

FERMENTACIÓN RUMINAL, TAMAÑO DE PARTÍCULA Y EFECTO DE LA FIBRA EN LA ALIMENTACIÓN DE VACAS LECHERAS

SERGIO C. ANGELES CAMPOS
DEPARTAMENTO NUTRICIÓN ANIMAL Y BIOQUÍMICA
FMVZ UNAM

INTRODUCCIÓN

La estrategia de alimentación de los rumiantes se basa en la simbiosis establecida entre los microorganismos ruminales y el animal huésped; ya que el rumiante contribuye aportando las materias primas o alimentos y las condiciones propicias del medio ruminal como son: temperatura, acidez, anaerobiosis, ambiente reductor entre otros; mientras que las bacterias utilizan parcialmente los alimentos para aprovechar los forrajes los cuales son indigestibles para los mamíferos, con la consecuente aportación de productos de la fermentación con valor nutritivo para el rumiante (ácidos grasos volátiles) (Hamada, 1976) y proteína microbiana, sin embargo cuando esta relación simbiótica se altera como consecuencia de cambios en la ración o por factores no deseados se produce un desequilibrio en la población microbiana ruminal que conduce a la aparición de patologías.

El rumen es el sitio donde se lleva a cabo la fermentación del alimento que es ingerido por el animal. Cabe señalar que el rumen no es un órgano glandular por lo que no secreta enzimas digestivas de manera que la actividad digestiva depende de las enzimas producidas por las bacterias, protozoarios y hongos ruminales.

La importancia de dichos microorganismos ruminales se puede argumentar en el hecho de que de cada 15 kg de materia seca consumidos por el animal, 10 kg son degradados y fermentados por los microorganismos ruminales.

En los rumiantes, la presencia de bacterias, protozoarios y hongos le permite cubrir hasta el 100% de sus requerimientos energéticos a partir de carbohidratos estructurales como celulosa, y hemicelulosa, le permite utilizar fuentes de nitrógeno no proteínico (urea, amoníaco) para cubrir una parte de sus necesidades de proteína y además, lo hace independiente de una suplementación de vitaminas hidrosolubles para cubrir sus requerimientos.

DESARROLLO DEL RUMEN

Anatómicamente el rumen se desarrolla a partir de la porción no secretora del estómago (Church, 1979), el aparato digestivo de los rumiantes al nacimiento funciona muy parecido al de los animales no rumiantes debido a que dicho órgano presenta un desarrollo muy rudimentario. Dicho desarrollo del rumen implica, tanto, la implantación y desarrollo de la microbiota ruminal y la capacidad de absorción de nutrientes. Siendo importante el tiempo que trascorra en que los animales desarrollen su morfofisiología digestiva, ya que esto determinará el ritmo en que los procesos digestivos pasen a depender de las enzimas producidas por el animal, así como a la relación simbiótica establecida con los microorganismos ruminales (Orskov, 1988).

DESARROLLO DE PAPILAS RUMINALES

La absorción de productos finales de la fermentación depende del adecuado desarrollo de las papilas del epitelio ruminoreticular y de una correcta circulación capilar. El contacto continuo de los ácidos grasos volátiles (AGV's) particularmente el butírico y en menor grado,

el propiónico con el epitelio estratificado del rumen estimula el desarrollo de papilas y, además el dióxido de carbono, estimulan el flujo sanguíneo hacia el epitelio ruminoreticular, (Booth y McDonald, 1988).

Los AGV's se absorben en forma no dissociada. El acético atraviesa la pared ruminal rápidamente sin sufrir ningún cambio y es utilizado por el organismo como aporte de energía. El ácido propiónico es convertido en ácido láctico y succínico para que este entre directamente al ciclo de Krebs para obtener energía o bien utilizarse como precursor de glucosa. El ácido butírico es metabolizado en la pared ruminal y convertido a betahidroxibutírico (Booth y mCDonald, 1988).

