

# Evaluación de modelos detallados de rumen para predecir disponibilidad de nutrientes en sistemas intensivos de producción de leche bajo pastoreo

P. Chilibroste\*

Facultad de Agronomía, Departamento de Producción Animal y Pasturas. Grupo Utilización de Pasturas.

---

## Evaluation of mechanistic rumen models to predict nutrients availability for grazing dairy cows on intensive production systems

**ABSTRACT:** From 1970 to date, significant progress has been made in the development of dynamic simulation models which provided the bases to integrate available knowledge, identify critical areas that would require future research and improve a quantitative understanding of the rumen function. There are still a number of limitations in the representation and quantification of key issues like distribution and interaction between the microbial population, passage of substrate out of the rumen and production and absorption of volatile fatty acids. The use of extant whole rumen models, to predict nutrient availability for grazing dairy cows, face additional limitation like the assumption of steady-state conditions, a constant fractional passage rate constant and uniformity through the day of the substrate chemical composition. Nutrient availability prediction for grazing dairy cows will require an integrated research of the ingestion – digestion process. Research programmes with a proper balance between modelling and analytical research, seems to be an effective strategy to improve both, understanding and quantification of the plant – animal – supplement interface.

Key words: Rumen models, grazing, dairy cows, nutrients

---

©2002 ALPA. Todos los derechos reservados

Arch. Latinoam. Prod. Anim. 2002. 10(3): 232-240

**RESUMEN:** De 1970 a la fecha se ha registrado un progreso significativo en el desarrollo de modelos dinámicos de simulación de rumen, que han permitido integrar el conocimiento disponible, identificar áreas que requieren mayor atención y fundamentalmente mejorar la comprensión cuantitativa sobre el funcionamiento del ecosistema ruminal. Existen todavía limitaciones importantes en la representación y cuantificación de una serie de aspectos entre los que se destacan la distribución e interacción entre microorganismos en el rumen, el pasaje de substrato hacia fuera del rumen y la producción y absorción de ácidos grasos volátiles. La utilización de modelos detallados de rumen, para predecir disponibilidad de nutrientes en vacas lecheras en pastoreo, presentan limitaciones adicionales, tales como la asunción generalizada de entrada continua de substrato al sistema, tasas fraccionales de pasaje constantes y uniformidad en la composición química del substrato a lo largo del día. La predicción de disponibilidad de nutrientes para vacas lechera en pastoreo requiere de un estudio integrado del proceso de ingestión y digestión. El diseño de programas de investigación con un balance adecuado entre investigación analítica y sistémica constituye una estrategia efectiva para avanzar en el proceso de comprensión y cuantificación del estudio de la interfase planta – animal – suplemento.

Palabras clave: Modelos rumen, pastoreo, vacas lecheras, nutrientes

### Introducción

La producción de leche en las principales regiones de clima templado del Cono Sur americano (Argentina, Chile, sur de Brasil y Uruguay) es predominantemente pastoril.

Esta macro región tiene dos grandes ventajas comparativas con respecto a otras regiones productoras, primero por la posibilidad de obtener altos rendimientos de forraje de las pasturas cultivadas y en segundo término, por la factibilidad de utilizar suplementos energéticos dada la aptitud agro

---

Recibido Agosto 7, 2002. Aceptado Octubre 22, 2002

\*E-mail: pchili@adinet.com.uy. Facultad de Agronomía, Estación Experimental "Dr. Mario A. Cassinoni", Ruta 3 km 363, CP. 60000, Paysandú, Uruguay.

ecológica de la región para producir cereales y oleaginosas (García 2002). Estas dos características debieran resultar en muy altas eficiencias de producción por hectárea si se tiene en cuenta que países de reconocida eficiencia productiva de leche como Nueva Zelanda, solamente cuentan con la primera de ellas. Sin embargo, existe una marcada brecha entre los niveles de producción y eficiencia alcanzado por este último país con respecto a los logrados en la macro región del Cono Sur.

En Uruguay en particular la producción de leche ha crecido en más de un 300% en las últimas tres décadas pasando de 400 a 1311 millones de litros anuales (DIEA, 2001). El número de productores de leche, en tanto, descendió significativamente, desapareciendo más de 2000 productores en los últimos 20 años. El aumento de la producción de leche ha estado basado fundamentalmente en una mejora en los índices de productividad promedio de los tambos, en los que los litros por hectárea se multiplicaron por 2 y los litros por vaca en ordeño y por vaca masa por 1.6 y 1.95, respectivamente (DIEA, 2001). Si bien durante este proceso se constató un incremento en los niveles de suplementación (concentrado y forraje conservados), la base del sistemas de producción de leche en Uruguay, sigue siendo esencialmente pastoril. De todas maneras, en los sistemas de mayor productividad (6-7 TT leche por há) se utilizan entre 1.2-1.5 TT de concentrado y 3-4 TT de ensilaje (base fresca) por há año<sup>-1</sup>. Durante los años '90, la relación de precios granos:leche ha sido muy favorable tanto en Uruguay como en Argentina, justificando los incrementos en la utilización de granos. Sin embargo esta relaciones de precios han ido cambiando en los últimos años y se necesita identificar modelos alternativos de producción con menor costo y mayor margen, las cuales sin lugar a dudas deberán basarse en una mayor conversión de pasto a leche (García, 2002).

El proceso de intensificación de los sistemas pastoriles de producción de la región, ha determinado que durante otoño-invierno, la alimentación del rodeo esté basada en el pastoreo directo de una cantidad limitada de forraje fresco, una diversidad de concentrados, granos y/o subproductos industriales y forrajes conservados (fundamentalmente ensilaje de maíz). Esto ha derivado en una mayor complejidad en el control del proceso de alimentación, donde las decisiones deben integrar en el tiempo (horas del día) y en el espacio (potrero, sala de ordeño, comederos fuera de la sala de ordeño), los diferentes componentes de la dieta. Se puede postular que estos sistemas disponen de "un verdadero mixer" (la vaca), el cual debe ser llenado, con alimentos que difieren desde el punto de vista estructural y nutricional (Chilibroste, 1998 a, b).

