

NIRS: UNA TECNOLOGÍA DE APOYO PARA UN SERVICIO INTEGRAL EN ALIMENTACIÓN ANIMAL

A. Garrido¹, A. Gómez¹, J.E. Guerrero^{1 y 2} y V. Fernández¹

¹Dpto. Producción Animal. ETSIAM. Universidad de Córdoba

²Secretaría General Técnica, Conserjería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía.

1.- INTRODUCCIÓN

Las crecientes demandas de la sociedad con respecto a los productos de origen animal, la tipificación de los mismos, las exigencias medio-ambientales y el bienestar animal, etc, todas ellas plasmadas en numerosas reglamentaciones, unido al incremento de conocimientos en la propia ciencia de la producción animal, la disponibilidad de nuevos alimentos y tecnología, las posibilidades de control y automatización de los procesos productivos etc, hace cada vez más necesario, el trabajar intensamente en nuevos planteamientos, que permitan cumplir con las mencionadas demandas.

Sin duda, la práctica de la alimentación animal en una concepción simplista, basada en el conocimiento de las necesidades del animal y el valor nutritivo para una determinada producción no es difícil, pero entendemos que el objetivo de alimentar animales, debe ser considerado desde un punto de vista mucho más amplio y complejo, que lo ha sido en el pasado, y que hoy más que nunca exige de mecanismos dinámicos, que permitan la incorporación y adaptación de conocimientos científicos en la práctica ganadera.

Es cierto que en los últimos años, los avances informáticos en computación han hecho posible el desarrollo de programas informáticos, basados en algoritmos matemáticos complejos para el cálculo de raciones, pero no menos cierto es, que el desarrollo y actualización en el cálculo de raciones no ha ido acompañado de una actualización similar en la calidad de los datos (alimentos y necesidades), que sustentan dichos programas y que asimismo sean escasos los programas desarrollados que permitan una verdadera validación y retro-alimentación, en base a la cantidad y calidad de los recursos disponibles, del propio animal y su medio y de la cantidad y calidad del producto final obtenido.

En nuestra opinión, un punto crítico de la aplicación práctica de conocimientos científicos generados en el terreno de la nutrición, lo constituye sin duda alguna, el control analítico de alimentos y productos debido no tanto al desarrollo de métodos analíticos sofisticados, sino a lo limitado del desarrollo de la automatización de dichos métodos, que permita el disponer de los datos generados, de forma rápida y precisa. Otra dificultad

importante sería, la de la falta de parámetros analíticos de referencia que modelen la respuesta animal con suficiente precisión.

Durante la pasada década, emerge un nuevo concepto de análisis basado en la absorción en la región del Infrarrojo Cercano (NIRS). En el momento actual, miles de publicaciones científicas, cuatro libros específicos y los libros de proceedings de ocho Conferencias Internacionales NIRS, confirman el potencial de la técnica NIRS para la caracterización de alimentos y productos de una forma instantánea y en sus aspectos cuantitativos y cualitativos y asimismo, de numerosos elementos cada vez más imprescindibles para realizar un control integral en la explotación (agua, suelo, aire, líquidos fisiológicos, tejidos vegetales y animales, medicamentos, etc).

Por todo lo anterior, la presente ponencia trata de argumentar el papel que la técnica NIRS puede jugar en la implantación de un Servicio Integral en Alimentación Animal, entendido éste como un Servicio que exige un control analítico ágil y económico y que debería ser de aplicación en un rango amplio de materiales y constituyentes. Entendemos que este Servicio podría ser suministrado desde Centros de la Administración Pública y/o desde las industrias y cooperativas del sector (fábricas de piensos, asociaciones de ganaderos, etc).

2.- ARGUMENTOS QUE JUSTIFICAN LA NECESIDAD DE CONTROL DE CALIDAD DE ALIMENTOS ANIMALES

Independientemente de que los argumentos podrían ser muy variados y claramente dependientes de la demanda del usuario (fábricas de piensos, productores de granos y forrajes conservados, autoridades responsables de la inspección y control de productos ganaderos, ganaderos etc), a continuación se indican algunos elementos que en nuestra opinión, justifican prioritariamente el control analítico de cualquier alimento (producido dentro ó fuera de la explotación) y cuyo destino final sea la alimentación del ganado.

- Cumplimiento de normativas vigentes, nacionales e internacionales, relativas a la circulación y comercialización de alimentos animales.
- Una vía reconocida de cuantificar reclamaciones a proveedores.
- Proporcionar a los usuarios con información útil y precisa sobre los constituyentes que puedan tener un efecto directo sobre el valor nutritivo del alimento.
- Controlar los procesos de producción.
- Proporcionar a los programas informáticos de racionamiento, una información precisa y actualizada, que permita la incorporación dinámica de conocimientos científicos desarrollados en el terreno de la nutrición animal.

3.- PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA ACTUALIZADO DE CONTROL DE CALIDAD

Un sistema de control analítico que pudiera dar respuesta a los argumentos expuestos anteriormente y que permitiera su aplicación en la práctica, debería reunir los siguientes atributos:

- Velocidad de respuesta, de forma que garantice agilidad en la incorporación de la misma a la toma de decisiones.
- Bajo coste por muestra.
- Alta repetibilidad y reproducibilidad.
- Capaz de producir información analítica sobre constituyentes de declaración obligatoria (ej: humedad, proteína, grasa, etc) y no obligatoria, pero de interés nutricional (ej. factores antinutritivos, aminoácidos, valor energético, ingestibilidad, etc).