COLONIZACIÓN DEL RUMEN

Un mito que se tiene a nivel práctico es que el consumo de forrajes ayuda a la colonización bacteriana del rumen. Sin embargo la primera colonización ruminal es por reflujo del abomaso y se observa desde los primeros días de vida siendo la *Escherichia coli* y *Clostridium welchii* los primeros microorganismos en habitar el rumen. La capacidad de las bacterias para pasar a través de la barrera ácida del abomaso es debida a la presencia de renina la cual eleva el pH. Posteriormente la colonización continua por el reflujo de lactobacilos y bacterias amilolíticas y, por último las celulolíticas (Caeiro Potes, 1998).

Desde el punto de vista optimización de los recursos lignocelulósicos, el conocimiento de los mecanismos implicados en la acción de la población ruminal sobre los forrajes es fundamental para utilizar este tipo de recursos de relativa abundancia y bajo costo económico.

Las etapas en que se lleva a cabo la digestión microbiana de los polisacáridos estructurales en el rumen son dos:

- 1) La colonización de los substratos que llegan a rumen y la adhesión íntima de los microorganismos a estas estructuras vegetales.
- 2) La acción enzimática sobre dichos substratos, independientemente de la posible utilización de los productos resultantes.

La magnitud de dichos eventos esta limitada por la naturaleza de la pared celular vegetal, por las características de la población microbiana implicada y por las condiciones del ambiente ruminal o limitar estos procesos.

Es importante recordar que los microorganismos ruminales son clasificados por Czerkowski y Cheng, 1988 en tres subpoblaciones de acuerdo a su interacción con las partículas de alimento:

- 1) los microorganismos suspendidos en el líquido ruminal
- 2) los que se encuentran en las paredes del epitelio ruminal y
- 3) los adheridos firmemente a las partículas de alimento.

ECOLOGÍA RUMINAL

Las condiciones ambientales en las que se desarrolla el proceso de degradación de alimento, tanto las características físicas y químicas del medio como las interacciones entre distintos microorganismos determinan el grado y ritmo de la digestión del forraje.

El éxito ecológico de los rumiantes se debe a los beneficios de la fermentación pregástrica. El término fermentación se refiere al metabolismo microbiano en ausencia de oxígeno que convierte a los carbohidratos en productos orgánicos como los ácidos grasos volátiles (AGV's), ácido láctico y etanol. Estos productos retienen la mayor parte de la energía original en el sustrato, una consecuencia de la falta de oxígeno para su oxidación completa a bióxido de carbono (CO₂) y agua.

La fermentación ruminal le permite al rumiante:

- a) utilizar alimentos que son muy fibrosos para los no rumiantes
- b) le confiere la habilidad de degradar la celulosa y liberando el contenido celular convirtiendo a la celulosa en un nutrimento primordial.
- c) permitiendo la síntesis de proteína microbiana de alto valor biológico a partir de proteína vegetal de bajo valor biológico, a partir de nitrógeno no proteico de la dieta y a partir del reciclaje de productos metabólicos de desecho (urea) y
- d) provee todas las vitaminas del complejo B siempre y cuando exista la concentración adecuada de cobalto para la síntesis de vitamina B₁₂.

Las desventajas de la digestión ruminal son que:

- 1) el rumiante necesita pasar una buena parte del día (aprox. 8 h) rumiando y debe tener acceso al alimento a intervalos regulares.
- 2) El rumiante necesita mecanismos complejos para mantener su cámara de fermentación trabajando eficientemente por ejemplo:
 - a) adicionar continua de grandes cantidades de saliva con naturaleza alcalina
 - b) movimientos de mezclado con tono marcado de los compartimentos gástricos
 - c) mecanismos para la eliminación de gases producto de la fermentación (eructo), para la regurgitación (rumia) y para la absorción de los productos finales de fermentación y para el paso de partículas no digeridas hacia el omaso
- 3) las rutas metabólicas deben ser capaces de utilizar los particulares productos finales de la fermentación, los AGV's, de los cuales sólo el ácido propiónico es el único que puede convertirse en glucosa, cuyo requerimiento es elevado en etapas como final de gestación y lactación. Por lo que se considera al proceso de fermentación como ineficiente desde el punto de vista energético, ya que las bacterias gastan energía para su mantenimiento lo cual se traduce como calor lo cual se considera una pérdida de energía para el rumiante.

