

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE CORNELL (CNCPS) COMO MODELO DE VALORACIÓN PROTEICA Y ENERGÉTICA PARA RUMIANTES

J.A. Guada
Dpto. Producción Animal y Ciencia de los Alimentos
Universidad de Zaragoza

1.- INTRODUCCIÓN

El sistema de valoración proteica y energética desarrollado por la Universidad de Cornell, conocido como "Cornell Net Carbohydrate and Protein System (CNCPS)" es un modelo con varios niveles de agregación que, al igual que otros recientes sistemas de valoración europeos (ARC, 1980, 1984; INRA, 1978, 1988; AFRC, 1993) y americanos (NRC, 1985), permite predecir los rendimientos productivos del ganado vacuno a partir del contenido en ingredientes de su dieta. Pero, a diferencia de estos últimos, el CNCPS no está específicamente diseñado para el racionamiento sino para comprobar la idoneidad de dietas previamente formuladas. Es decir, permite valorar la adecuación de una dieta previamente establecida para unas condiciones de producción determinadas. En este sentido, ofrece una detallada información sobre factores limitantes del metabolismo ruminal y adecuación del aporte de nutrientes, incluyendo aminoácidos limitantes, que puede resultar sumamente útil para valorar estrategias de formulación y elaborar hipótesis de trabajo.

El sistema CNCPS está integrado por una serie de submodelos que valoran, respectivamente, el contenido en carbohidratos y proteína disponibles de la dieta (Sniffen et al., 1992), los procesos de fermentación y síntesis de proteína microbiana (Russell et al., 1992), las necesidades energéticas y proteicas del ganado vacuno (Fox et al. 1992) y el aporte y necesidades de aminoácidos (O'Connor et al. 1993). Aunque el submodelo de necesidades supone un importante esfuerzo de integración de la información disponible, incluyendo diferencias de precocidad entre razas y distintos aspectos de la

termorregulación, lo que aumenta considerablemente su versatilidad, destacan por su originalidad los submodelos dedicados al aporte de nutrientes y el metabolismo ruminal, y por su carácter innovador el submodelo de estimación de aportes y necesidades de aminoácidos.

A continuación se comentan las características más significativas de estos tres submodelos del sistema CNCPS y en el cuadro 1 se resumen las diferencias esenciales con los restantes sistemas que atañen fundamentalmente al campo de la valoración proteica. Aunque, recientemente, el submodelo ruminal ha sido ampliado, incorporando la posibilidad de predecir la producción y absorción de ácidos grasos volátiles, y mejorar la estimación del pH ruminal (Pitt et al. 1996), estos aspectos se omiten para simplificar la presentación, dado que todavía esta pendiente su integración en el modelo general de predicción de rendimientos.

Cuadro 1.- Comparación de algunos de los factores considerados en la estimación del valor proteico por distintos sistemas.

| Sistema de valoración | AFRC | INRA | NRC | CNCPS |
|---|-------------|-------------|------------|--------------|
| <u>Estimación de la degradabilidad</u> | | | | |
| Fracciones proteicas consideradas | 3 | 3 | 3 | 5 |
| Cinética de degradación (kd) | + | + | + | + |
| Velocidad de paso (kp) variable | + | + | | + |
| <u>Estimación de la síntesis microbiana</u> | | | | |
| Sustrato energético | EMF | MOF | TDN | CHOF |
| Efecto de kp | empírica | | empírica | mecánica |
| Compartimentación microbiana | | | | + |
| N reciclado (% de N ingerido) | | | 15 | 10-70 |
| Efecto de la fuente de N | | | | + |
| Efecto del pH | | | | + |
| Efecto de los ionóforos | | | | + |
| Proteína microbiana verdadera | 0,75 | 0,8 | 0,80 | 0,85 |
| Digestibilidad del N microbiano | 0,85 | 0,8 | 0,8 | 0,75 |
| Digestibilidad del N degradado | var. | var. | 0,8 | var. |
| Perfil aminoacídico | | | | + |
| <u>Utilización de la proteína metabolizable</u> | | | | |
| Mantenimiento | 1 | est. | 0,67 | 0,67 |
| Crecimiento | 0,59 | 0,68-0,40 | 0,5 | 0,75-0,40 |
| Lactación | 0,68 | 0,64 | 0,65 | 0,65 |

*EMF = energía metabolizable fermentable, MOF = materia orgánica fermentable; CHOF = carbohidratos fermentables.

2.- VALOR NUTRITIVO DE CARBOHIDRATOS Y PROTEINAS

2.1.- Carbohidratos

El valor energético de la dieta se expresa convencionalmente en términos de energía metabolizable (EM) o energía neta (EN). Estas unidades describen la energía disponible por el animal y son útiles para comparar la adecuación de los aportes con las necesidades, pero resultan poco apropiadas como índices de la energía disponible por los microorganismos del rumen. La energía de las heces, orina y metano, que se detraen de la energía bruta para estimar la EM, supone una pérdida de energía para el animal pero no para los microorganismos ruminales. De hecho, parte de la energía fecal se encuentra en forma de cuerpos y restos microbianos procedentes del ciego y rumen, respectivamente. A su vez, parte de la energía eliminada en forma de orina procede del metabolismo orgánico de la proteína microbiana absorbida, mientras que el metano es un producto del metabolismo energético bacteriano.

Por otra parte, algunos de los nutrientes contabilizados en la EM, como los ácidos grasos o la fracción de la proteína no degradada en el rumen, no son utilizados por las bacterias como sustrato energético. Y aquellos que son utilizados no pueden considerarse isoenergéticos, debido a la desigual proporción de energía liberada durante la fermentación anaerobia. Los carbohidratos constituyen la principal fuente de energía para el crecimiento microbiano, pero la proteína tiene un rendimiento energético inferior en un 80% y por lo que se refiere a las grasas, solo el glicerol es fermentable (Hungate, 1966). Para corregir esta falta de consistencia, el INRA (1978) propone estimar el crecimiento microbiano a partir de la materia orgánica fermentable (MOF), calculada deduciendo de la materia orgánica digestible (MOD) el contenido en grasa, la proteína no degradable y los ácidos grasos volátiles, en el caso de los ensilados. Un enfoque similar es el seguido por el AFRC (1993) que propone calcular la denominada EM fermentable trayendo de la EM el equivalente energético de la grasa y de los ácidos grasos volátiles, aunque sigue considerando como fermentable a la proteína no degradable.

A pesar de que estas propuestas mejoran la estimación de la energía disponible por los microorganismos, el hecho de estimar la MOF a partir de la MOD conduce a error, ya que solo una proporción variable de la MOD es fermentada en el rumen, dependiendo del ritmo de degradación y del tiempo de retención en el rumen. El resto es digerida en el intestino delgado o fermentada en el intestino grueso. Así, suponiendo unos ritmos fraccionales de degradación del 25 y el 6% para la MO de la cebada y el maíz, respectivamente, se puede estimar que una disminución en el tiempo medio de retención de 20 a 12 h (2 y 3 x mantenimiento) supondría una disminución de la proporción de cebada y maíz degradados en el rumen del 10 y el 20%, respectivamente.

Para evitar estos inconvenientes, el CNCPS valora el aporte de energía al rumen en términos de carbohidratos estructurales (CS) y no estructurales (CNS), basándose en el esquema de fraccionamiento de la fibra de Goering y Van Soest (1970). Los CS se corresponden con la fibra neutro detergente (FND), corregida trayendo su contenido en

N x 6,25, mientras que los CNS comprenden el resto de los carbohidratos (azúcares, almidón, fructosanas, galactanas, pectinas y β -glucanos) estimados por diferencia entre el contenido en materia orgánica y el de CS, la proteína y el extracto etéreo (MO-CS-PBEE). Cada una de estas fracciones (CS y CNS), define un conjunto heterogéneo de compuestos, por lo que se subdividen en un total de 4 fracciones con distintas características en cuanto a su degradabilidad, como se detalla en el cuadro 2.

