (Mg)

Aproximadamente 70% del Mg presente en el cuerpo se encuentra en los huesos (McDowell y Arthington, 2005), el 30% restante se encuentra distribuido en tejidos blandos, es uno de los cationes más abundantes a nivel intracelular, después del potasio (NRC, 2005). El Mg interviene con el Ca y el P en la formación de huesos y dientes, y es de gran importancia en la catalización de 300 enzimas implicadas en la transferencia y utilización de la energía (Minson, 1990), es requerido para el buen funcionamiento del corazón, forma parte del líquido cefalorraquídeo e influye en la transmisión de impulsos nerviosos (NRC, 2005), es necesario para la fosforilación oxidativa de las mitocondrias, principalmente del músculo cardíaco (Church, 1992).

La absorción de Mg en animales pre rumiantes es en el intestino delgado, para el caso de los rumiantes la absorción tiene lugar principalmente en el rumen y el omaso (Kincaid, 1993). Las condiciones del rumen como el pH alto, pueden afectar su absorción y su requerimiento (McDowell *et al.*, 1993). La absorción de magnesio suele afectarse por altos niveles de K, N, Na, Al, Ca, P, exceso de grasa y proteína, disponibilidad de carbohidratos, ácidos orgánicos, ionoforos, vitamina D₃ y estado de madurez del forraje (Underwood, 1981; Minson, 1990). La concentración normal de Mg en plasma varía entre 1.8 y 2.4 mg dL⁻¹, el mantenimiento normal de este nivel es totalmente dependiente de la absorción de Mg en la dieta (NRC, 2001) y solo disminuye en casos severos de deficiencia (McDowell *et al.*, 1993).

Los requerimientos de Mg varían de acuerdo a la absorción del mineral en el tracto digestivo, la disponibilidad biológica y con los requerimientos absolutos del animal (Minson, 1990; Underwood y Suttle, 1999; McDowell *et al.*, 1993). El requerimiento de Mg para vacas en producción media es de 0.25% y para vacas de producción alta de 0.25 a 0.30% de la dieta (NRC, 2001).

Los animales que presentan deficiencia de Mg presentan hiperirritabilidad, tetania, vasodilatación periférica, falta de apetito, incoordinación, espasmos musculares, salivación excesiva, descenso de la presión sanguínea y temperatura corporal, pudiendo seguir por un estado de coma y muerte (Underwood y Suttle, 1999; Kramer *et al.*, 2003). La tetania de los pastos puede originarse en vacas lactantes cuando ingieren forrajes tiernos, esta anomalía se

explica porque los forrajes jóvenes contienen altas cantidades de K, el cual interviene en la absorción del Mg (Blood y Radostits, 1992), la deficiencia de Mg puede corregirse con la suplementación del mineral al ganado o aplicando fertilizaciones con Na y Mg a las praderas y evitando fertilizaciones excesivas de N y K (Minson, 1990).

Es difícil la intoxicación por exceso de Mg en rumiantes, probablemente por la capacidad que tiene el riñón para excretar el exceso de este mineral como respuesta a los niveles elevados en suero sanguíneo (Church, 1992), el nivel máximo tolerable de Mg es de 0.4% de la MS (NRC, 2001). La mayoría de las manifestaciones clínicas por exceso de Mg se asocian con problemas de tipo nervioso, esto se debe al efecto tóxico de este elemento, los animales presentan alteración generalizada de la transmisión neuromuscular, en casos extremos se produce hipotensión, depresión respiratoria y anestesia profunda (Chester-Jones *et al.*, 1989).

2.5.1.4. Potasio (K)

El potasio es el tercer mineral más abundante en el organismo, representa alrededor del 0.5 a 0.8% del peso corporal del bovino adulto (McDonald, 1988), es el principal catión intracelular, pues mantiene el equilibrio ácido-básico, la presión osmótica y el balance hídrico (Linsner, 1981). Otras funciones del K se encuentran el metabolismo de los carbohidratos, síntesis de proteína y mantenimiento de los tejidos del corazón y riñones, conducción de los impulsos nerviosos, contracción muscular, transporte de oxígeno y bióxido de carbono, ayuda a mantener un medio adecuado para la microflora del rumen, siendo el principal elemento para los microorganismos celulolíticos (ARC, 1980; Giorgievskii, 1982; McDonald *et al.*, 1988; McDowell y Arthington, 2005).

El K se absorbe principalmente en duodeno por difusión simple (NRC, 2001), aunque una cantidad considerable es absorbida en rumen (Underwood y Suttle, 1999), el K en los vegetales se encuentra distribuido en formas altamente solubles y digestibles para el organismo (NRC, 1980; McDowell, 1985; Church y Pond, 1987), se absorbe por transporte activo y difusión pasiva en un 90% (ARC, 1980). La principal vía de excreción del potasio sobrante en el organismo, es la orina (95%), este proceso es regulado por la aldosterona, este mecanismo favorece la absorción de Na y la excreción de K (NRC, 2005); también es eliminado por heces, leche y piel, por esta última vía varía de acuerdo a la temperatura ambiente en la que se encuentre el animal (ARC, 1980), además la eliminación de este elemento se ve incrementada en presencia de estrés y diarrea (Puls, 1994).

Los requerimientos de K están determinadas principalmente por la pérdidas urinarias y fecales, además varían entre especies, raza, estado fisiológico y el clima (ARC, 1980), se estima que los requerimientos de K para rumiantes oscila entre el 0.5 y el 1 % (McDowell *et al.*, 1993)

La deficiencia de potasio es poco frecuente, se caracteriza por retraso en el crecimiento, marcha insegura, debilidad muscular, diarrea, pérdida de peso, y en casos graves provoca la muerte del animal (Linsner, 1981); los factores que predisponen a las deficiencias de K son el consumo de forrajes maduros o de calidad baja, dietas altas en granos, cantidades de nitrógeno no proteico en la dieta, en condiciones de estrés y fatiga fisiológica (McDowell y Arthington, 2005). Por el contrario, el exceso de potasio provoca un desequilibrio en el balance ácido-base (Neathery *et al.*, 1979), puede ocasionar urolitiasis, disminución en el nivel de Mg en el organismo, disminución en los parámetros reproductivos y de la ganancia diaria de peso; el nivel máximo tolerado de K en la dieta para rumiantes es de 3% de la MS (ARC, 1980; NRC, 1980)

2.5.1.5. Sodio (Na)

El sodio es el principal catión monovalente extracelular (Suttle, 2010), mantiene la presión osmótica, el equilibrio ácido-básico y el metabolismo del agua; además interviene en el mecanismo de contracción muscular y en la transmisión del impulso nervioso, forma parte del jugo pancreático y bilis (McDowell y Arthington, 2005; Miller, 1979); participa en la absorción de azúcares y aminoácidos (McDonald, 1993), es un elemento de alta proporción en el sangre (Suttle, 2010); es requerido para el crecimiento de las bacterias ruminales (Underwood y Suttle, 1999).

La absorción de Na ocurre en el tubo digestivo y generalmente es 100% disponible; la absorción ocurre por transporte activo en retículo, abomaso, omaso y duodeno, mientras la absorción pasiva ocurre por medio de la pared intestinal (NRC, 2001). Cuando su ingestión es baja, se activa la producción de aldosterona en la corteza adrenal, esta evita la pérdida de Na en la orina y heces; pero el nivel de concentración de Na en la leche es constante, esta falta de habilidad de los animales de reducir la concentración de Na en la leche los hace más susceptibles a sufrir deficiencias durante la lactancia (Minson, 1990). El requerimiento de Na para bovinos lecheros en etapa productiva es de 0.18% de la MS (NRC, 2001), mientras que para vacas secas es de 0.10% de Na de la MS total.

El primer signo de deficiencia de Na es un estado de pica (apetencia desmedida por la sal) se detecta porque el animal lame vorazmente la lana, suelo, orina, o sudor de otros animales (Underwood y Suttle, 1999); cuando la deficiencia es prolongada produce pérdida de apetito, mala apariencia, pérdida de peso, disminución en el crecimiento (McDowell y Arthington, 2005), disminuye la producción de leche, acompañado con cierta reducción de grasa en la leche (Underwood, 1983), en casos graves se observa incoordinación, temblor corporal, debilidad y pérdida del ritmo cardiaco, lo cual puede conducir a la muerte del animal (McDowell y Arthington, 2005). Por el contrario, la mayoría de los animales pueden tolerar grandes cantidades de Na en la dieta, siempre y cuando se disponga de suficiente agua (McDowell y Arthington, 2005); un consumo excesivo puede dar lugar a edemas (Underwood y Suttle, 1999), problemas metabólicos como diarreas, vomito, anorexia, pérdida de peso (NRC, 2001; Puls, 1994); de la misma manera puede dañar los glomérulos renales dada la degeneración vascular y aumenta el volumen del líquido extracelular, generando hipertensión, que a su vez provoca una falla cardiaca congestiva (Church y Pond, 1987).

2.5.2. Microminerales

2.5.2.1. Cobre (Cu)

Seguido del fósforo la deficiencia de Cu es la limitante más importante para los animales en pastoreo, en la mayoría de las regiones tropicales (McDowell y Arthington, 2005), es un componente esencial de varias metaloenzimas entre las cuales destacan: ceruloplasmina, citocromo oxidasa, lisil oxidasa y tirosinasa; favorece la formación de hemoglobina, la maduración del eritrocito, la absorción del Fe, la oxidación y la unión con el Fe para el transporte de proteínas, es esencial en la formación de tejido conectivo (Minson, 1990), contribuye en la formación de colágeno y elastina del hueso, en la producción de melanina, es indispensable para la integridad del sistema nervioso central, para la respiración celular y la síntesis de prostaglandinas (Church *et al.*, 2006).

La absorción de Cu en la mayoría de las especies tiene lugar en duodeno y yeyuno, su retención depende de la presencia de otros minerales en la dieta como el Mo, S, Fe y Zn los cuales participan como antagonistas de éste; altos contenidos de Mo y S en alimento forman tiomolibdatos, los cuales tienen alta afinidad por el Cu haciéndolo indisponible para su absorción (Gooneratne *et al.*, 1994).

La cantidad de Cu en la dieta requerido para satisfacer las necesidades en lactación, varía con la edad del animal, forma química del Cu en la dieta y la presencia de sustancias que interfieran en su absorción (NRC, 2001). El requerimiento de Cu en bovinos debe de establecerse considerando el contenido de Mo y de S en la dieta; 4 ppm pueden cubrir los requerimientos pero 10 ppm es un requerimiento más práctico en ganado lechero, cuando el pasto contiene niveles altos de Mo, Ca y Fe pueden requerirse niveles mayores de Cu (NRC, 2001).

La deficiencia de Cu en el animal depende de factores como la edad, sexo, severidad y duración de la deficiencia del mineral (Miller, 1989). La deficiencia de Cu en rumiantes puede ocurrir como una deficiencia primaria en la cual el consumo de Cu es inadecuado, o como una deficiencia secundaria donde distintos factores de la dieta interfieren con la absorción y el metabolismo del Cu (Gengelbach *et al.*, 1994); la deficiencia se manifiesta en el animal con anemia, reducción del crecimiento, pérdida de peso, y disminución en la producción láctea, pelo áspero y descolorido, fragilidad de los huesos, rigidez de las articulaciones y cojeras (Underwood, 1981). En bovinos adultos se observa retraso en la presentación del celo, disminución en la reproducción y retención placentaria, disminución en la pigmentación del pelo que se encuentra alrededor de los ojos, este es un signo específico de la deficiencia de Cu (NRC, 1996; 2001). En relación con el sistema inmunológico, la deficiencia de Cu afecta las células T y B, los neutrófilos y los macrófagos, por lo tanto, reduce la cantidad de células que producen anticuerpos (McDowell *et al.*, 1993).