FACTORES DETERMINANTES DEL PH RUMINAL

El control del pH juega un papel central en el mantenimiento de una fermentación equilibrada. El pH ruminal depende fundamentalmente de tres factores:

- a) Producción de ácido;
- b) Capacidad tampón
- c) Eliminación de protones por absorción o flujo al tracto digestivo inferior.

PRODUCCIÓN DE ÁCIDO

La fermentación produce una serie de compuestos orgánicos entre los cuales los AGV's son los más importantes. La constante de disociación (pKa) de estos AGV's es baja. Debemos señalar que el pKa de los ácidos acético, propiónico y butírico es mayor que la del ácido láctico, en condiciones de pH normal, todos ellos se encuentran disociados generalmente,

por lo tanto se encuentran cediendo un protón al medio provocando una disminución del pH del líquido ruminal. Sauvart et.al., (1999) demostraron la relación inversa entre la concentración de AGV's totales y el pH ruminal.

Esta variabilidad demuestra que el pH ruminal no solo es el resultado de la cantidad de ácido producido, sino que otros factores, como la capacidad tampón del medio son importantes. La cantidad de AGV's producida depende de la cantidad de la ración fermentada y esta, a su vez depende de la cantidad de ración ingerida y de la velocidad de degradación.

Sauvart, et.al., (1999) demostraron la asociación negativa entre la cantidad de materia seca ingerida y el pH ruminal, y estimaron una reducción de $0,14 \pm .04$ unidades de pH por cada 10 g de MS por kg PV.

El pH del contenido ruminal disminuye durante las primeras 4-8 semanas de ingestión con el creciente consumo de alimento sólido, lo cual favorece la absorción de AGV's, particularmente del ácido butírico, ya que al presentar un pH alrededor de 5.4 se incrementa su velocidad de absorción en 3 o 4 veces con respecto al ácido acético. (Noble, 1989) y posteriormente el pH se incrementa hasta alcanzar niveles de 6- 6.2 donde se presenta la mayor actividad celulolítica.

El rango de pH que se puede encontrar en rumen oscila entre 6.2 y 7.0; de todos los factores existentes del ambiente ruminal, el pH es el más susceptible a sufrir una variación, y la ración es el más determinante de todos los cambios. El mantenimiento del pH ruminal es el resultado de la producción y la neutralización o eliminación de protones hacia el medio ruminal. Mientras que las fermentaciones de carbohidratos no estructurales son energéticamente más eficientes son altamente ácidogénicas, y su aportación debe limitarse con carbohidratos estructurales o fibrosos, ya que éstos aportan una capacidad amortiguante al medio ruminal. Sin embargo la fibra puede limitar la ingestión y su fermentación es energéticamente menos eficiente.

El factor fibra es un compuesto heterogéneo constituido por varias estructuras químicas de composición conocida, pero cuya estructura tridimensional es variable y poco conocida.

Desde el punto de vista químico la fibra se compone de un complejo entrelazado de celulosa, hemicelulosa y lignina. Con fines prácticos, se ha definido en términos de fibra cruda (FC) fibra neutro detergente (FDN) y ácido detergente (FAD), y se utiliza para predecir la calidad de los forrajes, ingestión de la materia seca, digestibilidad y valor energético de los alimentos.

Celulosa

Conformada solamente de unidades de glucosa, se encuentra formando la estructura de la pared celular y es la molécula disponible más abundante en la naturaleza. Es una molécula tridimensional conformada al menos de 15 a 10,000 unidades de glucosa, con enlaces β 1-4 de glucopiranosas.