Cuadro 2.- Análisis y características de las fracciones proteicas.

| Tampón borato-fosfato | Fracción | Compuestos | Determinación | Degradabilidad |
|------------------------------|-----------------|--|----------------------|-----------------------|
| Soluble | A | Nitrógeno no proteico | (Soluble-B1) | Instantánea |
| Insoluble | B1 | Globulinas, albúminas | Precipitable TCA | Rápida: 100-400 |
| | B2 | Albúminas, globulinas | 1-(A+B1+B3+C) | Intermedia: 3-15 |
| | B3 | N pared celular disponible | (NDIN-ADIN) | Lenta: 0,05-0,5 |
| | C | N ligado a lignina Compuestos de Maillard | ADIN | Indegradable |

NDIN = Nitrógeno insoluble en detergente neutro

ADIN = Nitrógeno insoluble en detergente ácido

A cada subfracción se le atribuye un ritmo de degradación (kd), característico de cada alimento (ver Sniffen et al. 1992), que junto con una estimación del tiempo de retención del contenido digestivo ruminal o ritmo fraccional de tránsito (kp), permite estimar la proporción de cada fracción que es degradada en el rumen ($kd/(kd+kp)$) o que lo abandona sin sufrir degradación ($kp/(kd+kp)$) (Sniffen y Robinson, 1985). Cada fracción de carbohidrato degradada en el rumen constituye, por lo tanto, un sustrato de fermentación microbiana que proporciona energía a un ritmo definido por su velocidad de degradación (kd).

Finalmente, el contenido de la dieta en EM o EN, utilizables por el hospedador, se estima a partir de su contenido en TDN. El modelo calcula, a su vez, este último como la diferencia entre el contenido en nutrientes y la excreción fecal de residuos indigestibles de origen alimenticio y microbiano, asumiendo una digestibilidad intestinal característica de cada fracción alimenticia no degradada en el rumen o de origen microbiano.

Este procedimiento, aunque de cálculo tedioso, no requiere técnicas analíticas complejas y permite describir, con una aproximación razonable, el heterogéneo valor nutritivo de los carbohidratos aportados por la dieta, así como su influencia sobre la eficiencia de síntesis microbiana, de cuya estimación se ocupa el submodelo que describe el metabolismo ruminal.

2.2.- Proteínas

Por lo que se refiere a la valoración proteica, la mayor parte de los actuales sistemas (INRA, 1988; NRC, 1985; AFRC, 1993) incorpora estimaciones de la degradabilidad ruminal de la proteína y del aporte de N disponible para el crecimiento microbiano, pero no tiene en cuenta la forma en que el N es aportado, a pesar de la diferente utilización del N en forma de amoníaco o como constituyente de aminoácidos y péptidos (Nolan, 1993).

En el CNCPS, se diferencian tres fracciones nitrogenadas. El N no proteico (fracción A), que es utilizado exclusivamente en forma de NH₃, la proteína verdadera potencialmente degradable (fracción B) y la proteína indigestible e indigestible en el intestino, por estar ligada a la fibra ácido detergente (fracción C). A su vez, la fracción B se subdivide en otras tres que se caracterizan por su diferente ritmo de degradación, como se indica en el cuadro 3. Partiendo de los ritmos de degradación (kd) y de paso (kp), ello permite estimar el aporte de N utilizable por los microorganismos en forma de NH₃ y péptidos o aminoácidos, así como la proporción de proteína que escapa sin ser degradada.

Cuadro 3.- Análisis y características de las fracciones de carbohidratos.

| (%/h) | Fracción | Compuestos | Determinación | Degradabilidad |
|-------|----------|---|------------------|------------------|
| CNS | A | Azúcares | (CNS-B1) | Rápida: 100-400 |
| | B1 | Almidón, pectinas β-glucanos, AGV's | Análisis directo | Intermedia: 5-60 |
| CS | B2 | Pared celular digestible | (CS-C) | Lenta: 3-15 |
| | C | Pared celular indigestible (<i>in vitro</i> , 72 h) | Liginina x 2,4 | Indegradable |

Describir la cinética de degradación de la fracción B mediante tres constantes de degradación (kd) en lugar de una, como en los restantes métodos de valoración (INRA, 1978; NRC, 1985; AFRC, 1993)), aumenta considerablemente la complejidad del modelo, sin que ello reporte ventajas aparentes en la estimación de la degradabilidad 0 de la síntesis microbiana. Parece difícil pensar que ello pueda contribuir a mejorar la precisión con que se estima el N degradable, si se tienen en cuenta los errores implícitos en la técnica de las bolsas de nylon (Orskov y McDonald, 1979), especialmente si los valores no se corrigen para la contaminación microbiana (Mathers y Aitchinson, 1981; Nocek y Grant, 1987; Rodriguez et al. 1995).

Asimismo, el hecho de considerar que el N insoluble en detergente ácido es indigestible en el intestino es cuestionable (Waters et al., 1992), especialmente cuando se trata de alimentos sin procesar, en los que no ha tenido lugar la formación de compuestos de Maillard (Nakamura et al., 1994).

3.- METABOLISMO RUMINAL

3.1.- Síntesis microbiana

La proteína de origen microbiano representa, por término medio, el 59% de la proteína que llega al intestino delgado (Clark et al., 1992), por lo que su correcta estimación resulta esencial para valorar las variaciones en el aporte de proteína metabolizable. Sin embargo, las estimaciones de la producción microbiana se caracterizan por una gran variabilidad (ARC, 1980), debido tanto a la imprecisión de las técnicas de medición como a las diferentes condiciones de alimentación en que se han estimado.

Hoy se reconoce que la eficiencia de síntesis microbiana puede variar en función del plano y el patrón de alimentación, la relación forraje/concentrado y el tipo de nutrientes aportados por la dieta (Sniffen y Robinson, 1987; Stern et al., 1994). Sin embargo, la mayor parte de los sistemas de valoración para rumiantes (INRA 1988; NRC, 1985) estima la producción microbiana, mediante modelos empíricos, asumiendo una eficiencia de síntesis constante, aunque ya el AFRC (1993) reconoce, en su última revisión, la influencia del plano de alimentación, recomendando incrementar en un 24% la eficiencia de síntesis, al aumentar la ingestión de 1 a 3 veces mantenimiento. Esto supone una importante mejora, pero continua sin ser cuantificada la influencia de otros factores potenciales de variación, como las características de la MOF y de la fuente de N (Beever and Cottrill, 1994).

El CNCPS cuantifica la síntesis microbiana mediante un modelo mecanístico que describe el ecosistema ruminal, de forma simplificada, mediante dos grandes grupos microbianos caracterizados por fermentar carbohidratos estructurales (CS) y no estructurales (CNS), respectivamente. Estos grupos microbianos varían también, en sus características de crecimiento y en sus preferencias por el tipo sustrato nitrogenado. Las bacterias que fermentan los CS utilizan exclusivamente NH_3 , mientras que las fermentadoras de CNS utilizan como fuente de N, tanto NH_3 como péptidos o aminoácidos.

3.2.- Utilización de la energía

Por razones termodinámicas, la síntesis microbiana está relacionada básicamente con la cantidad de sustrato fermentable y su rendimiento en energía utilizable por el metabolismo microbiano (Bauchop y Eldsen, 1960). La eficiencia de síntesis, definida como la conversión de MOF en masa microbiana (g MO microbiana/g MOF) fue considerada, durante algún tiempo, como una constante biológica, pero pronto se reconoció la existencia de variaciones ligadas al ritmo de crecimiento y renovación de la población microbiana, debido a su influencia sobre la proporción de energía disponible que es gastada en cubrir las necesidades de mantenimiento y el reciclado ruminal (Harrison y McAllan, 1960; Leng y Nolan 1984). A medida que aumenta la velocidad de crecimiento microbiano, debido a la mayor disponibilidad de sustrato fermentable, el gasto de

mantenimiento se diluye y la eficiencia neta de síntesis aumenta, de la misma forma que ocurre con el índice de conversión de un animal en crecimiento al incrementar el plano de alimentación. A su vez, las necesidades de mantenimiento pueden variar de forma importante entre poblaciones microbianas que ocupan nichos diferentes en el ecosistema ruminal (Russell y Baldwin, 1979).