El ganado bovino adulto es muy tolerante al exceso de Cu, en comparación con los animales en crecimiento (Minson, 1990); la toxicidad crónica por Cu bajo condiciones de pastoreo ocurre como resultado de un consumo elevado de Cu o de un consumo muy deficiente de Mo y S (McDowell *et al.*, 1993). Los rumiantes tienen la capacidad de almacenar Cu en el hígado durante épocas donde el consumo sea excesivo, antes de que se muestren signos de intoxicación, y usan estas reservas en épocas de escases (NRC, 2001; McDowell *et al.*, 1993). Los signos de intoxicación por Cu incluyen salivación excesiva, vómitos, convulsiones, parálisis, colapso y muerte (NRC, 1980; Alloway, 1986)

2.5.2.2. Hierro (Fe)

El Hierro es un componente esencial de la hemoglobina y mioglobina, necesarias para el transporte de oxígeno (Puls, 1988), del 60 al 70% del Fe corporal se encuentra en la hemoglobina de los eritrocitos y en la mioglobina del músculo; el 20 % se almacena en el

hígado, bazo y otros tejidos en formas lábiles, donde se encuentra disponible para la formación de hemoglobina, el Fe restante se fija en los tejidos como un componente de miosina y actomiocina muscular (Church, 2006; Suttle, 2010). Las principales funciones del Fe en el animal son el transporte de oxígeno a las células y la respiración celular, transporte de electrones, metabolismo de energía, antioxidante, sensor de oxígeno, síntesis de ADN (NRC, 2001; Suttle, 2010)

La absorción del hierro tiene lugar en todo el sistema digestivo, pero el principal sitio de absorción es el duodeno y yeyuno; la eliminación es por medio de las heces, orina, sudor y cuando los animales sufren hemorragias (McDowell y Arthington, 2005); el Fe se transporta en forma de hierro férrico, unido a la transferrina, almacenándose en hígado, bazo y médula ósea principalmente en forma de ferritina o hemosiderina (Underwood y Suttle, 1999; NRC, 2005).

De acuerdo a lo descrito por McDowell *et al.* (1997), los rumiantes jóvenes son más susceptibles a la deficiencia de Fe dado que la leche tiene niveles bajos de este mineral (< 1 mg/L), los animales adultos necesitan poco Fe en la ración ya que cuentan con buenas reservas del mineral, al menos que haya presencia de hemorragias o estados patológicos (Suttle, 2010)

Los requerimientos de Fe se estima de acuerdo a la edad, velocidad de crecimiento, y la disponibilidad del mineral en la dieta (NRC, 1996), la recomendación actual para vacas lecheras de 50 ppm (NRC, 2001), los niveles máximos de Fe en la dieta es de 1000 ppm para ganado vacuno.

Las deficiencias del Fe en animales en pastoreo es poco común ya que es bien suministrado por los forrajes, pero la deficiencia puede resultar tras pérdidas sanguíneas, infestaciones parasitarias severas o algunas tras causas de hemorragias (Miller, 1979; McDowell, 1985); puede sospecharse de deficiencia de Fe cuando los niveles séricos sean inferiores a 1.1 mg/L y los de hemoglobina sean inferiores a 1 mg/dL (McDowell, 1985); dentro de los signos de deficiencia de hierro podemos citar anemia hipocromía, y microcítica, crecimiento lento, palidez de las mucosas, incremento del ritmo respiratorio y circulatorio, anorexia, atrofia de la papilas linguales, cansancio, disminución en la resistencia a infecciones y en casos severos puede culminar en la muerte (Miller, 1979; NRC, 2005; McDowell y Arthington, 2005).

Por otro lado, la intoxicación por Fe causa diarrea y acidosis metabólica, retraso en el crecimiento (Minson, 1990; McDowell y Arthington, 2005), congestión vascular e irritación intestinal (Suttle, 2010); dietas con altos contenidos de Fe disminuyen la absorción de P, Cu, Zn, Se, Mn, Co y Pb, y viceversa, ya que compiten por los sitios de absorción.

2.5.2.3. Zinc (Zn)

El zinc es un elemento indispensable para el crecimiento y salud de los animales (Dana *et al.*, 2002), es componente estructural del ADN, ARN y los ribosomas, forma parte del sistema inmunológico, interviene en el balance electrolítico, es activador de diversos sistemas enzimáticos (Underwood y Suttle, 1999), es importante en el desarrollo del aparato reproductor en los machos (McDowell y Arthington, 2005).

El Zn se absorbe de acuerdo a las necesidades del animal, el principal sitio de absorción es el duodeno; el coeficiente de absorción en ganado bovinos es de 0.75 (Underwood y Suttle, 1999), la excreción principal del Zn es a través de las heces fecales (NRC, 1996), el grado de absorción del Zn es afectado por la cantidad en la dieta, cantidad y proporciones de otros elementos (P, Cd, Cu, Ca, Fe y Mo) en la dieta (Minson, 1990) y por la forma química que se ingiere el mineral, por lo tanto la absorción del Zn se incrementa con la disminución de éste en la dieta y viceversa (Miller, 1979a; Underwood, 1981).

Los requerimientos recomendados de Zn son menores a 30 o 40 ppm de la MS (NRC, 1980; 1986); la lactación demanda una mayor cantidad de Zn, a pesar del bajo contenido de este en la leche (Miller, 1979b). El nivel máximo tolerable de Zn ha sido establecido en 500 ppm para bovinos (McDowell, 1985). El consumo deficiente de Zn afecta la velocidad de crecimiento, retarda la cicatrización de las heridas, reduce la habilidad para movilizar reservas hepáticas de vitamina A (Suttle, 2010). Las vacas que son alimentadas con forrajes con contenido bajo de Zn presentan bajo crecimiento, fertilidad disminuida, paraqueratosis, inflamación de la nariz y boca, endurecimiento de las articulaciones, pérdida y aspereza en el pelo y niveles bajos de Zn en plasma (McDowell, 1983; Underwood, 198; NRC, 1984).

Se presenta intoxicación por Zn cuando las cantidades en la dieta exceden los 2000 a 3000 ppm en la dieta, la intoxicación por Zn reduce la ganancia de peso y la eficiencia alimenticia, también disminuye el consumo de alimento (Underwood y Suttle, 1999), es característico el dolor abdominal, la anemia, pobre mineralización del hueso, daño pancreático, artritis, enfermedad del musculo blanco, hemorragias internas, muerte de

animales recién nacidos (NRC, 2001; 2005). La magnitud de tolerancia del Zn depende principalmente de los contenidos relativos de Ca, Cu, Fe y Cd con los cuales éste mineral interactúa en los procesos de absorción y utilización (McDowell *et al.*, 1993).

2.5.2.4. Selenio (Se)

El selenio es un elemento esencial para el animal, interviene en funciones corporales tales como el crecimiento, la reproducción, la respuesta inmune, la protección de la integridad de los tejidos (McDowell *et al.*, 1993), el *Se* es componente estructural de la enzima glutatión-peroxidasa, la cual tiene como función proteger las células del daño peroxidativo, catalizando la reducción del peróxido de hidrogeno y de los hidroxiperóxidos formados a partir de ácidos grasos y otras sustancias (MacDowell *et al.*, 1988)

Existe una estrecha relación con la vitamina E, en cuanto a los efectos antioxidantes, consiste en que la vitamina E es un antioxidante específico de lípidos solubles en las membranas celulares y el *Se*, como componente de la GSH-Px, funciona destruyendo los peróxidos antes de que estos ataquen la membrana celular (McDowell *et al.*, 1993). La absorción del *Se* se da principalmente en duodeno (NRC, 1996). El *Se* suplementado en la dieta se absorbe en un 40%, pero su grado de asimilación varía con la forma del elemento, la cantidad ingerida y el contenido de Ca, As, Co y S en la dieta (NRC, 2001).

El nivel de *Se* en suero sanguíneo en vacas suplementadas va de 0.15 a 0.23 ppm (NRC, 2001). Los requerimientos de *Se* para rumiantes no ha sido bien definido, pero se estima que para rumiantes es de aproximadamente de 0.1 a 0.3 ppm de la materia seca de la dieta (NRC, 1989), esto depende de la forma química del elemento que ingresa al organismo, de los niveles de *Se* en el animal y de los diferentes factores que afectan la biodisponibilidad y absorción, los cuales se encuentran en la dieta, como la vitamina E, ácidos grasos, aminoácidos, S, Co, As y Cd (NRC, 1989).

La deficiencia de *Se* puede dar lugar la miodegeneración (enfermedad del musculo blanco), especialmente en corderos y becerros. En general se asocia con un menor crecimiento tanto en machos como en hembras, y menor resistencia a las enfermedades. El exceso de *Se* puede producir anemia, salivación excesiva, necrosis de las pezuñas e incluso la muerte (Minson, 1990).

2.5.2.5. Cobalto (Co)

El cobalto es un mineral importante para que los microorganismos del rumen puedan realizar la síntesis de vitamina B12, esta vitamina contiene aproximadamente 4.5% de Co, los requerimientos de vitamina B12 en rumiantes son altos ya que los microorganismos del rumen son poco eficientes en la producción de vitamina B12 a partir de Co y a la baja absorción de la vitamina B12 en el tubo digestivo (McDowell y Arthington, 2005; NRC, 2005).

La deficiencia de Co es común en rumiantes en pastoreo, está bien difundida en los países del trópico (McDowell y Arthington, 2005). Conforme progresa la deficiencia de Co van disminuyendo las concentraciones de Co y vitamina B12 en el líquido ruminal (Underwood y Suttle, 1999); en deficiencia moderada solo se afectan los animales jóvenes, en deficiencia grave se observa un agotamiento interno o indiferencia, difícil de distinguir de la que muestra un animal extenuado por el hambre, con excepción de que las mucosas se encuentran pálidas y la piel suele presentarse pálida y frágil (Suttle, 2010). El consumo de suelo sugiere que en ocasiones puede aliviar las deficiencias de cobalto (Underwood y Suttle, 1999).

2.6. Fuente de minerales para el animal

Los minerales se caracterizan porque no pueden ser sintetizados por el animal a partir de otras sustancias como es el caso de algunas vitaminas, aminoácidos y otros compuestos orgánicos, de tal manera que los minerales que requiere el ganado deben de ser tomados del ambiente (Underwood, 1981; McDowell, 1985). El ganado normalmente obtiene los minerales necesarios del suelo, del agua y de la ración de alimento que se le suministra diariamente.

2.6.1. Suelo

La composición mineral del suelo varía de acuerdo a la naturaleza de la roca, los cambios producidos durante la meteorización, acumulación de materia orgánica y prácticas de manejo (Rucks *et al.*, 2004), los minerales siguen un ciclo, un contenido anormal de determinado mineral en el suelo tiende a producir plantas con contenido anormal en dicho mineral, lo cual provoca un desequilibrio en el animal que consume estas plantas (Underwood y Suttle, 1999; Hampton *et al.*, 1999).

La productividad de los suelos no es constante y tiende a fluctuar de acuerdo a la época del año, las condiciones climáticas secas y lluviosas favorecen la deficiencia de minerales, la primera porque genera un detrimento en la solubilidad de los minerales y disminuyen su disposición en los sistemas radiculares (Kawas y Houston, 1990), la segunda por solubilización y lixiviación de minerales alejándolos del perímetro de absorción radicular (Velasco, 1992).