La extracción y utilización de nutrientes para fines productivos por parte de los rumiantes involucra una triple interacción entre el animal, el alimento y la población microbiana. Aspectos particularmente importantes de esta interacción y determinantes de la eficiencia de producción en pastoreo, son, por una lado, las características de las pasturas y por otro el comportamiento ingestivo del animal. Se-

gún varíen estos dos factores, resultará en cambios en la masa y actividad de la población microbiana y como consecuencia en la dinámica de producción de nutrientes para el animal huésped. En los sistemas intensivos de producción de leche del Hemisferio Norte la manipulación de la cantidad y tipo de nutrientes disponibles para el rumiante se realiza a través de cambios en el nivel y tipo de suplemento utilizado. En los sistemas pastoriles del Cono Sur donde la pastura es el componente principal de la base alimenticia y las relaciones de precio son notoriamente menos favorables que en el Hemisferio Norte, la manipulación de la cantidad y tipo de nutrientes disponibles para el rumiante debiera basarse en el control del proceso de pastoreo. La definición de estrategias de suplementación basadas en el conocimiento cuantitativo de la interfase planta-animal, aparece como la vía tecnológica con mayor potencial de lograr cambios en la cantidad y calidad del producto obtenido, sin variar en forma significativa los costos de producción (Chilibroste, 2002).

El objetivo de este trabajo es analizar las limitantes para incorporar modelos detallados de rumen en su estado actual, para mejorar la capacidad de predecir la disponibilidad de nutrientes en vacas lecheras en condiciones de pastoreo restringido y suplementadas con forraje conservado y concentrado.

## Evaluación de Modelos Detallados de Rumen

**Evolución reciente.** La cantidad y tipo de nutriente absorbido por los rumiantes, está fuertemente influenciado por los procesos que ocurren en el retículo-rumen. El mayor aporte de nutrientes de los forrajes está constituido por polisacáridos unidos por enlaces  $\beta$ 1-4 no susceptibles a hidrólisis por las enzimas secretadas por el rumiante. Otros componentes importantes de los forrajes lo constituyen las proteínas, azúcares solubles, lípidos, minerales y vitaminas. Afortunadamente, los rumiantes poseen un sistema digestivo altamente especializado en el que se destaca la presencia del retículo-rumen con alta capacidad de almacenamiento y mezclado, lo que disminuye la velocidad de pasaje del alimento a través del tracto digestivo y permite el desarrollo y estabilización de una densa masa microbiana con un importante potencial de desdoblar enlaces  $\beta$ 1-4. El resultado neto de la acción de los microorganismos sobre el forraje, es la síntesis de nuevos compuestos que, en función del rol que cumplen en el metabolismo del animal huésped, se clasifican en glucogénicos (ácido propiónico), cetogénicos (ácido acético y butírico) y aminogénicos (proteína microbiana). También se generan subproductos que no tienen valor para el rumiante (ej. metano) que son eliminados del sistema.

En la medida que el conocimiento del ecosistema ruminal ha logrado avances significativos en las últimas décadas (Van Soest, 1994), la utilización de modelos mecánicos como herramienta de investigación se ha incrementado (Dijkstra y France, 1996). La construcción de modelos con

el objetivo de integrar nuevo conocimiento disponible sobre la digestión y pasaje del alimento consumido, el metabolismo microbiano, y la formación de productos finales de la fermentación, se ha visto fuertemente estimulada en las últimas décadas (Bannink *et al.*, 1997; Dijkstra y France, 1996; Sauvant *et al.*, 1995), especialmente a partir del trabajo pionero reportado por Baldwin *et al.* (1970). El modelo de Baldwin *et al.* (1970), realizó una integración cuantitativa del metabolismo combinado de la energía y la proteína con el objetivo de predecir la formación y utilización de productos finales de la fermentación en ovejas. El trabajo si bien limitado por la cantidad y calidad del conocimiento disponible, tuvo la virtud de identificar y resaltar áreas donde el conocimiento disponible era inadecuado. Posteriormente, sucesivos modelos fueron reportados por Reichl y Baldwin (1975), Baldwin *et al.* (1977) y Murphy *et al.* (1982; 1983; 1986), quienes permitieron progresos significativos en la representación del metabolismo microbiano, las transacciones de nitrógeno, la cinética de digestión de la fracción fibra y los aspectos dinámicos del metabolismo de los ácidos grasos volátiles (AGV) en el rumen.

Una debilidad común de los modelos reportados era la pobre base matemática sobre la que estaban construidos, integrando un número variable de funciones empíricas. Una aproximación diferente fue propuesta por France *et al.* (1982), quienes fortalecieron la base matemática de los modelos, estableciendo la representación del sistema en términos de variables de estado, tasas de cambio a través de una serie de ecuaciones diferenciales y la utilización sistemática de la integración numérica. Más tarde, Baldwin *et al.* (1987), desarrollaron un modelo para predecir la tasa y patrón de absorción de nutrientes en vacas lecheras, logrando una descripción más comprensiva de las características físicas y química de las dietas, así como del metabolismo de los productos finales de la fermentación (Dijkstra y France, 1996). El modelo de Baldwin *et al.* (1987), fue el primero específicamente diseñado para trabajar con vacas lecheras. Unos años más tarde, Danfær (1990) también desarrolló un modelo dinámico y mecanístico, con el objetivo de predecir la digestión y metabolismo de nutrientes en vacas lecheras. Más recientemente, el modelo Cornell Net Carbohydrate and Protein System (CNCPS), ha sido desarrollado con el objetivo de proveer estimaciones de nutrientes disponibles para absorción en vacunos (Fox *et al.*, 1992). El componente ruminal de dicho modelo ha sido reportado por Rusell *et al.* (1992) y Sniffen *et al.* (1992). Kolver *et al.* (1998) evaluaron el comportamiento del modelo con vacas lecheras alimentadas en base a forraje. Dijkstra *et al.* (1992) tomaron como base el trabajo reportado por Baldwin *et al.* (1987) y desarrollaron un modelo con el objetivo de mejorar la descripción de la dinámica de la población microbiana. Contribuciones específicas de dicho modelo respecto a los anteriores, fueron la identificación de patrones de preferencia diferencial por substratos, tasas diferenciales de pasaje, variación en composición química y reciclaje entre las diferentes poblaciones microbianas que conviven en el ecosis-

tema ruminal (Dijkstra, 1993). Posteriormente, Lescoat y Sauvant (1995) reportaron un nuevo modelo ruminal, con el objetivo de mejorar la predicción del flujo de AA hacia el duodeno y la producción y absorción de AA, que consideraron pobremente desarrollada en los modelos precedentes (Dijkstra y France., 1996).

Adicionalmente al desarrollo de modelos completos de rumen, son destacables los esfuerzos posteriores de integración de nuevo conocimiento, en los que se cubrieron aspectos más específicos del ecosistema ruminal tales como la dinámica de los protozoarios (Dijkstra, 1994), la producción de ácidos grasos volátiles (Bannink y De Visser), fluctuaciones de pH en el líquido ruminal (Pitt y Pell, 1997) y la producción de proteína microbiana (Dijkstra *et al.*, 1998).