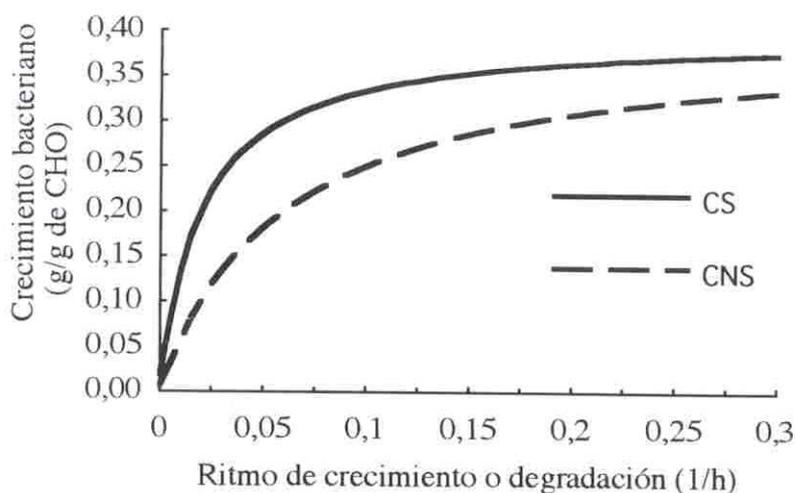
Además, la cantidad de proteína microbiana que fluye al intestino es el resultado neto de los procesos de síntesis y lisis bacteriana en el rumen, estimándose que entre un 30 y un 75% del N microbiano sintetizado es reciclado a NH_3 mediante lisis o fagocitosis por protozoos (Nolan y Leng, 1972, Firkins et al. 1992). Un rápido ritmo de renovación de la población microbiana reduce el tiempo de retención de las bacterias en el rumen y con ello el gasto de mantenimiento y el dispendio energético del reciclaje, permitiendo una mayor eficiencia neta de síntesis (Kennedy y Milligan, 1978; Chen et al. 1992).

En el CNCPS, la eficiencia de síntesis de cada grupo microbiano se estima en función de sus necesidades de mantenimiento y crecimiento y del ritmo de degradación del sustrato, mediante un modelo derivado del original de Pirt (1965), en el que el ritmo fraccional de crecimiento, equiparable a la tasa de dilución en condiciones de equilibrio dinámico en cultivo continuo, se sustituye por la tasa fraccional de degradación del sustrato: $1/Y = K_m/K_d + 1/K_g$, siendo Y la eficiencia neta de crecimiento microbiano (g de masa microbiana/g de sustrato), K_m las necesidades de mantenimiento (g de sustrato/g bacterias/h), K_d la tasa fraccional de degradación del sustrato (1/h) y K_g la eficiencia máxima de crecimiento o el recíproco de las necesidades netas de crecimiento (g de masa bacteriana/g de sustrato).

Este modelo permite estimar variaciones en la eficiencia de síntesis en función de las necesidades de mantenimiento y su relación con la disponibilidad de sustrato fermentable. En la figura 1 se muestra este efecto sobre la eficiencia de crecimiento de las poblaciones celulolíticas (fermentadoras de CS) y amilolíticas (fermentadoras de CNS).

La diferente respuesta entre poblaciones se debe a sus distintas necesidades de mantenimiento. Basándose en resultados obtenidos "in vitro" (Russell et al., 1992), el CNCPS atribuye coeficientes de mantenimiento (k_m) de 0,05 y 0,15 a las bacterias celulolíticas y amilolíticas, respectivamente, aunque considera una eficiencia máxima de crecimiento constante ($k_g=0,40$). Ya que los hidratos de carbono son sintetizados con mayor eficiencia que la proteína, es de esperar que las bacterias que acumulan más polisacáridos, en condiciones de exceso de energía, tendrán un crecimiento más eficiente (Russell y Strobel, 1993). Sin embargo, como el gasto de mantenimiento es generalmente estimado a partir de las eficiencias máxima y neta de crecimiento, esta variación queda probablemente anulada por una mayor estimación de las necesidades de mantenimiento, como se reconoce en el caso de las bacterias amilolíticas.

Figura 1.- Influencia de la tasa de crecimiento (1/h) sobre la eficacia de síntesis (g/g CHO) de bacterias celulolíticas y amilolíticas (CNS).



3.3.- Efecto del pH ruminal

El crecimiento máximo microbiano tiene lugar generalmente a un pH entre 6,5-6,8 que se mantiene estable gracias a la capacidad tampón de la saliva, cuya secreción es estimulada por la ingestión de fibra que favorece la masticación y rumia. En dietas concentradas, ricas en carbohidratos fermentables, la ingestión de fibra puede resultar insuficiente para tamponar la masiva producción de ácidos grasos volátiles y el pH desciende por debajo de 6,0-6,2, inhibiendo el crecimiento microbiano (Russell et al. 1979), especialmente de la flora celulolítica (Russell y Dombrowski, 1980), probablemente debido al gasto extra de energía para adaptarse a las condiciones de un bajo pH ruminal (Strobel y Russell, 1986).

El CNCPS tiene en cuenta este efecto, corrigiendo la eficiencia de síntesis microbiana en función del contenido en FND de la dieta, como índice del pH ruminal. Se estima que es necesario un contenido mínimo en FND del 20% para evitar depresiones del pH (NRC, 1985) y cuando disminuye por debajo de este umbral se reduce la síntesis microbiana en un 2,5% por cada unidad porcentual de disminución en el contenido en FND (Strobel y Russell, 1986), como se muestra en la figura 2.

3.4.- Utilización del N

Además de energía, las bacterias requieren N para la síntesis proteica, que es aportado por péptidos, aminoácidos y el NH_3 resultantes de los procesos de proteólisis y desaminación de los compuestos nitrogenados de la dieta. La mayor parte de las especies bacterianas pueden utilizar NH_3 como fuente de N, y para algunas de ellas, como las celulolíticas, resulta esencial (Allison, 1969). Se estima que entre un 50 y un 95% del N bacteriano procede del NH_3 (Leng y Nolan 1984; Nentze et al., 1986). La fracción restante

procede de péptidos o aminoácidos, incorporados directamente, cuya presencia parece estimular la producción microbiana, tanto "in vitro" (Griswold et al., 1996), como "in vivo" (Hume, 1970), particularmente de las bacterias amilolíticas (Maeng y Baldwin, 1976). El CNCES tiene en cuenta, también, este efecto estimulante de los péptidos, incrementando la producción de bacterias amilolíticas en función del contenido de la MOF en proteína verdadera degradable (Fracción B), como se muestra en la figura 3.

Figura 2.- Influencia del pH sobre la eficiencia de síntesis (g/g CHO) de las bacterias celulolíticas.

