

## Valoración de los alimentos

### (A) Digestibilidad

En este capítulo, se produce un cambio de la nutrición cualitativa a la cuantitativa. En los anteriores, se han estudiado las sustancias que necesitan los animales, la forma en que los alimentos las aportan y el modo de utilización de las mismas. En este capítulo y en los siguientes se estudian, en primer lugar, las cantidades de nutrientes aportadas por los alimentos y, en segundo lugar, las cantidades necesarias para las distintas clases de animales.

El valor potencial de los alimentos para aportar los distintos nutrientes, puede determinarse mediante el análisis químico, pero el valor real para los animales, sólo puede conocerse después de haber tenido en cuenta las pérdidas inevitables que se producen durante la digestión, absorción y metabolismo. La primera cantidad que hay que descontar a los alimentos corresponde a la fracción no absorbida y excretada en las heces.

La digestibilidad de los alimentos puede definirse, con cierto grado de exactitud, como la cantidad que no se excreta en las heces y que, por tanto, se considera absorbida por el animal. Normalmente, se expresa en relación con la materia seca, como coeficiente o como porcentaje. Por ejemplo, si una vaca consume 9 kg de heno que contienen 8 kg de materia seca, y excreta en las heces 3 kg de materia seca, la digestibilidad del heno es

$$\frac{8 - 3}{8} = 0,625 \text{ ó } \frac{8 - 3}{8} \times 100 = 62,5 \text{ por ciento}$$

Del mismo modo, pueden calcularse los coeficientes para los distintos componentes de la materia seca. Aunque la cantidad del alimento que no se ha excretado en las heces se considera igual a la absorbida en el tracto digestivo, existen razones que contradicen dicho supuesto, que se estudiarán más adelante.

### Determinación de la digestibilidad

En los experimentos de digestibilidad, el alimento en estudio se administra a los animales en cantidades conocidas, determinándose la excreción fecal. Se emplean varios animales debido, en primer lugar, a que los animales, aunque sean de la misma especie, edad y sexo, presentan pequeñas diferencias en su capacidad digestiva y, en segundo lugar, porque las repeticiones permiten detectar los posibles errores en las determinaciones.

En los experimentos con animales mamíferos, son preferibles los machos a las hembras, ya que resulta más fácil la recogida independiente de las heces y la orina en los primeros. Deben ser dóciles y gozar de buena salud. Los animales de pequeño tamaño se mantienen en jaulas de metabolismo, que permiten la separación de las heces y la orina por medio de una serie de rejillas, en tanto que en los animales mayores, como el ganado vacuno, se colocan arneses con bolsas de goma o cualquier material impermeable, que permiten la recogida de las heces. En el caso de las hembras, se utilizan dispositivos especiales que permiten canalizar las heces hasta las bolsas sin que entren en contacto con la orina. Para el ganado ovino se dispone de equipos semejantes.

La determinación de la digestibilidad en las aves es más complicada debido a que las heces y la orina se excretan por el mismo conducto, la cloaca. Los compuestos existentes en la orina son, en su mayor parte, nitrogenados, lo que permite diferenciar las heces y la orina por medios químicos si los compuestos nitrogenados de la orina pueden distinguirse de los de las heces. La separación se basa en el hecho de que la mayor parte del nitrógeno de la orina se encuentra en forma de ácido úrico, o en que la mayor parte del nitrógeno de las heces se encuentra en forma de proteína verdadera. Por otra parte, es posible alterar quirúrgicamente la anatomía de las aves, de forma que las heces y la orina se eliminen por separado.

Si es posible, los alimentos necesarios para el experimento deben mezclarse homogéneamente, con antelación, para lograr una composición uniforme. A continuación, se administran a los animales durante una semana, como mínimo, antes de comenzar la recogida de las heces, con la finalidad de acostumar a los animales a la ración y para eliminar del tracto digestivo los restos de los alimentos consumidos con anterioridad. Este período preliminar va seguido de un período experimental en que se controlan la ingestión de alimentos y la excreción de heces. El período experimental suele tener una duración comprendida entre 5 y 14 días, proporcionando mayor exactitud los períodos más prolongados. En los animales monogástricos, las heces procedentes de una determinada ingestión de alimentos pueden identificarse añadiendo alguna sustancia coloreada, indigestible, como el óxido férrico o el carmín, a la primera y última comida del período experimental; el comienzo y el final del período de recogida, se retrasan hasta que el colorante aparece y desaparece de las heces. Este método no resulta adecuado para los rumiantes, ya que los alimentos marcados se mezclan en el rumen con los no marcados; en lugar de este sistema, se deja transcurrir un período de tiempo discrecional, normalmente de 24 a 48 horas, para la eliminación de los restos de alimentos, es decir, la determinación de la excreción fecal se inicia uno o dos días después del comienzo de la ingestión del alimento en estudio, prolongándose durante el mismo período de tiempo después de la última comida controlada.

En los experimentos de digestibilidad, especialmente los realizados con rumiantes, resulta muy conveniente administrar las comidas siempre a la misma hora y que las cantidades consumidas no cambien de un día para otro. Si la ingestión es irregular, existe la posibilidad, por ejemplo, de que la última comida del período experimental sea anormalmente abundante y el subsiguiente aumento en la excreción fecal se retrase hasta después de la última recogida de heces. En este caso, la excreción fecal obtenida a partir de la ingestión controlada de alimentos, quedaría subestimada y la digestibilidad sobreestimada. Los experimentos se completan analizando las muestras de los alimentos empleados y las heces recogidas.

En la Tabla 10.1, se expone un ejemplo de un experimento de digestibilidad realizado con ovejas que consumieron heno durante un período preliminar de 14 días, y un período experimental de 10 días. Los resultados corresponden a la media de tres animales. Los cálculos pueden resumirse del modo siguiente:

**Tabla 10.1** Resultados de un experimento de digestibilidad en el que tres animales de la especie ovina recibieron heno como alimento.

|                                     | <i>Materia<br/>seca<br/>(MS)</i> | <i>Materia<br/>orgánica</i> | <i>Proteína<br/>bruta</i> | <i>Extracto<br/>etéreo</i> | <i>Fibra<br/>ácido<br/>detergente</i> |
|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| (1) Análisis (g/kg MS)              |                                  |                             |                           |                            |                                       |
| Heno                                | –                                | 919                         | 93                        | 15                         | 350                                   |
| Heces                               | –                                | 870                         | 110                       | 15                         | 317                                   |
| (2) Nutrientes (kg/d)               |                                  |                             |                           |                            |                                       |
| Consumidos                          | 1,63                             | 1,50                        | 0,151                     | 0,024                      | 0,57                                  |
| Excretados                          | 0,76                             | 0,66                        | 0,084                     | 0,011                      | 0,24                                  |
| Digeridos                           | 0,87                             | 0,84                        | 0,067                     | 0,013                      | 0,33                                  |
| (3) Coeficientes de digestibilidad  |                                  |                             |                           |                            |                                       |
|                                     | 0,534                            | 0,560                       | 0,444                     | 0,541                      | 0,579                                 |
| (4) Nutrientes digeribles (g/kg MS) |                                  |                             |                           |                            |                                       |
|                                     | –                                | 515                         | 41                        | 8                          | 203                                   |

