

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN REGIONAL DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN ANIMAL



Comparación de efectos alcalinizantes del bicarbonato de sodio vs óxido de magnesio en bovinos

Por:

Diana Mendoza Hernández

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

Torreón, Coahuila, México
Junio 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN REGIONAL DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN ANIMAL

Comparación de efectos alcalinizantes del bicarbonato de sodio vs el óxido de magnesio en bovinos

Por:

Diana Mendoza Hernández

TESIS

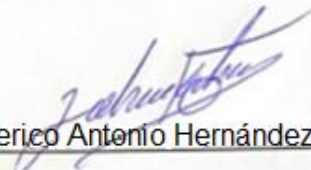
Que se somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito principal para obtener el título de:

MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

Aprobada por el comité de asesoría:


PhD. Juan David Hernández Bustamante

Presidente


MVZ. Federico Antonio Hernández Torres

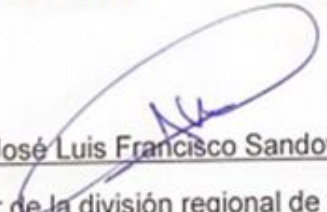
Vocal


MC. Jaime Isaias Romero Paredes Rubio

Vocal


Dra. María Guadalupe Sánchez Loera

Vocal Suplente


M.C. José Luis Francisco Sandoval Elías

Coordinador de la división regional de ciencia animal



Torreón, Coahuila, México
Junio 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN REGIONAL DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN ANIMAL

Comparación de efectos alcalinizantes del bicarbonato de sodio vs el óxido de magnesio en bovinos

Por:

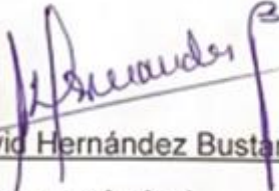
Diana Mendoza Hernández

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de

MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

Aprobada por el comité de asesoría


PhD. Juan David Hernández Bustamante

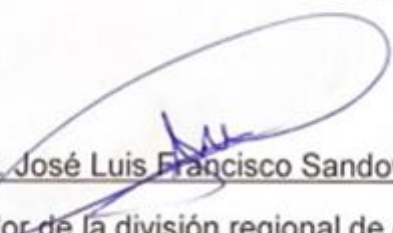
Asesor principal


MVZ. Federico Antonio Hernández Torres

Coasesor


MC. Jaime Isaias Romero Paredes Rubio

Coasesor


M.C. José Luis Francisco Sandoval Elias

Coordinador de la división regional de ciencia animal

Torreón, Coahuila, México
Junio 2025



AGRADECIMIENTOS

A Dios, por regalarme esta vida, por darme perfectas capacidades para disfrutarla, por permitirme sentir el aire, el sabor de un helado, y el calor del sol. Por ser mi base espiritual, y sostener mi fe.

Al PhD Bustamante, por brindarme la confianza para participar en este proyecto, por ser paciente, por apoyarme, y compartir conmigo sus conocimientos.

A mi ALMA MATER por cobijarme durante cinco años, por convertirse mi hogar, y hacerme coincidir con gente maravillosa que, a su tiempo, se convirtieron en amigos, para así, más tarde darme cuenta que ya eran familia.

A mis amigos, quienes hicieron de Narro y Torreón, un hogar, y ellos, se convirtieron en familia, gracias principalmente a Marina Loya, Mario Enrique Hermosillo Arzate, Leslye Medina, Orestes Lucio, Rosa Guillén, Patricia Soberón Nakasima y Mariana Durán, por ser mis amigos más presentes y apoyo fundamental.

DEDICATORIAS

Al universo, a la vida y a Dios, por hacer que las cosas sean exactamente como deben ser; por ponerme en los momentos y situaciones adecuadas para convertirme en la mujer que hoy soy.

A mis papis, Isela y Manuel, por dejarme vivir la vida al máximo, por permitirme tomar mis propias decisiones, apoyarlas y hacerme una mujer fuerte, independiente y capaz. Por regalarme una vida llena de cosas maravillosas, por darme la dicha de poder elegir mi propio camino y permitirme forjarlo. Por darme amor a manos llenas y por ser la pieza principal en este sueño materializado. Esto es tan suyo como mío.

A Itzita, mi hermana y mejor amiga, por darme apoyo incondicional en cada etapa de mi vida, por ser confidente y cómplice. Por cada regaño que me hizo entrar en razón, por cada palabra de consuelo y cada palabra de afirmación. Por ser una compañera excepcional, por ser amor, por ser cariño, por ser mi pilar más importante y pieza fundamental en este logro.

A mi mamá Julia, por ser la estrella que me guía desde el más allá. Porque cuando estuvo en este plano terrenal, me dio amor, me dio ternura, me dio comprensión. Porque me amó en todas y cada una de las etapas de mi vida, por brindarme un hogar en cualquier momento, y amarme incondicionalmente.

A Maverick, por ser felicidad, amor, pelitos y compañía; por llegar a nuestras vidas y hacerlas más divertidas.

A Java, por ser apoyo durante el experimento, por ser amor, amigo y compañero, por compartir conmigo incluso diferentes etapas de este experimento, y caminar conmigo durante este proceso.

RESUMEN

La producción animal moderna, especialmente en bovinos, requiere optimizar la eficiencia alimenticia mediante dietas de alta densidad energética, lo que puede provocar fluctuaciones en el pH ruminal y desencadenar acidosis, un trastorno que afecta negativamente la salud y productividad del animal. Para prevenir este desequilibrio, se utilizan buffers o tampones ruminales, sustancias que estabilizan el pH del rumen contrarrestando la acidez generada durante la fermentación.

El sistema digestivo de los rumiantes, con su compartimento principal de fermentación —el retículo-rumen—, alberga una microbiota que fermenta la fibra y libera ácidos grasos volátiles (AGV), la principal fuente de energía para el animal. Sin embargo, la rápida fermentación de carbohidratos concentrados puede superar la capacidad natural de tamponamiento proporcionada por la saliva, disminuyendo el pH y afectando la digestión, la síntesis proteica microbiana y la absorción de nutrientes.

En este contexto, el marco teórico se enfoca en dos de los buffers más usados y estudiados: el bicarbonato de sodio (NaHCO_3) y el óxido de magnesio (MgO). El bicarbonato de sodio destaca por su acción rápida y alta solubilidad, neutralizando ácidos de forma inmediata, aunque su efecto es de corta duración y aporta sodio a la dieta. El óxido de magnesio ofrece un efecto tamponante más lento pero prolongado, además de aportar magnesio, un mineral esencial, aunque su eficacia depende de su origen y procesamiento.

Compárelo con nosotros

Mantener un pH adecuado asegura la actividad óptima de la microbiota fibrolítica, mejora la digestión de la fibra, la absorción de AGV y la síntesis de proteínas microbianas, resultando en mayor disponibilidad energética y nutricional para el bovino. Además, reduce riesgos de acidosis clínica y subclínica, disminuye problemas de salud secundarios y mejora la eficiencia productiva.

Este marco teórico ofrece una base sólida para que profesionales y productores elijan y manejen estratégicamente buffers ruminales, optimizando la salud ruminal, previniendo trastornos metabólicos y promoviendo la sostenibilidad y rentabilidad en la producción bovina.

Palabras clave: pH, Acidosis ruminal, Alcalinizante, Neutralización, Buffers, Tamponamiento

Índice

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIAS	ii
RESUMEN.....	iii
INTRODUCCIÓN.....	1
MARCO TEÓRICO	2
Concepto y función de los buffers en rumiantes	3
Bicarbonato de sodio: características y mecanismo de acción	10
Óxido de magnesio: propiedades y mecanismo de acción	16
Comparación del bicarbonato de sodio y óxido de magnesio como buffers ruminales.....	23
OBJETIVO.....	33
HIPÓTESIS	34
MATERIALES Y MÉTODOS	35
RESULTADOS.....	36
ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
DISCUSIÓN.....	38
CONCLUSIONES	39
Referencias	40

INTRODUCCIÓN

La acidosis ruminal es uno de los trastornos metabólicos más frecuentes y relevantes en los sistemas de producción intensiva de rumiantes, especialmente en bovinos. Este desequilibrio ácido-base del medio ruminal es consecuencia directa del uso de dietas con alta proporción de concentrados de rápida fermentación, que generan grandes cantidades de ácidos grasos volátiles y superan la capacidad fisiológica de neutralización del animal. En este contexto, la suplementación con agentes tamponantes se ha consolidado como una estrategia nutricional efectiva para prevenir y controlar los efectos negativos de esta condición, mejorando tanto la salud ruminal como el desempeño productivo.

Entre los tamponantes más utilizados se encuentra el bicarbonato de sodio (NaHCO_3), una sal derivada del ácido carbónico con alta solubilidad y rápida acción, que permite neutralizar los protones libres (H^+) en el rumen, estabilizando así el pH. Su mecanismo de acción se basa en la participación del ion bicarbonato (HCO_3^-) en el sistema fisiológico de regulación ácido-base, lo que le otorga un papel protagónico en la prevención de la acidosis subclínica (SARA) y clínica. Además, al favorecer un entorno ruminal más estable, promueve la actividad microbiana benéfica, la digestibilidad de la fibra, la síntesis de proteína microbiana y la producción de precursores lácteos como el acetato.

En paralelo, el óxido de magnesio (MgO) representa otra alternativa como agente alcalinizante en la dieta de rumiantes. A diferencia del bicarbonato, su efecto tamponante es más lento y sostenido, debido a su menor solubilidad y a que requiere una reacción previa para liberar iones capaces de neutralizar el medio. Sin embargo, su uso combinado con bicarbonato ha demostrado beneficios complementarios, especialmente en situaciones donde se busca una acción tamponante más prolongada.

Dado el impacto productivo y sanitario que representa la acidosis ruminal, y la necesidad de estrategias prácticas y efectivas para su manejo, el presente trabajo tiene como objetivo analizar y comparar el efecto alcalinizante del bicarbonato de sodio frente al óxido de magnesio en bovinos. A través de una revisión integral de literatura y la interpretación de resultados experimentales, se busca aportar evidencia que oriente el uso racional de estos aditivos, de acuerdo con las condiciones específicas de manejo y alimentación en los sistemas ganaderos actuales.

MARCO TEÓRICO

La producción animal moderna, especialmente en el sector de rumiantes como los bovinos, se enfrenta a la constante necesidad de optimizar la eficiencia alimenticia y maximizar el rendimiento productivo. Esto ha impulsado la adopción generalizada de dietas de alta densidad energética, caracterizadas por una elevada proporción de carbohidratos de fermentación rápida, como almidones y azúcares presentes en los concentrados. Si bien estas formulaciones son esenciales para cubrir las altas demandas de energía de animales en lactación o engorde intensivo, también imponen un desafío considerable al delicado equilibrio del ecosistema ruminal. La rápida fermentación de estos sustratos genera una producción masiva y acelerada de ácidos grasos volátiles (AGV), la principal fuente de energía para el rumiante. Sin embargo, cuando la tasa de producción de estos ácidos supera la capacidad natural de neutralización del rumen (principalmente a través de la saliva) y la velocidad de absorción a través de la pared ruminal, el pH del medio desciende drásticamente.

Esta caída del pH, conocida como acidosis ruminal, puede manifestarse en formas agudas o, más comúnmente, subclínicas (SARA). La acidosis, incluso en su forma subclínica, tiene consecuencias perjudiciales significativas: altera la composición y actividad de la microbiota ruminal, perjudicando especialmente a las bacterias celulolíticas sensibles al pH bajo, lo que reduce la digestibilidad de la fibra; disminuye el consumo voluntario de alimento; incrementa el riesgo de problemas de salud secundarios como laminitis, abscesos hepáticos y desplazamientos de abomaso; y, en última instancia, merma la eficiencia productiva (leche o carne) y la rentabilidad de la explotación. Para mitigar estos efectos negativos y mantener la homeostasis ruminal, el uso de aditivos alimentarios con capacidad tamponante o alcalinizante, comúnmente denominados buffers ruminales, se ha convertido en una herramienta de manejo nutricional indispensable.

Este marco teórico se dedica a profundizar en el conocimiento de los buffers ruminales, enfocándose de manera particular en dos de los compuestos más ampliamente utilizados y estudiados en la nutrición de bovinos: el bicarbonato de sodio (NaHCO_3) y el óxido de magnesio (MgO). El documento inicia estableciendo las bases conceptuales, explicando qué son los buffers, cómo funcionan dentro del complejo ambiente ruminal para resistir cambios en el pH mediante la neutralización de protones, y por qué su adición exógena es frecuentemente necesaria para complementar los mecanismos fisiológicos de tamponamiento del propio animal, como la secreción salival, que a menudo resultan insuficientes bajo regímenes alimenticios intensivos.