El consumo de suelo por los rumiantes se ve favorecido por deficiencias nutricionales de energía, proteína y minerales, por un mal drenaje en el terreno, alta carga animal, parasitosis gastroentérica y el hábito de pastoreo (McDowell, 1985).

El consumo directo de grandes cantidades de suelo muchas veces es indicativo de deficiencias de minerales, McDowell *et al.*, (2005) mencionan que rumiantes en pastoreo pueden consumir hasta el 20% de la materia seca ingerida de tierra. La ingestión de suelo directa o indirecta puede resultar en consumos elevados de Co y I ya que, los suelos contienen mayor concentración que las plantas (McDowell *et al.*, 2005), la ingestión indirecta sucede cuando la presión de pastoreo es alta o cuando hay escasez de forraje (Huerta, 1997).

Los posibles efectos positivos de la ingestión de suelos incluyen el abastecimiento de elementos esenciales, la mejor utilización de la energía e incremento de la disponibilidad de ciertos minerales (McDowell, 1985). Dentro de los efectos negativos del consumo excesivo de suelo se menciona el desgaste de los dientes y del epitelio del tracto digestivo, disminución de la absorción de ciertos elementos de la dieta y servir como vehículo de minerales indeseables y metales pesados (McDowell, 1985).

2.6.2. Agua

A pesar de que el agua normalmente no es una fuente importante de minerales, todos los elementos esenciales están en ella hasta cierto nivel (McDowell *et al.*, 1993). La ingestión de agua no se considera una fuente importante de minerales, aunque existen excepciones como las aguas duras, las cuales suministran grandes cantidades de Ca, Mg, S, Cl y Na (Shirley, 1978; Underwood y Suttle, 1999; Whitehead, 2000); la concentración total de sales en agua menor a 1000 mg/L se considera aceptable para animales de granja, pero cantidades entre 1000 y 3000 mg/L causan diarreas temporales (McDowell, 1992).

Cuantificar los minerales que aporta el agua de bebida a los animales resulta difícil (Suttle, 2010) debido a que la ingesta depende del tamaño del animal, temperatura ambiente, del

estado fisiológico y estado de salud (NRC, 2005). Shirley (1985) calculó que el agua de bebida puede cubrir el 19% de NaCl que requieren las vacas lecheras, del 5 al 8% de Ca, del 4 al 11% de Mg, del 20 al 45% de S, 1% de P, K y Se, 2% del Zn y Cu, 12% del Co y 6% del Mn.

2.6.3. Alimento

La principal fuente de minerales para los rumiantes se encuentra en los alimentos que consumen, generalmente dependen de los forrajes para cubrir sus requerimientos (McDowell *et al.*, 1985). La concentración mineral de plantas forrajeras y cereales es afectada por el género, especie, y variedad de la planta, el tipo de suelo en cual se cultiva, clima, estación del año, estado de madurez de la planta y el manejo que se le dé al forraje (McDowell, 1985; Underwood y Mertz, 1987).

Las leguminosas han sido reconocidas como fuente excelente de forraje y como mejoradoras del suelo debido a su habilidad para fijar nitrógeno del aire, además de tener un contenido mayor de Ca, Mg, P (Bernal, 1994), K, S, Fe, Cu, Zn, Co y N (Huerta, 1997) en comparación con las gramíneas.

El contenido de minerales generalmente es mayor en las hojas que en los tallos (Bernal, 1994) principalmente el Ca, por el contrario, la concentración de K es mayor en tallos que en hojas (Whitehead, 2000), además se ha observado que la concentración de N, P, S (Whitehead, 2000), K, Mg, Na, Cl, Co, Fe, Se, Zn y Mn disminuye en forma proporcional con la maduración de la planta (Underwood, 1981; Underwood y Suttle, 1999; Suttle, 2010).

2.7. Factores que afectan el consumo de nutrientes

La cantidad de comida ingerida por un animal está determinada por un gran número de factores; los factores que influyen en la ingesta de los animales pueden agruparse en diferentes clases: factores que actúan a nivel del tracto digestivo, factores de naturaleza social o fisiológicos, aquellos que incluyen características del entorno del animal y factores relacionados con la fisiología de los animales (Gordon, 2008). La figura 2, resume de forma esquemática los factores involucrados en el consumo de alimento por los animales.

Los factores que reducen la ingesta de forrajes, por ejemplo el bajo nivel de proteína o el alto contenido de lignina, también reducen el consumo total de minerales (McDowell *et al.*,

1984). Los minerales que son reportados con mayor frecuencia como deficientes en los forrajes son: P, Na, Ca, Cu, Se Zn (McDowell *et al.*, 1985).

La Figura 3 muestra como la alimentación y las características ambientales pueden influir en el consumo de alimento englobado en el contexto de la producción animal.

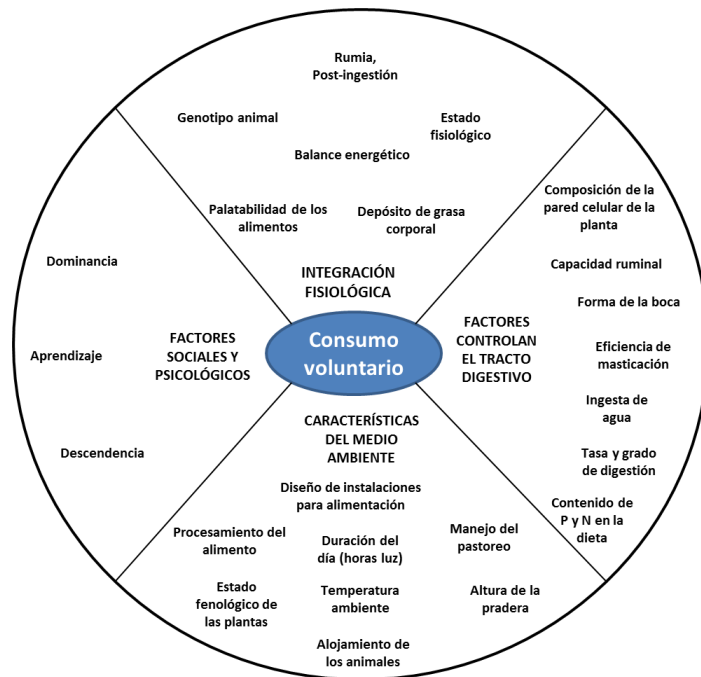


Figura 2. Factores que influyen en el consumo de alimento por los animales.

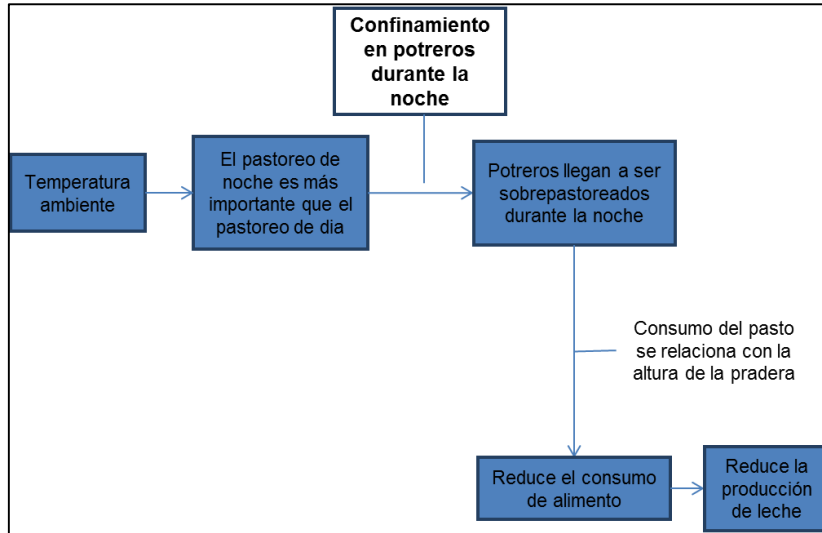


Figura 3. Eventos de manejo en el ganado lechero que limitan el consumo de alimento y en consecuencia la producción de leche.

III. JUSTIFICACIÓN

Numerosas investigaciones han sido enfocadas hacia el estudio de diagnósticos sobre el estado mineral de los recursos suelo-agua-planta-animal en las explotaciones pecuarias, en muchos casos, dichos recursos son analizados de forma integral, con el fin de conocer e identificar posibles desbalances de macro y micro elementos los cuales podrían influir en el desempeño productivo y reproductivo de los animales, así como en su estado sanitario.

Sin embargo, en varios estudios han descrito desbalances en los distintos recursos (suelo-agua-planta-animal) asumiendo que tales desbalances podrían afectar finalmente la respuesta productiva del animal pero sin necesariamente medir tal efecto sobre alguna variable productiva, es decir, se asume que la existencia de desbalances de minerales influyen en la producción animal, no obstante muchos de estos estudios no han evaluado tal conclusión.

Si bien la identificación de los desbalances minerales, en primera instancia promueve la ubicación de zonas geográficas con determinadas deficiencias o excesos de minerales, esto permitiría, a través de distintas formas o estrategias, la corrección de dichos desbalances con el fin de preservar la salud y mantener o mejorar la productividad del ganado, lo cual debe ser evaluado. Ahora bien, es necesario aportar evidencias de que posibles desbalances minerales en el animal y en los alimentos que consume, tienen efecto en su desempeño productivo.

IV. HIPÓTESIS

La estrategia de alimentación basada en el tiempo de permanencia en la pradera tiene influencia sobre el estado mineral de los bovinos lecheros en pastoreo afectando la respuesta productiva: consumo de alimento y producción de leche.

V. OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar la concentración de Ca, P, Mg, K, Na, Cu, Fe y Zn en alimentos y suero sanguíneo y analizar su relación con parámetros productivos de vacas lecheras con distinto momento de pastoreo.

Objetivos específicos

1. Estimar el contenido de Ca, P, Mg, K, Na, Cu, Fe y Zn en alimentos y suero sanguíneo de vacas con diferentes momentos de pastoreo.
2. Correlacionar el consumo de alimento y el consumo de minerales con las concentraciones de minerales en suero sanguíneo de vacas con diferentes momentos de pastoreo.
3. Determinar la relación de la concentración de minerales en suero sanguíneo de vacas con diferentes momentos de pastoreo con el rendimiento y composición química en leche.

VI. LÍMITE DE ESPACIO

El trabajo de campo se realizó en la posta zootécnica de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia; el análisis de minerales fue evaluado en el departamento de nutrición animal de la misma Facultad y en el laboratorio de edafología de la Facultad de Ciencias, ambos organismos ubicados en el campus universitario “El Cerrillo” de la Universidad Autónoma del Estado de México, localizado a 19° 24’ 48’’ latitud norte y 99° 40’ 45’’ longitud oeste, a una altitud de 2632 metros; el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, las temperaturas medias para los meses de abril, mayo y junio fueron 14.8, 16.8 y 16.3°C, con precipitación pluvial de 9.0, 20.1 y 130.1 mm respectivamente (INEGI, 2013; SMN, 2012)

VII. LÍMITE DE TIEMPO

El trabajo de campo se realizó en los meses de abril, mayo y junio de 2012, en la posta zootécnica de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia; el análisis de minerales en laboratorio, la elaboración de bases de datos y su procesamiento estadístico comprendió una duración de doce meses.

VIII. MATERIAL Y MÉTODO

8.1. Animales, dieta y tratamientos

Se utilizaron seis vacas multíparas Holstein en producción. Las vacas se agruparon en un diseño cuadro latino 3x3 repetido, con tres periodos experimentales de 15 días. Los animales fueron manejados de acuerdo con las normas de salud y bienestar de la institución.