La información científica y técnica disponible indica, que la tecnología NIRS reúne todas las características mencionadas, lo que trataremos de apoyar a continuación, con algunos ejemplos.

3.1.- Velocidad de respuesta

Tradicionalmente, los análisis químicos utilizados para el control de calidad de alimentos animales, se basan en el esquema Weende. Hoy día, un analista puede analizar como máximo de 15 a 20 muestras, para obtener un dato de un constituyente como grasa en una jornada de 8 horas de trabajo. Si a este tiempo se suma, un mínimo de cuatro horas para obtener un dato de materia seca, podemos decir que se necesitan 12 horas para obtener un único dato de contenido en grasa expresado en materia seca, para un total de 15 a 20 muestras. Como indican Shenk y Westerhaus (1995), en ese mismo período de tiempo, el mismo analista trabajando en un instrumento NIRS previamente calibrado, puede analizar 360 muestras para varios constituyentes. Adicionalmente, durante su jornada de trabajo, el analista no ha estado en contacto con reactivos químicos, ni bajo las condiciones estresantes en los que nos movemos, cuando se realizan determinaciones gravimétricas .

Pero la rapidez de la técnica NIRS solo puede ser explotada de una forma óptima, si la respuesta dada por el instrumento se usa de inmediato para-la toma de decisiones. Así, por ejemplo, como indica Lizaso (1993), los datos NIRS generados durante la primera hora ó en las 24 horas desde la llegada de materias primas a fábricas de piensos, son de un valor incalculable para la toma de decisiones. La tecnología NIRS permite ser incorporada a nivel de línea de producción (on-line) lo que posibilita su utilización en diferentes puntos a nivel de la industria de piensos. Jensen (1993) detalla dos sistemas on-line, desarrollados y

patentados en Dinamarca. La figura 1, muestra algunas posibilidades de implementación del NIRS en diferentes puntos del proceso de producción de piensos compuestos.

Finalmente señalar, que el avance en las tecnologías de comunicación y en el procesamiento de la señal NIRS, permite que la respuesta de un instrumento pueda ser transmitida en segundos e incorporada en bases de datos informatizadas, para usos diversos y particularmente para el diseño de planes de racionamiento.

3.2.- Bajo coste

Además del largo tiempo requerido para el análisis de parámetros químicos por vía húmeda, una limitante que explica en la práctica el bajo volumen de materias primas controladas en la industria y el casi nulo realizado a nivel de explotaciones individuales, lo constituye sin duda alguna el alto coste por muestra. Aunque con grandes diferencias podemos decir, que en nuestro país, el precio de un análisis Weende completo oscila entre 5.000 y 15.000 ptas por muestra (sin duplicados). Es evidente que este coste impide un control de calidad sistemático. Un instrumento NIRS completo (monocromador, ordenador, software y accesorios) puede costar como media 10 a 12 millones de pesetas. Teniendo en cuenta las estimaciones realizadas en el apartado anterior, un día de trabajo de una persona (360 muestras) podría ahorrar entre 3.600.000 y 5.400.000 ptas, lo que representa del 30 al 54% de la inversión en el equipo. Este ejemplo nos ayuda a apoyar lo indicado por Williams y Sobering: "Cuando se realizan comparaciones del NIRS con la vía química, el coste del análisis NIRS es bajo, ya que no requiere reactivos químicos, material de vidrio y otros fungibles, balanzas, campanas de humos, etc. Cuando se tiene este hecho en cuenta, el NIRS debe ser visto más que como un coste como una inversión".

Por otra parte, junto a este bajo coste cabe considerar un beneficio adicional de la tecnología NIRS y es el de su contribución a la conservación del medio ambiente al no producir residuos. Conviene señalar, que la eliminación e inactivación de residuos provenientes de la industria, representa hoy día un coste importante en muchas empresas. Durante el curso internacional "Applications of NIRS technology for the evaluation of agricultural products" (CIHEAM-UCO), desarrollado en la ETSIAM de Córdoba en 1994, Ian Murray (SAC, Aberdeen) presentaba algunas estimaciones de los residuos producidos en algunos análisis. Así, un laboratorio que realizara 5060 análisis Kjeldahl al año durante 5 años, produciría 2,76 Tm de SO_4H_2 , 0,75 Tm de SO_4K_2 , 2,19 Tm de NaOH, 75 Kwh y 900 Tm de H_2O de refrigeración. Las autoridades competentes deberían considerar la reducción en contaminación ambiental que podría obtenerse mediante el uso del NIRS en análisis de rutina.