### Potencialidades y Limitantes de los Modelos de Rumen en su Estado Actual

Los modelos descritos en la sección anterior, son mayoritariamente modelos mecanísticos (France y Thornley, 1984), en los que se describe el sistema, integrando las variables determinantes o causales de la dinámica del mismo. Estos modelos, contrastan con los modelos empíricos donde lo que se realiza es una descripción matemática (con base biológica o no), de datos observados. Entre los extremos que representan los modelos mecanísticos y empíricos, existen una gama de modelos intermedios que pueden ser considerados como mixtos (ej. CNCPS), que integran representaciones empíricas con procesos representados a través de simulación dinámica (O'Connors *et al.*, 1993). En general, los modelos empíricos han sido desarrollados con un objetivo predictivo. Si bien el desarrollo de un modelo dinámico de simulación contiene el potencial de desagregar el problema en sus componentes principales, representar los flujos de substratos entre dichos componentes, así como integrar los mecanismos de control, no necesariamente son más potentes en su capacidad predictiva (Chilibroste, 1993). Es importante que al evaluar o comparar modelos, la consideración de los objetivos con que han sido construidos sea especialmente considerada, a los efectos de poder extraer conclusiones valederas.

Una evaluación exhaustiva de modelos dinámicos de simulación, que han integrado el conocimiento disponible respecto a la cinética de digestión y producción de nutrientes a nivel ruminal, a sido reportada por Bannink *et al.* (1997) y Dijkstra y France (1996). Algunos de los aspectos identificados como críticos en el estado actual de los modelos y que requieren una mejor representación son los siguientes:

#### Degradación de substrato

La tasa de degradación del substrato ingerido por el animal es resultado de una triple interacción entre propiedades intrínsecas del alimento, la actividad microbiana en el rumen y actividades del animal (ej. rumia).

Prácticamente todos los modelos de rumen, distinguen en los alimentos fracciones potencialmente degradables y

fracciones no degradables y dentro de las primeras, componentes solubles e insolubles (Chilibroste *et al.*, 1997b). La representación de la degradación de los carbohidratos estructurales requiere una identificación precisa de las fracciones degradables y no degradables, las tasas fraccionales de degradación y pasaje, así como la interacción con la población microbiana y el medio ambiente ruminal (Dijkstra y France, 1996).. Las fracciones de carbohidratos no estructurales, son normalmente representadas por la concentración de almidón (soluble e insoluble) y de azúcares simples. Prácticamente todos los modelos de rumen, asumen que los carbohidratos solubles son potencialmente 100% degradables y que su disponibilidad para los microorganismos del rumen es instantánea una vez ingeridos. Este supuesto es particularmente crítico en condiciones de pastoreo, dado las evidencias experimentales disponibles (Boudon *et al.*, 2002; Chilibroste *et al.*, 1997a; Laca *et al.*, 1994).

Al igual que para los carbohidratos, la fracción nitrogenada (N) del sustrato, es representada en la mayoría de los modelos por una fracción no degradable y una degradable. Esta última, está compuesta por una fracción insoluble, y una fracción soluble, que pueden ser de origen proteico o provenir de unidades nitrogenadas más simples (péptidos, aminoácidos). Si bien los modelos no asumen un efecto directo de la disponibilidad de carbohidratos sobre la tasa fraccional de degradación de las fracciones nitrogenadas, integran la disponibilidad de carbohidratos en el balance entre N incorporado en masa microbiana y N fermentado a amonio. Si embargo existen diferencias importantes entre los modelos en la representación del reciclaje de N vía saliva y/o urea, la utilización de diferentes fuentes de N (amonio, aminoácidos y péptidos) y la interacción entre los diferentes componentes de la microflora microbiana (Bannink *et al.*, 1997; Dijkstra *et al.*, 1998). Adicionalmente, hay una serie de aspectos importantes pobremente considerados o no existentes en los modelos reportados, entre los que se destacan: la interacción entre nutrientes, la sincronización energía-proteína, los requerimientos de la población microbiana para procesos de mantenimiento y las variaciones en composición química de la población microbiana.

### **Pasaje de Sustrato hacia fuera del Rumen**

El pasaje de fracciones no digeridas y de la población microbiana, son procesos centrales involucrados en el control del consumo, la disponibilidad de nutrientes en los diferentes sitios de digestión y en la eficiencia de producción de proteína microbiana (Dijkstra *et al.*, 1998; Tamminga y Van Vuuren, 1996). A pesar de que la importancia de estos procesos ha sido ampliamente investigada (Van Soest, 1994), y de disponerse de un buen nivel de comprensión de los mecanismos involucrados en el pasaje de la fracción sólida y líquida hacia fuera del rumen (Owens y Goetsch, 1986), la información cuantitativa es aún limitada y poco precisa. En general la representación del pasaje de sustrato en los modelos de rumen es mucho menos detallada y en consecuen-

cia más pobremente y empíricamente representada, que los procesos de fermentación y de metabolismo microbiano (Dijkstra y France, 1996). Aspectos críticos en ésta área son la falta de información precisa sobre la interdependencia entre la tasa de pasaje y la degradación de partículas vía rumiación y fermentación. Igualmente limitante, es la generalización de una tasa fraccional constante de pasaje, la que no está en línea con evidencias experimentales (ej. Chilibroste *et al.*, 1997a; 2001; Okine y Mathinson, 1991), quienes sugieren tasas variables a lo largo del día, dependientes del patrón de ingestión de los animales.

### **Metabolismo Microbiano**

A pesar de haber sido una de las áreas donde más esfuerzo de investigación se ha realizado (*in-vitro* e *in-vivo*), la integración del conocimiento disponible en modelos dinámicos de simulación, ha dado lugar a diferencias importantes entre autores, tanto en el nivel de detalle que asumen, como en los parámetros que involucradas en las transacciones de nutrientes (Bannink *et al.*, 1997). Entre los aspectos identificados como más críticos en la representación del metabolismo microbiano se destacan la descripción y/o predicción de la interacción entre la población microbiana, la disponibilidad de sustrato y el animal huésped (Dijkstra *et al.*, 1998) así como el efecto del tipo y nivel de concentración de sustrato, la distribución de los microorganismos dentro del rumen, la interacción entre microorganismos y las variaciones en la composición química de la población microbiana (Bannink *et al.*, 1997).