La alimentación se realizó a base de pastoreo y, la suplementación de concentrado y ensilado de maíz ad libitum durante la estabulación. El sistema de pastoreo fue rotacional, en praderas polífitas predominando especies de gramíneas principalmente *Lolium perenne*, *Festuca arundinacea* y *Dactylis glomerata*, y *Trifolium repens* como leguminosa. Se ofertaron 22 kg MS/vaca/día. Se suplementaron diariamente con 5.0 kg en base húmeda (BH)/vaca de un concentrado con 20.0% de PC repartido en dos comidas. El concentrado estuvo compuesto de (g/100g MS) sorgo molido (48.7), pasta de soya (20.0), canola (14.8), salvado de trigo (14.7) y premezcla de vitaminas y minerales (1.8). En las praderas como en la estabulación los animales tuvieron libre acceso al agua de bebida.

Los tratamientos evaluados fueron el tiempo de permanencia del ganado lechero en la pradera: (8, 12 y 8 horas fraccionadas en dos tiempos de 4 horas):

- ❖ **Tratamiento 1.** Ocho horas de pastoreo, de 07:00 a 15:00h (**8h**)
- ❖ **Tratamiento 2.** Ocho horas de pastoreo fraccionadas en dos momentos, 4 h de pastoreo en la mañana (de 07:00 a 11:00h) y 4 h de pastoreo en la tarde (de 16:00 a 20:00h) (**4+4h**)
- ❖ **Tratamiento 3.** Doce horas de pastoreo de 07:00 a 15:00h y de 16:00 a 20:00h (**12h**)

8.2. Desarrollo experimental

El estudio comprendió tres periodos experimentales de 15 días cada uno (10 días de adaptación y 5 días de medición). Se realizaron diariamente dos ordeños, a las 06:00 h y 15:00 h. Al inicio y final de la etapa de medición de cada periodo los animales se pesaron.

Un día antes de iniciar la etapa de medición en cada periodo, se midió la producción de biomasa en la pradera, para ajustar el tamaño de parcela en función de la asignación de pasto (kg de MS por vaca y día). La biomasa forrajera se determinó colectando el forraje contenido en 1m² para lo cual se utilizó un cuadrante de 0.25 m², el cual fue arrojado (en forma de zig-zag) en cuatro ocasiones aleatoriamente en la pradera cortando a ras de suelo el forraje presente dentro del cuadrante, posteriormente fue pesado el pasto colectado. Al final de la recolección, las muestras se llevaron al laboratorio para determinar la MS en una estufa de aire forzado a 60°C por 24 h.

Finalizado el ordeño de la mañana, los tres grupos de animales salieron a la pradera a las 07:00 h. El grupo correspondiente a el tratamiento **4+4h** permaneció en la pradera hasta las 11:00 h después fueron trasladadas al establo donde se les suministro ensilado de maíz *ad libitum* y 2.5 kg de concentrado en BH, este grupo permaneció en estabulación hasta el ordeño de la tarde y al término de éste nuevamente fueron trasladadas a las praderas donde permanecieron de 16:00 a 20:00 h, posteriormente fueron llevadas al corral donde se les ofertó ensilado de maíz y 2.5 kg de concentrado en BH.

Los animales en los tratamientos con **8h** y **12h** de pastoreo, permanecieron en la pradera en el intervalo entre ordeños. El grupo de animales en **8h**, terminado el ordeño PM fueron trasladados al establo donde permanecieron el resto del día. En el corral se les proporcionó ensilado de maíz *ad libitum* y 5.0 kg de concentrado dividido en dos comidas de 2.5 kg. La oferta de alimento se realizó al término del ordeño y cada cuatro horas (16:00, 20:00 y 24:00h), en las dos primeras comidas se ofertó el concentrado.

El grupo de animales con el tratamiento **12h**, al término del ordeño de la tarde, fueron trasladados a la pradera cuatro horas más de pastoreo, hasta las 20:00 h, después fueron alojadas en el corral, ahí se les proporcionó, a las 20:00 y 24:00 h, ensilado de maíz *ad libitum* y 2.5 kg de concentrado en cada comida. El suministro de ensilado de maíz y concentrado en estabulación se realizó en comederos individuales, cuya duración de acceso aproximada fue de 90 minutos, transcurrido este tiempo se restringió el alimento dejando a los animales con libertad de desplazamiento en el establo y con disponibilidad al agua de bebida.

Al inicio y al final de cada etapa de medición se tomaron muestra de sangre (14 mL aproximadamente) de la vena coccígea, se dejaron reposar los tubos por 10 h para separar el paquete globular, una vez pasado este tiempo, el suero fue conservado en tubos eppendorf a temperatura de congelación (-4°C) hasta su análisis. Además, durante esta etapa se midió

diariamente el consumo de ensilado de maíz y de concentrado, aunado a esto se registró individualmente la producción de leche.

El ensilado de maíz (aproximadamente 200 g MF) fue muestreado diariamente en los cinco días de medición, mientras que el muestreo de concentrado se realizó una sola vez por periodo experimental. El pasto se muestreo utilizando la técnica de pastoreo simulado (hand plucking; Wayne, 1964). Las muestras de alimento fueron conservadas en refrigeración (4°C).

Las muestras de leche fueron recolectadas al momento del ordeño, se tomó una muestra por vaca en cada ordeño, con previa homogenización del depósito individual, al final fue preparada una alícuota de 50 mL la cual fue utilizada para conocer su composición química con un analizador de leche Lactoscan (Milkotronic, LTD), posteriormente se conservaron las muestras en congelación.

El consumo de ensilado de maíz y alimento balanceado se calculó por diferencia entre la oferta y rechazo. El consumo de forraje en pastoreo fue estimado mediante el método descrito por Macoon *et al.*, (2003), a partir de los requerimientos de energía neta mediante el cálculo de los requerimientos de energía neta total del ganado lechero (ENL) estimados a partir de la aplicación de las ecuaciones de predicción del NRC (2001), y de los aportes de energía neta de los alimentos consumidos en estabulación. Para dicha estimación se aplicó el procedimiento de ecuaciones de los requerimientos de energía neta total del ganado lechero incluyendo las necesidades de energía neta para:

- 1) Lactación (NEL), calculo basado en la producción diaria de leche (kg/d) y la concentración de grasa en la leche, así:
$$NEL = \text{kg de leche por día} * (0.3512 + [0.0962 * \% \text{ grasa en leche}])$$
- 2) Mantenimiento (NELM), basadas en el peso vivo (PV) del animal y el número de parto, así:
 - a) primer parto: $NEM = 1.2 (0.080 * PV^{0.75})$
 - b) segundo parto: $NEM = 1.1 (0.080 * PV^{0.75})$
 - c) tercer parto o más: $NEM = 0.080 * PV^{0.75}$
- 3) Cambio de Peso Corporal (NEBW), de acuerdo con el NRC (2001) para la ganancia promedio de peso será asignado el requerimiento de NEL 5.12 Mcal/kg PV,

mientras que para la pérdida de PV se preverán 4.92 Mcal/kg PV de energía disponible, adicional a la energía proporcionada por el alimento.

- 4) Actividad de Pastoreo (NELG), este cálculo se realizó con la ecuación sugerida por Rochinotti (1998):

$$\text{NELG} = 1.2 \text{ kcal} * \text{ tiempo de pastoreo, h} * \text{PV}^{0.75}$$

- 5) Actividad de desplazamiento o caminata (NELW), calculado usando la estimación para el caminar horizontal según el AFRC (1993):

$$\text{NELG} = 0.62 \text{ cal}/(\text{kg PV} * \text{distancia})$$

La distancia fue estimada en 400 m para bovinos con 8 h continuas de pastoreo y 800 m con 4+4 y 12 h, representando la distancia recorrida desde o a la parcela de pastoreo a la sala de ordeño o corral. La distancia a la parcela fue de 200 m valor que fue multiplicado por el número de veces que caminaron esa distancia.

El requerimiento de energía neta total es la sumatoria de las cinco estimaciones anteriores. La energía neta para lactación a partir del el consumo de forraje se estimó por diferencia entre los requerimientos de ENL menos la energía consumida por los alimentos suministrados en la estabulación. El contenido de energía neta de los alimentos (forraje, ensilado de maíz y concentrado) fue calculado con las ecuaciones descritas por Menke y Steingass (1988) a partir del contenido de fibra ácido detergente.

8.3. Análisis de laboratorio

Los alimentos (ensilado de maíz, concentrado y pasto) fueron secados con estufa de aire forzado a 60°C por 24 h y se molieron con malla de 2 mm. Posteriormente por duplicado se pesó 1 g de muestra en tubos de digestión, se adicionaron 8 mL de ácido nítrico (HNO₃, 65% pureza) y 4 mL de ácido perclórico (HClO₄, 72% pureza), se dejaron reposar por 12 h (pre-digestión). Pasado este tiempo se colocaron los tubos en el digestor y se calentaron hasta 150°C por 45 minutos aproximadamente, hasta que desaparecieron los humos pardos, se aumentó la temperatura a 210°C por 60 minutos aproximadamente, el final de la reacción fue marcada por la aparición de vapores blancos densos característicos del HClO₄. Se dejó enfriar, se agregaron 20 mL de agua destilada a los tubos de digestión y se filtraron con papel de poro fino en matraces volumétricos de 50 mL, el aforó final se realizó con agua destilada. El resultado de esta dilución es de 1:50 (Allan, 1971).

Los sueros sanguíneos se descongelaron a temperatura ambiente (18°C), se tomó una alícuota de 2 mL y se adicionaron 8 mL de ácido tricloroacético al 10 %, se agitaron con el equipo vortex por 60 segundos y se dejaron reposar 10 minutos, se centrifugaron a 2500 rpm por 5 minutos, por último se conservó la parte líquida en tubos de plástico limpios. El resultado de esta dilución es de 1:5 (Fick *et al.*, 1979).

8.4. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó utilizando el procedimiento GLM con apoyo del paquete estadístico SAS (2002) para un diseño de cuadro latino repetido 3x3. El modelo estadístico utilizado fue:

$$Y_{ijk} = \mu + C_i + A_{(i)j} + P_{(i)k} + TP_1 + E_{ijkl}$$

Donde:

Y_{ijk} = respuesta de las variables dependientes

μ = media general

C_i = efecto del i-ésimo cuadro

$A_{(i)j}$ = efecto del j-ésimo animal

$P_{(i)k}$ = efecto del k-ésimo periodo

TP_1 = efecto del tiempo en la pradera

E_{ijk} = error aleatorio

Se realizó una comparación de medias con la prueba de Tukey con una significancia ≤ 0.05 (Steel *et al.*, 1997). Para conocer la relación del consumo de minerales con el contenido en suero sanguíneo, y rendimiento productivo se realizaron análisis de correlación múltiple (SAS, 2002).

IX. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1. Composición química de los alimentos

Se muestran la composición química y contenido mineral de los alimentos proporcionados a las vacas durante el experimento (Cuadro 4). La mayor concentración de minerales lo tuvo el concentrado comparado con el ensilado de maíz y el pasto debido a la adición de premezcla de vitaminas y minerales en su elaboración. Se observó un alto contenido de potasio en el pasto; al respecto, McDowell y Valle (2000) mencionan que el forraje cosechado en una etapa temprana de maduración es una fuente rica de de éste mineral.

Cuadro 4. Composición química y contenido de minerales en los alimentos.