3.3.- Alta repetibilidad y reproducibilidad

En el terreno de la evaluación de alimentos es bien conocida la existencia de importantes variaciones intra e inter laboratorios, no solo para parámetros como fibra o digestibilidad, sino asimismo para parámetros más comunes como materia seca, cenizas y proteína (Argamentería et al., 1993). Un trabajo inicial realizado en EEUU (Templeton et al., 1983) y posteriormente los resultados de un ring-test europeo (Van der Meer and Eckes, 1987)

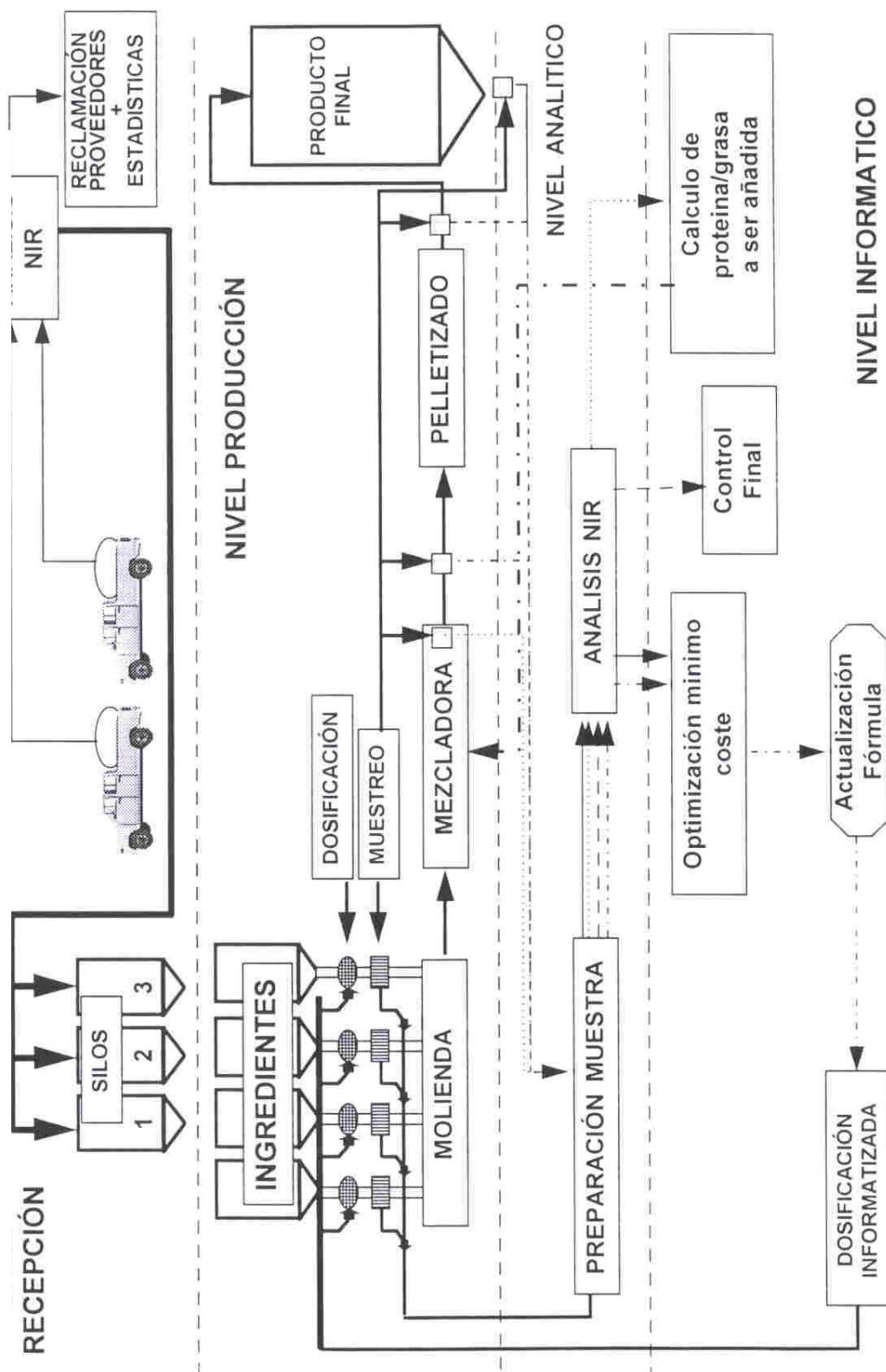
mostraban, que los valores de repetibilidad y reproducibilidad de los análisis NIRS eran superiores, que los obtenidos tradicionalmente en análisis químicos y/o biológicos.

A pesar de ello durante la década de los 70 y 80, no resultaba fácil mostrar sistemáticamente este hecho, debido a las diferencias existentes entre instrumentos, incluso de aquellos producidos por un mismo fabricante (Dardenne et al., 1992). Posteriormente las mejoras en instrumentación y el desarrollo de procedimientos matemáticos denominados de estandarización o clonación, ha hecho posible que la respuesta óptica de dos instrumentos sea muy similar y que las diferencias existentes, puedan ser eliminadas mediante correcciones matemáticas, siendo posible pues, el obtener valores analíticos prácticamente indistinguibles, para una misma muestra analizada en dos instrumentos diferentes (Biston y Dardenne, 1990; Shenk, 1992, Puigdomenech et al., 1995, Moya et al., 1995). La clonación de instrumentos ha representado un gran avance y como indican Puigdomenech et al., (1995) supone una vía para evitar duplicación de esfuerzos analíticos en diferentes centros y abre enormes expectativas para la deseada armonización en la evaluación de alimentos para el ganado, a nivel nacional e internacional.