- (1) La ingestión media de materia seca del heno fue de 1,63 kg por cabeza y día, y la cantidad media de materia seca excretada en las heces fue de 0,76 kg por cabeza y día. Se analizaron el heno y las heces, obteniéndose los resultados que figuran en la Sección 1 de la Tabla 10.1.
- (2) A partir de los datos analíticos y de las cantidades de materia seca consumida y excretada, se calcularon las cantidades consumidas y excretadas de los distintos nutrientes y, por diferencia, los nutrientes digeridos, según se indica en la Sección 2.
- (3) Se calcularon los coeficientes de digestibilidad expresando las cantidades de nutrientes digeridos como proporciones de las cantidades consumidas (por ej.,  $0,87/1,63 = 0,534$ ); ver la Sección 3.
- (4) Por último, se calculó la composición del heno en forma de nutrientes digeribles (por ej.,  $919 \times 0,560 = 515$ ); ver la Sección 4.

La fórmula general para el cálculo de los coeficientes de digestibilidad, en que se combinan las fases 3 y 4, es la siguiente:

$$\frac{\text{Nutriente consumido} - \text{Nutriente en las heces}}{\text{Nutriente consumido}}$$

En este ejemplo, el alimento en estudio fue un alimento grosero que pudo administrarse a los animales como alimento único. Por el contrario, los alimentos concentrados pueden dar lugar a trastornos digestivos si se administran como alimento único a los rumiantes, por lo que la determinación de la digestibilidad suele realizarse administrándolos con un alimento grosero de digestibilidad conocida. De este modo, el heno empleado en el ejemplo de la Tabla 10.1, podría utilizarse en un segundo experimento en el que los animales recibieran, además,

0,50 kg de avena por día. Si el contenido en materia seca de la avena fuera de 900 g/kg, la ingestión diaria de materia seca aumentaría en 0,45 kg. Si la excreción fecal aumentase desde 0,76 hasta 0,91 kg por día, podría calcularse la digestibilidad de la materia seca de la avena del modo siguiente:

$$\frac{0,45 - (0,91 - 0,76)}{0,45} = \frac{0,45 - 0,15}{0,45} = 0,667$$

En este ejemplo, el heno se considera como alimento base y la avena como alimento problema. La fórmula general para calcular la digestibilidad del alimento problema, es:

$$\frac{\text{Nutriente en el alimento problema} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Nutriente} \\ \text{en las heces} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Nutriente en las heces} \\ \text{del alimento base} \end{array} \right\}}{\text{Nutriente en el alimento problema}}$$

## Métodos especiales para determinar la digestibilidad

### Métodos en que se emplean indicadores

En determinadas circunstancias, la carencia del equipo adecuado o las características especiales del experimento, hacen imposible la determinación directa de la ingestión de alimentos o la excreción de heces, o ambas. Por ejemplo, si los animales se alimentan en grupo, resulta imposible determinar la ingestión de cada individuo. Sin embargo, es posible determinar la digestibilidad, si el alimento contiene alguna sustancia totalmente indigestible. Determinando los contenidos de dicho indicador en los alimentos y en pequeñas muestras de las heces de cada animal, la relación existente entre esas concentraciones proporciona una estimación de la digestibilidad. Por ejemplo, si la cantidad de indicador aumenta desde 10 g/kg en la materia seca del alimento, hasta 20 g/kg en las heces, indica que se ha digerido y absorbido el 50 por ciento de la materia seca. Expuesto en forma de ecuación,

$$\text{Digestibilidad} = \frac{\text{g indicador/kg heces} - \text{g indicador/kg alimento}}{\text{g indicador/kg heces}}$$

El indicador puede ser algún componente natural del alimento o alguna sustancia química que se mezcla con el mismo. La mezcla de productos químicos con alimentos del tipo del heno, resulta difícil; en este caso, puede emplearse algún componente indigestible como la lignina. En la actualidad se emplean como indicadores las fracciones de los alimentos llamadas fibra ácido detergente indigestible y cenizas insolubles en ácido (esta última compuesta fundamentalmente por sílice), así como algunos *n*-alcanos de cadena larga (C<sub>25</sub>-C<sub>35</sub>) que se encuentran de forma natural. El indicador más empleado para mezclar con los alimentos es el cromo, en forma de óxido de cromo, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. El óxido de cromo es muy poco soluble y, por consiguiente, indigestible; además, es poco probable que el cromo se encuentre como compo-

nente natural de los alimentos en cantidades apreciables. Para los animales no rumiantes, puede añadirse a los alimentos dióxido de titanio como indicador.

La determinación de la digestibilidad de la hierba consumida por los animales en pastoreo, presenta problemas especiales. Teóricamente, pueden emplearse como indicadores algunos componentes naturales de la hierba, como la lignina. En la práctica, esta aplicación de los métodos en que se emplean indicadores, se complica por la dificultad que supone la obtención de muestras de los alimentos (es decir, la hierba del pasto) que sean, realmente, representativas de lo consumido. Los animales pastan selectivamente y prefieren las plantas tiernas a las maduras y las hojas a los tallos, de modo que es probable que la muestra de hierba cortada con una segadora contenga más cantidad de componentes fibrosos (incluida la lignina), que la hierba consumida por los animales en pastoreo. Es posible obtener muestras representativas si se dispone de animales con fístulas esofágicas (cuya finalidad consiste en comunicar la luz del esófago con la superficie de la piel). Si se mantienen cerradas mediante un tapón, los alimentos llegan normalmente desde la boca hasta el estómago; si se retira el tapón durante algún tiempo, la hierba consumida puede recogerse en una bolsa situada por debajo de la fístula. A continuación, se procede al análisis del indicador en la hierba pastada obtenida de ese modo, así como en la muestras de heces.