Concepto	Concentrado	Ensilado de maíz	Pasto
Composición química (%)			
Materia seca (MS)	89.6	31.0	28.7
Materia orgánica (MO)	91.3	93.9	88.8
Proteína cruda (PC)	20.4	6.7	16.2
Fibra Neutro Detergente (FND)	20.5	55.1	53.6
Fibra Ácido Detergente (FAD)	7.0	31.1	25.0
Lignina Ácido Detergente (LAD)	2.2	4.1	2.7
Energía neta (ENL), Mcal/kg MS ¹	2.0	1.4	1.6
Minerales			
Calcio, %	1.53	0.17	0.21
Fósforo, %	0.45	0.13	0.21
Relación Ca:P	3.37	1.29	1.03
Magnesio, %	0.19	0.09	0.14
Potasio, %	0.67	0.71	1.14
Sodio, %	0.48	0.23	0.55
Cobre, ppm	18	9	16
Hierro, ppm	157	176	110
Zinc, ppm	22	10	10

¹ Estimado según la ecuación propuesta por Menke y Steingass (1988). ENL = (9.07- 0.0097* FAD). El resultado fue dividido entre 4.184 para obtener Mcal.

9.2. Desempeño productivo: consumo de alimento y producción de leche

El consumo de ensilado de maíz fue diferente ($P < 0.05$) entre tratamientos (Cuadro 5), siendo mayor en los animales que permanecieron 8 horas continuas en la pradera, el cual no fue diferente cuando se asignaron dos tiempos de 4 horas; el tratamiento 12h mostró el menor consumo de ensilado, esto se debió a que las vacas estuvieron menos tiempo en estabulación donde disponían de ensilado a libre acceso.

La ingestión de concentrado fue la misma en los tratamientos al ser fijada la oferta diaria de concentrado a 5.0 kg MF por vaca. El consumo de pasto fue afectado ($P < 0.05$) por los tratamientos siendo mayor cuando más tiempo permanecieron las vacas en la pradera. Las vacas en el tratamiento 12h consumieron 2.5 veces más pasto que el tratamiento 8h, y 1.8 veces más que 4+4h; no hubo diferencia ($P < 0.05$) en el consumo de pasto entre vacas que permanecieron 8 horas continuas o dividida en dos momentos.

Cuadro 5. Ingestión diaria de alimento (kg MS) y producción de leche (kg/d) de vacas Holstein con diferente tiempo de permanencia en la pradera en el valle de Toluca, México.

	Permanencia en pradera ¹			EEM ²	P<
	8h	4+4h	12h		
Consumo de alimento					
Ensilado	10.11 ^a	8.94 ^a	6.44 ^b	0.3201	0.0005
Concentrado	4.48	4.48	4.48	-	-
Total en estabulación	14.59 ^a	13.42 ^a	10.91 ^b	0.3207	0.0005
Pasto ³	2.64 ^b	3.70 ^b	6.58 ^a	0.3159	0.0003
Ingesta total	17.24	17.13	17.50	0.1498	0.2677
Ingesta, % PV	2.81	2.84	2.85	0.0211	0.5221
Producción de Leche	21.48	21.96	21.86	0.2167	0.2632

^{abc} Valores medios en la misma hilera con distinta literal son diferentes ($P < 0.05$).

¹ Permanencia en la pradera: 8h = de 07:00 a 15:00h; 4+4h = de 07:00 a 11:00h y de 16:00 a 20:00h; 12h = de 07:00 a 15:00h y 16:00 a 20:00h.

² EEM = error estándar de la media.

³ Estimado utilizando el método de rendimiento del animal (Macon *et al.*, 2003).

La ingesta total de alimento no fue diferente ($P > 0.05$), debido a que los animales de alguna u otra forma mantenían un consumo total constante ya sea ingiriendo más pasto o ensilado. De igual manera, la ingesta relacionada con el peso vivo del animal no mostro diferencias ($P > 0.05$) estando en un rango de 2.81 a 2.84 % del PV. Similarmente, la producción de la

leche de vacas no fue afectada ($P>0.05$) por las estrategias de alimentación basadas en el tiempo de permanencia en la pradera.

9.3. Consumo de minerales

Se presenta el consumo de minerales de bovinos productores de leche (Cuadro 6). En el valle de Toluca, investigaciones que han abordado la nutrición mineral de rumiantes, desde el punto de vista del diagnóstico del estado mineral (Morales-Almaráz *et al.*, 2007; Domínguez-Vara y Huerta-Bravo, 2008) no reportan datos de consumo de minerales; no obstante, que han contribuido a la identificación de desbalances minerales en el ganado en las zonas de estudio.

Cuadro 6. Consumo de macro (g/d) y microminerales (ppm/d) de vacas Holstein con diferente tiempo de permanencia en la pradera en el valle de Toluca, México.

Mineral	Permanencia en pradera ¹			EEM ²	P<	Media
	8h	4+4h	12h			
Calcio	90.47	90.39	92.64	0.6507	0.0846	91.17
Fósforo	38.75 ^b	39.29 ^b	41.23 ^a	0.3654	0.0068	39.76
Magnesio	21.60 ^b	21.92 ^b	23.53 ^a	0.3364	0.0139	22.35
Potasio	131.93 ^b	137.51 ^b	151.48 ^a	2.3808	0.0030	140.31
Sodio	59.54 ^b	64.20 ^b	75.26 ^a	1.6067	0.0012	66.33
Cobre	217 ^b	229 ^b	255 ^a	4.3971	0.0024	234
Hierro	2747	2704	2608	46.9597	0.1819	2687
Zinc	227	223	226	3.2607	0.6965	225

^{abc} Valores medios en la misma hilera con distinta literal son diferentes ($P<0.05$).

¹ Permanencia en la pradera: 8h = de 07:00 a 15:00h; 4+4h = de 07:00 a 11:00h y de 16:00 a 20:00h; 12h = de 07:00 a 15:00h y 16:00 a 20:00h

² EEM = error estándar de la media.

9.3.1. Consumo de macrominerales

El tiempo de permanencia en la pradera afectó ($P<0.05$) el consumo de la mayoría de macrominerales a excepción del calcio (Cuadro 6). El consumo de calcio (91.16 ± 12.66 g/d) no fue diferente entre tratamientos; no obstante, su consumo representó el 0.52% de la

ingesta total, menor al requerimiento recomendado por el NRC (2001) para una vaca en producción (0.62%).

El consumo de fósforo fue mayor ($P < 0.05$) en el tratamiento 12h (41.23 g/d) con respecto a los tratamientos 4+4h y 8h (39.29 y 38.75 g/d, respectivamente); esto podría ser atribuido al contenido de fósforo del pasto (0.21%) asociado a la mayor ingesta del mismo en el tratamiento 12h. De acuerdo con los datos de consumo diario de MS total, el consumo de P reportados en este trabajo (0.22-0.24%) no alcanza a cubrir los requerimientos de este mineral para animales en producción (0.33%) (NRC, 2001), sin embargo, los animales tienen la habilidad de movilizar sus reservas para corregir la deficiencia de P (Mathews *et al.*, 1998).

El consumo de magnesio mostró diferencias significativas ($P < 0.05$); el tratamiento 12h registró el mayor consumo (23.53 g/d) comparado con los tratamientos 8h y 4+4h que registraron consumos estadísticamente iguales (21.60 y 21.92 g/d, respectivamente); lo anterior, se puede atribuir al mayor consumo de pasto de vacas que permanecieron 12 horas en la pradera, además de un mayor porcentaje de este mineral (0.14%) con respecto al ensilado de maíz (0.09%). El porcentaje de Mg en la ingesta total es de 0.13% el cual no cubre el requerimiento para vacas en producción (0.18%) según el NRC (2001).

El tratamiento con mayor ($P < 0.05$) ingestión de potasio fue 12h (151.48 g/d) comparado con los grupos 8h y 4+4h, los cuales mostraron consumos similares; sin embargo, ninguno de los tratamientos cubre los requerimientos de K para vacas en producción (1.0%) (NRC, 2001), aunque la deficiencia es mínima ya que el consumo se encuentra entre el 0.077 y 0.087%. Normalmente, rumiantes en pastoreo no muestran deficiencias de este mineral (Huerta, 1999); el pasto utilizado en este trabajo contenía 1.14% de K pero los valores del concentrado y el ensilado no superaba el 0.8%.

El tratamiento 12h registró el mayor ($P < 0.05$) consumo de Na (75.26 g/d), con respecto a los tratamientos 8h y 4+4h los cuales no mostraron diferencias ($P > 0.05$) entre sí. El requerimiento mínimo de Na en vacas lecheras es de 0.22% (NRC, 2001), el cual fue cubierto en todos los tratamientos al registrar un consumo del 0.35 al 0.43% de este mineral.

9.3.2. Consumo de microminerales

El consumo de cobre mostró diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$) con un patrón similar al observado en el consumo de macrominerales (Cuadro 6). El tratamiento 12h mostró el mayor consumo de Cu (255 ppm/d) en comparación con los otros dos grupos que registraron consumos similares. Los tratamientos cubrieron los requerimientos de Cu para vacas lecheras en producción (NRC, 2001).

No existieron diferencias ($P > 0.05$) en el consumo de Fe en los tres tratamientos evaluados (2687 ± 495.28 ppm/d). Se identificó un exceso de Fe en la alimentación de vacas en este experimento. El Fe es antagonista de Cu, Zn, Ca y P (McDowell *et al.*, 1993) lo cual podría traer como consecuencia una deficiencia de estos minerales.

El consumo de zinc no mostró diferencias ($P > 0.05$), entre tratamientos, esto se debe a que el aporte del ensilado y el pasto prácticamente es el mismo (10ppm) y el consumo de concentrado fue similar para los tres tratamientos. El consumo de Zn fue 3.03 veces menor al requerido por vacas lecheras en lactación (NRC, 2001).

9.4. Concentración mineral en suero sanguíneo de bovinos

La concentración de minerales en suero sanguíneo de vacas en producción con distinto tiempo de permanencia en la pradera se presenta en el Cuadro 7.

9.4.1. Macrominerales en suero sanguíneo

No se observaron diferencias estadísticas ($P > 0.05$) en el contenido de minerales en el suero sanguíneo a excepción del magnesio que fue 6.5 y 16.5% mayor en el tratamiento 8h comparado con los tratamientos 4+4h y 12h, respectivamente (Cuadro 7). El rango normal de Mg en suero sanguíneo va de 1.8 a 2.4 mg/dL; todas las vacas estuvieron por debajo de este nivel lo cual indicaría una deficiencia de este mineral (NRC, 2001). La deficiencia de Mg en vacas en esta investigación se pudo deber al consumo insuficiente de este mineral aportado por los alimentos.

Cuadro 7. Concentración de minerales en suero sanguíneo de vacas Holstein con diferente tiempo de permanencia en la pradera en el valle de Toluca, México.

Mineral	Tratamientos ¹			Rango ²	EEM ³	P<
	8h	4+4h	12h			
Calcio, mg/dL	7.96	8.01	7.62	9-10	0.2714	0.5797
Fósforo, mg dL	5.91	6.21	6.07	4-8	0.1889	0.5669
Magnesio, mg/dL	1.63 ^a	1.53 ^{ab}	1.40 ^b	1.8-2.4	0.0363	0.0136
Potasio, mg/ dL	23.77	23.77	23.02	5-10	0.3935	0.3644
Sodio, mg/ dL	373.68	378.44	362.01	150	5.6541	0.1882
Cobre, mcg/mL	0.86	0.70	0.85	0.7-1.2	0.0648	0.2195
Hierro, mcg/ mL	1.54	1.39	1.52	1.3-2.5	0.1821	0.8283
Zinc, mcg/ mL	0.37	0.37	0.31	0.8-1.5	0.0644	0.7029

^{abc} Valores medios en la misma hilera con distinta literal son diferentes ($P < 0.05$).