Existen numerosos ejemplos de redes de instrumentos NIRS constituidas por equipos clonados. Algunas de ellas han sido descritas entre otros por Biston y Dardenne (1990), Shenk y Westerhaus (1995) y Büchman (1996). En 1995, tres centros españoles (IEPA-Villaviciosa-Asturias, LAGC-Cabrils-Barcelona y el Dpto. de Producción Animal de la ETSIAM-Córdoba), continuando con su tradición de colaboración e intercambio de experiencias en el terreno de la tecnología NIRS, establecieron una red NIRS constituida por los instrumentos en uso en dichos centros, lo que les permite compartir espectros y/o ecuaciones (Puigdomenech et al., 1995).

Desde hace varios años, el Dpto. de Producción Animal de la ETSIAM viene trabajando en la implantación y evaluación de redes NIRS. En 1993 realizaron el diseño y supervisión científico-técnica de la primera red NIRS española, basada en equipos monocromadores, a nivel de la industria de piensos (Moya et al., 1993).

Figura 1.- Puntos de aplicación del NIRS en la industria de piensos (adaptado de Jensen, 1993)



La existencia y proliferación de redes NIRS de diferente naturaleza, es un claro resultado de numerosas evidencias que muestran como las variaciones, intra e inter instrumentos, son de pequeña magnitud e inferiores a las obtenidas con los métodos analíticos de referencia.

3.4.- La tecnología NIRS para la predicción simultánea de parámetros de interés en Alimentación y Producción Animal

Desde la década de los 70, tiempo en el cual la tecnología NIRS comienza a vislumbrarse como una técnica viable y, posteriormente en la década de los 80 y 90, gracias a las mejoras en instrumentación y software y particularmente a la expansión en el uso de equipos monocromadores, un número elevado de publicaciones muestran la precisión del NIRS para la predicción de parámetros como los reflejados en los cuadros 1 y 2. En los apartados 2.4.1 a 2.4.3 trataremos de sintetizar la situación actual en el análisis de parámetros químicos clásicos (ej: Weende), parámetros nutricionales (ej: digestibilidad y energía) y asimismo otras aplicaciones cualitativas y cuantitativas de interés en Alimentación y Producción Animal

Cuadro 1.- Parámetros de evaluación nutritiva tradicionalmente analizados NIRS.

Químicos	Biológicos
Materia seca	Digestibilidad <i>in vitro</i> , T&T
Proteína bruta	Digestibilidad enzimática
Fibra (FB, FND, FAD, LAD)	Digestibilidad <i>in vivo</i>
Extracto etéreo	Nutrientes Digestibles Totales
Cenizas	Ingestión de materia seca
Minerales	Energía (EB, EI), EM, EN)

Cuadro 2.- Otras aplicaciones del NIRS en Producción Animal.

Degradabilidad <i>in sacco</i> . Cinética de degradación en el rumen. Composición de residuos de digesta <i>in sacco</i> . Proteína dañada por calor en forrajes. Mejora de la digestibilidad tras tratamiento con amonio en paja de cereales antes del tratamiento. pH, láctico, acético, amonio, azúcar en ensilados. Azúcares solubles en forraje verde. Glucosinolatos, fenoles, ácido erúcido, inhibidor tripsina, fitatos β -glucanos en granos y forrajes. Contaminación fúngica en forrajes y granos. Aminoácidos en granos y harinas. Detección de estro. Recuento de células somáticas.	Ac, Pr, Bu y N amoniacal en líquido ruminal. Oxido crómico en dietas de animales. Composición química y físico-química en leche y derivados lácteos. Composición química y físico-química de pescado. Linoleico en huevos. Autenticación de jamón ibérico de bellota y pienso. Proporción de ingredientes simples en mezclas. Olanquidox en mezclas. Composición botánica de pastos.
--	--

3.4.1.- La predicción NIRS de parámetros químicos tradicionales

En aras de simplificar la transmisión del mensaje acerca del potencial predictivo de la técnica NIRS, para el análisis de parámetros químicos clásicos y en la creencia de que esta información ha sido suficientemente evaluada científica y técnicamente, hemos elegido el mostrar algunos datos sobre piensos compuestos, por tratarse de un producto, que en numerosas ocasiones ha sido reputado como "difícil" o inadecuado (Giger-Reverdin, 1995), para una correcta y precisa aplicación de la tecnología NIRS.

Trabajos preliminares realizados en la Universidad de Pensilvania sobre piensos compuestos (Abrams, 1989), indicaban la baja precisión de las ecuaciones NIRS obtenidas. Entre las razones argumentadas, se encuentran la de que los piensos compuestos son complejos en sus propiedades químicas y físicas, ya que contienen muchos ingredientes y en muy diferentes proporciones y esto afecta a la textura, tamaño de partícula y distribución de partículas, aspectos de gran importancia en las propiedades de reflectancia de la mezcla final.

Las mejoras en instrumentación y en preparación de muestras (ej.:molienda) y sobre todo en el pre-tratamiento de datos espectrales y en métodos de calibración, lo que permite minimizar algunos de los efectos debidos a las propiedades físicas de la muestra, han hecho posible que en el momento actual, como indica Büchman (1995) la precisión de las ecuaciones NIRS de piensos compuestos sean excelentes comparadas a las tolerancias normales en la industria de piensos.