### **Producción de Productos Finales de la Fermentación**

Los productos finales de la fermentación en el rumen incluyen amonios, ácidos grasos volátiles y metano. Los AGV constituyen la principal fuente de energía para los rumiantes, por lo que una adecuada representación y predicción de la producción y absorción de AGV, es un proceso central en la evaluación de los modelos. Algunos de los modelos enumerados en la sección inicial, no dan cuenta de la producción de AGV (ej. France *et al.*, 1982) o no distinguen entre tipos de AGV (ej. Baldwin *et al.*, 1987). Al igual que para el metabolismo microbiano los modelos detallados de rumen difieren en el nivel de agregación y en la representación de lo proceso involucrados en la producción, absorción y pasaje de AGV desde el rumen (Bannink *et al.*, 1997). Un estudio comparativo de distintos modelos de simulación de rumen, adaptados para vacas lecheras, reveló que las fuentes de variación más importantes involucradas en la cantidad y perfil de AGV producidos, fueron la representación de la cinética de absorción de los diferentes AGV y la selección de los coeficientes estequiométricos para representar la conversión de sustrato fermentado en AGV (Bannink y De Visser, 1997).

## Limitantes para la Utilización de Modelos Detallados de Rumen en Animales en Pastoreo

Al considerar la utilización de modelos detallados de rumen para predecir disponibilidad de nutrientes en animales en pastoreo, a las limitantes señaladas en la sección anterior, se deben agregar un grupo de limitaciones comunes a todos los modelos enumerados, a saber:

- todos los modelos detallados de rumen requieren como variable de entrada, conocida, el consumo de materia seca y la composición química del alimento consumido,
- los modelos están desarrollados y han sido calibrados para operar en condiciones de flujo continuo de alimentación,
- prácticamente ninguno de los modelos descriptos, ha cuantificado los efectos de la sincronización en el tiempo de la disponibilidad de diferentes substratos y,
- en general los modelos propuestos operan con un solo alimento o con dietas completas.

Chilibroste (1993) y Chilibroste *et al.* (1997b) desarrollaron un modelo dinámico de simulación, que a la vez de integrar conocimiento disponible en el momento de su construcción, intentó superar algunas de las limitantes recién enumeradas. Aspectos destacables de dicho modelo fueron: a) la capacidad de predecir consumo dado una descripción de los animales y la cantidad, tipo y manejo de la alimentación, b) la posibilidad de ingresar distintos alimentos en diferentes momentos del día, c) las tasas fraccionales de degradación fueron variables en función de la disponibilidad de carbohidratos y nitrógeno y d) las tasas de pasaje fueron también variables de acuerdo al nivel de llenado del rumen. El modelo demostró buena capacidad predictiva para una gama amplia de condiciones de alimentación (Chilibroste *et al.*, 1997b) y permitió evaluar el efecto sobre el consumo y la digestibilidad de la MS, de distintos niveles y tipos de concentrados (Chilibroste, 1993). Más allá de su buen comportamiento predictivo, el modelo presenta limitaciones importantes en su diseño, como la no integración del proceso de selección y cosecha de forraje bajo pastoreo (componente de ingestión), y una pobre descripción del metabolismo microbiano (componente de digestión), lo cual reduce significativamente la capacidad del modelo para predecir disponibilidad de nutrientes.

La dinámica de ingestión bajo pastoreo debe recibir especial atención, dado los efectos directos de la dinámica de ingestión sobre la dinámica de aporte de substrato para la población microbiana y la retroalimentación que el propio proceso de digestión pueda tener sobre la dinámica de ingestión. En condiciones de pastoreo el proceso ingestión-digestión es una unidad mutuamente dependiente, que debe ser estudiada en forma integrada (Chilibroste, 1999; 2002).

## Descripción del Consumo de Forraje de Animales en Pastoreo

El modelo conceptual simple adoptado por Allden y Whittaker (1970) en el que el consumo de materia seca ( $\text{g día}^{-1}$ ) fue expresado como el producto de tasa de consumo ( $\text{g hora}^{-1}$ ) y el tiempo de pastoreo ( $\text{horas día}^{-1}$ ), ha formado la base de gran parte de la investigación llevada a cabo en las últimas décadas. La tasa de consumo a su vez ha sido expresada como el producto del peso de cada bocado individual ( $\text{g bocado}^{-1}$ ) por el número de bocados por hora ( $\text{bocado hora}^{-1}$ ). Laca *et al.*, (1992) utilizando pasturas artificialmente construidas, ubicaron a la altura y la densidad del forraje como los factores más importantes en la definición de la profundidad y área de bocado y consecuentemente en el peso de bocado. Es a nivel del bocado individual que se ha establecido la ligazón funcional entre el aparato ingestivo del animal y las características morfológicas y espaciales de las pasturas (Laca *et al.*, 1994). Adicionalmente, ha sido reconocido el peso del bocado individual en la determinación de la tasa de consumo lograda por los rumiantes (Hodgson, 1990; Ungar, 1996). Los hallazgos científicos realizados en la última década han sido elegantemente sintetizado por Parsons y Chapman (1998) quienes establecieron que “*si bien los técnicos y productores visualizan la utilización de pasturas como un problema a resolver potrero a potrero, los rumiantes están forzados a resolver sus requerimientos diarios bocado a bocado*”. Un diagrama ilustrativo de las principales relaciones entre las características de la pastura y la tasa de consumo instantánea, se presenta en la Figura 1.

## Patrón de Comportamiento Ingestivo

Los vacunos exhiben un patrón básico de comportamiento en pastoreo (Hodgson, 1990). Los patrones de pastoreo para vacas lecheras han sido establecidos en condiciones de pastoreo continuo (Rook *et al.*, 1994; Gibb *et al.*, 1997) donde se distinguen tres o eventualmente 4 sesiones importantes de pastoreo ubicándose las más importantes en la mañana temprano y al final del día. Barrett *et al.* (2001), han reconocido un patrón de comportamiento similar para animales, manejadas con cambios diarios de parcela.