¹ Permanencia en la pradera: 8h = de 07:00 a 15:00h; 4+4h = de 07:00 a 11:00h y de 16:00 a 20:00h; 12h = de 07:00 a 15:00h y 16:00 a 20:00h.

² Valores medios reportados en la literatura (NRC, 2001; McDowell *et al.*, 1997; Minson, 1990; ARC, 1980)

³ EEM = error estándar de la media.

Los valores de calcio encontrados en suero sanguíneo no fueron diferentes ($P > 0.05$) entre tratamientos; el NRC (2001) informa que los valores observados se encuentran por debajo del rango normal de bovinos lecheros en producción. En contraste con nuestros resultados, Morales-Almaráz *et al.* (2007) evaluaron la concentración mineral en suero sanguíneo de bovinos lecheros en pastoreo con complemento en cuatro localidades del valle de Toluca y Jilotepec, México, en dos épocas del año y reportaron un exceso de calcio en suero sanguíneo (15.18-17.12 mg/dL). McDowell y Arthington (2005) y Suttle (2010) mencionan que es poco probable la deficiencia de Ca en animales en pastoreo; sin embargo, animales de alto mérito genético en producción los requerimientos son aún mayores pudiendo encontrar esta deficiencia.

El fósforo en suero de los bovinos no mostró diferencias (6.06 ± 0.74 mg/dL; $P > 0.05$), a pesar de haber observado un efecto en la ingestión de este mineral, donde el tratamiento 8h mostró el menor consumo de P (38.75 g/d) y su concentración en suero fue cuantitativamente más baja (Cuadro 8). La concentración de P en suero sanguíneo estuvo

dentro del rango normal (NRC, 2001). El contenido normal de P en el suero sanguíneo se debe al equilibrio homeostático que tienen los rumiantes para reciclar este mineral en el organismo (Mathews *et al.*, 1998). Morales-Almaráz *et al.*, (2007) reportaron niveles similares de P en suero sanguíneo en la misma zona (6.88 mg/dL). Los niveles de P pueden variar de acuerdo a la edad, estado fisiológico y época del año (Miller *et al.*, 1993).

El magnesio mostró diferencias ($P < 0.05$) entre tratamientos. El tratamiento 12h mostró el nivel más bajo de Mg (1.40 mg/dL), no obstante que en los bovinos en este tratamiento mostraron mayor consumo de este mineral (23.53 g/d). De acuerdo con McDowell *et al.* (1993) los niveles normales de Mg en suero van de 1.8 a 2.4 mg/dL, así, con los niveles observados en la presente investigación se considera que los bovinos presentaron deficiencia de este mineral. En comparación a nuestros resultados, otros autores reportaron, en promedio, más del doble de la concentración de magnesio en suero de bovinos (3.29 mg/dL) de diferentes localidades del valle de Toluca (Morales-Almaráz *et al.*, 2007). Estos autores reportaron concentraciones de 2.94 mg/dL de magnesio en suero de bovinos en la zona del Cerrillo Piedras Blancas, Toluca (Morales-Almaráz *et al.*, 2007). Domínguez (1993) no encontró deficiencias de Mg en bovinos lecheros y ovinos en la región Tenango del Valle, México. Chiy y Philips (1996) mencionaron que un exceso de K asociado con un bajo contenido de Na disminuye la absorción e incrementan la excreción de Mg en las heces, estos dos minerales fueron óptimos.

El sodio no mostró diferencias significativas (371.38 ± 15.71 mg/dL, $P > 0.05$); los niveles de Na se encontraron dentro del rango normal (NRC, 2001) correspondiendo a lo encontrado en forraje, donde se observó un contenido adecuado. Aunque los bovinos tienen la capacidad de conservar este mineral cuando la dieta es deficiente, reduciendo su excreción en orina, heces y saliva (ARC, 1980), los niveles encontrados son inferiores a los reportados por Morales-Almaraz *et al.* (2007) en bovinos productores de leche, Vite (2002) en vaquillas y Rosas (1999) en bovinos leche y ovinos. La concentración de Na en suero se ve poco afectada por la dieta, la prueba más confiable para detectar una deficiencia es un análisis de Na en saliva (McDowell, 1985).

9.4.2. Microminerales en suero

Respecto al contenido de microminerales en el suero de bovinos lecheros analizados en esta investigación (Cuadro 7), el contenido de Cu (0.81 ± 0.18 mcg/mL), Fe (1.49 ± 0.46 mcg/mL) y Zn (0.36 ± 0.17 mcg/mL) no fue afectado por el tiempo de permanencia en la pradera ($P > 0.05$). Suttle (1983) menciona que la habilidad de un alimento para cubrir los requerimientos de Cu depende más de la absorción que de la concentración de Cu que

contiene. Numéricamente, el nivel más bajo de Cu en suero fue para el tratamiento 4+4h el cual se encuentra por debajo del nivel crítico (0.80 mcg/mL; NRC, 2001); el nivel deficiente de Cu no coincide con niveles deficientes en la dieta. Huerta (1999) menciona que la deficiencia de este mineral en los animales se presenta cuando el forraje contiene menos de 5-10 g/Kg MS. El molibdeno en exceso ocasiona una deficiencia de Cu aun cuando el nivel de este sea adecuado en la dieta. El exceso de consumo de Fe observado en este trabajo pudo interferir de manera negativa en la absorción y metabolismo del Cu (McDowell *et al.*, 1993). Los valores encontrados son similares a lo reportado por Morales-Almaráz *et al.* (2007) quienes reportaron concentraciones de 0.76 mcg/mL en bovinos lecheros en la misma localidad. Para observar deficiencias de Cu en plasma pueden pasar muchos meses ya que el animal tiene la capacidad de mantener el nivel de Cu normal en suero al recurrir a las reservas del hígado (Minson, 1990).

La concentración de Fe en el suero sanguíneo de los bovinos estuvo dentro de los niveles normales 1.3-2.5 mcg/mL (McDowell *et al.*, 1997; Minson, 1990). La deficiencia de Fe rara vez se presenta en animales adultos en pastoreo, entre otras cosas, por el consumo indirecto de suelo a través de los forrajes (McDowell y Arthington, 2005). En situaciones específicas como la pérdida de sangre o como consecuencia de enfermedades parasitarias que provoquen disturbios del metabolismo puede existir una deficiencia de Fe (McDowell, 1985; Suttle, 2010).

Aunque no hubo diferencias ($P>0.05$) entre tratamientos, la concentración de Zn en suero sanguíneo de bovinos se encontró por debajo del nivel crítico (NRC, 2001). El nivel de Zn puede ser deprimido por enfermedades o estrés del animal y valores inferiores a 0.4 mcg/mL se relacionan con una deficiencia (Huerta, 1999); McDonald *et al.* (1988) mencionaron que los excesos de Ca, P y Cu inhiben su absorción. Morales-Almaráz *et al.* (2007) reportaron niveles ligeramente superiores en la misma zona (0.56 mcg/mL). La deficiencia de Zn puede deberse a que el animal ingiere poco Zn (deficiencia primaria) ya sea por el bajo contenido de Zn en la dieta o la poca disponibilidad de este elemento, o cuando existen antagonistas (deficiencia secundaria) generados por el desbalance de componentes en la dieta (Huerta, 1997).

9.5. Correlación entre minerales

Se presentan los coeficientes de correlación y su probabilidad entre el consumo de minerales con su concentración en suero sanguíneo y la producción de leche, y la

concentración en suero sanguíneo con la producción de leche de bovinos con diferente tiempo de permanencia en la pradera (Cuadro 8).

Cuadro 8. Coeficientes de correlación entre el consumo de minerales, concentración mineral en suero sanguíneo y producción de leche de vacas Holstein en pastoreo en el valle de Toluca, México.

Mineral	Ca	P	Mg	K	Na	Cu	Fe	Zn
Consumo de minerales-Concentración en suero sanguíneo								
R	0.2122	-0.1546	-0.5510	0.4397	0.0073	-0.2582	-0.2722	0.2709
P<	0.397	0.540	0.017	0.067	0.977	0.300	0.274	0.276
Consumo de minerales-Producción de leche								
R	0.2559	0.8359	0.5528	0.7315	0.5984	0.5675	0.5553	0.6292
P<	0.305	<0.001	0.017	<0.001	0.008	0.014	0.016	0.005
Concentración en suero sanguíneo-Producción de leche								
R	-0.2570	-0.1403	-0.4567	0.4254	0.2344	-0.2428	-0.3287	0.1996
P<	0.303	0.578	0.056	0.078	0.349	0.331	0.182	0.426

9.5.1. Correlación entre el consumo de minerales y concentración mineral en suero sanguíneo de bovinos

Relacionando el consumo de minerales con su concentración en el suero sanguíneo, únicamente se observó significancia ($P < 0.05$) de correlación negativa para Mg ($r = -0.55$), esta nos indicaría que al disminuir el consumo de Mg se incrementa su concentración en suero sanguíneo, no obstante que los niveles de Mg en suero estuvieron por debajo del nivel crítico según la literatura (1.8 mg/dL, McDowell *et al.*, 1997; Puls, 1988). La baja concentración de Mg en los alimentos asociado al consumo de alimento pudo provocar que el aporte de este mineral no haya sido el adecuado para el animal. Morales-Almaráz *et al.* (2007) encontraron concentraciones más altas de magnesio en alimentos (pasto, 0.25%; ensilado de maíz, 0.52% y alimento balanceado 0.31%) en comparación con los reportados en el presente trabajo. Estos autores reportaron una correlación negativa ($r = -0.67$) entre la concentración de Mg del pasto y la de Mg en suero sanguíneo, sin embargo, no reportan datos de consumo de minerales. Por el contrario, Kumaresan *et al.* (2010) quienes evaluaron el estado mineral del suelo, planta y animal en una zona subtropical en la India

observaron una correlación positiva de Mg entre el consumo de forraje y el suero sanguíneo de bovinos ($r=0.88$; $P<0.05$). En bovinos de doble propósito no se encontró correlación de este mineral (Vieyra-Alberto, 2012).

9.5.2. Correlación entre el consumo de minerales y la producción de leche

Con excepción del Ca, el consumo del resto de los minerales estudiados en este trabajo mostraron una correlación significativa ($P<0.05$) con la producción de leche, esto reafirma que el consumo de minerales es de vital importancia para una adecuada productividad del animal (Underwood y Suttle, 1999). La productividad animal está limitada principalmente por aportes deficientes de energía y proteína, enfermedades parasitarias e infecciosas, factores genéticos del animal, y desequilibrios en el aporte mineral (Suttle, 1991). La importancia de los minerales en la nutrición animal radica en que son necesarios para la transformación de la proteína y la energía de los alimentos en componentes del organismo, cumpliendo primeramente con las necesidades de mantenimiento y posteriormente las necesidades de crecimiento, gestación y lactación (Huerta, 1999).

La falta de significancia de la relación entre el consumo de Ca y la producción de leche podría ser explicada porque los animales tienen la capacidad de movilizar el Ca presente en los tejidos para cubrir la deficiencia de este mineral (Underwood y Suttle, 1999). Cuando los animales ingieren forrajes deficientes en Ca, asociado con cantidades altas en P, se puede presentar una anomalía llamada hiperparatiroidismo nutricional secundario, que consiste en una alta movilización de calcio de los huesos, el cual es sustituido por tejido conectivo fibroso provocando un engrosamiento de los huesos faciales (Maynard *et al.*, 1981).