Los cuadros 3 y 4 muestran datos estadísticos, que nos informan de la precisión que es posible obtener en la predicción NIRS de piensos compuestos. Hemos recogido valores extremos (mínimos y máximos) para cada uno de estos datos. Estos valores mínimos y máximos son datos medios reflejados en la literatura científica, por otra parte escasos, y/o datos no publicados por razones de propiedad de la información, por tratarse de ecuaciones desarrolladas a nivel de la industria. Los datos son útiles para realizar algunos comentarios generales, que nos ayudarán a juzgar de una forma objetiva la precisión de la técnica NIRS, en el análisis de productos agro-industriales.

1º) En ambos tipos de piensos (vacuno y porcino) y para cada parámetro analítico, se observa que es posible obtener coeficientes de determinación superiores a 0,9. Esto indica que las ecuaciones NIRS, permiten explicar más del 90% de las variaciones en constituyentes analíticos de los piensos compuestos. El coeficiente de determinación es un estadístico cuyo máximo puede estimarse a priori, ya que según indican Howard y Workman (1991) viene determinado por la relación:

$$R^2_{\max} = 1 - (\text{ETL}/\text{DT})^2$$

Siendo ETL= error de laboratorio del método de referencia y DT= desviación típica de la población de calibración, para el constituyente considerado.

Así, por ejemplo, si pretendiéramos establecer una ecuación de PB para piensos y contáramos con una población de valor medio 18%, rango 15%-21% y DT = 1.5% y en el supuesto de que la diferencia media entre duplicados de PB en el laboratorio de referencia fuera de 0,8 unidades, lo que aproximadamente nos indica un ETL estimado de 0,56, el R² máximo sería de 0,86. Sin embargo, el mismo laboratorio de referencia podría obtener un R²=0,94, para una calibración general de piensos de un mayor rango 12-28% y DT=2,5%. Esto nos indica, que las diferencias que aparecen en el valor de R² en los cuadros 3 y 4 para un determinado constituyente, son explicables en gran medida, por las diferencias entre laboratorios en el ETL del método de referencia y por el rango y DT del colectivo de calibración.

Cuadro 3.- Valores medios (mínimo y máximo) de estadísticos de calibraciones NIRS en piensos compuestos para vacuno.

Método de referencia	Media, %	R ²	ETP, %	CV, %
Humedad	11,0	0,80-0,94	0,22-0,49	2,0-4,5
Proteína	19,0	0,84-0,99	0,50-1,10	2,6-5,8
Grasa	4,0	0,87-0,94	0,26-0,47	6,5-11,8
Fibra bruta	11,0	0,86-0,97	0,64-0,97	5,8-8,8
Cenizas	9,4	0,49-0,92	0,40-1,30	4,2-13,8

Cuadro 4.- Valores medios (mínimos y máximos) de estadísticos de calibraciones NIRS en piensos compuestos para porcino.

Método de referencia	Media, %	R ²	ETP, %	CV, %
Humedad	11,0	0,75-0,95	0,17-0,48	1,5-4,4
Proteína	18,0	0,83-0,93	0,49-0,62	2,8-3,4
Grasa	6,0	0,95-0,98	0,22-0,44	3,6-7,3
Fibra bruta	5,8	0,82-0,96	0,30-0,70	5,2-12,1
Cenizas	6,4	0,46-0,92	0,40-0,80	6,2-12,5

2º) El error de calibración ó mejor aún el error de predicción (ETP) generalmente se define como la desviación típica de las diferencias entre los valores predichos por NIRS y el método de referencia para N muestras que no han intervenido en la calibración y es otro estadístico que, en parte, puede ser explicado por la magnitud del error de laboratorio:

$$ETP = (\sum(NIR-LAB)^2/N)^{1/2}$$

Para una correcta interpretación y evaluación objetiva de ecuaciones de calibración NIRS resulta muy apropiado el tener en cuenta el conocido concepto estadístico de partición de la varianza del error. Así, como indican Osborne et al. (1993), la varianza definida por el ETP vendría dada por la expresión:

$$ETP^2 = ETL^2 + ET_{NIR}^2 + ET_{modelo}^2$$

Siendo ETL = error típico del método de referencia; ET_{NIR} = error del método NIRS (ej: errores instrumentales, de presentación de muestra, etc) y ET_{modelo} = error del modelo quimiométrico utilizado para el ajuste.

En las condiciones actuales, con algunas excepciones que comentaremos posteriormente, para un mismo producto y constituyente y utilizando equipos y software de características y prestaciones similares, las diferencias reflejadas en la literatura, en los valores de los ETPs de alimentos animales, son debidas fundamentalmente, a diferencias en ETL de los datos de referencia. Dentro de un mismo laboratorio NIRS, las diferencias obtenidas para un mismo producto y diferentes constituyentes (ej. humedad y fibra), pueden explicarse, por la magnitud de las diferencias de los ETLs de dichos constituyentes y asimismo, por la correlación existente en la medida espectral y el parámetro de referencia. De hecho no conviene olvidar, que la técnica NIRS y el método de referencia miden características diferentes. Así, por ejemplo, mientras el análisis Kjeldahl mide N orgánico total, el método NIRS mide la absorción debida a enlaces ó bandas proteicas. Por otra parte, la PB es el resultado de multiplicar el N total por un factor de conversión que es correspondiente al contenido medio en N de una composición media en Aas, por tal razón es denominada proteína bruta (Osborne et al., 1993). Comentarios similares podrían realizarse para otros componentes del esquema Weende y particularmente para la fibra bruta, un concepto operativo arbitrariamente definido. Las consecuencias de juzgar la precisión NIRS por su correlación con métodos tanto ó más arbitrarios que el propio NIRS, se expondrá posteriormente.