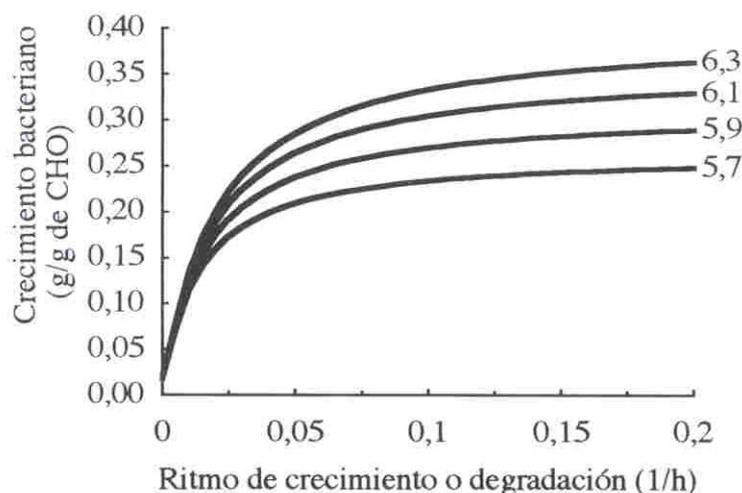
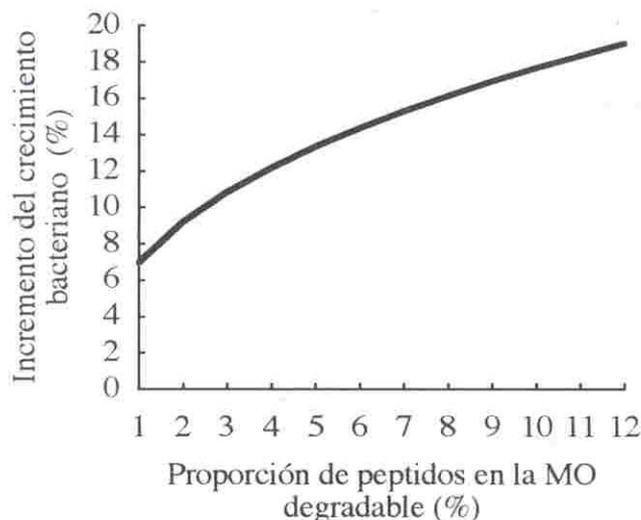


Figura 3.- Influencia del aporte de péptidos sobre la eficiencia de síntesis microbiana.



La incorporación de péptidos a la proteína microbiana se estima que tiene lugar a un ritmo de 0,07 g/g de bacterias/h, en competencia con el ritmo de paso de la fase líquida. Con ello se asume que los péptidos no incorporados fluyen al intestino con la fase líquida, como experimentalmente se ha comprobado que ocurre con altas ingestiones de proteína, cuya masiva degradación permite la acumulación de péptidos en el líquido ruminal y su

flujo al intestino (Russell et al. 1991). De los péptidos incorporados, solo el 66% se retiene en la proteína microbiana y el resto es desaminado y eliminado en forma de NH_3 . Este, junto con el procedente del N no proteico de la dieta (fracción A) y de la urea, reciclada al rumen con la saliva, es utilizado para cubrir las restantes necesidades de las bacterias amilolíticas (34%) y las correspondientes a las celulolíticas. Un output del CNCPS informa sobre el balance ruminal de N degradable y la posible existencia de déficit, pero el modelo no incorpora predicciones basadas en esta eventualidad, suponiendo que no dejará de ser subsanada en la formulación, dadas las negativas consecuencias de un déficit de N degradable, tanto sobre la síntesis microbiana, como sobre la digestión ruminal y la ingestión voluntaria (Balcells et al. 1993).

3.5.- Efecto de los ionóforos

Una importante ventaja de los modelos mecanísticos de predicción es la de poder acomodar en el cálculo la influencia de otros factores, tales como la suplementación con aditivos de acción ruminal. Entre los mas utilizados se encuentran los antibióticos ionóforos (monensina) que, además de incrementar el pH ruminal y la proporción de ácido propiónico, y de reducir las pérdidas de metano, tienen un importante efecto depresor de la concentración ruminal de NH_3 (Dinius et al., 1976). Este efecto es debido a la inhibición de los procesos de desaminación, mas que a una disminución de la proteolisis (Whestone et al., 1981), debido probablemente a la sensibilidad frente a la monensina de especies bacterianas fermentadoras de aminoácidos y ,en consecuencia, especializadas en la producción de NH_3 (Chen y Russell, 1989).

En el CNCPS estas especies son consideradas en el grupo de las bacterias amilolíticas, aunque no fermenten carbohidratos, y el efecto de los ionóforos se contempla reduciendo el ritmo de incorporación de péptidos en un 34%, lo que supone incrementar el flujo intestinal de péptidos, disminuyendo sus posibilidades de desaminación.

4.- APORTES Y NECESIDADES DE AMINOACIDOS

El progreso realizado, durante las últimas décadas, en el campo de la valoración proteica para rumiantes, se ha centrado fundamentalmente en mejorar la estimación de los aportes al intestino delgado de proteína microbiana y sin degradar. Sin embargo, el conocimiento de las necesidades y aportes de aminoácidos es mucho mas incipiente, y todos los actuales sistemas de valoración asumen una eficiencia de utilización de la proteína metabolizable constante para cada función fisiológica (NRC, 1985; INRA, 1988; AFRC, 1993). Se han identificado los aminoácidos limitantes de la proteína microbiana para el crecimiento (Storm y Yrskov, 1984) y la producción de leche (Fraser et al. 1991), pero las respuestas a la suplementación con aminoácidos o proteínas de diferente perfil aminoacídico son frecuentemente contradictorias (Rulquin y Verite, 1993), debido probablemente a variaciones no cuantificadas en el aporte y composición de la proteína sin

degradar o de origen microbiano, como resultado de las diferentes condiciones experimentales.

Aunque se han llevado a cabo otros intentos de desarrollar modelos de predicción de necesidades y aportes de aminoácidos, como parte integrante de los sistemas ARC (Strach et al., 1987) e INRA (Rulquin y Verite, 1993), el submodelo de aminoácidos del CNCPS constituye el primer intento global de predicción, integrado en el esquema de un sistema de valoración. Los valores estimados a partir de este modelo explican entre el 81 y el 89% de la variación observada experimentalmente en el flujo individual de aminoácidos (O'Connor et al. 1993), aunque los coeficientes de regresión obtenidos sugieren la existencia de una tendencia a sobrestimar los flujos más bajos y subestimar los más altos.

El CNCPS valora la adecuación del aporte de aminoácidos a las necesidades mediante un modelo factorial que atribuye coeficientes de utilización diferentes a cada aminoácido, excepto en el caso del crecimiento, en el que no se dispone de suficiente información (Ainslie et al., 1993).

4.1.- Aporte de aminoácidos

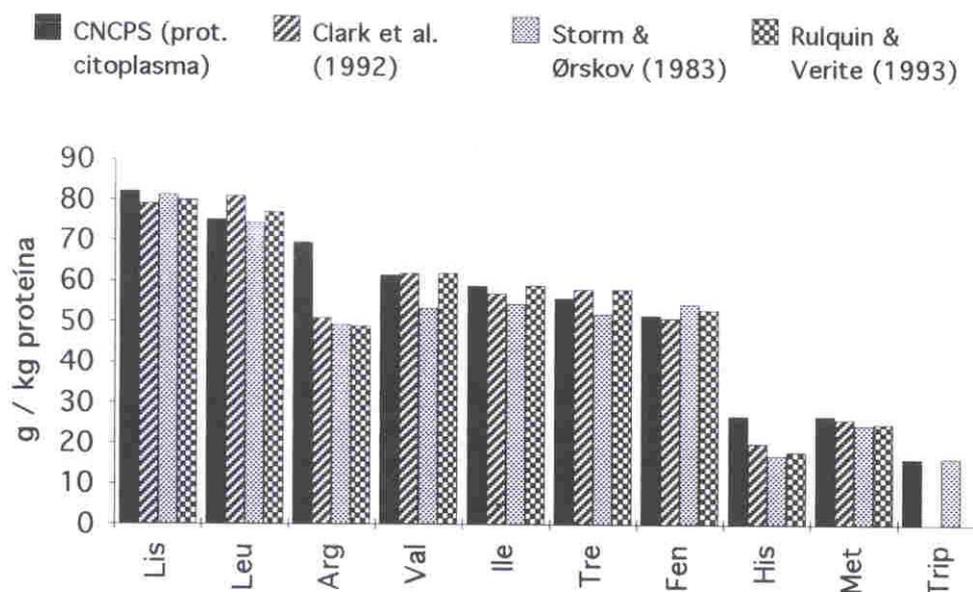
El aporte de aminoácidos digeribles (o metabolizables) se estima a partir de los aminogramas de la proteína sin degradar y de la de origen microbiano. En el caso de la proteína sin degradar, el CNCPS toma como referencia el perfil aminoacídico de la proteína insoluble, basándose en los resultados de McGregor et al. (1987), quienes observaron diferencias apreciables entre los perfiles aminoacídicos de la proteína total y la fracción insoluble de 19 suplementos de uso corriente en la alimentación de los rumiantes. Este perfil aminoacídico se aplica a todas las fracciones proteicas que, siendo potencialmente degradables (B1, B2 y B3), abandonan el rumen sin degradar, a las que se atribuye una digestibilidad intestinal del 100%, con excepción de la fracción más lentamente degradable (B3) que se supone es también menos digerible (80%).