En el caso de las vacas lecheras el evento de retirar los animales para el ordeño ejerce una influencia fundamental sobre el patrón natural de comportamiento ingestivo, concentrándose las dos sesiones principales de pastoreo a la salida de los ordeños. No obstante aun en sistemas en que el movimiento de los animales es fuertemente alterado como el caso de los sistemas lecheros, se mantiene la predominancia de la sesión de la tarde sobre la sesión de la mañana (Gibb *et al.*, 1997; Barrett *et al.*, 2001). Este comportamiento de los animales puede constituir tanto una respuesta a la mayor densidad energética de las pasturas al final del día,

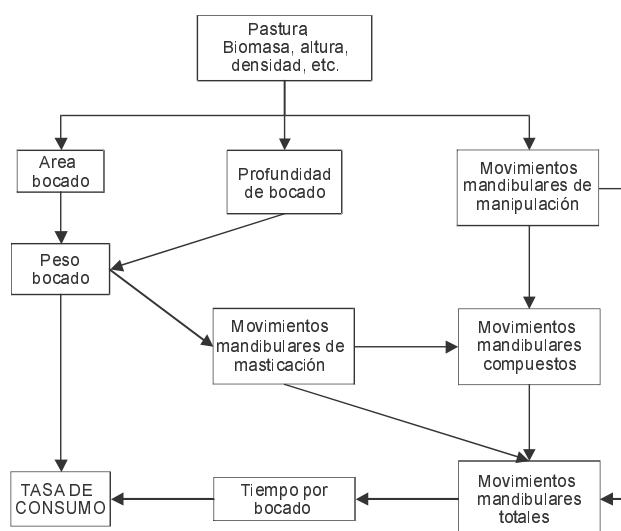


Figura 1. Componentes del comportamiento ingestivo que median entre la estructura de la pastura y la tasa de consumo. Adaptado de Ungar (1996).

como un intento de los animales por obtener la mayor cantidad de alimento posible antes de que llegue la noche, período en el que en condiciones silvestres los rumiantes estarían más expuestos a la presencia de predadores.

Gibb *et al.* (1998), en un estudio más detallado, estudiaron el efecto de la hora del día sobre el comportamiento ingestivo de vacas lecheras. El consumo de forraje fresco (kg de material fresco por hora) no varió significativamente a lo largo del día aunque las diferencias en valores absolutos fueron importantes. La tasa de consumo de materia seca se incrementó linealmente durante el día, resultando en un incremento de un 35% entre la primera (7:00 a.m.) y la última (19:00 p.m.) determinación realizada. El momento del día no parece tener un efecto significativo en el número total de movimientos mandibulares aunque sí en la relación entre movimientos mandibulares de prehensión (bocados) sobre movimientos mandibulares totales (Figura 1). En los pastoreos que siguieron a los ordeñes, la tasa de bocado no varió significativamente ubicándose en torno a los 52 bocados por minuto. Sin embargo, en la sesión de pastoreo que se realizó tarde en la mañana la tasa debocado se redujo significativamente (47 bocados  $\text{minuto}^{-1}$ ), mientras que en la sesión de pastoreo de la tarde las vacas incrementaron la tasa de bocado (59 bocados  $\text{minuto}^{-1}$ ), aumentando fundamentalmente la proporción de movimientos mandibulares destinados a la prehensión del forraje. Estas observaciones sugieren que las vacas maximizan la cosecha de forraje en la tarde donde conjugan una alta tasa de consumo con la sesión de pastoreo más extensa y que la estrategia para lograr altas tasas de consumo está ligada a la reducción de los bocados destinados a la manipulación y/o masticación del forraje durante la ingestión (Laca *et al.*, 1994).

## Estado Fisiológico de los Animales y Patrón de Comportamiento Ingestivo

Si bien las características de la pastura ejercen una influencia dominante sobre el comportamiento ingestivo de los animales, éste se ve modificado por cambios en el estado fisiológico de los mismos. Gibb *et al.* (1999), registraron mayores tasas de consumo para vacas lactando que para vacas secas: 1.4 y 1.2 kg MS  $\text{h}^{-1}$ , respectivamente. Es importante destacar que más allá de las diferencias en peso de bocado y tasa de consumo, el mecanismo de respuesta más importante frente a cambios en el estado fisiológico de los animales es la variación en tiempo de pastoreo. En el caso del trabajo de Gibb *et al.* (1999), registraron tiempos de pastoreo de 582 y 451 min.  $\text{día}^{-1}$  para las vacas lactando y secas, respectivamente.

El ayuno previo al pastoreo también ejerce una influencia sobre el patrón de ingestión de los animales. Chacon y Stobbs (1977), Patterson *et al.* (1998), y Soca (2000), registraron aumentos en tamaño de bocado para vacunos pastoreando gramíneas, y Dougherty *et al.* (1989), para vacunos pastoreando leguminosas, cuando fueron expuestos a un período de ayuno previo al pastoreo. El ayuno previo afecta también el tiempo de pastoreo total, induciendo en general menor cantidad de sesiones de pastoreo de mayor duración. Chilbroste *et al.* (1997a), reportaron aumentos significativos en el largo de la primera sesión de pastoreo (+ 38 min.) de vacas expuestas a 16.5 h de ayuno vs. vacas con 2.5 h de ayuno. Soca *et al.* (1999), estudiando el efecto de la ubicación durante el día de la sesión de pastoreo, encontraron que el largo de la primera sesión de pastoreo fue significativamente más larga (120 vs. 82 min.) en las vacas que experimentaron un período de ayuno previo al ingreso al pastoreo. Estas evidencias concuerdan con las observaciones de Soca (2000), quien trabajando sobre una pastura naturalizada de raigrás en el sur de Chile observó que las vacas restringidas a pastorear solamente entre el ordeño p.m. y a.m. tuvieron una sesión vespertina de pastoreo significativamente más larga que las vacas que pastorearon día y noche (219 vs 80 min, respectivamente).

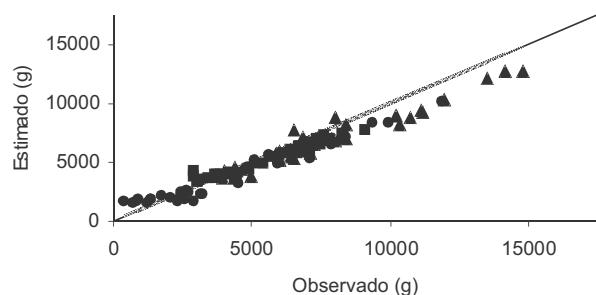
Estas evidencias experimentales, ponen de manifiesto la necesidad de contar con modelos capaces de operar en condiciones discontinuas de alimentación y predecir disponibilidad de nutrientes (Chilbroste *et al.*, 1997a; Dijkstra y France, 1996).