Posteriormente, la revisión se estructura en secciones dedicadas a cada uno de estos compuestos clave. Se examina primero el bicarbonato de sodio, detallando sus propiedades químicas, su mecanismo de acción basado en el sistema

bicarbonato/ácido carbónico, su característica acción rápida derivada de su alta solubilidad, sus ventajas en la prevención de caídas bruscas de pH, pero también sus limitaciones como su corta duración de efecto y el aporte de sodio a la dieta. Se abordan también consideraciones prácticas sobre su dosificación y métodos de administración. Seguidamente, se analiza el óxido de magnesio, destacando su doble funcionalidad como fuente concentrada del macromineral esencial magnesio y como agente alcalinizante. Se profundiza en su mecanismo de acción buffer, su cinética de reacción más lenta pero más prolongada, la crucial influencia de su origen y procesamiento (reactividad) en su eficacia, y se discuten aspectos como la palatabilidad, el potencial efecto laxante y su contribución al balance catión-anión de la dieta.

El componente central de este marco teórico es la sección final, que ofrece una comparación directa y detallada entre el bicarbonato de sodio y el óxido de magnesio. Este análisis contrastivo se articula en torno a criterios fundamentales para la selección y uso de estos aditivos: la velocidad de inicio de su acción tamponante, la duración o persistencia de su efecto en el rumen, el impacto específico que cada uno tiene sobre las fluctuaciones del pH ruminal a lo largo del día, una evaluación de la relación costo-beneficio que considera no solo el precio sino también la eficacia y los beneficios adicionales (como el aporte de Mg), y su idoneidad o aplicación preferente en función de distintos tipos de dietas (altas en concentrado vs. ricas en forraje) y sistemas de alimentación (componentes separados vs. ración total mezclada).

En conjunto, este marco teórico busca compilar y sintetizar el conocimiento actual sobre el bicarbonato de sodio y el óxido de magnesio como buffers ruminales, proporcionando una comprensión clara de sus mecanismos, ventajas, limitaciones y diferencias clave. El propósito es ofrecer una base sólida de información que permita a profesionales de la nutrición animal y productores tomar decisiones estratégicas y fundamentadas sobre la selección y el manejo de estos aditivos, con el fin de optimizar la salud del rumen, prevenir trastornos metabólicos y mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la producción bovina.

Concepto y función de los buffers en rumiantes

Los rumiantes, a diferencia de otras especies, poseen un sistema digestivo complejo que incluye varios compartimentos antes de llegar al estómago glandular, lo cual les permite aprovechar compuestos fibrosos que no son digeribles por la mayoría de los mamíferos (Liaudat et al., 2024). Dentro de este sistema, el retículo-rumen se erige como la cámara de fermentación principal, donde ocurre la actividad microbiana más intensa y donde también se generan importantes fluctuaciones en el pH. Los llamados buffers o tampones ruminales, como el bicarbonato de sodio y el óxido de magnesio, desempeñan un papel crucial al estabilizar este pH, contrarrestando los ácidos producidos durante la

fermentación de los carbohidratos y de otras fracciones de la dieta (Bea y Udina, 2022).

La presencia de un ambiente estable en el rumen asegura que los microorganismos puedan llevar a cabo la fermentación de manera eficiente. En condiciones de acidez moderada, tanto bacterias como protozoos y hongos prosperan, descomponiendo la fibra y liberando ácidos grasos volátiles. Estos ácidos, sin embargo, tienden a disminuir el pH. Cuando dicha disminución se vuelve excesiva, se produce una alteración en la proporción de poblaciones microbianas, afectando no solo la digestión de la fibra, sino también la síntesis de proteínas microbianas y, por ende, la disponibilidad de nutrientes para el bovino. Es en este punto donde la adición de tampones exógenos se vuelve indispensable para prevenir el deterioro de la salud ruminal y el descenso de la productividad.

Según Fernández (2021), la saliva del rumiante contiene de manera natural cantidades considerables de bicarbonato, lo que representa un primer mecanismo de defensa contra la acumulación de ácidos. Sin embargo, en regímenes de alta producción con dietas muy concentradas en cereales y almidones, la velocidad de fermentación supera la capacidad de neutralización endógena. Añadir sustancias tampón en la ración contribuye a mantener el pH dentro de un rango óptimo, que generalmente oscila entre 6,0 y 7,0 en el retículo-rumen. El bicarbonato de sodio, por su parte, destaca por su efecto rápido e inmediato al reaccionar con los ácidos presentes, mientras que el óxido de magnesio ejerce una acción más prolongada, generando mayor estabilidad a lo largo del día (Udina, 2021).

La distinción entre la velocidad de acción y la duración del efecto es un factor clave al evaluar la utilidad de cada buffer. Por un lado, el bicarbonato actúa con rapidez y puede contrarrestar caídas súbitas del pH. Por otro lado, el óxido de magnesio provee un efecto que, aunque menos inmediato, tiende a sostener la neutralización a lo largo de un periodo más extenso. De este modo, la decisión de cuál buffer utilizar, o incluso la posibilidad de combinarlos, puede basarse en las características de la dieta, la condición fisiológica del animal y los objetivos productivos. Además, la integración de ciertos minerales marinos también se ha planteado como alternativa eficaz y complementaria a los tampones convencionales.

Bea y Udina (2022) señalan que la acción alcalinizante del óxido de magnesio puede ser hasta cuatro veces superior a la del bicarbonato de sodio en determinadas condiciones ruminales. Esta mayor capacidad de neutralizar ácidos se vincula con la solubilidad específica del óxido de magnesio y su modo de liberar iones que capturan protones libres, elevando el pH. No obstante, la efectividad real depende también de la biodisponibilidad y del tiempo de residencia en el rumen. Otros factores, como el origen (terrestre o marino),

pueden modificar el grado de solubilidad en pH cercanos a 6,0. Por eso, conviene analizar la calidad del suplemento para asegurar que realmente cumpla con su función y aporte un beneficio notable en la estabilización del pH.

Mantener un pH adecuado se traduce en múltiples beneficios. Primero, la población microbiana fibrolítica permanece más activa, lo que incrementa la degradación de la fibra y la disponibilidad de ácidos grasos volátiles como fuente energética para el animal. Segundo, se reduce el riesgo de acidosis subclínica y clínica, las cuales pueden desencadenar disminución del apetito, dolor ruminal, e incluso laminitis. Tercero, se promueve una mejor conversión alimenticia, dado que el bovino aprovecha más eficientemente los nutrientes ingeridos. Estos aspectos adquieren relevancia en sistemas de alta demanda productiva, donde cualquier desbalance ruminal repercute en la salud y rendimiento del ganado. Por ende, la aplicación de un buffer apropiado constituye una práctica preventiva y correctiva en muchos escenarios.

Liaudat et al. (2024) explican que el papel del buffer trasciende la simple neutralización de ácidos. También influye en la absorción de determinados nutrientes. En un ambiente ácido, las vellosidades y papilas ruminales pueden dañarse o retraerse, lo que limita la superficie de absorción. Al proteger el epitelio ruminal, el buffer mejora la captación de ácidos grasos volátiles y otros metabolitos, asegurando que lleguen de manera eficiente al torrente sanguíneo. Este fenómeno resulta especialmente útil en bovinos lecheros de alta producción, donde la demanda energética es elevada. Cuanto mejor funcione la absorción de los AGV, mayor será la disponibilidad energética para la síntesis de leche, la ganancia de peso o la gestación, según el caso.

Un entorno ruminal estable también contribuye a la eficiencia en la síntesis de proteínas microbianas. Las bacterias, protozoos y hongos del rumen no solo digieren la fibra, sino que también transforman compuestos nitrogenados en proteínas de alto valor biológico. Esto se traduce en un suministro constante de aminoácidos esenciales para el bovino, reduciendo la dependencia de las proteínas dietarias de alta calidad. Así, la integración de tampones facilita el crecimiento y la actividad de las poblaciones microbianas, garantizando mayor estabilidad en el paso de nutrientes a lo largo del tubo digestivo. Todo ello culmina en una mejor salud general, ya que se minimizan los episodios de disbiosis que podrían desencadenar enfermedades metabólicas, caída en la producción de leche o pérdidas en el incremento de peso.

De acuerdo con Udina (2021), el interés por los minerales marinos como fuentes buffers ha ido en aumento. Estos productos, obtenidos de algas calizas o depósitos sedimentarios marinos ricos en calcio y magnesio, presentan una elevada solubilidad en el rango de pH ruminal. Cuando se habla de sustancias como el *Lithothamnium calcareum*, se hace referencia a matrices minerales con capacidad de neutralizar el exceso de protones y estabilizar el pH, apoyando así

la función microbiana. Además, se ha demostrado que contribuyen a reducir la emisión de metano, pues un pH más estable favorece vías fermentativas más eficientes. Este doble beneficio (eficiencia productiva y sostenibilidad ambiental) hace que el estudio de estas fuentes marinas sea particularmente atractivo en la ganadería moderna.

La idea de un buffer “dual” que aporte magnesio y calcio en proporciones adecuadas responde a la necesidad de cubrir distintas aristas de la fisiología ruminal. Por un lado, el calcio aporta estabilidad estructural y puede actuar como tampón cuando se encuentra en formas solubles a pH cercanos a 6. Por otro lado, el magnesio, además de su rol en la neutralización de ácidos, participa en procesos metabólicos y en la prevención de enfermedades como la hipomagnesemia. El resultado final es un sistema digestivo mejor equilibrado, con menor incidencia de acidosis y un mejor aprovechamiento de nutrientes. Este enfoque sinérgico coincide con la tendencia de formular raciones más segmentadas, donde cada aditivo cumple una función específica.

Fernández (2021) hace hincapié en el hecho de que la selección de un buffer debe basarse en la composición de la dieta y el nivel de producción deseado. En vacas lecheras de alta producción, se observan dietas concentradas en cereales, ensilados de maíz y subproductos que generan una fermentación rápida, aumentando el riesgo de acidosis subclínica. En tales circunstancias, el bicarbonato de sodio puede ayudar a neutralizar picos de acidez repentinos, mientras que el óxido de magnesio ofrece una acción más prolongada y un soporte constante a lo largo del día. Asimismo, la cantidad de fibra efectiva en la ración influye en la producción de saliva y, por ende, en la cantidad de bicarbonato endógeno que ingresa al rumen.

Cuando la fibra efectiva es limitada, la rumia se reduce, y con ello la secreción salival, disminuyendo así la protección natural contra la acidificación. En estos casos, la adición de buffers externos se vuelve decisiva para mantener la homeostasis. Otro punto a valorar es el costo relativo de cada buffer y la forma de incluirlo en la ración. Algunos productores optan por mezclar el bicarbonato con el concentrado, mientras que otros prefieren administrarlo por libre acceso. En el caso del óxido de magnesio, muchas veces se combina con otros suplementos minerales para aportar magnesio y otros oligoelementos. Sea cual sea la modalidad elegida, el objetivo común es conservar la salud ruminal y evitar los trastornos asociados a la acidificación extrema.

Bea y Udina (2022) subrayan que, al hablar de buffers, no se puede ignorar la dinámica de la fermentación ruminal. Los carbohidratos no estructurales, como almidones y azúcares simples, fermentan más rápido y liberan ácidos de manera acelerada. En cambio, los carbohidratos estructurales, como la celulosa y hemicelulosa, fermentan de forma más lenta, liberando ácido acético principalmente. Estos patrones de producción de ácidos determinan la magnitud

de la caída del pH. Por ello, la inclusión de tampones se vuelve más necesaria en dietas con elevado contenido de concentrados, donde la generación de ácido propiónico y láctico puede ser abrumadora si no existe un sistema amortiguador que controle los picos de acidificación.

La velocidad con que se digieren los distintos carbohidratos y proteínas del alimento afecta también la producción de gases, particularmente dióxido de carbono y metano. Un pH demasiado bajo no solo altera la flora ruminal, sino que promueve rutas de fermentación menos eficientes y con mayor producción de subproductos perjudiciales. Al garantizar un pH estable, el buffer permite que las rutas fermentativas se orienten hacia la producción de ácidos grasos volátiles de manera controlada. Por consiguiente, además de prevenir la acidosis, se logra una menor fluctuación en la producción de gas, lo que es relevante tanto para la salud del animal como para las consideraciones ambientales relacionadas con la emisión de metano en la ganadería.