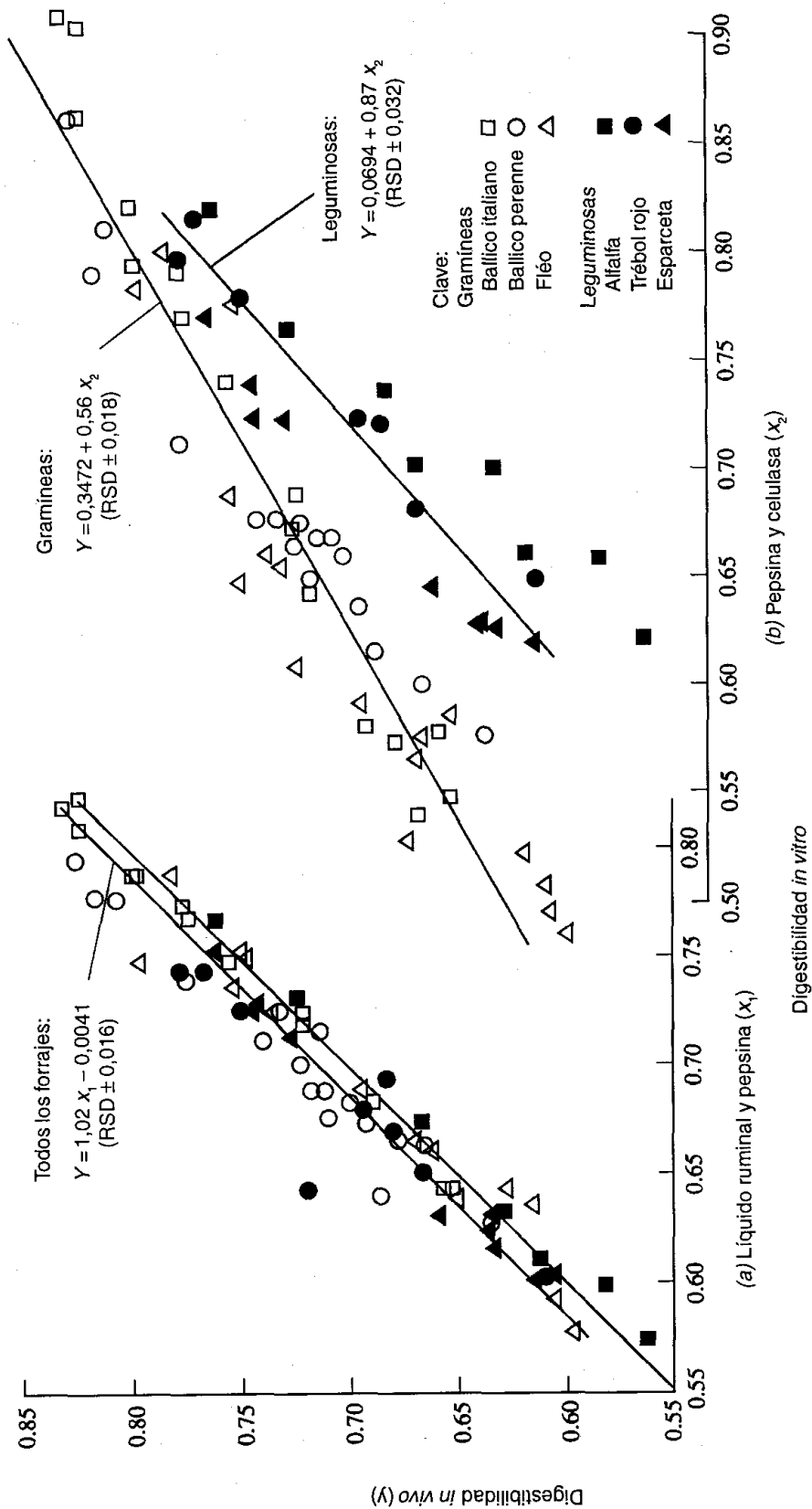
## Métodos de laboratorio para estimar la digestibilidad

Puesto que la realización de experimentos de digestibilidad es un proceso laborioso, se han realizado muchos intentos para determinar la digestibilidad de los alimentos reproduciendo en el laboratorio las reacciones que tienen lugar en el tracto digestivo de los animales. Aunque no es fácil de imitar en su totalidad la digestión en los animales no rumiantes, la digestibilidad de la proteína de los alimentos puede determinarse a partir de su susceptibilidad al ataque *in vitro* con pepsina y ácido clorhídrico. También es posible recoger las secreciones del tracto digestivo mediante cánulas, y utilizarlas para realizar la digestión *in vitro* de los alimentos.

La digestibilidad de los alimentos de los rumiantes puede determinarse, con cierta exactitud, sometiéndolos, en primer lugar a la acción de líquido ruminal y, seguidamente, a la acción de la pepsina. Durante la primera fase de este método, denominado «*in vitro* en dos fases», se incuba, en condiciones anaerobias, durante 48 horas, una muestra del alimento, finamente molido, en un tubo que contiene líquido ruminal tamponado. En la segunda fase, se matan las bacterias acidificando el medio con ácido clorhídrico, hasta alcanzar un pH 2, y se digieren incubándolas con pepsina durante otras 48 horas. El residuo insoluble se filtra, deseca e incinera; restando la materia orgánica de la existente en el alimento, se obtiene una estimación de la materia orgánica digestible. La digestibilidad determinada *in vitro* suele ser ligeramente inferior a la determinada *in vivo*, por lo que se hace necesario emplear ecuaciones de corrección para relacionar ambas determinaciones; en la Figura 10.1(a), se expone un ejemplo.

En la actualidad, se utiliza esta técnica para analizar los alimentos groseros de las explotaciones, para asesorar a los ganaderos, así como para determinar la digestibilidad de muestras de pequeño tamaño, como las obtenidas por los fitotécnicos. Otra posibilidad es la estimación de la digestibilidad de la hierba consumida en pastoreo, si se recoge mediante el empleo de animales con fístulas esofágicas, según se ha expuesto anteriormente.

El líquido ruminal empleado en la primera fase de este método de laboratorio, puede presentar distintas características fermentativas, de acuerdo con las raciones consumidas por los



**Figura 10.1** Métodos de laboratorio para estimar la digestibilidad de la materia seca de los forrajes. (a). Incubación en líquido de rumen seguida de una digestión con pepsina. (b) Digestión con pepsina seguida de una digestión con celulasa. (De Terry, R.A. *et al.*, 1978, *J. Br. Grassld Soc.*, 22, 13).

animales de los que se obtiene. Con el fin de mejorar la repetibilidad de las estimaciones de la digestibilidad, suele sustituirse el líquido ruminal por preparados de celulasas fúngicas. En la Figura 10.1(b), puede apreciarse la forma de estimar la digestibilidad de los forrajes para el ganado ovino, a partir de la incubación con pepsina, seguida de la incubación con celulasa. No obstante, la relación existente en la Figura 10.1(b), es menos estrecha que la obtenida, para los mismos forrajes, entre la digestibilidad estimada por fermentación con líquido ruminal y la determinada en el ganado ovino (Fig. 10.1(a)). El método pepsina-celulasa precisó ecuaciones de predicción independientes para las gramíneas y las leguminosas, siendo las desviaciones estándar residuales para dichas ecuaciones, mayores que las correspondientes a la ecuación empleada para el método del líquido ruminal-pepsina.