## Evaluación de un Modelo Detallado de Rumen en Condiciones Discontinuas de Alimentación

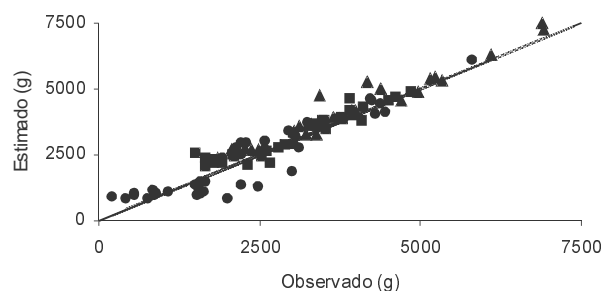
Chilbroste *et al.* (2001), evaluaron un modelo de simulación construido con el objetivo de predecir digestión y absorción de nutrientes en vacas lecheras (Dijkstra *et al.*, 1996). Una serie de modificaciones fueron realizadas al modelo original (Chilbroste *et al.*, 2001) para poder eva-

luarlo en condiciones discontinuas de alimentación. Resultados de experimentos detallados de pastoreo (Chilibroste *et al.*, 1997a; 1998; 2000), fueron utilizados como valores de referencia para evaluar el modelo reportado por Dijkstra *et al.* (1996). En la Figura 2 se presentan los valores observados y simulados para los pools ruminales de MO, N y FDN. La raíz del cuadrado medio del error (MSPE), para los pools de MO, N y FDN estuvo en torno al 10% de la media observada, lo que fue considerado como un valor aceptable (Chilibroste *et al.*, 2001). El MSPE fue fuertemente influenciado por los valores correspondientes a los períodos largos de ayuno, impuestos a posteriori de las sesiones de pastoreo. La asociación entre magnitud de los errores y largo del período de ayuno, sugieren la necesidad de una mejor definición de los inputs del modelo, especialmente la inclusión de tasas fraccionales de pasaje y de de-

#### a) Pool de material orgánica (MO) en rumen



#### b) Pool de fibra detergente neutro (FDN) en rumen



#### c) Pool de nitrógeno (N) en rumen

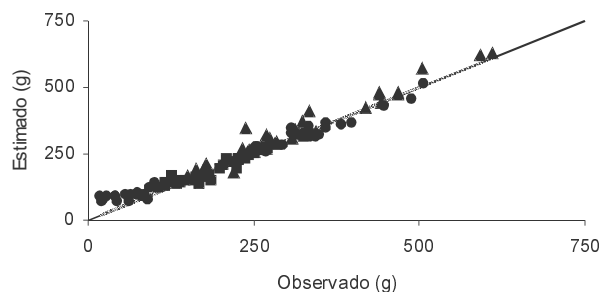


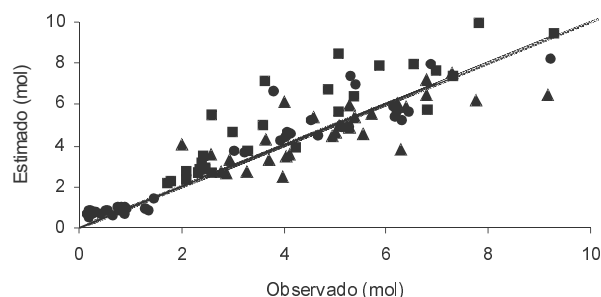
Figura 2. Pools de MO, FDN y N observados y estimados por el modelo.

gradación, variables en el tiempo. La predicción del tamaño del pool y la concentración de AGV (Figura 3), fue menos satisfactoria que el de las fracciones sólidas (Figura 2). Sin embargo, el pool de AGV fue estimado con una raíz del MSPE cercana al coeficiente de variación observado en los propios experimentos de pastoreo. Los autores concluyeron que el modelo de Dijkstra *et al.* (1996) podría ser utilizado en condiciones de alimentación discontinua para predecir disponibilidad de nutrientes para vacas lecheras, en la medida que se eviten situaciones de alimentación que incluyan períodos de ayuno prolongados. Como continuación de esta evaluación, actualmente se está desarrollando modelo dinámico de simulación (Chilibroste y Tamminga, sin publicar), que aparte de integrar las fortalezas de los modelos detallados de rumen, incorpore la flexibilidad y estructura del modelo propuesto por Chilibroste *et al.* (1997a), con especial énfasis en la dinámica de ingestión y de las partículas en el rumen.

## Implicancias y Perspectivas

La interfase planta-animal involucra interacciones entre un número importante de variables, lo que convierten al sistema pastoril en un sistema complejo. El nivel de complejidad aumenta, cuanto el sistema incorpora inputs externos como son la suplementación con concentrados. Particularmente complejos son los sistemas de producción de leche pastoriles, donde los animales deben integrar en el tiempo

#### a) Pool de ácidos grasos volátiles (AGV) en rumen



#### b) Concentración de AGV en rumen

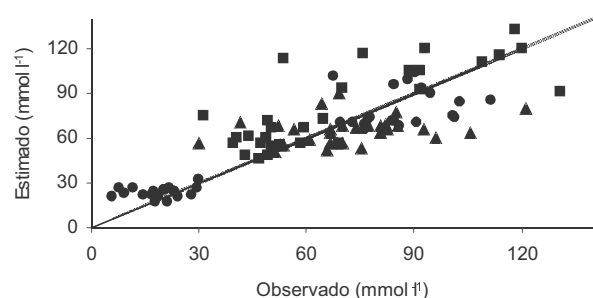


Figura 3. Pool y concentración de AGV en el rumen. Valores estimados y observados.

diferentes componentes de la dieta (pastoreo, forraje conservado y suplementos concentrados) y una rutina rígida que involucra en entre otras cosas el movimiento de los animales para el ordeño. Desde esta perspectiva, la integración de la modelación al estudio de los problemas, no sólo se justifica sino que tal vez represente la única vía efectiva de poder integrar la complejidad del sistema. Un balance adecuado entre investigación analítica y sistémica, ha probado ser una estrategia efectiva para avanzar en el proceso de comprensión y cuantificación de sistemas complejos (Chilibroste, 1999; Demment *et al.*, 1995; Dijkstra y France, 1995).