Este enfoque, aunque simple, no deja de tener sus limitaciones. No todos los aminoácidos de la fracción insoluble, pero potencialmente degradable, se degradan con la misma intensidad (Rooke et al., 1984; Varvikoo, 1986), lo que puede hacer variar el perfil aminoacídico de la fracción insoluble no degradada. El análisis de los residuos de alimentos incubados en el rumen, mediante bolsas de nylon, constituye una alternativa atractiva para establecer el perfil aminoacídico de la fracción no degradada (Ganev et al., 1979), pero la contaminación microbiana de los residuos es una importante fuente de error, especialmente cuando los alimentos son ricos en almidón (Varvikoo, 1986). Aunque la influencia de la contaminación puede ser corregida, la incertidumbre sobre la composición bacteriana dificulta esta corrección (Clark et al., 1992; Rodriguez et al., 1995).

En la figura 4 se compara el perfil aminoacídico de la proteína microbiana adoptado por el CNCPS con otras estimaciones medias (Storm y Yrskov, 1983; Ainslie et al. 1993; Clark et al., 1992). La notable coincidencia entre valores medios no debe enmascarar, sin embargo, la gran variabilidad observada entre valores individuales, que puede dar lugar a diferencias de hasta 10 y 20 veces en la estimación del flujo duodenal de

determinados aminoácidos (Clark et al., 1992). Aunque parte de la variación puede reflejar diferencias en la metodología, existe suficiente evidencia que indica la existencia de diferencias reales en la composición, especialmente entre bacterias asociadas a las partículas o a la fase líquida del contenido ruminal (Cecava et al., 1990; Clark et al., 1992; Rodriguez et al., 1995).

Figura 4.- Perfil aminoacídico de la proteína microbiana.



El CNCPS considera que un 15% del N bacteriano se encuentra en forma de ácidos nucleicos. Otro 25% se localiza en la pared celular, por lo que sería indigestible en el intestino delgado, y el 60% restante constituye la proteína citoplasmática, a la que se atribuye una digestibilidad intestinal del 100%. Por lo tanto, el aporte de aminoácidos digestibles se estima a partir del perfil aminoacídico de esta última fracción. Ello se traduce en atribuir un valor de digestibilidad diferente a cada aminoácido, dependiendo de la contribución relativa de la pared y el citoplasma celular. Las digestibilidades resultantes oscilan entre un 71 y un 81% para los distintos aminoácidos, que resultan algo inferiores a los valores determinados por Tas et al., (1981) y Storm et al., (1983), respectivamente.

4.2.- Necesidades de aminoácidos

Las necesidades de aminoácidos digestibles son calculadas a partir de las necesidades netas, mediante coeficientes de utilización específicos de cada aminoácido para cada función fisiológica. Las necesidades netas de mantenimiento y producción dependen de las de proteína total, estimadas por el submodelo de necesidades (Fox et al. 1992), y del perfil aminoacídico atribuido a éstas (cuadro 4).

Las necesidades de mantenimiento comprenden las pérdidas dérmicas, el N endógeno urinario y el N metabólico fecal. Teniendo en cuenta que la queratina y la proteína tisular son los principales fuentes de aminoácidos que contribuyen a este tipo de

pérdidas, su perfil aminoacídico se estima a partir del contenido en aminoácidos de la queratina, en el caso de las pérdidas dérmicas, y a partir de la composición de la proteína tisular, en caso del N endógeno urinario y metabólico fecal. Las necesidades de aminoácidos digestibles se estiman a partir de las necesidades netas, utilizando los coeficientes de utilización correspondientes a mantenimiento, aunque ello no es preciso en el caso del N metabólico fecal, cuya estimación viene ya expresada en términos de proteína absorbida (NRC, 1985).

Cuadro 4.- Contenido en aminoácidos esenciales de la proteína tisular, leche y queratina (g/kg de proteína), adoptados por el CNCPS (O'Connor et al., 1993).

| Aminoácido | Tejidos | Leche | Queratina |
|--------------|---------|-------|-----------|
| Arginina | 66 | 34 | 38 |
| Fenilalanina | 35 | 48 | 37 |
| Histidina | 25 | 27 | 10 |
| Isoleucina | 28 | 58 | 50 |
| Leucina | 67 | 92 | 100 |
| Lisina | 64 | 76 | 32 |
| Metionina | 20 | 27 | 10 |
| Treonina | 39 | 37 | 72 |
| Triptófano | 6 | 15 | 14 |
| Valina | 40 | 59 | 60 |

La estimación de las necesidades de producción se basa en el mismo esquema procedimental, pero utilizando los coeficientes de utilización apropiados en cada caso (cuadro 5), excepto en el del crecimiento, en el que se atribuye un coeficiente de utilización común a todos los aminoácidos, el cual varía con la fase de crecimiento desde un 72 a un 38% entre los 100 y los 400 kg de peso vivo vacío (Ainslie et al 1993).

Cuadro 5.- Coeficientes de utilización (%) de los aminoácidos esenciales adoptados por el CNCPS (O'Connor et al., 1993).

| Aminoácido | Mantenimiento | Gestación | Lactación |
|--------------|---------------|-----------|-----------|
| Arginina | 85 | 66 | 42 |
| Fenilalanina | 85 | 85 | 100 |
| Histidina | 85 | 85 | 90 |
| Isoleucina | 66 | 66 | 62 |
| Leucina | 66 | 66 | 72 |
| Lisina | 85 | 85 | 88 |
| Metionina | 85 | 85 | 98 |
| Treonina | 85 | 85 | 83 |
| Triptófano | 85 | 85 | 85 |
| Valina | 66 | 66 | 72 |

5.- COMPARACION DE LAS PREDICCIONES

La combinación de enfoques mecanísticos y empíricos y la consideración individualizada de las distintas fracciones de carbohidratos y proteínas de cada ingrediente incrementa extraordinariamente la complejidad conceptual y operativa del sistema CNCPS. No obstante, esta mayor complejidad se ve compensada, según sus autores, por la menor desviación de las estimaciones respecto a los valores observados. El submodelo ruminal explica el 88% de la variación en el flujo duodenal de N microbiano observado en varios experimentos con vacuno lechero y de cebo, consumiendo una gran variedad de dietas a diferentes niveles de ingestión (Russell et al. 1992; O'Connor et al., 1993). Valorando el aporte de proteína metabolizable (PM) como factor limitante del rendimiento de terneros en crecimiento (110-250 kg PV), Fox et al. (1992) observaron que el CNCPS mejoraba significativamente la estimación de las ganancias comparado con el sistema NRC, disminuyendo el error standard de estimación de 1,0 a 0,7 kg/d y la desviación media de las predicciones respecto a los valores observados de -30 a 1,6%. En otra serie de ensayos, con terneros en crecimiento, la valoración del primer aminoácido limitante, además del aporte de PM, permitió reducir la desviación de las estimaciones de un 8 a un 5% (Ainslie et al., 1993).