Liaudat et al. (2024) resaltan que el uso de tampones cobra especial relevancia en las primeras semanas de lactancia, etapa en la cual las vacas enfrentan un estrés metabólico considerable al aumentar drásticamente su producción lechera. En este periodo, la demanda de energía puede motivar a los productores a incrementar la proporción de concentrados en la dieta para sostener altos niveles de producción. Sin embargo, este ajuste alimenticio expone al animal a mayores riesgos de acidosis, lo cual podría comprometer la ingesta y, por ende, la producción láctea a mediano y largo plazo. El aporte de buffers en la ración durante esta etapa ayuda a equilibrar la velocidad de fermentación y a conservar la salud ruminal.

La dimensión preventiva es tal vez el aspecto más valorado del uso sistemático de buffers. En numerosos casos, los signos de acidosis subclínica no son evidentes de inmediato. El animal puede presentar un consumo de alimento irregular, cambios en la consistencia de las heces o una ligera disminución en la producción lechera sin que el productor perciba un problema grave. Con el tiempo, estas señales pueden escalar hasta complicaciones de mayor magnitud, incluyendo la aparición de laminitis o desplazamientos de abomaso. Al incorporar tampones desde el inicio de la lactancia o en momentos críticos de la curva de producción, se reduce significativamente la probabilidad de que la acidosis subclínica progrese a formas más severas.

El enfoque de utilizar bicarbonato y óxido de magnesio de manera complementaria se respalda en las observaciones de varios trabajos (Fernández, 2021; Bea y Udina, 2022). Mientras que el bicarbonato es efectivo para neutralizar picos de acidez súbitos debido a su rápida disolución y reacción, el óxido de magnesio prolonga el efecto tampón a lo largo del día. Además, se considera que el magnesio es un mineral esencial en el metabolismo energético del rumiante y en la transmisión nerviosa, por lo que su aporte regular puede

contribuir a evitar patologías como la hipomagnesemia, especialmente en vacas lecheras de alta producción y bovinos que pastorean forrajes con alto contenido de potasio.

Cada uno de estos tampones también puede tener interacciones con otros nutrientes presentes en la ración. Por ejemplo, el bicarbonato de sodio, al aportar sodio, puede modificar ligeramente el balance catión-anión en la dieta, algo de suma importancia cuando se diseñan raciones para vacas en transición. Asimismo, el óxido de magnesio se solubiliza en función del pH ruminal y de la presencia de otros cationes, lo que implica que su rendimiento puede variar según la composición específica de la dieta. Estas consideraciones refuerzan la idea de que la formulación de raciones con buffers debe hacerse de manera integral, evaluando tanto los nutrientes aportados como las condiciones productivas y el estado fisiológico de los animales.

Udina (2021) resalta la creciente atención que han recibido los minerales marinos en la última década, no solo en Europa, sino a escala global. Se ha observado que fuentes como el *Lithothamnium calcareum* proporcionan una liberación gradual de calcio y magnesio a pH ruminal, acompañada de oligoelementos como yodo y potasio. Esta complejidad mineral favorece un efecto tampón prolongado y, al mismo tiempo, aporta micronutrientes valiosos para la salud del animal. Además, algunos estudios indican que se podría reducir la emisión de metano al estabilizar el pH y optimizar las vías fermentativas. De esta forma, el uso de minerales marinos no solo se enfoca en prevenir trastornos ruminales, sino en mejorar la sostenibilidad del sistema ganadero.

El potencial de los minerales marinos se alinea con la búsqueda de estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero en la producción pecuaria. Si bien la prioridad inmediata para el ganadero es la salud ruminal y la productividad, cada vez cobra mayor importancia el impacto ambiental de las prácticas ganaderas. Un rumen sano y eficiente no solo convierte mejor los nutrientes en carne o leche, sino que también reduce subproductos indeseados como el metano. En este sentido, la elección de un buffer o una combinación de tampones debe contemplar no solo la rentabilidad y la facilidad de manejo, sino también las implicaciones a largo plazo en términos de bienestar animal y sustentabilidad.

Desde la perspectiva de la fisiología ruminal descrita por Liaudat et al. (2024), el mantenimiento del pH en rangos adecuados implica favorecer la actividad de las bacterias celulolíticas, responsables de la degradación de la fracción fibrosa de la dieta. Cuando el pH cae por debajo de 6,0, estas bacterias experimentan una drástica reducción en su capacidad de multiplicación y acción enzimática. Esto, a su vez, reduce la producción de ácido acético, uno de los principales ácidos grasos volátiles que influyen en la síntesis de grasa láctea. Por lo tanto, la presencia de buffers permite conservar la fibra efectiva en el rumen y promover un balance adecuado en la producción de ácido acético, propiónico y butírico.

Aunque se suelen citar más los efectos de la acidosis sobre la producción de grasa láctea, su impacto en la salud general del animal es igualmente significativo. Cuando el pH se desequilibra, la pared del rumen puede verse comprometida, aumentando el riesgo de abscesos hepáticos o de endotoxemias derivadas de la muerte masiva de bacterias gramnegativas. Así, la importancia de los buffers no solo reside en mantener estable la producción láctea, sino también en garantizar la integridad del rumen y prevenir complicaciones infecciosas o inflamatorias. Todo ello repercute en la longevidad del animal y en la rentabilidad de la explotación, puesto que un bovino con una función ruminal sana es más resistente a enfermedades y mantiene un alto rendimiento.

Bea y Udina (2022) también mencionan el rol modulador que ejerce el balance electrolítico en la efectividad de los buffers, pues la presencia de iones como el sodio, potasio, magnesio y calcio influye sobre las rutas metabólicas de los microorganismos ruminales. Un adecuado balance catión-anión garantiza que la fermentación sea ordenada y no derive en una acidificación excesiva. En este contexto, la evaluación de la concentración de cationes en el agua de bebida, la calidad de los forrajes y la suplementación extra de sales tamponantes adquiere particular relevancia. Todo ello se integra en la formulación de dietas capaces de sostener la producción intensiva sin sacrificar la salud gastrointestinal ni los índices reproductivos.

La selección de la fuente de magnesio, el tipo de bicarbonato o incluso la decisión de incluir minerales marinos se ajusta a las condiciones particulares de cada explotación: tamaño del hato, disponibilidad de forraje, fase de lactancia, objetivos de producción y recursos económicos. Si bien la literatura científica converge en que ambos compuestos (bicarbonato de sodio y óxido de magnesio) son beneficiosos como tampones, la proporción a suministrar y la oportunidad de administrarlos pueden variar. Algunas explotaciones prefieren introducirlos gradualmente durante el período de transición, otras los mantienen de forma constante en el alimento balanceado, y hay quienes ajustan la dosis según el comportamiento del pH ruminal medido a través de técnicas como la evaluación de fluidos ruminales o mediciones con bolos ruminales electrónicos.

Finalmente, al integrar los aportes de Fernández (2021), Bea y Udina (2022), Liaudat et al. (2024) y Udina (2021), queda claro que la función de los buffers en rumiantes va más allá de la simple neutralización de la acidez. Actúan como elementos reguladores de la fermentación, promueven la salud de la pared ruminal, facilitan el aprovechamiento de nutrientes, y reducen la incidencia de trastornos metabólicos. La disyuntiva entre bicarbonato de sodio y óxido de magnesio se resuelve considerando la velocidad y persistencia de sus efectos, así como el origen y la biodisponibilidad de cada fuente. En última instancia, la elección de un buffer o la combinación de varios dependerá de las metas productivas, el tipo de dieta y la búsqueda de un sistema ganadero sustentable y eficiente.

Bicarbonato de sodio: características y mecanismo de acción

El bicarbonato de sodio (NaHCO_3), comúnmente conocido como bicarbonato sódico o bicarbonato de sosa, es un compuesto químico de gran relevancia en diversos campos, incluyendo la biología, la medicina humana y la medicina veterinaria. Su naturaleza química le confiere propiedades únicas que lo hacen fundamental en sistemas biológicos, particularmente en la regulación del equilibrio ácido-base. En el ámbito de la producción animal, específicamente en rumiantes, el bicarbonato de sodio ha ganado notoriedad como un aditivo alimenticio estratégico, empleado principalmente por su capacidad tamponante o amortiguadora en el rumen. Este texto se adentrará en las características químicas y el mecanismo de acción del bicarbonato de sodio, con un énfasis especial en su aplicación en la nutrición de rumiantes para mitigar los efectos de la acidosis ruminal, un trastorno metabólico frecuente en sistemas de producción intensiva. Se explorarán sus propiedades, ventajas, potenciales efectos adversos derivados de un uso inadecuado y las recomendaciones generales de dosificación, integrando la información derivada de estudios clave en nutrición y fisiología animal (Bodas et al., 2009; Martínez y Oliver, 2016; Mendoza et al., 2022; Castillo y Macías, 2022).

Desde una perspectiva química, el bicarbonato de sodio es una sal que resulta de la reacción entre una base fuerte, el hidróxido de sodio (NaOH), y un ácido débil, el ácido carbónico (H_2CO_3). Su fórmula molecular es NaHCO_3 . En solución acuosa, como el fluido ruminal o los fluidos corporales, el bicarbonato de sodio se disocia fácilmente liberando iones sodio (Na^+) e iones bicarbonato (HCO_3^-). Esta alta solubilidad y la inmediata disponibilidad del ion bicarbonato son cruciales para su función biológica y farmacológica. El ion bicarbonato es el componente clave del principal sistema tampón fisiológico del organismo, el sistema bicarbonato/ácido carbónico ($\text{HCO}_3^-/\text{H}_2\text{CO}_3$), que opera según el equilibrio: $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$. Este sistema es vital para mantener el pH sanguíneo y de otros fluidos corporales dentro de rangos estrechos compatibles con la vida, neutralizando tanto ácidos como bases que puedan acumularse (Martínez y Oliver, 2016; Bodas et al., 2009).

La capacidad del ion bicarbonato para aceptar protones (H^+) y formar ácido carbónico, el cual a su vez se descompone rápidamente en agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2) -este último fácilmente eliminable por la respiración o eructación en rumiantes-, lo convierte en un agente alcalinizante y un tampón eficaz. Su naturaleza como base débil le permite reaccionar con ácidos fuertes, neutralizándolos y minimizando las fluctuaciones del pH. Esta propiedad es explotada terapéuticamente en medicina humana y veterinaria para corregir estados de acidosis metabólica y, como se detallará más adelante, para estabilizar el ambiente ruminal en rumiantes sometidos a dietas acidogénicas (Martínez y Oliver, 2016; Bodas et al., 2009).

El rumen es un órgano complejo de fermentación presente en los rumiantes (bovinos, ovinos, caprinos, entre otros) que alberga una vasta y diversa población de microorganismos (bacterias, protozoarios, hongos) anaerobios. Estos microorganismos son esenciales para la digestión de los componentes fibrosos de la dieta (celulosa, hemicelulosa) que los animales monogástricos no pueden aprovechar eficientemente. La fermentación ruminal produce ácidos grasos volátiles (AGV) -principalmente acetato, propionato y butirato- que son la principal fuente de energía para el rumiante. Además, los microorganismos sintetizan proteína de alto valor biológico a partir de fuentes de nitrógeno de la dieta (incluyendo nitrógeno no proteico como la urea) y vitaminas del complejo B (Mendoza et al., 2022; Castillo y Macías, 2022).

El mantenimiento de un pH ruminal estable, generalmente entre 6.0 y 7.0, es crucial para la salud y actividad de la microbiota ruminal, especialmente para las bacterias celulolíticas, que son sensibles a ambientes ácidos. Sin embargo, en los sistemas de producción intensiva, es común el uso de dietas con altas proporciones de concentrados (ricos en almidones y azúcares de fermentación rápida) para satisfacer las altas demandas energéticas de animales de alta producción (leche o carne). La rápida fermentación de estos carbohidratos produce grandes cantidades de AGV en un corto período, superando la capacidad natural de tamponamiento del rumen (principalmente por la saliva rica en bicarbonato y fosfatos) y la capacidad de absorción de los AGV a través de la pared ruminal. Esto conduce a una caída significativa del pH ruminal, una condición conocida como acidosis ruminal (Bodas et al., 2009; Mendoza et al., 2022).

La acidosis ruminal puede manifestarse de forma aguda ($\text{pH} < 5.0\text{-}5.2$) o subclínica (SARA, por sus siglas en inglés, Sub-Acute Ruminant Acidosis, pH entre 5.2 y 5.8 mantenido por periodos prolongados). La acidosis aguda es una emergencia médica grave, mientras que la SARA, más común, tiene efectos insidiosos pero significativos sobre la salud y la productividad animal, incluyendo reducción del consumo de alimento, disminución de la digestibilidad de la fibra, laminitis, abscesos hepáticos y reducción de la producción de leche o ganancia de peso (Mendoza et al., 2022; Bodas et al., 2009). El manejo nutricional, incluyendo el uso de tamponantes, es clave para prevenir estos problemas.