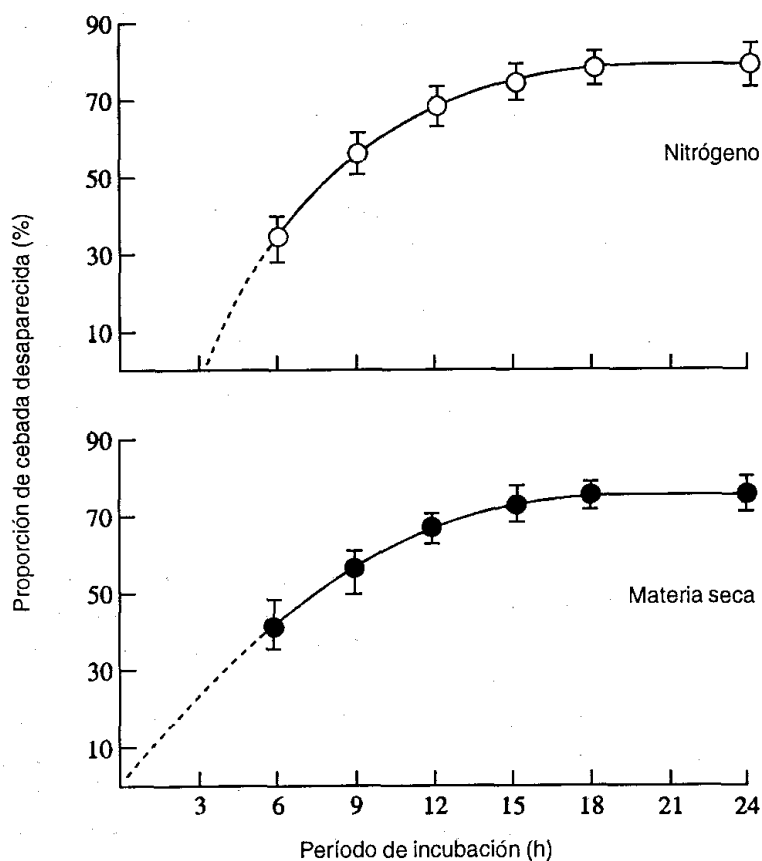
Los animales fistulados empleados para obtener líquido ruminal para la estimación de la digestibilidad *in vitro*, pueden utilizarse, así mismo, para realizar la valoración rápida de la digestibilidad de pequeñas muestras de alimentos. Dichas muestras (3-5 g de materia seca), se introducen en pequeñas bolsas de material sintético permeable, de paso de malla estandarizado ( $400-1.600 \mu\text{m}^2$ ), que se introducen en el rumen a través de una cánula, incubándose durante 24-48 horas. Una vez extraídas las bolsas, se lavan y desecan, para determinar la cantidad de materia seca del alimento que permanece como material no digerido. Esta técnica se denomina determinación de la digestibilidad *in sacco* (ver Fig. 10.2). La técnica presenta ciertos problemas que surgen, fundamentalmente, de la necesidad de seleccionar el período de incubación adecuado. Las curvas representadas en la Figura 10.2, pueden utilizarse para obtener más información sobre la digestión del alimento, ajustando ecuaciones a las mismas; la forma de hacerlo se explica en el Capítulo 13.

## Validez de los coeficientes de digestibilidad

El supuesto de que la cantidad de alimento digerida y absorbida puede determinarse restando la porción excretada en las heces, resulta discutible por dos motivos. El primero consiste en que, en los animales rumiantes, el metano producido durante la fermentación de los carbohidratos, se pierde por el eructo y no se absorbe. Este hecho, determina la sobreestimación de los carbohidratos digestibles, así como la energía digestible de los alimentos para los rumiantes.

No obstante, se introducen errores más graves por el hecho de que, según se estudió en el Capítulo 8, las heces no están formadas, exclusivamente, por restos no digeridos de los alimentos. Parte del material fecal lo componen enzimas y otras sustancias segregadas al intestino, que no se reabsorben, así como células desprendidas de la mucosa intestinal. Por tanto, si un cerdo recibe una ración libre de nitrógeno, sigue excretando nitrógeno en las heces. Puesto que este nitrógeno procede del organismo y no directamente de los alimentos, se denomina nitrógeno metabólico fecal; las cantidades eliminadas son, aproximadamente, proporcionales a la cantidad de materia seca ingerida. Además, las heces contienen cantidades apreciables de sustancias solubles en éter, así como minerales, que son de origen metabólico. Parte de las cenizas de las heces procede de los elementos minerales segregados al intestino, ya que las heces constituyen una vía real de excreción para ciertos minerales, especialmente el calcio.

La excreción en las heces de sustancias que no proceden, directamente, de los alimentos, determina una subestimación de la cantidad del alimento realmente absorbida por los animales. Por consiguiente, las cifras obtenidas en los experimentos de digestibilidad reciben el nombre de coeficientes de *digestibilidad aparente*, para diferenciarlos de los coeficientes de



**Figura 10.2** Desaparición de nitrógeno y materia seca de muestras de cebada incubadas en bolsas de fibra artificial en el rumen de ovinos. Las líneas verticales indican las variaciones entre las réplicas de las muestras, expresadas por la desviación estándar. (Tomado de Mehrez, A.Z. y Ørskov, E. R., 1977, *J. Agric. Sci. Camb.*, 88, 645).

*digestibilidad real.* En la práctica, los coeficientes de digestibilidad real son difíciles de determinar ya que, en la mayoría de los casos, no es posible diferenciar las fracciones de las heces correspondientes a los alimentos y a los animales. Para la mayoría de los fines, los coeficientes de digestibilidad aparente de los componentes orgánicos de los alimentos son perfectamente adecuados, ya que representan el resultado neto de la ingestión de los alimentos. Por el contrario, los coeficientes de digestibilidad aparente para algunos elementos minerales carecen de significación (ver la pág. 219).