En la figura 5 se comparan los ritmos de crecimiento de terneros en cebo intensivo, estimados mediante el CNCPS y dos de los vigentes sistemas de valoración (NRC, 1984; AFRC, 1993), asumiendo una ingestión voluntaria a lo largo del crecimiento de 98-104 g/kg PVO,75, muy próxima a la estimada por el CNCPS, y partiendo de una dieta compuesta por un 10% de paja de trigo y un 90% de concentrado con un 16% de proteína bruta a base de cebada, harina de soja y suplemento mineral (3%). El nivel de proteína se fijó atendiendo a las necesidades de N degradable, estimadas por el CNCPS y AFRC, optándose por un nivel intermedio que cubre con un ligero exceso (4-6%) las estimaciones del CNCPS y un déficit de similar magnitud las del AFRC. No obstante, los rendimientos presentados en la figura 5 son independientes de estas limitaciones, ya que se trata de valores potenciales en función del aporte de energía.

Las estimaciones no difieren sustancialmente entre los tres sistemas, aunque el NRC sobrestima sistemáticamente las ganancias en 0,12 kg/d respecto al CNCPS, mientras que las desviaciones del AFRC aumentan con la fase de crecimiento desde -0,06 a 0,15 kg/d. En cualquier caso, la similitud entre estimaciones es de esperar ya que las principales innovaciones del CNCPS se centran en el campo de la valoración proteica.

Las necesidades y aporte de PM estimados por los sistemas CNCPS y AFRC se comparan en la figura 6. No deja de ser sorprendente que la principal diferencia entre sistemas radique en la estimación de las necesidades, mientras que los aportes de proteína microbiana son prácticamente iguales, a pesar de que el modelo mecanístico del metabolismo ruminal constituye el núcleo central y diferencial del sistema CNCPS. Las diferencias en la estimación de PM de origen alimenticio, o proteína bypass, son algo más importantes (20+(),7%) y favorables al CNCPS, pero no llegan a compensar las mayores necesidades estimadas por este sistema. Así, mientras que según el AFRC, el aporte total

de PM es suficiente para cubrir las necesidades, el CNCPS predice la existencia de un déficit en las primeras edades que queda cubierto a partir de los 200 kg PV. Por otra parte, según el AFRC, el aporte exclusivo de proteína microbiana es suficiente para cubrir las necesidades a partir de los 200 kg, lo que el CNCPS retrasa hasta los 350 kg. Parece evidente que las estimaciones del CNCPS son más próximas a las expectativas generalmente reconocidas y que la subestimación de necesidades por el AFRC puede condicionar los rendimientos en las primeras fases de crecimiento.

Figura 5.- Predicción del crecimiento de terneros en cebo intensivo.

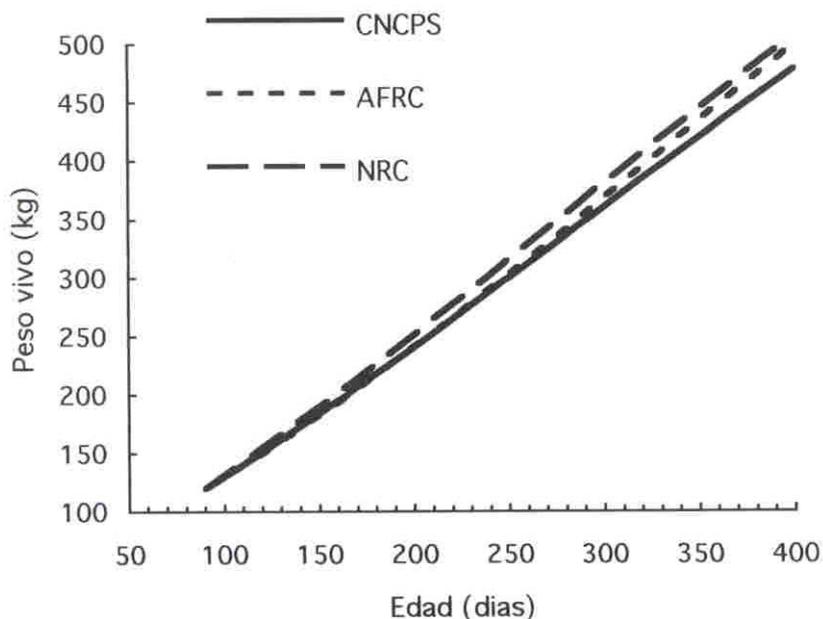
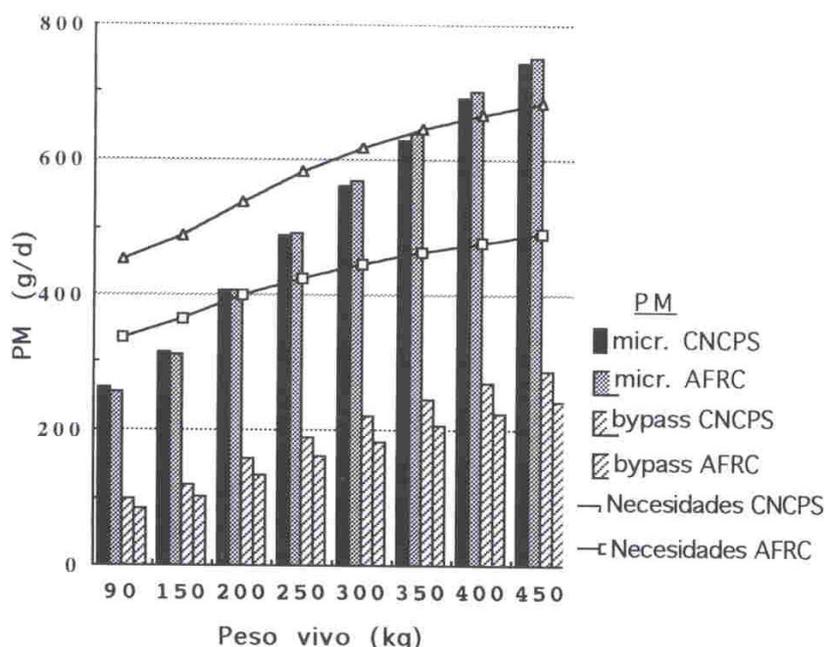


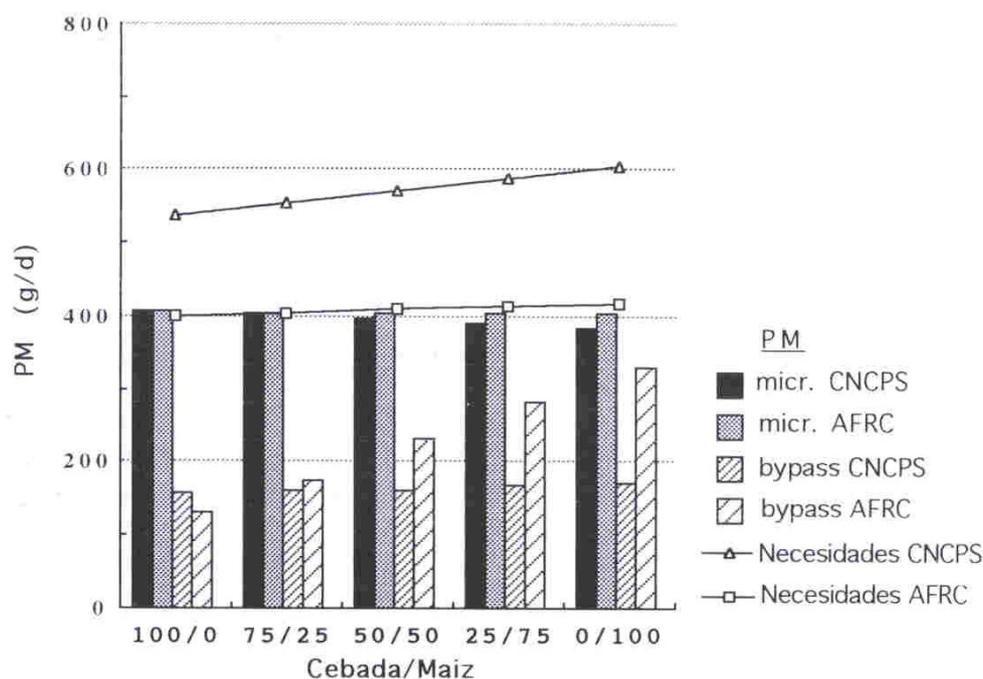
Figura 6.- Necesidades y aportes de Proteína Metabolizable (PM) de terneros en cebo intensivo.