El bicarbonato de sodio se utiliza ampliamente en la nutrición de rumiantes como un agente tamponante exógeno para contrarrestar la caída del pH ruminal asociada a dietas ricas en concentrados. Su mecanismo de acción se basa en su capacidad para neutralizar el exceso de ácidos (protones, H^+) producidos durante la fermentación rápida de carbohidratos. Al disociarse en el fluido ruminal, libera iones bicarbonato (HCO_3^-) que reaccionan con los protones según la ecuación: $\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$. El ácido carbónico (H_2CO_3) formado es inestable y se descompone rápidamente en agua y dióxido de carbono ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$). El CO_2 gaseoso es eliminado del rumen a través de la eructación, evitando

así una acumulación adicional de ácido (Bodas et al., 2009; Martínez y Oliver, 2016).

Bach et al. (2018) observaron que la suplementación con MgO permitió mantener un pH ruminal más estable cuando se añadió cebada, comparado con el grupo control y el grupo suplementado solo con bicarbonato, evidenciado en una mayor proporción de tiempo por encima del umbral de pH 5.8 durante el reto

Una de las características más valoradas del bicarbonato de sodio como tampón ruminal es su acción rápida. Esto se debe a su alta solubilidad en el líquido ruminal y la consecuente disponibilidad inmediata de los iones bicarbonato para reaccionar con los ácidos. A diferencia de otros tampones como el óxido de magnesio, que requiere una reacción previa para ser efectivo y tiene una acción más lenta y prolongada, el bicarbonato de sodio actúa casi instantáneamente al entrar en contacto con el ambiente ácido, proporcionando un alivio rápido del descenso del pH. Esta acción inmediata es particularmente útil durante los picos de producción de ácido que ocurren típicamente después de la ingestión de grandes cantidades de concentrado (Bodas et al., 2009; Harding, 1995, citado por Castillo y Macías, 2022).

El uso de bicarbonato de sodio, junto con otros tamponantes como el óxido de magnesio, se considera una estrategia efectiva para prevenir la caída del porcentaje de grasa en la leche en vacas que reciben dietas con alta proporción de concentrados, ya que ayuda a mantener un pH ruminal más favorable para la producción de acetato, precursor de la grasa láctea (Harding, 1995, citado por Castillo y Macías, 2022). Además, al estabilizar el pH ruminal, se favorece un ambiente más adecuado para la actividad de los microorganismos, incluyendo aquellos responsables de la digestión de la fibra y la síntesis de proteína microbiana, contribuyendo a una mejor eficiencia general de la fermentación ruminal (Bodas et al., 2009; Mendoza et al., 2022).

La inclusión de tamponantes como el bicarbonato de sodio es especialmente relevante en dietas con una alta proporción de concentrado respecto al forraje, como las utilizadas en la finalización intensiva de ovinos y bovinos o en vacas lecheras de alta producción. La relación forraje:concentrado es un factor crítico que impacta la salud ruminal; relaciones que se acercan a 40:60 o incluso menores requieren a menudo el soporte de agentes tamponantes para prevenir la acidosis y mantener la producción y la salud animal (Mendoza et al., 2022; Bodas et al., 2009).

La principal ventaja de la suplementación con bicarbonato de sodio en rumiantes alimentados con dietas altas en concentrado es la atenuación de la acidosis ruminal, tanto clínica como subclínica. Al mantener el pH ruminal en un rango más fisiológico, se promueve un ambiente más estable para la microbiota ruminal, lo cual puede tener efectos positivos en la digestión y la salud general del animal (Bodas et al., 2009; Mendoza et al., 2022).

Diversos estudios han evaluado el impacto de la suplementación con bicarbonato de sodio en el comportamiento productivo. Bodas et al. (2009) observaron en corderos Merino de ceba que, aunque no hubo diferencias significativas en el consumo de paja, la inclusión de bicarbonato de sodio en el concentrado a niveles de 20, 30 y 40 g/kg tendió a aumentar el consumo de concentrado en comparación con el grupo control sin bicarbonato ($P=0.09$). También se observó una tendencia ($P=0.05$) hacia una mejor conversión alimenticia (expresada como consumo de materia orgánica por unidad de ganancia de peso) en los grupos suplementados con niveles medios y altos (B2+B3+B4) en comparación con el control (B0). Si bien la ganancia de peso no mostró diferencias estadísticamente significativas en ese estudio específico, la tendencia al aumento del consumo de concentrado sugiere un potencial para mejorar el rendimiento en animales bajo dietas intensivas (Bodas et al., 2009). Es importante señalar que la respuesta animal puede depender de múltiples factores, incluyendo las características del animal, el sistema de alimentación y la composición específica de la dieta (Çetinkaya y Ünal 1992, Le Ruyet y Tucker 1992, citados por Bodas et al., 2009).

Desde un punto de vista práctico, el bicarbonato de sodio es considerado un aditivo seguro ("inocuo") tanto para el animal como para el consumidor final de carne o leche (Bodas et al., 2009). Su manejo es relativamente sencillo y puede incorporarse directamente en la ración concentrada o en la mezcla total (TMR). La estabilidad del pH ruminal que promueve puede, a su vez, favorecer una digestión más eficiente de otros componentes de la dieta y una síntesis de proteína microbiana más constante, aunque estos efectos pueden variar (Mendoza et al., 2022; Castillo y Macías, 2022).

La capacidad del bicarbonato de sodio para actuar rápidamente lo hace particularmente útil en situaciones donde se anticipan caídas bruscas de pH, como durante la adaptación a dietas con mayor contenido de grano o después de la ingestión de comidas concentradas ofrecidas en pocas veces al día. Su uso puede facilitar las transiciones dietéticas y reducir el riesgo de trastornos digestivos asociados (Mendoza et al., 2022; Sprinkle, 2008, citado por Mendoza et al., 2022).

Determinar la dosis óptima de bicarbonato de sodio no es sencillo, ya que depende de diversos factores como la composición de la dieta (especialmente el nivel y tipo de carbohidratos fermentables y la proporción de forraje), el tipo de rumiante, la etapa productiva y el sistema de manejo alimenticio (Bodas et al., 2009; Mendoza et al., 2022). No existe una única dosis universalmente aplicable.

En la práctica, especialmente en sistemas intensivos de producción ovina en la región mediterránea, la inclusión de bicarbonato de sodio en el concentrado suele variar entre 0.5% y 2% (equivalente a 5 a 20 g/kg de concentrado) (Sen et al. 2006, Kawas et al. 2007 a, b, citados por Bodas et al., 2009). El estudio de Bodas et al. (2009) con corderos Merino en finalización sugiere que niveles entre 20 y

40 g/kg de concentrado (2% a 4%) pueden mejorar el consumo y el rendimiento, indicando que una tasa de suplementación óptima podría estar alrededor de los 20 g/kg (2%) en las condiciones específicas de su experimento. Estos niveles son ligeramente superiores a los rangos comúnmente citados, lo que resalta la necesidad de ajustar la dosis según las circunstancias particulares de cada sistema productivo.

Una alternativa a la inclusión directa en el alimento es ofrecer el bicarbonato de sodio a libre acceso en un comedero separado. Sin embargo, la investigación sobre esta práctica ha arrojado resultados inconsistentes. En el estudio de Bodas et al. (2009), los corderos con acceso libre consumieron en promedio 47 g de bicarbonato por kg de concentrado, una cantidad considerablemente alta y con una gran fluctuación diaria (15 a 80 g/día/animal). Este consumo elevado y errático no se tradujo en mejoras significativas en el consumo de alimento ni en otros parámetros productivos medidos, en comparación con el grupo control. Los autores sugieren que el exceso en el consumo y el patrón intermitente de ingestión podrían ser las razones de la falta de efectos consistentes, indicando una probable saciedad o un efecto de llenado después de picos de consumo (Bodas et al., 2009). Por lo tanto, aunque ofrecerlo a libre acceso podría parecer una forma de permitir que el animal regule su ingesta según sus necesidades, la evidencia sugiere que esto puede llevar a un consumo excesivo e ineficiente, haciendo preferible la incorporación controlada en la ración.

Al formular raciones, especialmente cuando se utilizan herramientas como la programación lineal o software de balanceo, el bicarbonato de sodio (a menudo listado como "buffer" o "bicarbonato") puede incluirse como un ingrediente más, especificando su costo y su nulo aporte nutricional (excepto por el sodio). Se pueden establecer restricciones para limitar su inclusión a los rangos deseados (e.g., 1-2% de la materia seca total o 10-20 g/kg de concentrado) (Mendoza et al., 2022). La decisión final sobre la dosis debe basarse en la evaluación de la dieta total, el rendimiento esperado y la observación de la respuesta animal.

El bicarbonato de sodio es generalmente considerado un aditivo seguro cuando se utiliza en las dosis recomendadas en la nutrición de rumiantes (Bodas et al., 2009). Los riesgos asociados a su uso suelen derivarse de una dosificación incorrecta o de un consumo excesivo e incontrolado, como puede ocurrir con la suplementación a libre acceso.

Como se mencionó, el consumo excesivo observado en el grupo Blibre del estudio de Bodas et al. (2009) (promedio de 47 g/kg de concentrado) no produjo beneficios productivos y podría representar un costo innecesario. Aunque no se reportaron efectos adversos evidentes en ese estudio, un consumo muy elevado podría teóricamente alterar el equilibrio electrolítico o contribuir a una carga excesiva de sodio. El sodio es un catión esencial, pero su ingesta excesiva

requiere una mayor excreción renal y puede aumentar el consumo de agua (Mendoza et al., 2022).

Desde la perspectiva del equilibrio ácido-base sistémico, aunque el bicarbonato actúa principalmente en el rumen, una absorción excesiva de bicarbonato o una alteración significativa del metabolismo ruminal que genere una carga alcalina sistémica podría, en teoría, contribuir a una alcalosis metabólica. Sin embargo, los mecanismos homeostáticos del animal (principalmente la compensación respiratoria y la excreción renal de bicarbonato) suelen ser muy eficientes para prevenirla, a menos que existan condiciones patológicas subyacentes que afecten estos mecanismos compensatorios, como problemas renales o respiratorios (Martínez y Oliver, 2016). La alcalosis metabólica descrita en rumiantes suele estar asociada a problemas como el desplazamiento de abomaso con secuestro de Cloro (alcalosis metabólica hipoclorémica), y no directamente al uso de tamponantes orales en dosis adecuadas (Martínez y Oliver, 2016).

Es importante diferenciar el uso de bicarbonato de sodio como tampón ruminal de su uso terapéutico intravenoso para corregir acidosis metabólica sistémica, donde la dosificación y monitorización son mucho más críticas. En el contexto de la alimentación, el principal riesgo práctico parece ser la ineficacia y el costo asociado a un consumo excesivo o mal gestionado (Bodas et al., 2009).

Otra consideración es el impacto del sodio aportado por el bicarbonato en el balance catión-anión de la dieta (DCAD). En vacas lecheras, especialmente en el periodo de transición (preparto), se busca manipular el DCAD para prevenir la hipocalcemia (fiebre de leche). Dietas preparto a menudo buscan un DCAD negativo, lo cual se logra limitando cationes como Sodio (Na^+) y Potasio (K^+) y aumentando aniones como Cloro (Cl^-) y Azufre (S^{2-}). El uso de bicarbonato de sodio (fuente de Na^+) sería contraproducente en estas dietas específicas preparto, donde se prefieren sales aniónicas (Mendoza et al., 2022; Martínez y Oliver, 2016). Sin embargo, durante la lactancia, donde el riesgo de acidosis ruminal es alto y se busca maximizar el consumo y la producción, el bicarbonato de sodio sí tiene un papel relevante como tampón.

El bicarbonato de sodio (NaHCO_3) es un compuesto versátil con propiedades químicas que lo hacen indispensable en la regulación del pH en sistemas biológicos. En la nutrición de rumiantes, su papel como agente tamponante ruminal es de gran importancia, especialmente en sistemas de producción intensiva donde las dietas altas en concentrados predisponen a la acidosis ruminal. Su alta solubilidad y la inmediata disponibilidad de iones bicarbonato (HCO_3^-) le confieren una acción rápida para neutralizar el exceso de ácidos producidos durante la fermentación, ayudando a estabilizar el pH ruminal y a mantener un ambiente favorable para la microbiota ruminal.

La suplementación controlada con bicarbonato de sodio, típicamente en dosis que oscilan entre el 1% y el 2% del concentrado o de la materia seca total (aunque estudios sugieren que hasta 4% puede ser beneficioso en ciertas condiciones), puede mejorar el consumo de alimento, particularmente de concentrado, y potencialmente la eficiencia alimenticia y el rendimiento animal. Sin embargo, la suplementación a libre acceso ha demostrado ser ineficaz y llevar a un consumo excesivo y variable, sin beneficios consistentes.