3º) Un último comentario general y válido para los datos mostrados en los cuadros 3 y 4 sería, el de que, como indican Shenk et al. (1992), los estadísticos generalmente obtenidos en la predicción NIRS de parámetros químicos de rutina en el análisis de productos agrícolas, difieren de los obtenidos a nivel de trabajos de investigación. En general, las ecuaciones denominadas de rutina, se diseñan de forma que cubran todas las fuentes de variación que existen en un determinado producto (forrajes, granos, mezclas de ingredientes y piensos), obteniéndose así ecuaciones globales. Nuestra experiencia en este terreno (Moya et al., 1995), nos lleva a coincidir con lo indicado por Shenk et al. (1992) referente a la existencia de tres categorías de ecuaciones, atendiendo a la magnitud de los estadísticos de calibración y particularmente a la del error típico de calibración y/o predicción.

- Una primera categoría la constituyen aquellos productos y constituyentes que muestran una alta correlación entre la información espectral y los valores de referencia. En esta categoría se incluyen humedad y proteína bruta en la mayor parte de granos, grasa en concentrados proteicos (ej: harina de soja) y grasa en varios subproductos de origen animal.

- Una segunda categoría, incluiría aquellos productos que muestran errores de predicción algo superiores. Lo constituyen la proteína bruta y humedad en forrajes y piensos y fibra y minerales en productos forrajeros. Así, mientras en el caso de cereales

como trigo, cebada y maíz, es relativamente fácil obtener errores bajos, del orden del 0.2% al 0.3%, para la predicción de proteína bruta, estos valores en el caso de forrajes y piensos alcanzan valores del 0.5% al 0.8% e incluso superiores.

- Una tercera categoría, estaría formada por aquellos productos y constituyentes en los que, como hemos indicado anteriormente, la correlación entre la medida espectral y el método de referencia es baja y por tanto los errores de calibración son mayores. Tal es el caso, por ejemplo, de la predicción de PB en harinas de pescado, donde los errores de calibración alcanzan valores del 1.5%, muy superiores a los encontrados en otros productos. En este caso, el dilema está en decidir, si el contenido en proteína real presente en la harina de pescado, se aproxima más al valor proporcionado por el NIRS o por el método oficial Kjeldahl.

Llegados a este punto conviene hacer una reflexión general relativa a la interpretación y uso de estadísticos NIRS.

La precisión de una ecuación NIRS, puede ser juzgada por el valor del coeficiente de determinación y el del error típico de predicción. Ambos estadísticos vienen determinados en gran medida, por los errores del método de referencia. Una estrategia global de incrementar sensiblemente la precisión de las ecuaciones NIRS, sería por tanto, mediante la mejora en la calidad de los datos analíticos de referencia. Otra complementaria sería la de utilizar métodos de referencia que mejor correlacionen con la medida espectroscópica (ej: Karl Fisher para humedad, precipitación, fraccionamiento proteico y electroforesis para proteína, etc). Una estrategia más acertada sería, la de definitivamente aceptar, que los métodos de referencia utilizados en la evaluación de alimentos animales, si bien han sido de gran utilidad en el pasado para caracterizar alimentos, son en esencia conceptos operativos, es decir métodos empíricos que tratan de estimar el contenido en principios inmediatos, y que hoy en día la tecnología NIRS, permite la predicción directa de la respuesta animal, como mostramos en el apartado siguiente.

Como nutricionistas e investigadores NIRS, queremos resaltar el dilema con el que se enfrentó y aún sigue enfrentándose la tecnología NIRS, y es el de que la industria relacionada con productos agrícolas, entre los que incluimos los alimentos animales, ha aceptado oficialmente y se encuentra familiarizada con métodos operativos y empíricos como el análisis Weende, por ello la respuesta de dicha industria y de la comunidad científica que actúa como asesora en temas legislativos y reglamentarios relativos a la circulación de alimentos animales, a una nueva tecnología como es el NIRS, ha sido y aún continúa siéndolo, el exigir que los datos analíticos NIRS dupliquen los resultados de los métodos de referencia (Shenk et al., 1992). Han sido necesarios más de 20 años de trabajo, para mostrar en repetidas publicaciones que esto es posible, sin embargo, existe un cierto sentimiento de tiempo perdido, y de freno a una verdadera innovación tecnológica, en las posibilidades de aplicación práctica de conocimientos nutricionales, sobre todo si se considera, que desde los inicios del desarrollo de la tecnología NIRS, es sabido, que por definición, la medida espectral podía correlacionar mejor con la respuesta animal que con entidades químicas no bien definidas.

3.4.2.- Predicción de la respuesta animal: NIRS frente a métodos de laboratorio

En el apartado anterior, ya ha sido puesto de manifiesto la potencialidad de la técnica NIRS para la predicción de parámetros químicos clásicos, trataremos de mostrar aquí, de forma específica, la capacidad del NIRS para la predicción directa de la respuesta animal y particularmente de la digestibilidad y valor energético de diferentes alimentos. Para ello hemos seleccionado un ejemplo concreto para cada uno de los siguientes grupos de alimentos: forrajes, ingredientes simples y piensos.