## Digestión y digestibilidad en los distintos tramos del tracto digestivo

Según se explicó en el Capítulo 8, los nutrientes pueden absorberse en distintas partes del tracto digestivo. Incluso en los monogástricos, la absorción tiene lugar en dos partes bien diferenciadas, los intestinos delgado y grueso, y en los rumiantes, los ácidos grasos volátiles se absorben en el rumen. Los componentes de los alimentos que se digieren (y absorben) en un punto determinado, pueden dar lugar a nutrientes muy distintos a los que se producen si la digestión se realiza en otro, de modo que el valor nutritivo de dicho componente depende, no

**Tabla 10.2** Digestión de hierba seca picada o molida y granulada, en los sucesivos tramos del tracto digestivo de la oveja.(Según Beever, D.E., Coelho da Silva, J.P., Prescott, J.H.D. y Armstrong, D.G., 1972. *Br. J. Nutr.* **28**, 347).

| <i>Componentes<br/>del alimento:</i> | <i>Materia orgánica</i> |                  | <i>Celulosa</i> |                  |
|--------------------------------------|-------------------------|------------------|-----------------|------------------|
|                                      | <i>Picada</i>           | <i>Granulada</i> | <i>Picada</i>   | <i>Granulada</i> |
| <i>Tratamientos de la hierba:</i>    |                         |                  |                 |                  |
| Proporción digerida en:              |                         |                  |                 |                  |
| Estómago                             | 0,52                    | 0,45             | 0,80            | 0,56             |
| Intestino delgado                    | 0,27                    | 0,20             | 0,02            | -0,02            |
| Intestino grueso                     | 0,04                    | 0,13             | 0,05            | 0,23             |
| Total                                | 0,83                    | 0,78             | 0,87            | 0,77             |

sólo del grado en que es digerido (es decir, de su digestibilidad), sino también del lugar de la digestión. Por ejemplo, un carbohidrato como el almidón, puede fermentar en el rumen dando lugar a la producción de ácidos grasos volátiles (y metano), o ser digerido en el intestino delgado dando lugar a la formación de glucosa.

La digestibilidad de los alimentos en los sucesivos tramos del tracto digestivo, puede determinarse exteriorizando el tracto en puntos previamente seleccionados. Ya se han descrito las características de las fístulas esofágicas. Así mismo, pueden establecerse fístulas entre el saco dorsal del rumen y el flanco del animal. Dichas fístulas, suelen acomodar cánulas permanentes de goma o plástico, cerradas con tapón a rosca, que permiten la toma de muestras del contenido del rumen. En el abomaso, o en puntos seleccionados de los intestinos delgado o grueso, pueden establecerse cánulas semejantes, de menor tamaño. Además, en el intestino pueden disponerse cánulas reentrantes. Con esta finalidad, se secciona el intestino, disponiéndose los extremos cerca de la superficie de la piel, uniéndose mediante un tubo situado en la parte externa del animal. Una vez colocado el tubo, los productos de la digestión fluyen con toda normalidad desde la porción proximal hasta la porción distal del intestino. Si el tubo dispone de una abertura, es posible recoger los productos de la digestión en la porción proximal, medirlos, tomar muestras y reintegrarlos a la porción distal. Por tanto, las cánulas reentrantes permiten medir directamente el flujo de los productos de la digestión y, como consecuencia, calcular la digestibilidad del mismo modo que si se recogieran las heces. Con las cánulas sencillas, que permiten la toma de muestras de los productos de la digestión, pero no pesarlos, es posible estimar la digestibilidad mediante el empleo de indicadores, según se estudió en la página 208.

En la Tabla 10.2 se expone un ejemplo del empleo de animales con cánulas para determinar la digestión en las porciones sucesivas del tracto digestivo, en el ganado ovino.

Las cánulas se colocaron en el duodeno y el íleon terminal, de modo que fue posible estudiar la digestión parcial en el estómago, intestino delgado e intestino grueso. La digestibilidad global de la materia orgánica de la hierba granulada (0,78), fue considerablemente más baja que la de la hierba picada (0,83), siendo transferida, parcialmente, la digestión microbiana de la primera, del rumen al intestino grueso. Las diferencias fueron más notables para la digestión de la celulosa, a la que contribuyó muy poco el intestino delgado.

En el Capítulo 8, se hizo referencia a la degradación de la proteína de la ración en el rumen. El nitrógeno de la proteína del alimento que llega al rumen puede abandonarlo en la

**Tabla 10.3** Digestión y absorción de la proteína por las ovejas que recibieron 800 g de materia orgánica por día, de dos ballicos diferentes.(Según MacRae, J.C. y Ulyatt, M.J., 1974 *J. Agric. Sci., Camb.*, **82**, 309)

|                                              |                                  | <i>Ballico<br/>perenne</i> | <i>Ballico<br/>de ciclo corto</i> |
|----------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| N total<br>(g/día)                           | (1) En el alimento               | 37,8                       | 34,9                              |
|                                              | (2) Llega al duodeno             | 27,8                       | 31,7                              |
|                                              | (3) Llega al íleon terminal      | 9,0                        | 9,3                               |
|                                              | (4) En heces                     | 5,8                        | 6,7                               |
| Proporción de N<br>del alimento<br>digerido  | (5) En preestómagos<br>y abomaso | 0,26                       | 0,09                              |
|                                              | (6) En intestino delgado         | 0,50                       | 0,64                              |
|                                              | (7) En intestino grueso          | 0,08                       | 0,07                              |
|                                              | (8) Total                        | 0,84                       | 0,80                              |
| N proteico<br>absorbido (g/día) <sup>a</sup> | (9) En intestino delgado         | 15,0                       | 19,1                              |
| N aminoacídico<br>absorbido (g/día)          | (10) En intestino delgado        | 14,6                       | 18,3                              |

<sup>a</sup> Proteína = nitrógeno no amoniacal  $\times$  6,25.

misma forma si la proteína escapa a la degradación, o bien, si la proteína se degrada, el nitrógeno puede abandonar el rumen como proteína microbiana, si es reutilizado, o como amoníaco, si no lo es. Es posible conocer el destino de la proteína de la ración (o el nitrógeno) en los rumiantes, recogiendo el contenido de los sucesivos tramos del tracto digestivo. En la Tabla 10.3, se compara la digestión del nitrógeno de dos tipos de ballico. Aunque el contenido total de nitrógeno en ambos ballicos fue semejante (línea 1), se «perdió» mucha más cantidad de nitrógeno en el estómago, posiblemente por la mayor absorción de amoníaco, con la primera muestra (líneas 1-2). Por el contrario, con este ballico se absorbió más cantidad de nitrógeno en el intestino delgado, tanto si se expresa como nitrógeno total (líneas 2-3), proteína (línea 9) o aminoácidos (línea 10). La diferencia entre la absorción de nitrógeno total y de nitrógeno proteico, se debe a la absorción del amoníaco que llega al intestino, en tanto que la existente entre el nitrógeno proteico y el aminoacídico se debería, fundamentalmente, al nitrógeno de los ácidos nucleicos de la proteína microbiana. Además, se produjo otra pérdida de nitrógeno en el intestino grueso, probablemente en forma de amoníaco. El resultado neto fue que, aunque el contenido en nitrógeno del ballico de ciclo corto era ligeramente inferior y de una digestibilidad global ligeramente más baja, proporcionó a los animales aproximadamente 25 por ciento más cantidad de aminoácidos, que el ballico perenne. Respecto a éste, del nitrógeno total aparentemente absorbido (32 g/día), menos de la mitad (14,6 g/día), lo fue en forma de aminoácidos.