Considerado seguro en dosis adecuadas, los principales inconvenientes del bicarbonato de sodio se relacionan con el costo y la posible ineficacia si se administra incorrectamente o en exceso. Su uso debe evaluarse en el contexto de la dieta completa, la etapa productiva del animal y los objetivos de producción, prestando atención a la relación forraje:concentrado y al balance general de nutrientes, incluyendo el balance catión-anión en etapas específicas como el parto en vacas lecheras. En resumen, el bicarbonato de sodio sigue siendo una herramienta valiosa y práctica en el manejo nutricional de rumiantes para mitigar los riesgos de acidosis ruminal y optimizar la fermentación y la productividad en sistemas intensivos.

ÓXIDO DE MAGNESIO: PROPIEDADES Y MECANISMO DE ACCIÓN

El óxido de magnesio (MgO), también conocido como magnesia, es un compuesto inorgánico de gran interés en la nutrición y manejo de rumiantes, particularmente en bovinos. Su relevancia radica en su doble función: por un lado, es una fuente concentrada de magnesio (Mg), un macromineral esencial para múltiples funciones fisiológicas; por otro lado, actúa como un agente alcalinizante o tampón ruminal, contribuyendo a la estabilización del pH en el rumen, especialmente en animales alimentados con dietas que predisponen a la acidosis. A diferencia de otros tamponantes como el bicarbonato de sodio, el óxido de magnesio presenta características particulares en cuanto a su solubilidad y cinética de reacción en el rumen. Este texto explorará en detalle las propiedades del óxido de magnesio, su origen, su mecanismo de acción como suplemento nutricional y como tampón ruminal, analizando su acción distintiva (más lenta pero prolongada) y su contribución al mantenimiento de un ambiente ruminal saludable, integrando información de diversas fuentes y contrastándola con otros aditivos (Albaitaritz, 2025; Tánori-Lozano et al., 2022; Infortambo, 2020; Mendoza et al., 2022).

Químicamente, el óxido de magnesio es un compuesto iónico formado por el catión magnesio (Mg^{2+}) y el anión óxido (O^{2-}), con la fórmula empírica MgO . Se presenta comúnmente como un sólido blanco, higroscópico (tiende a absorber humedad del aire) y relativamente insoluble en agua. Sin embargo, reacciona con ácidos para formar sales de magnesio y agua. Su producción industrial se realiza principalmente a través de la calcinación a altas temperaturas de minerales naturales que contienen magnesio, como la magnesita (carbonato de magnesio,

MgCO₃) o la brucita (hidróxido de magnesio, Mg(OH)₂). También puede obtenerse a partir del hidróxido de magnesio precipitado de agua de mar o salmueras.

Las propiedades físicas y químicas del MgO, en particular su reactividad y solubilidad, dependen significativamente del proceso de calcinación. Se distinguen principalmente dos tipos: MgO "ligero" o "calcinado cáustico" (producido a temperaturas más bajas, 700-1000 °C), que es más poroso y reactivo; y MgO "pesado" o "calcinado a muerte" (producido a temperaturas muy altas, >1400 °C), que es mucho menos reactivo y se utiliza principalmente en aplicaciones refractarias. Para su uso en nutrición animal y como tampón ruminal, se prefiere el MgO ligero debido a su mayor reactividad y biodisponibilidad del magnesio (Albaitaritzza, 2025; Tánori-Lozano et al., 2022). Esta diferencia en reactividad es fundamental para entender su comportamiento en el ambiente ruminal.

La estructura física y la superficie específica del MgO ligero facilitan su interacción con los ácidos presentes en el rumen, aunque su baja solubilidad intrínseca en el agua que compone el fluido ruminal modula la velocidad a la que esta reacción ocurre. Esta característica fisicoquímica es la base de su perfil de acción como tampón, diferenciándolo marcadamente de bases más solubles como el bicarbonato de sodio (Infortambo, 2020; Bodas et al., 2009).

El magnesio (Mg) es un macromineral esencial para todos los animales, incluyendo los bovinos. Desempeña un papel crucial en cientos de reacciones enzimáticas fundamentales para el metabolismo energético (como cofactor de quinasas en la glicólisis y el ciclo de Krebs), la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos, la transmisión neuromuscular y la función muscular. Además, es un componente estructural importante del hueso. La deficiencia de magnesio puede provocar una serie de trastornos metabólicos, siendo el más conocido y dramático en rumiantes la hipomagnesemia, comúnmente llamada "tetania de los pastos" o "mal de los avenales" (Infortambo, 2020; Mendoza et al., 2022).

La tetania hipomagnesémica es particularmente frecuente en vacas (lecheras o de cría) que pastorean forrajes tiernos y de rápido crecimiento, especialmente en primavera u otoño. Estos pastos suelen ser bajos en magnesio y, a menudo, altos en potasio y nitrógeno, factores que pueden interferir con la absorción de magnesio en el rumen. La falta de reservas corporales significativas de magnesio fácilmente movilizables hace que los rumiantes dependan de una ingesta diaria constante para mantener niveles sanguíneos adecuados. La suplementación con fuentes de magnesio es, por tanto, una práctica de manejo esencial en situaciones de riesgo (Infortambo, 2020; Albaitaritzza, 2025). El óxido de magnesio (MgO), debido a su alta concentración de Mg (típicamente >50% Mg), es una de las fuentes más comunes y costo-efectivas utilizadas para la suplementación

mineral en bovinos, ya sea incluido en mezclas minerales, bloques para lamer o incorporado directamente en la ración (Albaitaritzza, 2025; Mendoza et al., 2022).

La efectividad del MgO como fuente de magnesio depende de su biodisponibilidad, la cual está directamente relacionada con su reactividad (influenciada por el proceso de calcinación, como se mencionó anteriormente). Fuentes de MgO altamente reactivas (ligeras) permiten una mejor solubilización en el tracto digestivo y, por ende, una mayor absorción del mineral. Es crucial seleccionar un producto de MgO de calidad adecuada para asegurar que cumpla eficazmente su función como suplemento nutricional (Infortambo, 2020; Mendoza et al., 2022).

Además de su rol como fuente de magnesio, el óxido de magnesio ejerce un efecto alcalinizante en el rumen, lo que le permite actuar como un agente tamponante o buffer. Esta función es especialmente relevante en el contexto de la alimentación intensiva de rumiantes, donde las dietas ricas en carbohidratos de fermentación rápida pueden llevar a una producción excesiva de ácidos grasos volátiles (AGV) y a una caída del pH ruminal, condición conocida como acidosis (Tánori-Lozano et al., 2022; Mendoza et al., 2022). La acidosis ruminal, ya sea clínica o subclínica (SARA), compromete la salud animal, la eficiencia digestiva (especialmente de la fibra) y el rendimiento productivo. El uso de aditivos que modulen el ambiente ruminal, como los tamponantes, es una estrategia común para mitigar estos efectos negativos (Tánori-Lozano et al., 2022; Infortambo, 2020).

El mecanismo de acción del MgO como tampón implica su reacción química con los protones (H^+) presentes en el fluido ruminal ácido. Aunque su solubilidad en agua es baja, el MgO reacciona con los ácidos según la siguiente ecuación general: $MgO(sólido) + 2H^+(acuoso) \rightarrow Mg^{2+}(acuoso) + H_2O(líquido)$. Al consumir protones, esta reacción ayuda a contrarrestar la acidificación y a elevar el pH del medio ruminal (Mendoza et al., 2022; Albaitaritzza, 2025). Cada molécula de MgO puede neutralizar dos protones, lo que le confiere una alta capacidad neutralizante por unidad de peso en comparación con el bicarbonato de sodio (donde cada ion bicarbonato neutraliza un protón).

Sin embargo, la característica distintiva del MgO como tampón, especialmente cuando se compara con el bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$) discutido previamente (Bodas et al., 2009), reside en su cinética de acción. Debido a su menor solubilidad y reactividad controlada (en comparación con la disolución casi instantánea del $NaHCO_3$), el MgO ejerce su efecto tamponante de manera más lenta pero sostenida. Mientras que el $NaHCO_3$ proporciona un aumento rápido del pH poco después de la ingestión pero su efecto es relativamente transitorio, el MgO libera su capacidad neutralizante gradualmente a medida que se disuelve y reacciona en el rumen, ofreciendo un efecto amortiguador más prolongado (Mendoza et al., 2022; Infortambo, 2020). Esta acción lenta y prolongada puede

ser beneficiosa para mantener un pH más estable a lo largo del tiempo entre comidas, complementando la acción rápida del bicarbonato.

Esta complementariedad en los perfiles de acción es la razón por la cual frecuentemente se utilizan combinaciones de bicarbonato de sodio y óxido de magnesio en formulaciones comerciales de tamponantes ruminales (como podría ser el caso de RUMIBUF mencionado por Albaitaritzza, 2025). La idea es aprovechar la acción rápida del NaHCO_3 para contrarrestar el descenso inicial de pH post-ingesta de concentrado, y la acción sostenida del MgO para mantener el pH elevado durante un período más largo, logrando así una estabilización más completa del ambiente ruminal a lo largo del ciclo de fermentación (Mendoza et al., 2022; Tánori-Lozano et al., 2022).

El objetivo principal del uso de tamponantes como el MgO es mantener el pH ruminal dentro de un rango óptimo para la actividad microbiana, idealmente por encima de 6.0-6.2 para favorecer a las bacterias celulolíticas, que son particularmente sensibles a la acidez. Al contribuir a esta estabilidad, el MgO puede tener efectos beneficiosos indirectos sobre la fermentación ruminal y la digestión de nutrientes (Tánori-Lozano et al., 2022; Mendoza et al., 2022). Un pH ruminal más estable puede mejorar la digestibilidad de la fibra (celulosa y hemicelulosa), lo cual es crucial en dietas que aún contienen una proporción significativa de forraje, incluso si son altas en concentrados.

Aunque la investigación específica citada en los documentos proporcionados se centra más en otros aditivos como la clinoptilolita (Tánori-Lozano et al., 2022) o aborda el magnesio principalmente desde la perspectiva de la prevención de la tetania (Infortambo, 2020; Albaitaritzza, 2025), el principio general de que un pH ruminal estable favorece una fermentación más eficiente es ampliamente aceptado. Al mitigar las fluctuaciones extremas de pH, el MgO (especialmente en combinación con otros tamponantes) puede ayudar a optimizar la producción de AGV y la síntesis de proteína microbiana, contribuyendo potencialmente a mejorar la eficiencia alimenticia y el rendimiento productivo (leche o carne) en sistemas intensivos (Mendoza et al., 2022; Tánori-Lozano et al., 2022).

Es importante considerar que el efecto neto del MgO sobre la fermentación dependerá de la dosis utilizada, la composición general de la dieta, la frecuencia de alimentación y las características específicas del producto de MgO (su reactividad). La monitorización del pH ruminal (si es posible) o de indicadores indirectos como el consumo de materia seca, la producción y composición de la leche (especialmente el porcentaje de grasa), y la condición corporal pueden ayudar a evaluar la efectividad de la suplementación con MgO como tampón (Infortambo, 2020; Mendoza et al., 2022).

El uso de óxido de magnesio en la alimentación de bovinos presenta una serie de ventajas y desventajas que deben considerarse al decidir su inclusión en la dieta.

Ventajas:

- Doble Función: Proporciona magnesio esencial, ayudando a prevenir la hipomagnesemia, y actúa como tampón ruminal (Infortambo, 2020; Albaitaritz, 2025). Esto puede simplificar la suplementación mineral y de aditivos.
- Acción Tamponante Prolongada: Su lenta reacción ofrece un efecto amortiguador sostenido, útil para mantener la estabilidad del pH entre comidas (Mendoza et al., 2022).
- Complementariedad: Su perfil de acción complementa bien al del bicarbonato de sodio, permitiendo una estrategia de tamponamiento más completa cuando se usan juntos (Albaitaritz, 2025; Mendoza et al., 2022).
- Alto Contenido de Mg: Es una fuente concentrada y generalmente costo-efectiva de magnesio.

Desventajas y Consideraciones:

- Acción Lenta Inicial: Su baja solubilidad implica que no actúa tan rápidamente como el NaHCO_3 para neutralizar el ácido inmediatamente después de una comida rica en concentrado. Puede no ser suficiente por sí solo en situaciones de riesgo agudo de acidosis (Comparación implícita con Bodas et al., 2009).
- Palatabilidad: Algunas fuentes de MgO pueden tener baja palatabilidad, lo que podría reducir el consumo de la ración o del suplemento mineral si se incluye en niveles altos (Mendoza et al.,

2022). La calidad y el procesamiento del MgO pueden influir en este aspecto.