En esta investigación se observó una correlación positiva alta del consumo de fósforo con la producción de leche ($r=0.83$, $P<0.0001$). El P es un nutriente esencial utilizado para el desarrollo de los huesos, crecimiento y producción óptima del ganado (McDowell y Arthington, 2005); influye directamente sobre la ganancia de peso corporal (Call *et al.*, 1978) y la producción láctea (Church y Pound, 1987). Gutiérrez y Ávila (2010) mencionan que la leche contiene de 0.25-1.00 g/L de este mineral, por lo que es necesario suministrar 44.2 g de P absorbible al día (NRC, 2001). McDowell y Arthington (2005) mencionan que la deficiencia mineral más común en el mundo es la de P; los parámetros reproductivos se ven alterados teniendo anestros prolongados, repetición de celos, reabsorción embrionaria y bajas tasas de concepción (Garmendia, 2007).

Se observó una correlación positiva ($r=0.73$, $P<0.0001$) entre el consumo de K y la producción de leche (Cuadro 8). El adecuado aporte de K con la dieta asociado al consumo de alimento y de este mineral marca su importancia en la productividad del animal. Desordenes nerviosos, una reducción del consumo de alimento (McDowell *et al.*, 1993), del peso corporal, así como una disminución en la producción de leche y del nivel de K en plasma y leche (NRC, 2001; Miller, 1979) son observados cuando se suministran niveles deficientes de K en la dieta (de 0.06 a 0.15%) de bovinos productores de leche (Miller, 1979; NRC, 1989).

Respecto a la correlación positiva media observada entre el consumo de Na y la producción láctea ($r=0.59$; $P<0.0001$), de acuerdo con el NRC (2001) la ingesta diaria de Na debe de ser de 0.2%, siendo el requerimiento de 0.04-0.25% de Na, recomendándose el nivel más alto para vacas en lactación (McDowell *et al.*, 1993), el cual fue cumplido en la presente investigación. La deficiencia de Na se manifiesta por un deseo intenso por sal, reducción del consumo de alimento, menor producción de leche y pérdida de peso (Underwood, 1981; McDowell *et al.*, 1993). Pese a una deficiencia prolongada de Na los niveles de este mineral permanecen altos en la leche (McDowell *et al.*, 1993; Seynaeve *et al.*, 1996), es por eso que los animales en lactación son más susceptibles a la deficiencia de Na en la dieta (Loosli, 1978).

El Cu es un elemento esencial para rumiantes, el rango de Cu en suero es de 0.7 a 1.2 mcg/mL (Burtis y Ashwood 1994; Da Silva *et al.*, 1999) el cual fue cumplido en todos los tratamientos de nuestro trabajo; la cantidad de Cu en la dieta depende de la edad del animal, forma química del mineral, y presencia de sustancias que interfieren en su absorción (NRC, 2001); 4 ppm pueden cubrir el requisito, pero 10 ppm es un requerimiento más práctico en ganado lechero (NRC, 2001). En nuestra investigación se observó una relación positiva entre el consumo de Cu y la producción láctea ($r=0.56$; $P<0.0001$). La deficiencia de Cu se manifiesta con reducción del crecimiento, pérdida de peso, disminución en la producción de leche (Underwood, 1981), así mismo, se observa retraso en la presentación del celo, disminución de la reproducción y retención de placenta (NRC, 2001). Quiroz y Bouda (2001) en una revisión mencionaron gran cantidad de signos asociados con una deficiencia de Cu o hipocuprosis: anemia, infertilidad, claudicación, ataxia enzoótica, diarrea, predisposición a enfermedades infecciosas, crisis hemolíticas, úlceras abomasales, mala condición corporal, fallas en el crecimiento y muerte súbita; estas alteraciones de manera directa o indirecta causan un descenso en la producción de leche.

La producción de leche aumentó con el incremento del consumo de Fe, así lo refleja la correlación positiva media observada entre ambas variables ($r=0.55$; $P<0.0001$). El NRC (2001) recomienda suministrar 50 ppm de Fe al día a vacas lecheras, necesidad que fue cubierta íntegramente en el presente trabajo.

El aporte de Zn al ganado lechero en el presente trabajo fue en promedio 200 ppm/d. Los requerimientos de zinc son menores a 30-40 ppm de la MS (NRC, 1996). La lactación representa una demanda mayor de Zn a pesar de su bajo contenido en la leche (Miller, 1979). En nuestro estudio, el consumo de Zn se correlacionó positivamente con la producción de leche ($r=0.62$; $P<0.0001$). De acuerdo con Underwood (1981) cuando los rumiantes son alimentados con dietas deficientes en Zn, la utilización de la proteína es afectada y el consumo voluntario es deprimido en un 39%, lo cual podría limitar la productividad del animal. El Zn es un importante constituyente de una gran cantidad de enzimas y hormonas (Underwood, 1981; McDowell *et al.*, 1993); los efectos importantes de la deficiencia de este mineral ocurren en la hembra donde se ven afectados los procesos productivos desde el estro, el parto y la lactancia (McDowell *et al.*, 1993).

9.5.3. Correlación entre la concentración mineral en suero sanguíneo y la producción de leche

No se encontraron interacciones significativas ($P>0.05$) en ninguno de los minerales al hacer una correlación entre la concentración en suero sanguíneo-producción de leche (Cuadro 8). Esto sugiere que el análisis del contenido mineral en el suero sanguíneo no fue un parámetro significativo para relacionarlo con una posible afectación de la productividad del animal, específicamente de la producción láctea en el ganado lechero en pastoreo, bajo las condiciones en que fue realizada la presente investigación. Este hecho podría estar también sustentado por la falta de significancia observada en la relación entre el consumo de minerales con la concentración en suero sanguíneo de bovinos para la gran mayoría de los minerales analizados.

Nuestros resultados podrían estar vinculados al hecho de que el animal regula, en la mayoría de los minerales, su concentración mineral en fluidos (suero sanguíneo) y su aprovechamiento (absorción y metabolismo) a partir de su aporte en la dieta y de sus reservas corporales, lo cual asociado a otros factores como el nivel de producción, estado sanitario; el estrés, entre otros, hacen difícil la interpretación tanto de los desbalances observados en la concentración mineral en suero sanguíneo como el efecto de la correlación

entre las variables estudiadas, particularmente del consumo con el contenido mineral en suero sanguíneo, y de este con la producción láctea.

X. CONCLUSIONES

Con base en los resultados de la presente investigación, se concluye lo siguiente:

- ❖ El tiempo de permanencia en la pradera tiene influencia sobre el consumo de minerales de los bovinos lecheros, siendo la estrategia de alimentación con 12h de acceso a la pradera donde se observó mayor consumo de macrominerales.
- ❖ Las estrategias de alimentación evaluadas no cubrieron el requerimiento de P, Mg, K y Zn de los bovinos.
- ❖ La concentración de mineral en suero sanguíneo de los bovinos, independiente del tratamiento, fue normal para P, Na, Cu y Fe; crítica para Ca, deficiente en Mg y Zn; y excesiva en K.
- ❖ El consumo mineral y la producción de leche mostraron estrecha correlación, indicando que conocer el aporte de minerales en la dieta al animal y la medición del consumo de alimento resultó en un mejor indicador de la importancia de la nutrición mineral con la producción de leche.

Los desbalances observados en suero sanguíneo indicarían que es necesario adecuar su suplementación acorde a aquellos minerales deficientes y excesivos en los alimentos consumidos por los bovinos en la zona de estudio, con el fin de satisfacer las necesidades de estos en los animales en producción bajo condiciones de pastoreo.

Hacen falta más estudios que vayan encaminados a medir el consumo de alimento y parámetros productivos y reproductivos, que contribuyan a mejorar la producción animal cuando esta se encuentra basada en la utilización de forrajes frescos y/o conservados, máxime si se cuenta con diagnósticos en materia del estado mineral en alimentos y en el animal.

XI. LITERATURA CITADA

- AFRC. (1993): Necesidades energéticas y proteicas de los rumiantes. Acribia, España.
- Allan J. (1971): The preparation of agricultural samples for analysis by atomic absorption spectroscopy, Varian Techtron. USA.
- Allaway W. (1986): Soil, Plant, Animal and Human interrelationship in trace element nutrition. En: Orlando WM (ed). *Trace elements in Human and Animal Nutrition*. Academy Press Inc, USA.
- Angulo J, Mahecha L, Olivera M. (2009): Síntesis, composición y modificación de la grasa de la leche bovina: Un nutriente valioso para la salud humana. *MVZ Córdoba*, 14(3):156-158.
- ARC. (1980): *The Nutrient Requirements of Ruminant Livestock*. Commonwealth Bureax Farinham Royal. England
- Ávila S, Gutiérrez J. (2010): Producción de leche con ganado bovino. 2ª ed., Manual Moderno, México.
- Blood DC, Randostir OM. (1992): *Medicina Veterinaria*. 7a ed., Limusa- Noriega, Mexico.
- Burtis, C. A. and Ashwood, E.R. (1994). *Tietz textbook of clinical chemistry*, 2ª ed. Philadelphia: W.B. Saunders.
- Chen S, Bobe G, Zimmerman S, Hammond G, Luhman M, Boylston D, Freeman E, Beitz C. (2004): Physical and sensory properties of dairy products from cows with various milk fatty acid compositions. *J. Agric. Food Chem.*, 52: 3422-3428.
- Chester-Jones H, Fontenot JP, Veit HP, Wesbb KE. (1989): Physiological effects of feeding high magnesium to sheep. *Journal Animal Science*. **67**: 1070.
- Chilliard Y, Ferlay A. (2004): Dietary lipids and forages interactions on cow and goat milk fatty acid composition and sensory properties. *Repr. Nutr. Dev.*, 44: 467-492.
- Chiy, P. C, and Phillips, C. J. C. (1996). Sodium nutrition of dairy cows. In: *Progress in Dairy Science*. C. J. C. Phillips (Ed). UK, CAB International: p. 29-44.
- Church DC, Pond WG, Pond KR. (2002): *Fundamentos de Nutrición y Alimentación de Animales*. 2ª ed. Limusa, México.
- Church DC, Pond WG. (1987): *Fundamentos de nutrición y alimentación de los animales*, Limusa-Noriega, México.
- Church DC. (1992): *Fundamentos de nutrición y alimentación animal*. Limusa.
- Da Silva, M. S., Hubinger, T. C. y Dobereiner, J. (1999). Deficiencias e desequilibrios de microelementos em bovinos e ovinos em algunas regiões do Brasil. *Pesq. Vet. Bras*, 19: 19-33.
- Dana JT, Socha TM, Swenson KC, Bruce AJ. (2002): Efecto de minerales traza inorgánicos en el desempeño del ganado lechero y de engorda. XXX Reunión de la Asociación Mexicana de Producción Animal, Guadalajara, México.
- Demment MW, Allen LH. (2004): Animal source foods to improve micronutrient nutrition and human function in developing countries. *J. Nutr.*, 133 (Suppl.): 11-S II.