Con objeto de valorar la respuesta del modelo mecanístico del rumen al tipo carbohidrato, se ha calculado la influencia de la sustitución de cebada por maíz en el caso de los terneros de 200 kg PV. Ambos sistemas, CNCPS y AFRC, predicen un incremento de las ganancias de peso con la proporción de maíz en la dieta, aunque de diferente magnitud. Las ganancias permitidas por el mayor aporte energético al sustituir completamente la cebada por el maíz aumentarían de 1,16 a 1,47 kg/d, según el CNCPS, o de 1,20 a 1,28, según el AFRC; diferencias que se justifican por el diferente contenido energético atribuido al maíz por ambos sistemas.

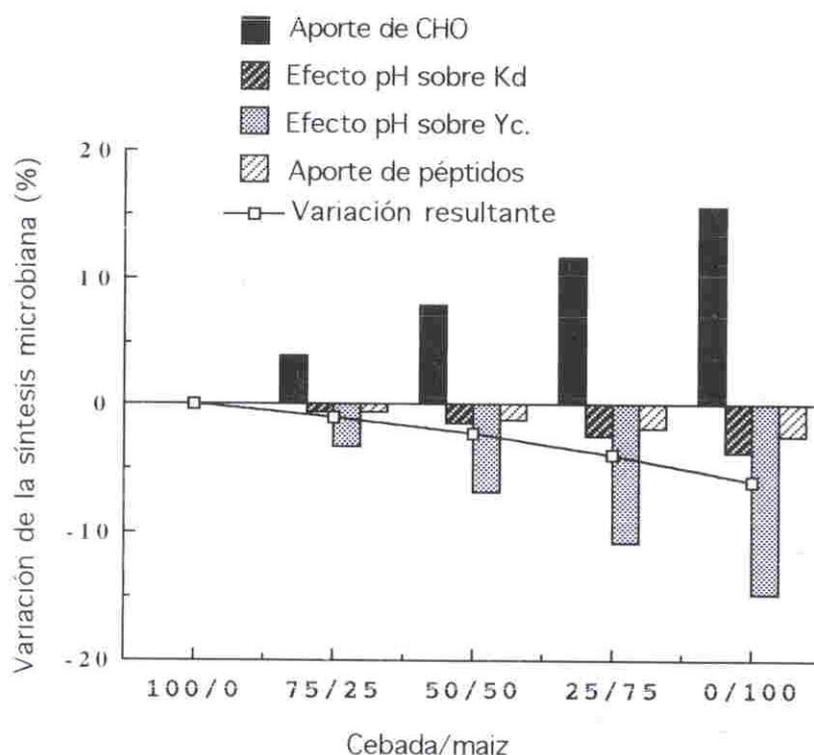
La respuesta del aporte y necesidades de PM al tipo de carbohidratos se muestra en la figura 7. La producción microbiana predicha por el CNCPS no refleja el mayor contenido en carbohidratos fermentables atribuido por este sistema al maíz, debido a la depresión en la eficiencia de síntesis provocada por la disminución del pH ruminal. Este efecto, evidenciado por el modelo mecanístico del CNCPS como se detalla en la figura 8, es sin embargo ignorado por el AFRC que, basado en un modelo empírico, atribuye un valor constante a la eficiencia de síntesis. No obstante, la diferencia entre sistemas en la estimación del flujo de proteína microbiana es escasa y muy inferior a la predicha para el aporte de proteína sin degradar, lo que tiene una importante repercusión en el grado de cobertura de las necesidades. De un balance positivo entre aportes y necesidades (1,24%), con la dieta de cebada, se pasa a un déficit de PM del 9%, con la dieta de maíz, según las estimaciones del CNCPS. Sin embargo, este déficit podría ser cubierto con holgura asumiendo el contenido en proteína bypass del maíz estimado por el AFRC, lo que pone en evidencia la importancia de una adecuada valoración de la degradabilidad ruminal de las fuentes proteicas.

Figura 7.- Influencia del tipo de cereal sobre las necesidades y aportes de proteína metabolizable (PM) de terneros de 200 kg PV.



La verificación de los modelos mediante contrastación de los rendimientos predichos con los observados puede aportar información útil sobre los errores de estimación, pero difícil de interpretar analíticamente si no se contrastan, también, las estimas de los diversos submodelos agregados en el sistema, tales como. producción microbiana, degradabilidad efectiva de la proteína o necesidades. Sin embargo, las limitaciones metodológicas y operativas para obtener información experimental sobre estas estimas constituye un condicionante importante para la verificación de los modelos de predicción. Técnicas indirectas, como el uso de la excreción urinaria de derivados púricos para estimar la producción microbiana (Guada y Balcells, 1993), pueden ofrecer una alternativa digna de consideración para este fin, por su posibilidad de aplicación a grandes grupos de animales en distintas condiciones de explotación. Ello, unido a una mejor definición de las necesidades. mediante modelos basados en información metabólica a nivel orgánico o tisular (Baldwin et al 1987) permitiría contrastar y perfeccionar el desarrollo de los actuales sistemas de valoración.

Figura 8.- Variación de la eficiencia de síntesis microbiana con el tipo de carbohidrato.



Hasta que tales alternativas no sean realidad, los actuales modelos de predicción pueden ser utilizados, con suficiente precaución, como herramientas de apoyo en la interpretación de resultados y toma de decisiones, en las que en todo caso resulta insustituible la experiencia personal.