- Efecto Laxante: El magnesio tiene un efecto osmótico en el intestino y puede actuar como laxante si se consume en exceso. La dosis debe ser cuidadosamente controlada para evitar diarreas (Mendoza et al., 2022).
- Variabilidad en Calidad y Reactividad: Como se mencionó, la reactividad del MgO varía según su origen y procesamiento (calcinación). Es fundamental utilizar un producto de calidad constante y con la reactividad adecuada (preferiblemente MgO ligero) para asegurar tanto la biodisponibilidad del Mg como su efectividad como tampón (Infortambo, 2020).
- Impacto en el DCAD: El magnesio (Mg^{2+}) es un catión fuerte que contribuye positivamente al Balance Cation-Anión de la Dieta (DCAD). Esto debe tenerse en cuenta al formular raciones, especialmente en vacas lecheras durante el período de transición preparto, donde a menudo se busca un DCAD negativo o bajo para prevenir la hipocalcemia (Mendoza et al., 2022).

La dosis adecuada de óxido de magnesio dependerá del objetivo principal de su uso (suplementación de Mg, tamponamiento ruminal, o ambos) y de factores como el tipo de animal, nivel de producción, composición de la dieta basal (contenido de Mg, nivel de concentrado, contenido de potasio) y el riesgo percibido de hipomagnesemia o acidosis.

Para la prevención de la hipomagnesemia, las recomendaciones suelen variar, pero a menudo se sugiere suplementar para asegurar una ingesta total de magnesio que cubra los requerimientos del animal (por ejemplo, 0.20% a 0.35% de Mg en la materia seca total de la dieta para vacas lecheras en lactación o

vacas de cría en pastos de riesgo). El MgO se incluye comúnmente en mezclas minerales ofrecidas a libre acceso o incorporado en suplementos concentrados o raciones totales mezcladas (TMR) para alcanzar estas concentraciones (Infortambo, 2020; Mendoza et al., 2022).

Cuando el objetivo principal es el tamponamiento ruminal, el MgO se utiliza a menudo en combinación con NaHCO_3 . Dosis típicas para MgO en este contexto podrían oscilar entre 0.2% y 0.5% de la materia seca de la dieta, aunque la dosis óptima debe determinarse caso por caso. Si se usa como único tampón (menos común), las dosis podrían necesitar ser más altas, pero siempre considerando el riesgo de efectos laxantes y problemas de palatabilidad (Mendoza et al., 2022). La literatura específica sobre dosis óptimas de MgO solo como buffer es menos extensa que para NaHCO_3 , y las recomendaciones prácticas a menudo se basan en la experiencia y la combinación con otros agentes.

La forma de administración también es importante. Incorporar el MgO de manera homogénea en una TMR asegura un consumo más constante a lo largo del día, lo cual es ideal para su función tamponante sostenida. Si se ofrece en una mezcla mineral a libre acceso, el consumo puede ser más variable entre animales (Mendoza et al., 2022; Tánori-Lozano et al., 2022).

El óxido de magnesio (MgO) es un aditivo multifuncional valioso en la nutrición de bovinos y otros rumiantes. Cumple un rol indispensable como fuente concentrada del macromineral esencial magnesio, siendo clave en la prevención de la hipomagnesemia o tetania de los pastos, una condición metabólica grave frecuente en animales de pastoreo (Infortambo, 2020; Albaitaritz, 2025). Adicionalmente, el MgO actúa como un agente tamponante ruminal, contribuyendo a la neutralización de ácidos y a la estabilización del pH en el rumen, particularmente bajo condiciones de alimentación con altas proporciones de concentrados que predisponen a la acidosis (Mendoza et al., 2022; Tánori-Lozano et al., 2022).

Su mecanismo de acción como tampón se caracteriza por ser más lento pero más prolongado en comparación con el bicarbonato de sodio, debido a su menor solubilidad y reactividad gradual en el fluido ruminal. Esta característica lo hace un complemento ideal para el NaHCO_3 en estrategias de tamponamiento combinadas, buscando una estabilización del pH ruminal más completa y duradera. Sin embargo, su uso requiere consideraciones cuidadosas respecto a la calidad y reactividad del producto, la dosis (para evitar efectos laxantes y asegurar la eficacia), la palatabilidad y su contribución catiónica al DCAD de la dieta. En resumen, el óxido de magnesio representa una herramienta importante en el manejo nutricional de rumiantes, abordando tanto necesidades minerales específicas como desafíos relacionados con la salud y eficiencia del ambiente ruminal en sistemas de producción modernos.

COMPARACIÓN DEL BICARBONATO DE SODIO Y ÓXIDO DE MAGNESIO COMO BUFFERS RUMINALES

La intensificación de los sistemas de producción de rumiantes, particularmente en ganado lechero y de engorde de alta producción, ha llevado a la formulación de dietas con una alta proporción de concentrados energéticos. Si bien estas dietas son necesarias para satisfacer los elevados requerimientos nutricionales de los animales, también presentan un desafío significativo para la homeostasis del rumen. La rápida fermentación de carbohidratos no estructurales (almidones y azúcares) produce grandes cantidades de ácidos grasos volátiles (AGV), lo que puede provocar un descenso drástico del pH ruminal, una condición conocida como acidosis ruminal (subaguda o aguda). La acidosis ruminal compromete la salud del animal, la eficiencia digestiva y, en última instancia, la productividad (Mendoza et al., 2022; Liaudat et al., 2024). Para mitigar este riesgo, se ha generalizado el uso de aditivos alimentarios con capacidad tamponante o alcalinizante, conocidos comúnmente como buffers ruminales. Entre los más utilizados se encuentran el bicarbonato de sodio (NaHCO_3) y el óxido de magnesio (MgO).

Ambos compuestos actúan modificando el ambiente ruminal para contrarrestar la caída del pH, pero difieren significativamente en sus mecanismos de acción, velocidad, duración del efecto, impacto fisiológico y consideraciones económicas. El bicarbonato de sodio es quizás el buffer más tradicional y ampliamente estudiado, conocido por su rápida acción. Por otro lado, el óxido de magnesio, además de su capacidad buffer, aporta un mineral esencial, el magnesio, cuya importancia en la nutrición de rumiantes es cada vez más reconocida (Bea & Udina, 2022; Udina, 2021). Comprender las diferencias fundamentales entre estos dos aditivos es crucial para seleccionar la estrategia de suplementación más adecuada según el tipo de dieta, el sistema de manejo y los objetivos productivos específicos.

Este apartado del marco teórico se centrará en una comparación detallada entre el bicarbonato de sodio y el óxido de magnesio como agentes buffer ruminales. Se analizarán aspectos clave como la velocidad de disolución y reacción en el rumen, la persistencia de su efecto alcalinizante, su impacto específico sobre el pH ruminal en diferentes momentos del ciclo alimenticio, una evaluación de la relación costo-beneficio considerando no solo el precio del aditivo sino también su eficacia y posibles beneficios adicionales (como el aporte de Mg), y su aplicabilidad diferencial en función de las características de la dieta (por ejemplo, dietas ricas en concentrados vs. dietas con mayor proporción de forraje). Este análisis comparativo proporcionará una base sólida para comprender la relevancia del estudio experimental subsiguiente, permitiendo contextualizar los resultados y evaluar la idoneidad de cada buffer bajo condiciones específicas.

El bicarbonato de sodio es una sal alcalina que ejerce su efecto buffer mediante la neutralización directa de los protones (H^+) generados durante la fermentación ruminal. Al disolverse en el fluido ruminal, el ion bicarbonato (HCO_3^-) reacciona con los H^+ para formar ácido carbónico (H_2CO_3), el cual es inestable y se disocia rápidamente en agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2), que es eructado por el animal. Esta reacción química elimina eficazmente los protones del medio, incrementando así el pH. La capacidad tamponante del bicarbonato está intrínsecamente ligada al sistema buffer bicarbonato/ácido carbónico, un sistema fisiológico fundamental también presente en la saliva del rumiante (Mendoza et al., 2022; Liaudat et al., 2024). Su alta solubilidad en agua asegura una rápida disponibilidad en el rumen tras la ingestión, lo que lo convierte en una opción atractiva para contrarrestar caídas bruscas de pH.

La principal característica del bicarbonato de sodio es su rápida velocidad de acción. Al ser altamente soluble, se disuelve casi instantáneamente en el líquido ruminal, proporcionando iones bicarbonato disponibles para neutralizar el ácido producido poco después de la ingestión de alimentos ricos en carbohidratos fermentables. Esta rápida respuesta es particularmente útil en situaciones donde se espera una producción ácida intensa y rápida, como ocurre después del consumo de grandes cantidades de concentrado. Sin embargo, esta misma solubilidad y rápida reacción implican que su efecto tiende a ser de corta duración. El bicarbonato se consume relativamente rápido en el proceso de neutralización y puede ser arrastrado fuera del rumen con el flujo de digesta, limitando su capacidad para mantener un pH estable durante periodos prolongados entre comidas (Fernández, 2021; Mendoza et al., 2022).

La aplicación del bicarbonato de sodio ha demostrado ser efectiva en la prevención de la acidosis ruminal, especialmente la acidosis aguda o subaguda asociada a dietas con alta proporción de granos o cambios abruptos en la alimentación, como en el periodo de transición de las vacas lecheras. Estudios han indicado que su suplementación puede ayudar a estabilizar el pH ruminal, mejorar el consumo de materia seca en ciertas condiciones y, consecuentemente, mantener la producción de leche o la ganancia de peso (Fernández, 2021; Bodas et al., 2009). Sin embargo, su uso debe ser cuidadosamente manejado, ya que una suplementación excesiva podría teóricamente llevar a condiciones de alcalosis si la producción de ácido no es suficientemente alta, aunque esto es menos común en la práctica bajo condiciones de desafío ácido. Además, aporta una carga significativa de sodio a la dieta, un factor a considerar en la formulación total y en animales con posibles restricciones de sodio (Mendoza et al., 2022; Martínez & Oliver, 2016).

La rapidez con la que actúa el bicarbonato de sodio lo posiciona como una herramienta valiosa para el manejo nutricional inmediato post-alimentación, cuando el riesgo de caída de pH es máximo. Esta característica es especialmente relevante en sistemas de alimentación donde los animales consumen grandes

porciones de concentrado en momentos puntuales del día ("slug feeding"), a diferencia de una ración totalmente mezclada (TMR) consumida más uniformemente. Sin embargo, la necesidad de una protección más continua a lo largo del día, especialmente en dietas TMR donde la fermentación puede ser más constante, podría no ser completamente cubierta por la acción transitoria del bicarbonato. La consideración del aporte de sodio también es relevante, no solo desde el punto de vista de la formulación mineral total de la dieta, sino también por sus posibles implicaciones en el balance hídrico y la excreción, factores que pueden ser importantes en ciertas condiciones ambientales o fisiológicas.

El óxido de magnesio es un compuesto inorgánico que también actúa como agente alcalinizante en el rumen, aunque su mecanismo y características difieren notablemente de las del bicarbonato de sodio. El MgO reacciona con el agua en el rumen para formar hidróxido de magnesio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), el cual es poco soluble pero puede neutralizar los protones (H^+) presentes en el medio. La reacción de neutralización es: $\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2$; y luego $\text{Mg}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$. A diferencia del bicarbonato, el MgO no participa directamente en el sistema buffer fisiológico del bicarbonato/ácido carbónico, sino que actúa consumiendo protones a través de la formación de iones magnesio y agua (Mendoza et al., 2022; Liaudat et al., 2024). Una característica distintiva del MgO es que, además de su efecto buffer, es una fuente importante de magnesio, un macromineral esencial para numerosas funciones metabólicas en el rumiante, incluyendo la función neuromuscular y enzimática.

La velocidad de acción del óxido de magnesio es considerablemente más lenta que la del bicarbonato de sodio, principalmente debido a su menor solubilidad en el fluido ruminal. La reactividad del MgO, y por ende su capacidad y velocidad de neutralización, depende en gran medida de sus propiedades fisicoquímicas, como el tamaño de partícula y, crucialmente, su origen geológico y proceso de calcinación, que determinan su estructura cristalina y superficie de contacto. Fuentes de MgO de alta reactividad se disolverán y reaccionarán más rápidamente que aquellas de baja reactividad (Bea & Udina, 2022; Udina, 2021). Esta menor solubilidad y reactividad intrínseca resulta en una liberación más gradual del efecto alcalinizante, lo que a su vez se traduce en una duración del efecto más prolongada en comparación con el bicarbonato de sodio. El MgO puede proporcionar una capacidad tamponante más sostenida a lo largo del tiempo (Mendoza et al., 2022; Bea & Udina, 2022).