### Literatura Citada

- Alden, W. G. and I. A. McD Whittaker, 1970 The determinants of herbage intake by grazing sheep: Interrelationship of factors influencing herbage intake and availability. *Austr. J. Agric. Sci.* 21: 755-766.
- Baldwin, R. L., L. J. Koong, and M. J. Ulyatt. 1977. A dynamic model of ruminant digestion for evaluation of factors affecting nutritive value. *Agric. Syst.* 2: 255-288.
- Baldwin, R. L., H. L. Lucas, and R Cabrera. 1970. Energetic relationships in the formation and utilization of fermentation end-products. In: *Physiology of digestion and metabolism in the ruminant* (Phillipson, A. T., Annon, E. F., Armstrong, D. G., Balch, C. C., Comline, R. S., Hardy, R. S., Hobson, P. N. & Keynes, R. D. eds.), Oriol Press, Newcastle-upon-Tyne. pp. 319-334.
- Baldwin, R.L., J.H.M. Thornley and D.E. Beever, 1987. Metabolism of the lactating cow. II. Digestive elements of a mechanistic model. *J. Dairy Res.* 54:107-131.
- Bannink, A. and H. De Visser, 1997. Comparison of mechanistic rumen models on mathematical formulation of extramicrobial and microbial processes. *J. Dairy Sci.* 80:1296-1314.
- Bannink, A., H. De Visser and A.M. Van Vuuren, 1997. Comparison and evaluation of mechanistic rumen models. *Br. J. Nutr.* 78:563-581.
- Barrett, P. D., A. S. Laidlaw, C. S. Mayne, and H. Christie. 2001. Pattern of herbage intake rate and bite dimensions of rotationally grazed dairy cows as sward height declines. *Grass Forage Sci.* 56: 362-373.
- Boudon, A. and J. L. Peyraud. 2001. The release of intracellular constituents from fresh ryegrass (*Lolium perenne* L.) during ingestive mastication in dairy cows: effect of intracellular constituent, season and stage of maturity. *Anim. Feed Sci. Technol.* 93: 229-245.
- Chacon, E. A. and T. H. Stobbs. 1977. The effects of fasting prior to sampling and diurnal variation on certain aspects of grazing behaviour in cattle. *Appl. Anim. Ethol.*, 3: 163-171.
- Chilibroste, P. 1993. Evaluación nutricional de dietas. Simulación de la digestión y pasaje de los nutrientes por el retículo-rumen. Tesis MSc. Departamento de Zootecnia, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile. Pp. 117.
- Chilibroste, P. 1998a. Fuentes comunes de error en la alimentación del ganado lechero: I Predicción del consumo. XXVI Jornadas Uruguayas de Buiatría. Paysandú, Uruguay. pp: 1-7.
- Chilibroste, P. 1998b. Fuentes comunes de error en la alimentación del ganado lechero: II Balance de nutrientes. XXVI Jornadas Uruguayas de Buiatría. Paysandú, Uruguay. pp 8-12.
- Chilibroste, P. 1999. Grazing time: the missing link. A study of the plant-animal interface by integration of experimental and modelling approaches. PhD thesis Agricultural University, Wageningen, 191 pp.
- Chilibroste, P. 2002. Integración de patrones de consumo y oferta de nutrientes para vacas lecheras en pastoreo durante el período otoño – invernal. In X Congreso Latinoamericano de Buiatría, XXX Jornadas Uruguayas de Buiatría. Ed. Centro Médico Veterinario, Paysandú. pp 90-96
- Chilibroste, P., C. Aguilar and F. García. 1997b. Nutritional evaluation of diets. Simulation of digestion and passage of nutrients through rumen-reticulum. *Anim. Feed Sci. Technol.* 68: 259-275.
- Chilibroste, P., J. Dijkstra, and S. Tamminga. 2001. Design and evaluation of a non-steady state rumen model. *Neth. J. Agric. Sci.* 49: 297-312.
- Chilibroste, P., S. Tamminga, H. Boer, M. J. Gibb and G. Den Dikken. 2000 Duration of regrowth of ryegrass (*Lolium perenne*) effects on grazing behavior, intake, rumen fill, and fermentation of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 83: 984-995.
- Chilibroste, P., S. Tamminga, and H. Boer. 1997a Effect of length of grazing session, rumen fill and starvation time before grazing on dry matter intake, ingestive behaviour and dry matter rumen pool sizes of grazing lactating dairy cows. *Grass Forage Sci.* 52: 249-257.
- Chilibroste, P., S. Tamminga, J. Van Bruchem, and P. L. Van der Togt. 1998. Effect of allowed grazing time, inert rumen bulk and length of starvation before grazing, on the weight, composition and fermentative end-products of the rumen contents of lactating dairy cows. *Grass Forage Sci.* 53: 146-156.
- Danfær, A. 1990. A dynamic model of nutrient digestion and metabolism in lactating dairy cows. Ph.D. Thesis, National Institute of Animal Science, Foulum, 510 pp.
- Demment, M. W., J. L. Peyraud, and E. A. Laca 1995. Herbage intake at grazing: a modelling approach. In *Recent developments in the Nutrition of Herbivores. Proceedings of the IVth International Symposium on the Nutrition of Herbivores.* M. Jornet, E. Grenet, M.-H. Farce, M. Theriez, and C. Demarquilly, ed. INRA Editions, Paris, pp 121-141.
- DIEA, 2001. Estadísticas del sector lácteo 2000. Trabajo Especiales N° 24. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Montevideo. Uruguay.
- Dijkstra J., J. France, H. D. S. C. Neal, A. G. Assis, L. J. M. Aroeira, and O. F. Campos, 1996. Simulation of digestion in cattle fed sugarcane: model development. *J. Agric. Sci.* 127:231-246.
- Dijkstra, J. and J. France, 1996. A comparative evaluation of models of whole rumen function. *Ann. Zootech. (Paris)* 45:175-192.
- Dijkstra, J. 1993. Mathematical modelling and integration of rumen fermentation processes. PhD thesis Agricultural University, Wageningen, pp. 221.
- Dijkstra, J. 1994. Simulation of the dynamics of protozoa in the rumen. *Br. J. Nutr.* 72: 679-699
- Dijkstra, J. and J. France 1995. Modelling and methodology in animal science. In *Proceedings of the IVth international workshop on modelling nutrient utilisation in farm animals.* A. Danfaer and P. Lescoat, ed. National Institute of Animal Science, Foulum, pp 9-18.
- Dijkstra, J., J. France, and D. R. Davies. 1998. Different mathematical approaches to estimating microbial protein supply in ruminants. *J. Dairy Sci.* 81: 3370-3384.
- Dijkstra, J., H. D. S. C. Neal, D. E. Beever, and J. France. 1992. Simulation of nutrient digestion, absorption and outflow in the rumen: model description. *J. Nutr.* 122: 2239-2256
- Dougherty, C. T., N. W. Bradley, P. L. Cornelius, and L. M. Lauriault. 1989. Short-term fasts and the ingestive behaviour of grazing cattle. *Grass Forage Sci.* 44: 295-302.
- Fox, D. G., C. J. Sniffen, J. D. O'Connor, J. B. Russell, and P. J. Van Soest. 1992. A Net Carbohydrate and Protein System for evaluating cattle diets: III Cattle requirements and diet adequacy. *J. Anim. Sci.* 70: 3578-3596.
- France, J. and J. H. M. Thornley. 1984 *Mathematical models in agriculture.* London, UK, Butterwoths. pp. 335
- France, J., J. H. M. Thornley and D. E. Beever, 1982, A mathematical model of the rumen. *J. Agric. Sci.* 99: 343-353.
- García, S. 2002. Desafíos y oportunidades para el establecimiento de sistemas estacionales de producción de leche en Argentina y Uruguay. In X Congreso Latinoamericano de Buiatría, XXX Jornadas Uruguayas de Buiatría. Centro Médico Veterinario, Paysandú. pp 97-106
- Gibb M. J., C. A. Huckle, and R. Nuthall R. 1998. Effect of time of day on grazing behaviour and intake rate by lactating dairy cows. *Grass Forage Sci.* 53, 41-46.
- Gibb, M. J., C. A. Huckle, R. Nuthall, and A. J. Rook. 1997. Effect of sward surface height on intake and grazing behaviour by lactating Holstein-Friesian cows. *Grass Forage Sci.* 52: 309-321.
- Gibb, M. J., C. A. Huckle, R. Nuthall, and A. J. Rook. 1999. The effect of physiological state (lactating or dry) and sward surface height on