6.- REFERENCIAS

- AFRC (1992) *Nutr. Abst. and Rev.*, Series B, 62: 787-835.
- AINSLIE, S.J., FOX, D.G., PERRY, T.C., KETCHEN, D.J. y BARRY, M.C. (1993) *J. Anim. Sci.* 71: 1312-1319.
- ALLISON, M.J. (1869) *J. Anim. Sci.* 29: 797-807.
- ARC (1980) *The Nutrient Requirements of Ruminant Livestock*. Commonwealth Agricultural Bureaux. Slough, England.
- ARC (1984) *The Nutrient Requirements of Ruminant Livestock. Supplement n°1*. Rep. Protein Group AFRC Working Party. Commonwealth Agricultural Bureaux. Slough, England.
- BALCELLS, J., GUADA, J.A., CASTRILLO, C. y GASA, J. (1993) *Brit. J. Nutr.* 69: 721-732.
- BAUCHOP, T. y ELDBEN, S.R. (1960) *J. General Microbiol.* 23: 457-469.
- BEEVER, D.E. y COTTRILL, B.R. (1994) *J. Dairy Sci.* 77: 2031-2043.
- CECAVA, M.J., MERCHEN, N.R. y GAY, L.C. (1990) *J. Dairy Sci.* 73: 2480-2488.
- CLARK, J.H., KLUSMEYER, T.H. y CAMERON, M.R. (1992) *J. Dairy Sci.* 75: 2304-2323.
- CHEN, G. y RUSSELL, J.B. (1989) *Appl. and Environ. Microbiol.* 55: 1052-1057.
- CHEN, X.B., CHEN, Y.K., FRANKLIN, M.F., ORSKOV, E.R. y SHAND, W.J. (1992) *J. Anim. Sci.* 70: 1534-1542.
- DINIUS, D.A., SIMPSON, M.E. y MARSH, P.B. (1976) *J. Anim. Sci.* 42: 229-234.
- FIRKINS, J.L., WEISS, W.P. y PIWONKA, E.J. (1992) *J. Anim. Sci.* 70: 3223-3233.
- FOX, D.G., SNIFFEN, C.J., O'CONNOR, J.D. RUSSELL, J.B. y VAN SOEST, P.J. (1992) *J. Anim. Sci.* 70: 3578-3596.
- FRASER, D.L., ORSKOV, E.R., WHITELAW, F.G. y FRANKLIN, M.F. (1991) *Liv. Prod. Sci.* 28: 235-252.
- GANEV, G., ORSKOV, E.R. y SMART, R.I. (1979) *J. Agric. Sci. Cambridge* 93: 651-656.
- GOERING, H.K. y VAN SOEST, P.J. (1970). *Forage fiber analyses. Agricultural Handbook n°379*. Agricultural Research Service. US Department of Agriculture, Washington D.C.
- GRISWOLD, K.E., HOOVER, W.H., MILLER, J.K. y THAYNE, W.V. (1996) *J. Anim. Sci.* 74: 483-491.
- HARRISON, D.G. y McALLAN, A.B. (1980) En: *Digestive Physiology and Metabolism in Ruminants*. Ed. Y. Ruckebush, P. Thivend. MTP Press Ltd. England. pp.205-226.
- HUME, I.D. (1970) *Aust. J. Agric. Res.* 21: 305-314.
- HUNGATE, R.E. (1966). *The rumen and its microbes*. Academic Press. New York.
- INRA (1978) *Alimentation des Ruminants*. INRA Publications. Paris.
- INRA (1988). *Alimentation des Bovins, Ovins & Caprins*. Institut National de la Recherche Agronomique. Paris.
- KENNEDY, P.M. y MILLIGAN, L.P. (1978) *Br. J. Nutr.* 39: 105-117.
- LENG, R.A. y NOLAN, J.V. (1984) *J. Dairy Sci.* 67: 1072-1089.
- MAENG, W.J. y BALDWIN, R.L. (1976) *J. Dairy Sci.* 59: 648-655.
- MATHERS, J.C. y AITCHINSON, E.M. (1981) *J. Agric. Sci. Cambridge* 96: 691-693.
- MCGREGOR, C.A., SNIFFEN, C.J. y HOOVER, W.H. (1978) *J. Dairy Sci.* 61: 566-573.
- NAKAMURA, T., KLIPFENSTEIN, T.J. y BRITTON, R.A. (1994) *J. Anim. Sci.* 72: 1043-1048.
- NEUTZE, S.A., KELLAWAY, R.C. y FAICHNEY, G.J. (1986) *Br. J. Nutr.* 56: 497-507.
- NOCEK, J.E. y GRANT, A.L. (1987) *J. Anim. Sci.* 64: 552-564.
- NOLAN, J.V. (1993) En: *Quantitative aspects of Ruminant Digestion and Metabolism*. Ed. J.M. Forbes, J. France. CAB International. Wallingford, UK. pp.123-143.
- NOLAN, J.V. y LENG, R.A. (1972) *Br. J. Nutr.* 27: 177-194.
- NRC (1985) *Ruminant Nitrogen Usage*. National Academy Press. Washington D.C.
- O'CONNOR, J.D., SNIFFEN, C.J., FOX, D.G. y CHALUPA, W. (1993) *J. Anim. Sci.* 71: 1298-1311.
- ORSKOV, E.R. y McDONALD, I. (1979) *J. Agric. Sci. Cambridge* 92: 499-503.
- PIRT, S.J. (1965). *Proceedings of the Royal Society of London*, Ser. B, 163: 224-231.
- PITT, R.E., VAN KESSEL, J.S., FOX, D.G., PELL, A.N., BARRY, M.C. y VAN SOEST, P.J. (1996) *J. Anim. Sci.* 74: 226-244.

- RODRIGUEZ, C., GONZALEZ, J., ALVIR, M.R. y PEREIRA, J.C. (1995). *Effect of intake level on chemical composition of rumen bacteria: implications in true nitrogen degradability estimation. Protein metabolism and Nutrition*. Ed. A.F. Nunes, A.V. Portugal, Costa, J.P. y J.R. Ribeiro. EAAP Publication n° 81. pp.261.
- ROOKE, J.A., GREIFE, H.A. y ARMSTRONG, D.G. (1984) *J. Agric. Sci. Cambridge* 102: 695-702.
- RULQUIN, H. y VERITE, R. (1993) En: *Recent Advances in Animal Nutrition*. P.C. Garnsworthy y D.J.A. Cole, Nottingham University Press. pp. 55-77.
- RUSSELL, J.B. y STROBEL, H.J. (1993) En: *Quantitative aspects of Ruminant Digestion and Metabolism* Ed. J.M. Forbes, J. France. CAB International. Wallingford, UK. pp.165-186.
- RUSSELL, J.B. y DOMBROWSKI, D.B. (1980) *Appl. and Environ. Microbiol.* 39: 604610.
- RUSSELL, J.B. y BALDWIN, R.L. (1979) *Appl. and Environ. Microbiol.* 37: 537-543.
- RUSSELL, J.B., ONODERA, R. y HINO, T. (1991) En: *Physiological Aspects of Digestion and Metabolism in Ruminants*. Ed. T. Tsuda, Y. Sasaki y R. Kawashima. Academic Press Inc. London. pp.681-697.
- RUSSELL, J.B., SHARP, W.M. y BALDWIN, R.L. (1979) *J. Anim. Sci.* 48: 251-255.
- RUSSELL, J.B., O'CONNOR, J.D., FOX, D.G., VAN SOEST, P.J. y SNIFFEN, C.F. (1992) *J. Anim. Sci.* 70: 3551-3561.
- SNIFFEN, C.J. y ROBINSON, P.H. (1987) *J. Dairy Sci.* 70: 425-441.
- SNIFFEN, C.J., O'CONNOR, J.D., VAN SOEST, P. r., FOX, D.G. y RUSSELL, J.B. (1992) *J. Anim. Sci.* 70: 3562-3577.
- STERN, M.D., VARGA, G.A., CLARK, J.H., FIRKINS, J.H., HUBER, J.L. y PALMQUIST, D.L. (1994) *J. Dairy Sci.* 77: 2762-2786.
- STORM, E. y ORSKOV, E.R. (1984) *Br. J. Nutr.* 52: 613-620.
- STORM, E. y ORSKOV, E.R. (1983) *Br. J.Nutr.* 50: 463-470.
- STORM, E., BROWN, D.S. y ORSKOV, E.R. (1983) *Br. J. Nutr.* 50: 479-485.
- STRACHAN, P.J., WILSON, J.S. y KELLY, N.C. (1987) *Anim. Prod.* 44: 492-493.
- STROBEL, H.J. y RUSSELL, J.B. (1986) *J. Dairy Sci.* 69: 2941-2947.
- TAS, M.V., EVANS, R.A. y AXFORD, R.F.E (1981) *Br. J. Nutr.* 45: 167-174.
- VARVIKOO, T. (1986) *Br. J. Nutr.* 56: 131-140.
- WATERS, C.J., KITCHERSIDE, M.A. y WEBSTER, A.J.F. (1992) *Anim. Feed Sci. and Technol.* 39: 275-291.
- WHETSTONE, H.D., DAVIS, C.L. y BRYANT, M.P. (1981) *J. Anim. Sci.* 53: 803-809.