El uso de óxido de magnesio como buffer es particularmente interesante en dietas donde se requiere un control del pH ruminal más constante y prolongado, como en las raciones totalmente mezcladas (TMR) que promueven un patrón de consumo más distribuido a lo largo del día. Además, su inclusión es una estrategia común para cubrir los requerimientos de magnesio, especialmente en dietas basadas en forrajes que pueden ser deficientes en este mineral o contener factores que limitan su absorción (como altos niveles de potasio). Se ha sugerido

que el MgO puede ser particularmente útil en dietas ricas en grasa, donde puede ayudar a mantener un ambiente ruminal adecuado para la digestión de la fibra y la función microbiana (Mendoza et al., 2022; Bea & Udina, 2022). Sin embargo, la variabilidad en la calidad y reactividad de las distintas fuentes comerciales de MgO es un factor crítico a considerar, ya que afecta directamente su eficacia como buffer y la biodisponibilidad del magnesio. Fuentes de baja reactividad pueden tener un efecto buffer mínimo y una pobre absorción de Mg (Bea & Udina, 2022; Udina, 2021). Otro aspecto a considerar es la palatabilidad, ya que algunas fuentes de MgO pueden reducir el consumo si se incluyen en niveles elevados, aunque esto también puede variar según la fuente y la dieta base (Mendoza et al., 2022; Liaudat et al., 2024).

La naturaleza de acción más lenta y sostenida del óxido de magnesio presenta un contraste interesante frente a la respuesta rápida del bicarbonato. Mientras que el bicarbonato ofrece una solución "de emergencia" para picos ácidos post-prandiales, el MgO podría ser más adecuado para mantener una estabilidad ruminal general en sistemas de alimentación continua o TMR. Su doble función como buffer y fuente de magnesio añade una capa de complejidad y valor potencial a su inclusión. La dependencia de la eficacia del MgO de su reactividad fisicoquímica subraya la importancia de la selección de la fuente del producto, un aspecto que no es tan crítico con el bicarbonato de sodio, cuya composición y solubilidad son mucho más consistentes. Esta variabilidad (mencionada por Bea & Udina, 2022 y Udina, 2021) es un factor clave en la evaluación de su relación costo-beneficio, ya que un producto de MgO más barato pero de baja reactividad podría resultar ineficaz y, por lo tanto, más costoso en términos de resultados productivos.

Realizar una comparación directa entre el bicarbonato de sodio y el óxido de magnesio permite destacar sus fortalezas y debilidades relativas en diferentes escenarios productivos. Esta comparación se basará en los criterios clave definidos previamente: velocidad de acción, duración del efecto, impacto en el pH ruminal, costo-beneficio y aplicación en distintos tipos de dieta.

- **Velocidad de Acción:** El bicarbonato de sodio se caracteriza por una acción prácticamente inmediata debido a su alta solubilidad en el fluido ruminal. Libera rápidamente iones bicarbonato que neutralizan el ácido, siendo efectivo para contrarrestar caídas abruptas de pH que ocurren típicamente después de la ingestión de grandes cantidades de carbohidratos fácilmente fermentables (Fernández, 2021; Mendoza et al., 2022). En contraste, el óxido de magnesio tiene una velocidad de acción

considerablemente más lenta. Su baja solubilidad y la necesidad de reaccionar primero con agua para formar hidróxido de magnesio, que luego neutraliza el ácido, hacen que su efecto buffer sea más gradual. La velocidad específica del MgO está fuertemente influenciada por su reactividad, que varía entre las diferentes fuentes comerciales (Bea & Udina, 2022; Mendoza et al., 2022).

Esta diferencia fundamental en la velocidad de acción dicta en gran medida sus nichos de aplicación. El NaHCO_3 es ideal para una intervención rápida, casi como un "apagafuegos" para picos de acidez, mientras que el MgO es menos adecuado para este propósito inmediato, pero su acción puede comenzar a medida que el efecto del bicarbonato disminuye o en situaciones donde la producción de ácido es más constante pero menos intensa.

- **Duración del Efecto:** Consecuencia directa de su rápida solubilidad y reacción, el efecto del bicarbonato de sodio tiende a ser de corta duración. Una vez disuelto y reaccionado, o pasado fuera del rumen con el flujo de digesta, su capacidad tamponante cesa relativamente rápido (Fernández, 2021; Mendoza et al., 2022). Por el contrario, la lenta solubilización y reacción del óxido de magnesio le confiere una duración de efecto más prolongada. El MgO libera su potencial neutralizante de forma más sostenida, contribuyendo a la estabilidad del pH ruminal durante un período más largo después de su ingestión (Mendoza et al., 2022; Bea & Udina, 2022).

Erdman (1988) argumenta que los requerimientos de agentes tamponantes en la dieta de vacas lecheras dependen de tres factores básicos: la secreción

de saliva, la capacidad amortiguadora del alimento y la acidez inherente de la ración

La duración del efecto es un factor crítico al diseñar estrategias de suplementación. Para una protección continua, especialmente con sistemas de alimentación TMR, la acción prolongada del MgO puede ser ventajosa. Sin embargo, si el desafío ácido es agudo y concentrado en momentos específicos, la corta duración del NaHCO_3 podría ser suficiente si se administra estratégicamente, aunque podría requerir múltiples dosificaciones o una inclusión continua en la ración si el riesgo persiste.

- **Impacto en el pH Ruminal:** El bicarbonato de sodio provoca un aumento rápido y a menudo significativo del pH ruminal poco después de su consumo, ayudando a evitar que el pH caiga por debajo de umbrales críticos (generalmente $< 5.8-5.6$) que comprometen la digestión de la fibra y la salud del rumen (Fernández, 2021; Bodas et al., 2009). El óxido de magnesio, debido a su acción más lenta y gradual, tiende a producir un aumento del pH más moderado pero más sostenido. No provoca picos de pH tan marcados como el bicarbonato, pero puede ayudar a mantener el pH promedio en un rango más favorable durante más tiempo (Mendoza et al., 2022; Bea & Udina, 2022).

El patrón de modificación del pH tiene implicaciones fisiológicas. Un aumento muy rápido del pH (como con NaHCO_3) es beneficioso para prevenir la acidosis aguda, pero si es excesivo o mal sincronizado con la producción de ácido, podría teóricamente desplazar el pH hacia rangos demasiado alcalinos, aunque esto es raro en la práctica con dietas acidogénicas. El efecto más suave y sostenido del MgO podría ser más conducente a mantener un equilibrio estable en el ecosistema microbiano ruminal a largo plazo, sin las fluctuaciones potencialmente inducidas por buffers de acción muy rápida.

- **Costo-Beneficio:** La evaluación del costo-beneficio es compleja y depende de múltiples factores. El bicarbonato de sodio suele tener un costo por kilogramo relativamente bajo y es ampliamente disponible. Sin embargo, su corta duración de acción podría implicar la necesidad de mayores dosis de inclusión o estrategias de manejo específicas para asegurar su efectividad, lo que puede incrementar el costo total de la suplementación (Fernández, 2021; Mendoza et al., 2022). El óxido de magnesio puede tener un costo por kilogramo variable, a menudo superior al del bicarbonato, especialmente las fuentes de alta reactividad. No obstante, su efecto más prolongado podría permitir dosis de inclusión menores (en base molar de capacidad neutralizante) o menos frecuentes, y además aporta el beneficio nutricional del magnesio elemental, cuyo valor debe ser considerado en el cálculo (Bea & Udina, 2022; Mendoza et al., 2022). La eficacia real del MgO está ligada a su reactividad; fuentes baratas pero poco reactivas pueden ofrecer un pobre retorno de la inversión (Bea & Udina, 2022; Udina, 2021).

Por lo tanto, una simple comparación de precios por tonelada puede ser engañosa. Se debe considerar la capacidad neutralizante efectiva por unidad de costo, la duración del efecto deseado, y el valor adicional del magnesio aportado por el MgO. Fuentes como catálogos comerciales (Albaitaritz, 2025) o revistas sectoriales (Infortambo, 2020) pueden ofrecer perspectivas sobre los costos relativos y las prácticas de uso en el campo, pero la decisión final debe basarse en un análisis técnico y económico adaptado a cada situación productiva.

- **Aplicación en distintos tipos de dieta:** El bicarbonato de sodio es tradicionalmente recomendado para dietas con alto riesgo de acidosis aguda, como aquellas con alta inclusión de concentrados (>50-60%),

especialmente si se administran en comidas separadas ("slug feeding"). También es útil durante períodos de transición dietética o estrés, cuando el consumo puede ser irregular y el riesgo de caída brusca del pH es elevado (Fernández, 2021; Bodas et al., 2009). El óxido de magnesio, por su acción sostenida, se considera más adecuado para raciones totalmente mezcladas (TMR) donde el consumo es más constante. Es particularmente valioso en dietas basadas en forrajes de baja calidad o ensilados ácidos, donde se necesita un efecto buffer prolongado, y en situaciones donde se requiere suplementación de magnesio para prevenir hipomagnesemia (tetania de los pastos) o para satisfacer las altas demandas de vacas lecheras (Bea & Udina, 2022; Mendoza et al., 2022). Su uso también se ha explorado en dietas con grasas añadidas para mejorar el ambiente ruminal (Udina, 2021; Mendoza et al., 2022).

La elección entre NaHCO_3 y MgO , o incluso la combinación de ambos, debe basarse en una evaluación cuidadosa del tipo de dieta, el sistema de alimentación, los animales (especie, estado fisiológico) y los objetivos específicos (prevención de acidosis aguda vs. mantenimiento de pH estable vs. suplementación de Mg). En algunos casos, especialmente con desafíos acidogénicos severos y prolongados, la combinación de un buffer rápido (NaHCO_3) con uno de acción sostenida (MgO) podría ofrecer una protección más completa, aprovechando las fortalezas de ambos compuestos (Mendoza et al., 2022; Liaudat et al., 2024).

Más allá de la comparación directa, existen otros factores a considerar. La palatabilidad puede ser un problema con algunas fuentes de MgO , potencialmente afectando el consumo de materia seca si se incluye en niveles altos, mientras que el NaHCO_3 es generalmente bien aceptado (Mendoza et al., 2022). El aporte de sodio del NaHCO_3 debe ser balanceado en la ración total, considerando otras fuentes de sodio y las necesidades del animal, así como posibles regulaciones ambientales sobre excreción de minerales (Martínez & Oliver, 2016; Mendoza et al., 2022). Por otro lado, la biodisponibilidad del magnesio del MgO es crucial; si el objetivo principal es la suplementación de Mg,

la elección de una fuente altamente reactiva y biodisponible es fundamental (Bea & Udina, 2022; Udina, 2021).

La posibilidad de utilizar ambos buffers de forma combinada es una estrategia interesante. Teóricamente, el NaHCO_3 podría proporcionar la neutralización inicial rápida después de la comida, mientras que el MgO ofrecería una capacidad tamponante residual más prolongada, cubriendo así un espectro más amplio de riesgo de pH bajo. Esta combinación podría ser particularmente útil en dietas muy desafiantes o en sistemas de manejo donde el control preciso del pH ruminal es crítico para optimizar la fermentación y la salud animal (Mendoza et al., 2022; Liaudat et al., 2024). La investigación sobre las proporciones óptimas y la eficacia de tales combinaciones bajo diferentes escenarios dietéticos sigue siendo un área de interés.

La comparación detallada entre el bicarbonato de sodio y el óxido de magnesio revela que no existe un "mejor" buffer universal, sino que cada uno posee un perfil de acción distinto que lo hace más o menos adecuado según las circunstancias específicas de la producción animal. El NaHCO_3 destaca por su rapidez de acción, siendo una herramienta eficaz contra descensos agudos del pH post-prandial, aunque su efecto es transitorio y aporta una carga de sodio. El MgO , en cambio, ofrece una acción más lenta pero sostenida, ideal para mantener la estabilidad del pH a largo plazo en sistemas TMR, además de proporcionar magnesio esencial, pero su eficacia está supeditada a la reactividad de la fuente utilizada.

Este análisis comparativo subraya la importancia de seleccionar el agente buffer basándose en un conocimiento profundo de sus propiedades fisicoquímicas y efectos fisiológicos, en el contexto del tipo de dieta, el sistema de alimentación, los requerimientos nutricionales del animal y los objetivos económicos. La velocidad de acción contrastante, la duración del efecto, el impacto diferencial sobre la curva de pH ruminal, las consideraciones de costo-beneficio que incluyen el valor nutricional del Mg y la variabilidad del producto, y la idoneidad para diferentes regímenes alimenticios son factores clave en esta decisión.