Forrajes

En este caso hemos seleccionado como ejemplo, un trabajo colaborativo (Dardenne et al., 1993), realizado a nivel de diferentes centros franceses (INRA, ITCF, Limagrain) y uno belga (SHB). Dicho trabajo contaba entre sus objetivos, con el de evaluar la precisión de la técnica NIRS, para la predicción de la digestibilidad *in vivo* de la materia orgánica de maíz forrajero, frente a la obtenida utilizando como estimadores diferentes parámetros químicos, enzimáticos y climáticos. En dicho trabajo, se han utilizado 199 datos de digestibilidad *in vivo* (ovejas), obtenidos en Francia durante 1987 y 1988. El cuadro 5 muestra algunas de las ecuaciones obtenidas y las variaciones en la precisión de las mismas, lo que nos permite realizar los siguientes comentarios:

- El mejor modelo de predicción obtenido (ecuación 1.5) y que utiliza como predictores directos, solubilidad enzimática, proteína, nº de días a la floración, materia seca y lignina ácido detergente, sólo explica el 68,9% de la variabilidad ($R=0,83$) en los datos *in vivo*.
- Cuando se reemplaza en todas las ecuaciones el parámetro (químico o enzimático) correspondiente, por su valor predicho por NIRS (ecuaciones denotadas con subíndice NIRS), la precisión de las ecuaciones obtenidas es similar a las anteriores.
- La precisión de la ecuación NIRS desarrollada para la predicción directa de la DMO ($R = 0,81$, DTR 1,5) sólo es mejorada ligeramente por ecuaciones que incluyen datos climáticos (ej: nº de días a la floración, ecuación 1.5).

Cuadro 5.- Comparación del NIRS con métodos químicos y enzimáticos para la predicción de la digestibilidad *in vivo* de maíz forrajero (Dardenne et al., 1993).

Ecuación	Predictores	R	DTR
1,2	SEL PB	0,74	1,91
1,2 _{NIR}	SEL PB	0,71	2,00
5,3	SEL PB FB	0,77	1,83
5,3 _{NIR}	SEL PB FB	0,73	1,92
6,3	SEAU PB FB	0,74	1,89
6,3 _{NIR}	SEAU PB FB	0,74	1,88
1,5	SEL PB DF MS ADL	0,83	1,58
1,5 _{NIR}	PB DF MS ADL	0,80	1,70
3,5	SEL PB FB CE ADL	0,80	1,69
3,5 _{NIR}	SEL PB FB CE ADL	0,76	1,81
NIR	log(1/R)	0,81	1,65

SEL y SEAU = Solubilidad enzimática (Limagrain y Aufrère); DF= Días a floración.

Dardenne et al. (1993) concluyen, que la predicción directa de la DMO es posible, si bien la base de datos utilizada, no contiene aún todas las fuentes de variación existentes en el maíz forrajero, resaltando la necesidad de estandarizar las condiciones de los ensayos *in vivo* y enzimáticos entre laboratorios en Europa, a fin de poder aunar los datos en bases de datos comunes y de amplio uso.

Ingredientes simples

Un trabajo exhaustivo realizado por de Boever et al. (1993) en el National Institute for Animal Nutrition (Melle-Gontrode, Bélgica), ha permitido obtener ecuaciones NIRS para la predicción de energía metabolizable (estimada mediante celulasa-gamanasa), en un total de 18 grupos de ingredientes simples, lo que en total incluía a unas 800 muestras recogidas de diferentes fabricantes de piensos compuestos belgas, durante tres años consecutivos. Los resultados obtenidos indican que los errores de predicción NIRS oscilan entre 0,08 y 0,35 MJ/kg. En el cuadro 6 aparece un resumen de los resultados obtenidos por de Boever et al. (1993), junto con otros obtenidos en el ADAS Drayton Research Centre en Strafford upon Avon por Deaville et al. (1994) y Moss y Givens (1994) y que utilizan como predictores de la EM, digestibilidad, NDF-celulasas y extracto etéreo previa extracción con CIH. Como se observa en dicho cuadro, los ETPs obtenidos por NIRS, son muy inferiores a los obtenidos utilizando métodos químicos y enzimáticos. Otro aspecto interesante del trabajo de de Boever et al., (1993), es el hecho de que en 45 materias primas estudiadas, el valor de referencia de EM se desviaba de -1,5 a +1,1 MJ/kg de los valores teóricos obtenidos de Tablas Holandesas y en cambio esta desviación era muy inferior -0,4 a +0,8 MJ/kg con respecto a los valores predichos por NIRS.

Cuadro 6.- Comparación del NIRS con métodos de laboratorio para predicción del valor energético^(1,2) (EM, MJ/kg) de diferentes ingredientes simples.

Materia Prima	Predictores	DTR	Referencia
Subp. ricos en energía ¹	NDF-celulasas/EEA	1,19	Deaville et al. (1994)
Subp. ricos en energía ²	NIR (log I/R)	0,13-0,35	de Boever et al. (1993)
Concentrados proteicos ¹	NDF-celulasas/EEA	1,51	Moss & Givens (1994)
Concentrados proteicos ²	NIR (log I/R)	0,08-0,35	de Boever et al. (1993)

¹EM *in vivo*; ²EM enzimática

Piensos compuestos

Los esfuerzos colaborativos realizados en los últimos años, particularmente en Francia y en el Reino Unido, para la obtención de ecuaciones de predicción del valor energético de piensos compuestos para rumiantes, han sido importantes y los objetivos generales y metodología utilizada en dichos trabajos son muy similares.