Hemicelulosa

Esta fracción de la pared celular de las plantas está relacionada con las gomas vegetales, se encuentra en menor cantidad que la celulosa y su estructura química es de menor tamaño comparada con la celulosa. Deriva de las cadenas de pentosas y actúa como cemento, junto con la celulosa y fibrillas vegetales. Está conformado por xilosa, arabinosa, galactosa,

manosa, ácidos urónicos (galacturónico y glucurónico). Cabe señalar que la concentración tanto de xilosa y arabinosa se ha utilizado como indicador de la calidad del forraje.

Diversos trabajos (Van Soest, 1994) reportan que la digestión de la hemicelulosa es limitada por la concentración de lignina.

Lignina

Es un compuesto fenólico de alto peso molecular, adiciona rigidez a la estructura y limita la disponibilidad de carbohidratos estructurales para los microorganismos ruminales. La lignificación aumenta con la madurez fenológica con consecuente aumento de ácidos fenólicos.

Desde el punto de vista nutricional de rumiantes, la fibra puede definirse como el conjunto de componentes de los vegetales que presentan baja digestibilidad, por lo que promueven la rumia y el equilibrio ruminal.

La fibra y particularmente los forrajes constituye el componente fundamental de las raciones en la mayor parte de los sistemas productivos de rumiantes. Sin embargo, los niveles de incorporación en las raciones varían entre rangos muy superiores 25-45% de Fibra Detergente Neutro (FND) a los niveles recomendados de proteína (15-18%), grasa (4-7%) y cenizas (8-10%).

En animales con indicadores de producción mínima o moderada, las recomendaciones tratan de establecer límites máximos de fibra. El exceso de fibra reduce la capacidad de ingestión de alimentos, digestibilidad de la ración, síntesis de proteína microbiana ruminal y el aporte de energía. Por el contrario, en animales de elevada producción donde la ración deberá contener una elevada densidad energética, las recomendaciones establecen mínimos. La falta de fibra provoca una disminución del contenido de grasa, acidosis, laminitis y desplazamiento de abomaso, debido a desequilibrios físicos (falta de llenado ruminal) o fermentativos (reducción del pH ruminal Allen, 1991). Por lo tanto cuando las estrategias de formulación se orientan a reducir los niveles de fibra efectiva y a la utilización de subproductos, la composición, estructura, forma y tamaño cobra una importancia trascendental. Por lo que en esta plática se revisaran algunos conceptos con respecto a la utilización de fibra como criterio de formulación en el ganado lechero.

ESTRUCTURA QUÍMICA

Los carbohidratos fibrosos constituyen la fibra efectiva, desde el punto de vista químico, la fibra es un agregado de componentes que no constituye una entidad propia ya que se encuentran entremezclados como lo es la celulosa, hemicelulosa y lignina y que con frecuencia se se asocian minerales y otros componentes.

Según Van Soest, 1982 la fibra se clasifica en los siguientes términos:

a) Fibra Cruda (FC):

Consiste en un residuo insoluble después de una incubación en una solución ácida, seguida de una alcalina. El residuo insoluble contiene celulosa pero ligada a cantidades variables de hemicelulosa, lignina y compuestos nitrogenados. Dicho contenido de estos componentes que acompañan a la celulosa dependerá del tipo de vegetal y de su estado de madurez fenológico lo que conduce a errores de interpretación por lo que el uso de FC en sistemas de alimentación actuales debe ser limitado.

b) Fibra neutro detergente (FDN):

Material insoluble en una solución detergente neutra y se compone de celulosa, hemicelulosa y lignina, existiendo otros compuestos mínimos como residuos de almidón cenizas y nitrógeno. Las recomendaciones recientes de Van Soest, 1991 para la determinación de FDN sugieren la utilización de amilasas termoestables específicas sobre todo en concentrados o ensilados de maíz y una corrección en cenizas.

c) Fibra ácido detergente (FAD):

Material insoluble en una solución detergente ácida y está constituida fundamentalmente por celulosa y lignina suelen existir componentes minoritarios como nitrógeno y/o minerales.