- Domínguez VI, Huerta BM. (2008): Concentración e interrelación mineral en suelo, forraje y suero de ovinos durante dos épocas en el valle de Toluca, México. *Agrociencia*, 42(2):173-183.
- Domínguez, V. I. A. (1993). Diagnóstico del estado mineral de ovinos bajo condiciones de pastoreo en Tenango del Valle, México. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo.
- Elgersma A, Tamminga S, Ellen G. (2006): Modifying milk composition through forage. *Anim. Feed Sci. Technol*, 131: 207-225.
- Fick KA, McDowell PH, Miles NS, Wilkinson JD, Funk JH, Conrad R, Forchetti O, Maffrand C, Visssio C, Boaglio C, Cufre G. (1979): Hipofosfatemia y fragilidad osmótica eritrocítica en cabras. *Redvet. VII. 1: 1-9*.
- Gangliostro A. (2004): Control nutricional del contenido de Ácido Linoléico Conjugado (CLA) en leche y su presencia en alimentos naturales funcionales. *Producción de leche alto CLA de vaca*. 24(3-4): 138-139.
- Garmendia J. (2007). Los minerales en la producción bovina [en línea]. Disponible en www.produccion-animal.com.ar. (Revisado el 28 de diciembre de 2010).
- Gengelbach GP, Ward JD, Spears JW. (1994): Effect of dietary copper, iron and molybdenum on growth and copper status of beef cows and calves. *Journal Animal Science* 72: 2722-2727.
- Georgievskii VI. (1982): General Information on Mineral. In: *Mineral Nutrition of Animal*. Georgievskii VI, Annenkov BN, Samokhin VT. Butterworths, London.
- Gooneratne SR., Buckley WT, Christense DA. (1989): Review of copper deficiency and metabolism in ruminants. *Canadian Journal Animal Science* 69: 819-845
- Gordon MD. (2008): *Animal Nutrition Science*. CABI International. UK.
- Gravert, H. O. 1987. Dairy Cattle Production, World Animal Science. Kaufmann, H. Hagemeister (Eds), Edit. Elsevier Science Publisher. 107-131.
- Huerta BM. (1997): Nutrición mineral de rumiantes en pastoreo. *Curso Alternativas de Manejo de Bovinos Carne en Pastoreo*, Estado de México, México.
- Huerta, B. M. (1999). Diagnóstico del estado mineral de explotaciones bovinas en México.
- Hurwitz S. (1996): Homeostatic control of plasma calcium concentration. *Critical Review in Biochemistry and Molecular Biology*. 31:41-100
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 2013. Territorio nacional [En línea]. Disponible en www.inegi.org.mx. (revisado el 24 de agosto del 2014).
- Johnson H. (1978): The composition of milk. *Fundamentals of Dairy Chemistry*. Webb BH, Johnson AH, Alford JA., Avi. Publ. Co., Westport.
- Kinkaid, R. (1993). Macroelementos para los rumiantes. *El rumiante. Fisiología digestiva y nutrición*. D. C. Church (Ed). Acribia. Zaragoza, España. p. 373-390
- Kramer JH, Malk IT, Phillips TM, Weglicki WB. (2003): Dietary magnesium intake influences circulating pro-inflammatory influences circulating pro-inflammatory neuropeptide levels and loss of myocardial, tolerance to postischemic stress. *Exp. Biol. Med.*
- Kuhn J, Carrick T, Wilde J. (1980): Lactose synthesis: the possibilities of regulation. *J. Dairy Sci.*, 63: 328-336

- Kumaresan, A., Bujarbaruah, K. M., Pathak, K. A., Brajendra., Ramesh, T. 2010. Soil-plant animal continuum in relation to macro and micro mineral status of dairy cattle in subtropical hill agro ecosystem. *Trop Anim. Health Prod.* 42:569-577.
- Linser JR. (1981): Potassium in Ruminant. *In: Fourth Annual International Mineral Conference.* St. Petersburg Beach, USA.
- Lock A, Shingfield KJ. (2004): Optimising milk composition. En: *Dairying-Using Science to Meet Consumers' Needs.* Kebreab E. Mills J. Beever DE (Eds). *Occ.*, 29:107-188.
- Loosli, J. K. (1978). Sodium and chlorine requirements of ruminants. *Latin American Symposium on Mineral Nutrition Research with Grazing Ruminants.* J. H. Conrad and R. L. McDowell (Eds). *Animal Science Department.* University of Florida, Gainesville: p. 54-58.
- Macon B, Sollenberger LE, Moore JE, Staples CR, Fike JH, Portier KM. (2003): Comparison of three techniques for estimating the forage intake of lactating dairy cows on pasture. *J. Anim. Sci.* 81: 2357-2366.
- Mathews, B., Tristchler, J. P. and Miyasaka, S. C. (1998). Phosphorus management and sustainability. *Grass for dairy cattle.* J. H. Cherney and D. J. R. Cherney (Eds). London, UK., CAB International. p. 210.
- Maynard AL, Lossli JK, Hintz HF, Warner RG (1981): *Nutrición Animal.* McGraw-Hill, México
- Maynard, A. L., Losli, J. K., Hintz, H. F. y Warner, R. G. (1981). *Nutrición Animal.* México. D. F., Ed. McGraw-Hill. p. 640.
- McDonald P, Edwards RA, Greenhalg JFD. (1988): *Animal Nutrition.* 4a ed. Longman Scientific and Technical.
- McDonald P, Edwards RA, Greenhalg JFP, Morgan CA (2001). *Animal Nutrition.* 6ed. Prentice Hall. London, UK.
- McDowell LR, Arthington JD. (2005): *Minerales para rumiantes en pastoreo en regiones tropicales.* IFAS, USA.
- McDowell LR, Conrad JH, Hembra FG, Rojas LX, Velásquez J. (1993): *Minerales para rumiantes en pastoreo en regiones tropicales,* Gainesville, USA.
- McDowell LR, Valle G. (2000): Major minerals in forages. *In: Forage evaluation in ruminant nutrition.* Givens DI, Owen E, Axford RFE, Omed HM. CAB International, London, UK.
- McDowell LR. (1985): *Nutrition of Grazing Ruminants in Warm Climates.* USA, Academic Press
- McDowell, L. R., Velázquez, P. Valle, G. (1997). *Minerales para rumiantes en pastoreo en regiones tropicales.* Universidad de Florida. Gainesville, Florida, USA.
- Menke KH, Steingass H. (1988): Estimation of the energetic feed value from chemical analysis and *in vitro* gas production using rumen fluid. *Animal Research and Development.* 28: 7-55.
- Mephram B. (1982): Amino acid utilization by lactating mammary gland. *J. Dairy Sci.*, 65: 287-298.
- Miller JK, Ramsey N, Madson FC. (1993): Elementos vestigiales. En: *El Rumiante: fisiología digestiva y nutrición.* Church DC. Acribia, España.

- Miller WJ, (1979). Dairy Cattle Feeding and Nutrition, Academic Press, Inc. NY. USA.
- Miller WJ. (1983): phosphorus nutrition, biochemistry, metabolism and requirements in ruminants. Paper presented at the meeting of the National Feed Ingredients Association, Illinois, USA.
- Miller WJ. (1989): *Nutrición y alimentación del ganado vacuno lechero*, Acribia, España.
- Minson DJ. (1990): *Forages in Ruminant Nutrition*, Academic Press, USA.
- Morales AE, Domínguez VI, González RM, Jaramillo EG, Castelán OO, Pescador SN, Huerta BM. (2007): Diagnóstico mineral en forrajes y suero sanguíneo de bovinos lecheros en dos épocas en el Valle central de México. *Téc. Pecu. Méx.*; 45(3):329-344.
- Neathery MW, Pugh DG, Miller W J, Gentry RF, Wihitlock R H (1979): *Potassium toxicity in dairy calves*. *J. Dairy Sci.* **63**: 82-85.
- Nickerson TA (1978). Lactose. *Fundamentals of Dairy Chemistry*. BH Webb. AH Johnson. JA Alford (Eds). Avi. Publ. Co., Westport, CT. pp. 273-324.
- NRC (National Research Council) (1980): *Mineral Tolerance of Domestic Animals*, National Academic Sci, USA.
- NRC (National Research Council) (1989). Requirements of dairy cattle. 6th rev ed. National Academic Sci. Washington, DC, USA.
- NRC (National Research Council) (1996): *Nutrient Requirements of Beef Cattle*. 7th re ved., National Academic Press, USA
- NRC (National Research Council) (2001): *Requirements of dairy cattle*. Washington, DC., National Academic Press.
- NRC. (2005): *Mineral Tolerance of Animals*. 2 ed., The National Academies Press. USA.
- Puls R. (1994): *Minerals levels in animal health*. Diagnostic Data, Sherpa International, Canada.
- Pulss, R. (1988). *Mineral levels in animal health: dignostic data*. Sherpa International. clearbrook.
- Renner E. (1982): *Milch und Milchprodukte in der Esnährung des Menschen*, Gelsenkirchen/Volkswirtschaftl. Verlag, München, 4. Aufl.
- Rochinotti D. (1998): *Model components of forage-fed cattle systems: Energy expenditure of grazing cattle and prediction of intake in dairy cows*. Ph.D. Diss., Gainesville, USA.
- Rosas, V. A. (1999). *Diagnóstico del estado mineral en una explotación ovina en San Juan Teotihuacán, México*. Tesis Profesional Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México.
- Seynaeve, M., de Widle, R., Janssens, G. and de Smet, B. (1996). The influence of dietary salt level on wáter consumption, farrowing and reproductive performance of lactating sows. *Journal Animal Science* 74: 1047-1055.
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2013. Dirección de ganadería [En línea]. Disponible en www.siap.gob.mx. (revisado el 24 de agosto del 2014).
- Statistical Analisis System (SAS). (2002): Cary, NC, USA.
- Steel RGD, Torrie JH, Dickey DA. (1997): *Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach*. 3^a ed. McGraw-Hill Series in Probability and Statistics, USA.
- Suttle NF. (1991): *The interactions between copper, molybdenum and sulphur in ruminant nutrition*. *Annu. Rev. Nutr.* **11**: 121-140.

- Suttle NF. (2010): Mineral nutrition of livestock. 4^a ed. CABI. UK.
- Suttle, N. F. (1983). Assessing the mineral and trace element status of feeds. In: Proceedings of the Second Symposium of the International Network of Feed Information Centres, Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, UK, p. 211-237.
- Underwood EJ, Suttle NF (1999): *Mineral nutrition of livestock*. CABI. UK,
- Underwood EJ. (1997): *Trace elements in human and animal nutrition*, Academic Press, USA.
- Underwood EJ. (1981): *The mineral nutrition of Livestock*. London, Commonwealth agricultura Bureaux.
- Valdivia. (1979): Métodos de análisis de minerales para tejidos de plantas y animales, Gainesville, FL. USA.
- Valsta LM, Tapanainen H y Männistö S (2005). Meat fats in nutrition: a review. *Meat Sci.* 70: 525–530.
- Vieyra AR., Domínguez VIA, Olmos OG, Martínez MJF, Borquez GJL, Palacio NJ, Lugo de la Fuente JA, Morales AE. (2013): Perfil e interrelación mineral en agua, forraje y suero sanguíneo de bovinos durante dos épocas en la Huasteca Potosina, México. *Agrociencia* 47: 121-133.
- Vieyra-Alberto, R. (2012). Perfil mineral en suelo, agua, forraje y suero sanguíneo de bovinos de doble propósito de la Huasteca Potosina, México. Tesis de maestría. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México.
- Vite, A. A. (2002). Caracterización del Estado mineral en ganado lechero del rancho San Lorenzo, Huaquechula, Puebla. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Mexico. p. 81.
- Vrzgula L. (1990): Metabolic disorders and their prevention in farm animals. *In*: Leopold Vrzgula, Disorders in mineral metabolism. New York. Elsevier Sci. Publish Co USA.