Otra técnica para estudiar la digestión de fracciones definidas de los alimentos en distintos tramos del tracto digestivo, supone el empleo de pequeñas bolsas semejantes a las empleadas en los estudios de digestión en el rumen (pág. 211). Para esta denominada «técnica de las bolsas de nylon móviles», se introducen en el aparato digestivo (por ej., en el estómago), mediante cánulas, bolsas con pequeñas muestras de alimentos (0,5-1,0 g), que después se recuperan mediante una segunda cánula (por ej., a nivel de la válvula íleo-cecal). Se considera

que la desaparición de nutrientes entre ambos puntos, representa a la cantidad digerida y absorbida. Dicha técnica se utiliza mucho en los cerdos; en esta especie, la digestibilidad al final del intestino delgado (denominada, a veces, «digestibilidad ileal»), se considera más exacta como medida del valor nutritivo de los alimentos, que la digestibilidad obtenida en todo el tracto digestivo. Por ejemplo, supongamos que en un alimento de alto valor nutritivo toda la lisina se liberase de la proteína y se absorbiese por el cerdo antes de que los productos de la digestión llegasen al final del íleon (es decir, la digestibilidad ileal de la lisina = 100 por ciento). Sin embargo, los microorganismos del ciego y colon podrían sintetizar más lisina, que se excretaría en la proteína microbiana en las heces, lo que reduciría la digestibilidad aparente de la lisina en tracto digestivo completo a una cantidad inferior al 100 por ciento.

## Factores que afectan a la digestibilidad

### Composición de los alimentos

La digestibilidad de los alimentos guarda estrecha relación con la composición química, de forma que un alimento como la cebada, cuya composición varía poco de unas partidas a otras, presenta ligeras variaciones en la digestibilidad. Otros alimentos, especialmente la hierba fresca o conservada, presentan una composición menos constante y, por consiguiente, su digestibilidad es más variable. La fracción fibra de los alimentos es lo que más afecta a su digestibilidad, siendo importantes tanto la cantidad como la composición química de la fibra.

Los métodos modernos de análisis de alimentos, persiguen diferenciar las fracciones correspondientes a la pared celular y al contenido celular. Al hervir los forrajes en una solución neutro detergente, el contenido celular se disuelve y las paredes celulares quedan como un residuo que recibe el nombre de fibra neutro detergente (ver pág. 5). La fracción correspondiente a las paredes celulares puede diferenciarse en hemicelulosa (que puede extraerse con una solución ácido detergente) y celulosa más lignina (es decir, fibra ácido detergente). El contenido celular se digiere casi totalmente (es decir, su digestibilidad real = 100 por ciento), aunque la digestibilidad aparente resulta 10-15 por ciento más baja, debido a la excreción de productos metabólicos en el intestino (ver pág. 211). La digestibilidad de las paredes celulares es mucho más variable ya que depende del grado de lignificación que, en términos químicos se expresa como el contenido en lignina de la fibra ácido detergente. No obstante, la digestibilidad de las paredes celulares depende también de la estructura de los tejidos vegetales. Por ejemplo, las gramíneas tropicales suelen ser menos digestibles que las gramíneas de las zonas templadas, ya que sus hojas contienen más cantidad de haces vasculares y, por tanto, más lignina, y porque presentan densas masas de células que son resistentes a la invasión por microorganismos.

La digestibilidad de los alimentos puede rebajarse por las deficiencias o excesos de nutrientes u otros componentes. Dichos efectos son más frecuentes en los rumiantes en los que, por ejemplo, las deficiencias de azufre o nitrógeno amoniacal en el líquido ruminal limitan el crecimiento microbiano y, como consecuencia, se reduce la digestibilidad de la fibra. Así mismo, el exceso de lípidos en la ración inhibe a los microorganismos del rumen. El alto contenido en sílice en algunos alimentos, particularmente la paja de arroz, reduce su digestibilidad. En los alimentos de los animales no rumiantes, los componentes que se unen a las proteínas y aminoácidos, como los taninos, reducen su digestibilidad.

## Composición de la ración

La digestibilidad de los alimentos está afectada, no sólo por su propia composición, sino también por la de los alimentos consumidos al mismo tiempo. De acuerdo con este hecho, podría observarse que, si se administraran a partes iguales en una ración mixta un alimento grosero (cuya digestibilidad de la MS fuese 0,6), y un concentrado (digestibilidad 0,8), la digestibilidad de la ración global sería distinta al valor esperado de 0,7. Este efecto *asociativo* de los alimentos supone un serio obstáculo para la determinación de la digestibilidad por diferencia de los alimentos concentrados, según se expuso en la página 207. Los efectos asociativos suelen ser negativos (es decir, la digestibilidad de las raciones mixtas es menor de lo esperado) y más notables cuando los alimentos groseros de baja calidad se suplementan con concentrados amiláceos. En estos casos, la rápida fermentación del almidón hasta ácidos grasos volátiles rebaja el pH del rumen hasta 6 o menos. El bajo pH inhibe a los microorganismos celulolíticos y disminuye la digestibilidad de la fibra. El descenso puede prevenirse parcialmente mediante la adición a la ración de agentes tampón como el bicarbonato sódico, pero además de su «efecto pH» parece que el almidón ejerce un efecto directo sobre la celulolisis.

## Preparación de los alimentos

Los tratamientos más corrientes a que se someten los alimentos son el picado, troceado, aplastamiento, molienda y cocción. Para lograr la máxima digestibilidad, los granos de cereales deben aplastarse para el ganado vacuno y molerse para los cerdos ya que, de lo contrario, pueden atravesar intactos el tracto digestivo. Se considera que el ganado ovino mastica bien los granos de cereales consumidos enteros, lo que evita el procesado mecánico; no obstante, si los granos de cereales se administran con algún alimento grosero que atravesase rápidamente el tracto digestivo, como el ensilado de hierba, también deben ser aplastados para el ganado ovino.