Comprender estas diferencias es fundamental para contextualizar y dar relevancia al estudio experimental propuesto en esta tesis. Al evaluar comparativamente el bicarbonato de sodio y el óxido de magnesio bajo condiciones controladas y específicas (relacionadas con la dieta, tipo de animal, etc.), la investigación podrá aportar datos concretos sobre su eficacia relativa en dicho escenario particular. Los hallazgos permitirán validar, refinar o cuestionar las recomendaciones generales derivadas de la literatura aquí revisada (e.g., Fernández, 2021; Bea & Udina, 2022; Mendoza et al., 2022), proporcionando información valiosa para nutricionistas y productores a la hora de optimizar las estrategias de manejo de la salud ruminal y la eficiencia productiva mediante el uso de buffers. La base teórica establecida en esta comparación es, por tanto,

esencial para interpretar los resultados experimentales y extraer conclusiones aplicables a la práctica.

Tras revisar 82 experimentos, Erdman (1988) concluyó que el uso de bicarbonato de sodio, óxido de magnesio, bicarbonato de potasio y otros buffers fue eficaz para elevar el pH ruminal

OBJETIVO

Objetivo general

Comparar el efecto alcalinizante del bicarbonato de sodio frente al óxido de magnesio en bovinos alimentados con dietas altas en concentrado, evaluando su impacto sobre el pH ruminal y la estabilidad del ambiente ruminal.

Objetivos específicos

- Evaluar los cambios en el pH ruminal tras la suplementación con bicarbonato de sodio y óxido de magnesio en bovinos.
- Determinar la velocidad de acción de ambos tamponantes sobre el pH ruminal posterior al consumo de concentrado.
- Analizar la influencia de cada alcalinizante sobre parámetros indirectos de fermentación ruminal (como consumo de alimento y signos clínicos de acidosis).
- Establecer cuál de los dos tamponantes mantiene el pH ruminal dentro de un rango fisiológicamente óptimo por mayor tiempo.

HIPÓTESIS

La suplementación con bicarbonato de sodio en bovinos alimentados con dietas altas en concentrado tendrá un efecto alcalinizante más rápido y eficaz sobre el pH ruminal en comparación con el óxido de magnesio, favoreciendo un ambiente ruminal más estable y condiciones más propicias para la actividad microbiana, la digestión de la fibra y el rendimiento productivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron dos Novillos de la raza Charoláis adaptados con fístula Ruminal permanente para tomar la muestra

Novillos de 24 meses de edad, con una condición corporal de 4/5, de 300 kg /PV

Para medir el pH se utilizó un potenciómetro digital marca HANNA Instruments modelo H198103

Óxido de magnesio en polvo

Bicarbonato de sodio en polvo

Balanza analítica

Báscula digital de piso con capacidad de 150kg

Guantes de exploración

A cada bovino se le realizó la fijación de una cánula ruminal permanente, con una previa rumenotomía, utilizando la técnica descrita por Alexander (1982), permitiendo la medición directa del pH ruminal.

TOMA DE MUESTRA

El muestreo se llevó a cabo de la siguiente manera: hora 0, hora 4, hora 8, hora 12, hora 24, y hora 48, postprandial, simultáneo a una prueba de digestibilidad.

El pH ruminal se midió a través de un potenciómetro digital calibrado, tomando la muestra directamente de la fístula ruminal, en intervalos.

DIETA OFRECIDA

La dieta que se ofreció a los animales, estaba constituida por heno de alfalfa de primera calidad y alimento balanceado comercial de 20% de proteína cruda. Se integraron en una ración totalmente mezclada (RTM)

Se ofrecía la mitad de la ración por la mañana 9:00 am, y la otra mitad por la tarde 6:00 pm, el agua se ofreció a libre acceso.

Se utilizó un diseño experimental Turn Over con tres repeticiones por tratamiento.

Para análisis estadístico se usó el paquete SAS (2020)

Los resultados se muestran en forma de tabla y de gráfica.

RESULTADOS

Tabla 1. Lecturas de pH ruminal en novillos

HORA	OXIDO DE MAGNESIO	BICARBONATO DE SODIO
0	6.4	6.4
4	6.3	6.0
8	6.0	6.2
12	6.1	5.9
24	6.8	6.5
48	6.8	7.4

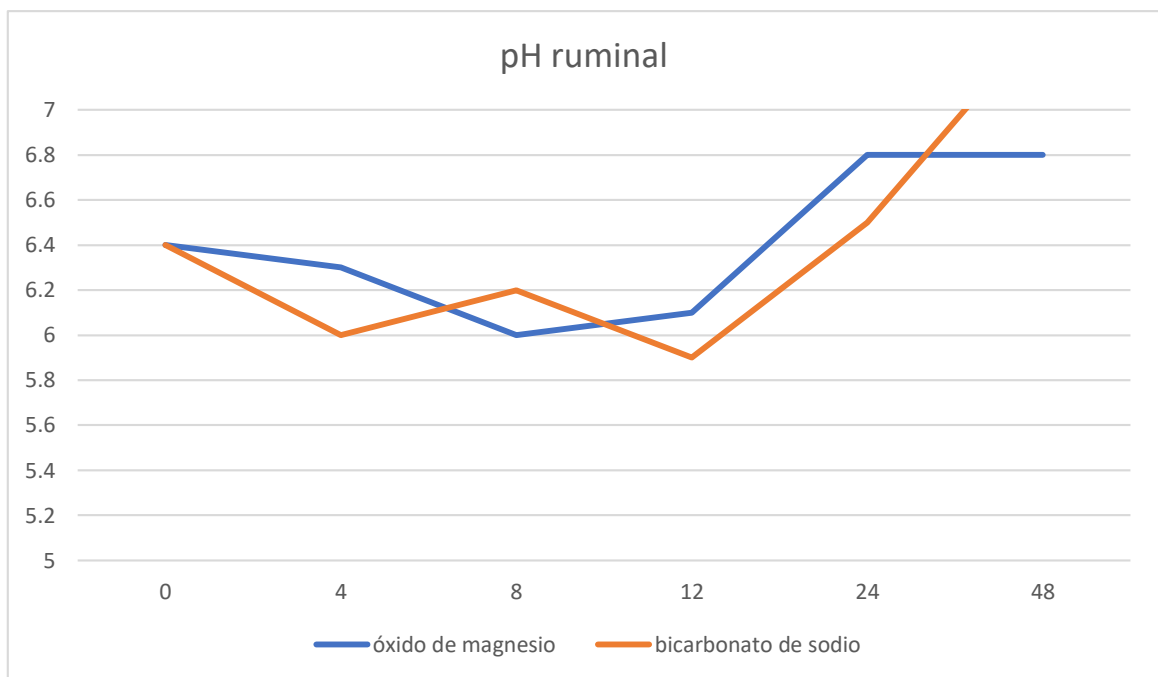


Figura 1. Gráfico de resultados del pH ruminal de los novillos

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los valores de pH ruminal obtenidos tras la administración de los alcalinizantes muestran diferencias en el comportamiento entre el bicarbonato de sodio y el óxido de magnesio durante las 48 horas de monitoreo.

Al inicio del experimento (hora 0), ambos animales presentaban un pH ruminal de **6.4**, correspondiente a un estado normal previo al tratamiento. Tras inducir la acidosis y administrar los respectivos alcalinizantes, se observaron las siguientes tendencias:

- En el animal que recibió **bicarbonato de sodio**, el pH disminuyó a **6.0** a las 4 horas y se mantuvo relativamente bajo hasta la hora 12 (**5.9**), lo cual indica una rápida acción neutralizante inicial, pero de corta duración. A partir de las 24 horas, comenzó una recuperación progresiva (**6.5**), alcanzando un valor de **7.4** a las 48 horas, lo que refleja un efecto alcalinizante prolongado posterior a su absorción y acción sistémica.
- Por otro lado, el animal que recibió **óxido de magnesio** mostró una reducción más leve del pH a las 4 horas (**6.3**) y alcanzó su punto más bajo a las 8 horas (**6.0**). Sin embargo, a partir de ese momento, el pH se mantuvo estable y dentro de valores normales (**6.1 a 6.8**) durante el resto del periodo de observación.

Comparativamente, el **bicarbonato de sodio** mostró un **efecto más marcado a largo plazo**, con una alcalinización evidente a las 48 horas. El **óxido de magnesio**, aunque tuvo un efecto más moderado, fue más **estable** y sin caídas pronunciadas tras la administración, lo que sugiere un **efecto tamponador sostenido**.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran diferencias importantes en la dinámica de acción de los dos alcalinizantes utilizados. El bicarbonato de sodio, reconocido por su rápida capacidad de neutralización de ácidos, mostró un descenso inicial en el pH ruminal, seguido de una recuperación paulatina que culminó con un pH de 7.4 a las 48 horas, indicando una fuerte respuesta alcalinizante en fases tardías. Este comportamiento sugiere una posible acción retardada o una absorción y recirculación sistémica que contribuye a la corrección del estado ácido con el paso del tiempo.

Por su parte, el óxido de magnesio presentó una disminución leve del pH en las primeras horas, manteniéndose luego dentro de rangos fisiológicos más estables (6.1–6.8), lo que podría explicarse por su efecto tamponador sostenido y su menor solubilidad, que permite una liberación más gradual en el rumen. Su acción parece estar orientada más a la prevención de fluctuaciones bruscas del pH que a una alcalinización intensa.

CONCLUSIONES

- El bicarbonato de sodio mostró un efecto alcalinizante más pronunciado hacia las últimas horas del experimento, alcanzando un pH superior a 7, lo cual podría ser útil en tratamientos de acidosis ruminal avanzada.
- El óxido de magnesio ofreció un efecto más estable y sostenido en el tiempo, evitando caídas significativas del pH y manteniéndose dentro de rangos fisiológicos.
- Ambos compuestos mostraron utilidad como agentes alcalinizantes, pero su aplicación podría adaptarse según la fase de la acidosis, la urgencia del tratamiento y el objetivo terapéutico (corrección vs mantenimiento).

REFERENCIAS

- Albaitaritz. (2025). *PRODUCTOS Catálogo 2024-25*.
<https://albaitaritz.com/wp-content/uploads/Catalogo-Productos-2024.pdf>
- Bodas, R., Fernández, B., Giráldez, F. J., López, S., & Mantecón, A. R. (2009). *Efecto de niveles de suplementación con bicarbonato de sodio en el consumo alimentario y el comportamiento animal de ovinos de ceba*. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 43(1).
<https://www.redalyc.org/pdf/1930/193015398006.pdf>
- Castillo, S. E., & Macías, I. (2022). *Efecto de las dietas de vacas lecheras sobre los niveles de nitrógeno ureico en leche en tres unidades de producción en el suroeste del Estado de México* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México].
<http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/137202/TESIS%20Castillo%20y%20Macias%204Nov22.pdf>
- Fernández, M. (2021). *El uso del bicarbonato sódico y la acidosis ruminal en el vacuno lechero de alta producción*. https://www.agronegocios.es/wp-content/uploads/2021/10/uso-del-bicarbonato_MG302.pdf
- Infortambo. (2020). *La revista del sector lechero* (Edición 206).
https://empresasiansa.cl/wp-content/uploads/sites/4/2020/09/Edici%C3%B3n-206_-Infortambo-Lecher%C3%ADa.pdf
- Liaudat, A. C., Capella, V., & Rodriguez, N. (2024). *Bases fisiológicas de la producción animal*. www.unirioeditora.com.ar
- Martínez, D. A., & Oliver, O. J. (2016). Alcalosis metabólica hipoclorémica o alcalosis de iones fuertes: Una revisión. *Revista de Medicina Veterinaria*, 32, 131. <https://doi.org/10.19052/mv.3862>
- Mendoza, G. D., Hernández, P. A., Plata, F. X., Martínez, J. A., Arcos, J. L., & Lee, H. A. (2022). *Nutrición animal cuantitativa*.
http://cbs1.xoc.uam.mx/publicaciones_1/docs/Libro_digital_Nutricion_Animal_Cuantitativa.pdf
- Tánori-Lozano, A., Montalvo-Corral, M., Pinelli-Saavedra, A., Valenzuela-Melendres, M., Libertad, Z.-G., Dávila-Ramírez, J. L., & González-Ríos, H. (2022). *Inclusión dietaria de clinoptilolita como aditivo en la producción de rumiantes*. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v25i1.1759>
- Udina, A. (2021). *Mejora de la eficiencia ruminal con el uso de minerales de origen marino*.

https://vacapinta.com/media/files/fichero/vp024_castelanl_alimentacionmineralesmarinos.pdf