- grazing behaviour and intake by dairy cows. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 63: 269-287.
- Hodgson, J. 1990. *Grazing management. Science into practice.* Logman Scientific & Technical: Harlow.
- Kolver, E. S., L. D. Muller, M. C. Barry, and J. W. Penno. 1998. Evaluation and application of the Cornell Net Carbohydrate and Protein System for dairy cows fed diets based on pasture. *J. Dairy Sci.* 81: 2029-2039.
- Laca, E. A., E. D. Ungar, and M. W. Demment. 1994. Mechanisms of handling time and intake rate of a large mammalian grazer. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 39: 3-19.
- Laca, E. A., E. D. Ungar, N. Seligman, and M. W. Demment. 1992. Effects of sward height and bulk density on bite dimensions of cattle grazing homogeneous swards. *Grass Forage Sci.*, 47: 91-102.
- Lescoat, P. and D. Sauvant. 1995. Development of a mechanistic model for rumen digestion validated using the duodenal flux of amino acids. *Reprod. Nutr. Develop.* 35: 45-70.
- Murphy, M. R., R. L. Baldwin, and L. J. Koong. 1982. Estimation of stoichiometric parameters for rumen fermentation of roughage and concentrate diets. *J. Anim. Sci.* 55: 411-421.
- Murphy, M. R., R. L. Baldwin, and M. J. Ulyatt. 1986. An update of a dynamic model of ruminant digestion. *J. Anim. Sci.* 62: 1412-1422.
- Murphy, M. R., R. L. Baldwin, M. J. Ulyatt, and L. J. Koong. 1983. A quantitative analysis of rumination patterns. *J. Anim. Sci.* 56: 1237-1240.
- O'Connor, J. D., C. J. Sniffen, D. G. Fox, and W. Chalupa. 1993. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: IV. Predicting aminoacids adequacy. *J. Anim. Sci.* 70: 3551-3561.
- Okine, E. K. and G. W. Mathison. 1991. Reticular contraction attributes and passage of digesta from the ruminoreticulum in cattle fed roughage diets. *J. Anim. Sci.* 69: 2177-2186.
- Owens, F. N. and A. L. Goetsch. 1986. Digesta passage and microbial protein synthesis. In: L.P. Milligan, W.L. Grovum & A. Dobson (Eds.), *Control of Digestion and Metabolism in Ruminants*, Prentice-Hall, Englewood-Cliffs, pp. 196-223.
- Parsons, A. J. and D. F. Chapman. 1998. Principles of grass growth and pasture utilization. Pages 283-309 in *Grass for Dairy Cattle*. J.H. Cherney and D.J.R. Cherney, ed. CAB International, Wallingford, Oxon OX10 8DE, UK
- Patterson, D. M., D. A. McGiloway, A. Cushnahan, C. S. Mayne, and A. S. Laidlaw. 1998. Effect of duration of fasting period on short-term intake rates of lactating dairy cows. *Anim. Sci.*, 66: 299-305.
- Pitt, R. E. and A. N. Pell. 1997. Modeling ruminal pH fluctuations: interactions between meal frequency and digestion rate. *J. Dairy Sci.* 80: 2429-2441.
- Reicht, J. R. and B. A. Baldwin. 1975. Rumen modelling rumen input-output balance models. *J. Dairy Sci.* 58: 879-890.
- Rook, A. J., C. A. Huckle, and P.D. Penning. 1994. Effect of sward height and concentrate supplementation on the ingestive behaviour of spring-calving dairy cows grazing grass-clover swards. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 40:101-112.
- Russell, J. B., J. D. O'Connor, D. G. Fox, P. J. Soest, C. J. Sniffen, and P. J. Van Soest. 1992. A Net Carbohydrate and Protein System for evaluating cattle diets. 1. Ruminal fermentation. *J. Anim. Sci.* 70: 3551-3561.
- Sauvant D., J. Dijkstra and D. Mertens. 1995. Optimisation of ruminal digestion: a modelling approach. In: M. Journet, E. Grenet, M.H. Farce, M. Theriez & C. Demarquilly (Eds.), *Recent Developments in the Nutrition of Herbivores*, INRA, Paris, pp 143-165.
- Sniffen, C. J., J. D. O'Connor, P. J. Soest, D. G. Fox, J. B. Russell, and P. J. Van Soest. 1992. A Net Carbohydrate and Protein System for evaluating cattle diets. 2. Carbohydrate and protein availability. *J. Anim. Sci.* 70: 3562-3577.
- Soca, P. 2000. Efecto del tiempo de pastoreo y nivel de suplementación sobre el consumo, conducta y parámetros productivos de vacas lecheras. MSc Thesis. Universidad de Chile, 98 pp.
- Soca, P., P. Chilibroste and D. A. Mattiauda. 1999. Effect of the moment and length of the grazing session on: 2. Grazing time and ingestive behaviour. In: *Proceedings of International Symposium Grassland Ecophysiology and Grazing Ecology*. Pp. 295-298.
- Tamminga, S. and A. M. Van Vuuren, 1996. Physiological limits of fibrous feed intake and conversion in dairy cows. In: A. F. Groen and J. Van Bruchem (Eds.). *Utilization of Local Feed Resources by Dairy Cattle. Perspective of Environmentally Balanced Production Systems*, Wageningen Pers, Wageningen, pp. 19-33.
- Ungar, E. D. 1996. Ingestive behaviour. In: *The Ecology and Management of Grazing Systems*. J. Hodgson and A.W. Illius, ed. CAB INTERNATIONAL, Wallingford, Oxon OX10 8DE, UK. Pp. 185-218.
- Van Soest, P. J. 1994. *Nutritional ecology of the ruminant*, Ed.2<sup>nd</sup>, Cornell University Press, Ithaca. pp. 476.