Los alimentos groseros se someten a diversos tratamientos para reducir su tamaño: el más leve, *el picado*, afecta poco a la digestibilidad, aunque puede reducirse indirectamente al impedir a los animales la selección de las partes más digestibles. La *compresión* de los alimentos groseros, proceso que supone la formación de bloques de sección redonda o cuadrada, tampoco tiene mucho efecto sobre la digestibilidad. El tratamiento más intenso, la *molienda fina* (a la que suele seguir la granulación), tiene un marcado efecto sobre el modo en que se digieren los alimentos groseros y, por tanto, sobre la digestibilidad. Los alimentos groseros molidos pasan por el rumen con más rapidez que los productos largos o troceados, de modo que los componentes fibrosos resultan menos fermentados (ver la Tabla 10.2). Por consiguiente, la molienda de los alimentos groseros puede reducir la digestibilidad de la fibra bruta hasta 20 unidades de porcentaje, y la de la materia seca como un todo, en 5-15 unidades. La reducción suele ser máxima para los alimentos groseros de digestibilidad intrínsecamente baja, pudiendo agudizarse por el efecto del nivel de alimentación sobre la digestibilidad, ya que la molienda mejora la apetecibilidad de los alimentos groseros por los rumiantes (ver el Capítulo 17).

Los alimentos groseros del tipo de las pajas de cereales, en los que la celulosa se encuentra mezclada o ligada a gran cantidad de lignina, pueden tratarse por medios químicos para separar los componentes. Los tratamientos y sus efectos se estudian con detalle en el Capítulo 20. Los productos químicos empleados son, principalmente, álcalis (hidróxidos sódico o amónico), mejorando la digestibilidad de las pajas de cereales considerablemente, de 0,4 a 0,5-0,7.

En ocasiones, los alimentos se someten a *tratamientos térmicos* para mejorar su digestibilidad. Un método tradicional de tratamiento térmico es la cocción de las patatas destinadas a los cerdos, si bien, el calor puede aplicarse también a otros alimentos en forma de vapor o mediante irradiación con microondas (proceso conocido como micronización). Aplicados a los cereales, dichos tratamientos mejoran poco la digestibilidad, aunque el sorgo parece responder mejor que otros granos. Los tratamientos térmicos para mejorar la digestibilidad, son más eficaces al aplicarlos con la finalidad específica de inactivar los inhibidores de enzimas existentes en algunos alimentos. Los ejemplos más conocidos de dichos inhibidores se encuentran en los concentrados proteicos (ver el Capítulo 23). Las patatas y algunas raíces como los nabos suecos (*Brassica napus*) poseen inhibidores de la tripsina que se inactivan por el calor; la ventaja de dicho tratamiento no radica tanto en la mejora de la digestibilidad, sino en el hecho de que la digestión de la proteína se realice por digestión enzimática normal en el intestino delgado, y no tenga lugar por fermentación en el ciego.

### Suplementación de los alimentos con enzimas

Puesto que los animales no rumiantes están mal equipados para degradar muchos componentes de los alimentos, pueden añadirse a los mismos preparaciones enzimáticas (generalmente de origen fúngico), con la finalidad de mejorar su digestibilidad. La enzima que ha proporcionado efectos positivos con más constancia ha sido la  $\beta$ -glucanasa añadida a las raciones que incluyen cebada, para las gallinas. Si los  $\beta$ -glucanos escapan a la digestión, aparecen en las excretas en forma de geles que determinan «heces pegajosas»; además, la degradación de los glucanos parece mejorar la digestibilidad del pienso. Así mismo, se han utilizado preparaciones enzimáticas para otros componentes polisacáridos de los cereales. Otra preparación enzimática es una fitasa que mejora la digestibilidad del ácido fítico (ver pág. 95) y, por tanto, reduce las necesidades de suplementación con fósforo de las raciones para los animales no rumiantes.

### Factores dependientes de los animales

La digestibilidad es una propiedad que guarda más relación con los alimentos que con los animales que los consumen. Sin embargo, esto no quiere decir que el mismo alimento administrado a distintos animales sea siempre digerido al mismo nivel. El factor animal más importante es la especie a que pertenece. Los alimentos de bajo contenido en fibra son bien digeridos por los animales rumiantes y no rumiantes, pero los alimentos fibrosos son mejor digeridos por los rumiantes. Los coeficientes de digestibilidad aparente de la proteína suelen ser mayores para los cerdos debido a que la excreción de nitrógeno metabólico fecal es menor que en los rumiantes. Las diferencias en la capacidad digestiva del ganado vacuno y ovino son pequeñas y carecen de importancia práctica para la mayoría de las raciones; no obstante, los alimentos muy digestibles (como los granos de cereales), tienden a ser digeridos con más eficiencia por el ganado ovino, en tanto que los alimentos poco digestibles (como los alimentos groseros de mala calidad), tienden a ser mejor digeridos por el ganado vacuno.

### Nivel de alimentación

En general, al aumentar la cantidad consumida de un determinado alimento, se produce un ritmo de paso más rápido por el tracto digestivo. Como consecuencia, los alimentos quedan

expuestos a la acción de las enzimas digestivas durante menos tiempo, lo que puede determinar una reducción en la digestibilidad. Como es natural, las reducciones en la digestibilidad debidas al aumento en el ritmo de paso, son mayores para los componentes de los alimentos de digestión más lenta, es decir, los componentes de la pared celular.

El nivel o plano de alimentación suele expresarse en múltiplos de la cantidad de alimentos necesarios para el mantenimiento del organismo animal (es decir, la cantidad necesaria para que el animal no pierda ni gane peso). Este nivel se considera la unidad; en los rumiantes alimentados a libre disposición, dicho nivel puede aumentar hasta 2,0-2,5 veces el nivel de mantenimiento en los animales en crecimiento o cebo, y hasta 3,0-5,0 veces el nivel de mantenimiento en los animales en lactación. Al aumentar el nivel de alimentación en una unidad (por ej., del nivel de mantenimiento a dos veces dicho nivel), se reduce muy poco la digestibilidad de los alimentos groseros como el heno, el ensilado y la hierba de pastos (0,01-0,02). Respecto a las raciones de los rumiantes que contienen partículas de alimentos más finas (por ej., las mezclas de alimentos groseros y concentrados), la reducción de la digestibilidad por unidad de aumento en el nivel de alimentación, es mayor (0,02-0,03); esto quiere decir, por ejemplo, que la digestibilidad de la materia seca de una ración normal para vacas lecheras, puede descender desde el 0,75 al nivel de alimentación de mantenimiento hasta el 0,70 al nivel de tres veces el mantenimiento. Los descensos de esta magnitud pueden deberse a exagerados efectos asociativos de los alimentos, existiendo algunas pruebas de que pueden evitarse aumentando el contenido en proteína de la ración. Las mayores reducciones en la digestibilidad, al aumentar el nivel de ingestión, se producen con los alimentos groseros molidos y granulados, así como con algunos subproductos fibrosos (0,05 unidades por unidad de aumento en el nivel de alimentación).

Respecto a los animales no rumiantes, los niveles de alimentación suponen 2,0-3,0 veces el nivel de mantenimiento en las gallinas, 3,0-4,0 veces el nivel de mantenimiento en los cerdos en crecimiento, y 4,0-6,0 el nivel de mantenimiento en las cerdas lactantes, sin que se produzcan efectos apreciables del plano de alimentación sobre la digestibilidad de las raciones de tipo convencional (es decir, de bajo contenido en fibra).