Como puede observarse la diferencia entre FDN y FAD consiste fundamentalmente en hemicelulosa. Es necesario apuntar que la determinación secuencial de FAD y lignina permite un cálculo más preciso del contenido de celulosa y hemicelulosa, pero que el método no secuencial es más adecuado para la determinación de cenizas ácidas insolubles, taninos y nitrógeno insoluble en FAD.

DEGRADACIÓN RUMINAL DE FIBRA

La fibra se fermenta en el rumen lentamente por acción de las bacterias celulolíticas (fibrolíticas). El proceso de degradación de la fibra se inicia con la adhesión de las bacterias a la pared vegetal, proceso que se realiza a una velocidad inversamente proporcional al grado de lignificación de dicha pared. Una vez adheridas, la degradación de los componentes de la pared celular progresa por acción de las celulasas y hemicelulasas y varía en función de la composición, entremezclado tridimensional de los componentes y el grado de lignificación.

Las bacterias celulíticas producen glucosa o pentosas como productos intermedios, y utilizan mayoritariamente vías fermentativas que conducen a la producción de acetato como producto final.

Durante el proceso fermentativo de la fibra se pierde un carbono en forma de metano, por lo que el proceso es energéticamente menos eficaz que la fermentación de otros nutrientes. Sin embargo, el acetato juega un papel muy importante en el aporte de precursores para la síntesis de grasa en la glándula mamaria, en consecuencia el aporte de fibra en el rumen y la supervivencia de las bacterias fibrolíticas es imprescindible. La degradabilidad efectiva de la fibra depende de la velocidad de tránsito ruminal y de su velocidad de degradación.

La fibra como nutriente, contribuye al mantenimiento del funcionamiento ruminal es decir por llenado ruminal y estímulo de las contracciones ruminales; y de las condiciones ruminales como pH, a través de la secreción salivar dependiente de la masticación y la rumia., (Nocek, 1994). Estas dos funciones dependen de la composición, degradabilidad y forma de presentación de la fibra. Sin embargo es importante recalcar que la fibra supone un inconveniente, ya que limita el contenido energético de las raciones (digestibilidad baja) y el potencial de ingestión (Mertens, 1987). Por lo tanto la formulación de raciones adecuada debe orientarse a buscar el equilibrio entre la ingestión máxima de materia seca (niveles inferiores de FDN y el mantenimiento de funciones y condiciones normales del rumen incluyendo cierto niveles mínimos tanto FDN y FAD.

CONCEPTO Y LA IMPORTANCIA DE LA FIBRA EFECTIVA

Las interacciones nutricionales de la fibra no sólo dependen de su composición, sino de las interacciones entre sus componentes y de la forma como se presenta al animal. Por estas razones no es suficiente con considerar únicamente el análisis químico como método de valoración de la calidad de un forraje, y es necesario observar el tamaño de partícula y el manejo de la ración. Por estas consideraciones se dificulta la formulación de raciones y la predicción de la respuesta de los animales a una ración determinada.

El uso de subproductos, tipo de forraje y procesado fino de algunos forrajes (para permitir un mejor ensilado, o henos en forma de pellets) resulta en la aparición de síndromes asociados a la falta de fibra en la ración (acidosis, disfunción ruminal, desplazamientos de abomaso. Muchos subproductos comúnmente utilizados en raciones de rumiantes son ricos en fibra y pueden utilizarse para reemplazar parcialmente los forrajes de la ración. Aunque estos ingredientes contienen fibra, no tiene el mismo efecto a nivel ruminal (Firkins, 1992) Por lo cual se ha generado el concepto de **fibra efectiva, fibra funcional o FDN efectiva**.

La fibra efectiva puede definirse como la capacidad real para estimular la rumia y la salivación que resulta en el mantenimiento de las condiciones ruminales óptimas para la producción de leche, y depende del tipo, forma y tamaño de la fibra que estimula la rumia.

Con base a estos principios se han desarrollado índices de valor forraje que estiman el tiempo de masticación y/o rumia por kg de MS, y que han servido de base para estimar el valor de fibra efectiva (FDNe). Con el fin de mantener el llenado ruminal y las condiciones fermentativas adecuadas, se recomienda que el 80% de la FDN se aporte en forma de FDNe, o bien el 22.4 de la FDNe en % de la MS ingerida, (Sudweeks et al., 1981; Santini et al., 1983).