## Otras medidas de la digestibilidad de los alimentos

Según se ha indicado, la digestibilidad puede expresarse de distintas formas. Por ejemplo, hay que diferenciar la digestibilidad de la materia seca de un alimento de la digestibilidad de la materia orgánica (o de los distintos componentes de la materia orgánica); entre la digestibilidad aparente y la digestibilidad real, y entre la digestibilidad en todo el tracto digestivo y en alguna parte del tracto digestivo (por ej., digestibilidad en el íleon). Además, la digestibilidad puede determinarse directamente en los animales (digestibilidad *in vivo*), o indirectamente, tanto en el laboratorio (*in vitro*) como mediante el empleo de bolsas de poliéster (*in sacco*). Además de estas determinaciones, existen ciertas expresiones obtenidas de los datos de digestibilidad que pretenden aportar una medida del valor energético del alimento. Una de ellas es la del Total de Nutrientes Digestibles (TDN) del alimento, que se calcula sumando los contenidos, en 100 kg del alimento, de proteína bruta digestible, carbohidratos digestibles (fibra bruta y extractivos libres de nitrógeno) y extracto etéreo digestible multiplicado por 2,25. El extracto etéreo se multiplica por 2,25 porque el valor energético de las grasas es, aproximadamente, dos con veinticinco veces el de los carbohidratos. Si a partir de los datos de la Tabla 10.1 se calculan las cantidades de proteína y carbohidratos digestibles restando a la materia orgánica digestible

el extracto etéreo digestible (es decir,  $515 - 8 = 507$ ), el contenido en TDN se calcula como  $507 + 2,25 \times 8 = 525$  g/kg, o 52,5 kg/100 kg. En su momento, el valor del TDN fue muy utilizado en los Estados Unidos de América, pero en la actualidad ha quedado prácticamente olvidado.

Otra medida del contenido energético de los alimentos es el contenido en materia orgánica digestible en la materia seca (DOMD). Para el heno de la Tabla 10.1, supone 515 g/kg, ó 51,5 por ciento. La cifra expresada como porcentaje suele denominarse valor «D» del alimento. Los equivalentes energéticos del TDN y la DOMD se explicarán en capítulos posteriores.

## Utilización de los elementos minerales

Se producen pérdidas fecales endógenas de la mayoría de los minerales, especialmente calcio, fósforo, magnesio y hierro. Dichas pérdidas pueden proceder de secreciones que lleguen al tracto digestivo, cuyos minerales no se reabsorben, y pueden ser relativamente grandes; por ejemplo, en los rumiantes, la cantidad de fósforo segregada al tracto digestivo por la saliva suele ser mayor que la cantidad existente en los alimentos. Además, las heces pueden contener minerales que han sido absorbidos en cantidades excesivas y que, por tanto, han de ser excretados (es decir, el intestino es una ruta tanto de excreción real como de excreción endógena). Por estas razones, los coeficientes de digestibilidad aparente de dichos elementos minerales, tienen poca significación. Para determinar la utilización de los minerales, es necesario diferenciar en las heces la fracción que representa a la parte no absorbida, de la que corresponde a la procedente de los tejidos que se elimina por el intestino. La diferenciación puede realizarse marcando algún elemento mineral del organismo mediante isótopos radiactivos y determinando la cantidad que aparece en el intestino.

En los productos de la digestión, los elementos minerales se encuentran de tres maneras: como iones metálicos en solución, como componentes de complejos órgano-metálicos en solución, o como componentes de sustancias insolubles. Los que se encuentran en la primera forma, se absorben con facilidad, en tanto que los que se encuentran en la tercera no se absorben. Los complejos órgano-metálicos, algunos de los cuales son quelatos (ver pág. 91), pueden absorberse en ciertos casos. Algunos minerales pueden pasar de una forma a otra de manera que, en términos generales, la utilización de un mineral depende de la forma en que se encuentra en el alimento y del grado en que las condiciones del intestino favorezcan la conversión de una forma en otra. De este modo, el sodio y el potasio, que se encuentran en los productos de la digestión casi totalmente en forma ionizada, tienen una utilización cercana a 1,0. Por el contrario, el cobre se encuentra, casi totalmente, formando complejos solubles o insolubles, y su utilización suele ser inferior a 1,0. Respecto al fósforo, se encuentra en numerosos alimentos formando parte del ácido fítico (ver pág. 95), y su utilización depende de la existencia de fitasas —de origen microbiano o vegetal— en el tracto digestivo. Un factor importante que controla la interconversión de las formas solubles e insolubles de los elementos minerales, es el pH de los productos de la digestión. Además, pueden existir agentes específicos que ligan los elementos minerales, impidiendo su absorción. Por ejemplo, el calcio puede precipitar por los oxalatos, y el cobre por los sulfuros.

Normalmente, la utilización de los minerales es alta en los animales jóvenes alimentados a base de leche o productos lácteos, pero desciende a medida que la ración se cambia a alimentos sólidos. Otra complicación consiste en que la absorción y, por tanto, la utilización aparente, de algunos elementos minerales viene determinada, en parte, por las necesidades de los

animales. El ejemplo más claro de dicho efecto lo proporciona la absorción del hierro, que se estudió en el Capítulo 8, aunque en los rumiantes, la absorción del calcio también parece estar determinada por las necesidades de los animales.

Aunque ni en este lugar ni en el Capítulo 8, se ha pretendido presentar una relación exhaustiva de los factores que afectan a la utilización de los minerales, los mencionados sirven para explicar la razón del porqué, en las tablas de composición de alimentos, no se incluyen cifras comparables a los coeficientes de digestibilidad que figuran para los nutrientes orgánicos. Puesto que la utilización de los minerales de cada alimento en particular, guarda mucha relación con los demás componentes de la ración y con el animal que lo recibe, las cifras medias correspondientes a los distintos alimentos, serían de escasa utilidad.

## Bibliografía

- Nutrition Society 1977 Methods for evaluating feeds for large farm animals. *Proceedings of the Nutrition Society*, **36**: 169-225.
- Schneider, B.H. and Flatt, W.P., 1975 *The Evaluation of Feeds through Digestibility Experiments*. Athens, G.A., University of Georgia Press.
- Van Soest, P.J., 1982 *Nutritional Ecology of the Ruminant*. Corvallis, Oregon, O and B Books.
- Wheeler, J.L. and Mochrie, R.D. (eds) 1981 *Forage Evaluation: Concepts and Techniques*. Melbourne, CSIRO and Lexington, Kentucky, American Forage and Grassland Council.