La implementación de estos conceptos en la práctica presenta dos problemas:

- a) disponibilidad de valores de FDNe de los ingredientes es limitada. En la actualidad existen valores establecidos por la Universidad de Michigan y Cornell (Sniffen et al., 1992).
- b) Determinación práctica del valor FDNe en función del tamaño es difícil de estandarizar.

USO DE LA FIBRA COMO CRITERIO DE FORMULACIÓN DE RACIONES

La FDN se utiliza como índice de volumen de la ración y supone un límite a la capacidad de ingestión de la ración. trabajos de la Universidad de Wisconsin sugieren que la capacidad de ingestión de animales se estima como el 1.2 % del peso vivo como mínimo en forma de FDN (Mertens, 1987). Por encima de éste nivel la FDN puede limitar la ingestión de alimentos, y en ningún caso debe superar el 1.4-1.5% del peso vivo.

La FDA debe reducirse al máximo para optimizar el contenido energético de la ración, pero debe aportarse niveles mínimos que mantengan el equilibrio ruminal.

CONCLUSIONES

La formulación correcta de la fibra requiere la toma de muestras y valoración correcta de los forrajes ya que la valoración de la FDN considera conceptos de procedencia de la FDN de forrajes, tamaño de partícula y fibra efectiva; así como la evaluación de los resultados productivos en función de la ingestión, producción y composición de la leche, condición corporal y incidencia de síndromes patológicos.

La naturaleza de la composición de la pared celular es la clave que limita la degradación ruminal, ya que a medida que la planta madura la pared celular se ensancha y comúnmente produce una notable deposición de constituyentes aromáticos (compuestos fenólicos), por lo tanto la lignificación de la pared celular de los forrajes limita la degradación de la MS.

LITERATURA CITADA

- Bacha, F. Nutrición del ternero neonato .1997 XV Curso de Especialización Avances en Nutrición y Alimentación Animal.FEDNA
- Calsamiglia, S. Nuevas bases para la utilización de la fibra en dietas para rumiantes.1997 XV Curso de Especialización Avances en Nutrición y Alimentación Animal. FEDNA
- Calsamiglia, S. Fisiología Ruminal relacionada con la patología digestiva: Acidosis y Meteorismo. 1997 XV Curso de Especialización Avances en Nutrición y Alimentación Animal. FEDNA
- Chaudhry, A.S. Chemical and biological procedures to upgrade cereal straws for ruminants. 1998 Nutrition Abstracts and Reviews (series B) **68**: 319-331.
- Cheng, K.J. C.W.; Forsberg, H.; Minato and J.W. Costerton. 1991. Microbial ecology and physiology of feed degradation within the rumen. En: T, Tsuda, Y, Sasaki, R. Kawashima (Eds.) Physiological aspects of digestion and metabolism in ruminants. Academic, Press, San Diego pp. 595-624.
- Fondevila, M. Procesos implicados en la digestión microbiana de los forrajes de baja calidad. 1998. Rev. Fac. Agron. (LUZ) **15**: pp. 87-106
- Grenet E. Aspects microscopiques de la dégradation microbienne des tissus végétaux dans le rumen. 1997. INRA Prod. Anim. **10**: (3) pp.241-249
- Leek,B.F. 1993. Digestion in the ruminant stomach. En: M. J. Swenson and Reece (eds) Duke's Physiology of Domestic Animals 11th ed. Cornell University Press, Ithaca pp. 387-396.
- Ramírez, O.R.; Ramírez, L. R.G.;López G. F. Factores estructurales de la pared celular del forraje que afectan su digestibilidad. 2002 Ciencia UANL **2** pp. 180-189.
- Stevens, C.E. Comparative Physiology of the Vertebrate Digestive System Cambridge University Press New Yor, 1988 pp. 159-176.