Un ejemplo de estos trabajos lo constituye, el realizado en el INRA por Giger Reverdin et al. (1994). Dicho estudio fué abordado utilizando 83 piensos compuestos representantes de los utilizados en la práctica y que habían sido valorados *in vivo*, en 4 centros de investigación europeos (INRA-Theix y París-Grignon, Ivvo-Lelystad-Holanda y

RRI-Aberdeen-Reino Unido). Utilizando los datos *in vivo* y diferentes parámetros químicos y enzimáticos se han obtenido entre otras, ecuaciones de predicción de EM. Los errores de predicción (DTR) oscilaban entre 0,452 y 0,574 MJ/kg dependiendo de los parámetros de referencia utilizados. El cuadro 7 recoge dichos parámetros, junto con la precisión de la estima de la mejor de dichas ecuaciones ($R^2 = 0,75$, DTR = 0,45).

En el terreno de la predicción NIRS de EM en piensos compuestos, caben destacar los trabajos realizados por Verheggen et al. (1991), de Boever et al. (1995) y Aufrère y Graviou (1995). Particularmente y a efectos de la comparación del potencial del NIRS frente a métodos químicos y/o enzimáticos, el trabajo de Aufrère y Graviou (1995), resulta especialmente útil, ya que ha sido realizado utilizando las mismas muestras de piensos que las utilizadas por Giger-Reverdin et al. (1994). El comentario más explícito sería, el de que la técnica NIRS predice directamente la EM *in vivo* de piensos compuestos con un error de la estima (0,23 MJ/kg) que es aproximadamente la mitad del que se obtiene con cinco parámetros analíticos, como son la energía bruta, NDF, y ADF y ADL secuencial. Es oportuno recordar aquí todas las características argumentadas sobre la técnica NIRS, en los apartados 2.1 a 2.3. De los resultados del cuadro 7, también es posible deducir otras conclusiones de interés:

- La precisión de las ecuaciones NIRS obtenidas utilizando datos de energía metabolizable predichos por métodos enzimáticos, por diferentes autores (Verheggen et al., 1991 y de Boever et al., 1995), tienen una precisión muy similar entre sí y similar a las obtenidas directamente utilizando datos de EM *in vivo*.

- El MAFF-Working Party (1993) recomienda la declaración energética de EM en piensos compuestos, predicha con los estimadores digestibilidad NDF-celulosa-gamanasa y grasa tras hidrólisis con CIH y admite una tolerancia de $\pm 7,5\%$. Los errores de predicción NIRS de la EM *in vivo* del cuadro 7 son bajos comparados con dicha tolerancia.

Cuadro 7.- Comparación del NIRS con varios métodos de laboratorio para la predicción de la Energía Metabolizable (MJ/kg MS) de piensos compuestos.

Método	Valor Energético	Estadísticas		
		R ²	DTR	N
EB+NDF+ADFs+ADLs	ME _{VIVO} ¹	0,75	0,45	83
NIR (M)	ME _{VIVO} ²	-	0,23	80
NIR (M)	ME (enzim) ³	0,86	0,29	126
NIR (M)	ME _{VIVO} ⁴	0,84	0,37	179
NIR (F)	ME _{VIVO} ⁴	0,66	0,55	179
NIR (M)	ME (enzim) ⁴	0,83	0,41	179
NIR (F)	ME (enzim) ⁴	0,60	0,69	179
NIR (M)	ME (enzim) ⁴	0,79	0,30	163
NIR (F)	ME (enzim) ⁴	0,40	0,53	163

1.- Giger et al; 1994; 2.- Aufrère et Graviou, 1995; 3.- Verheggen et al., 1991; 4.- de Boever et al 1995; F= filtros; M= monocromador.

La figura 2 nos ayuda a resumir el potencial de la técnica NIR para la predicción de la respuesta animal. Dicha figura muestra, que es posible utilizar el NIRS de una forma tradicional, es decir, como técnica predictiva de parámetros de referencia tradicionales y utilizar los resultados obtenidos para su incorporación en ecuaciones de predicción recomendadas por diferentes sistemas de valoración. Sin embargo, esta aproximación sólo estaría utilizando parte del potencial de la tecnología NIRS y explicaría asimismo sólo una parte de la respuesta animal. Podemos asimismo predecir directamente parámetros como la digestibilidad in vivo, energía metabolizable etc. Esta aproximación, si bien de mayor capacidad predictiva que la anterior y que nos acerca más a la respuesta animal, sin embargo, no ayuda a predecir y/o modelar todas las interacciones alimento-animal. Pensamos, que la aproximación que nos permitiría aprovechar el máximo potencial de la técnica NIRS, sería aquella que tratara de correlacionar la señal espectroscópica NIRS, directamente con la respuesta animal, por ejemplo, con la calidad de la canal o de la leche producida, etc. Pero esta aproximación, necesita contemplarse desde una óptica multidisciplinar y exige de planificación y trabajo colaborativo. Como hemos indicado anteriormente (Garrido et al., 1993), el NIRS debe ser entendido y utilizado como un verdadero almacén de información y de ahí que la huella espectral característica de cada alimento, deba ser correlacionada con bases de datos diferentes, provenientes de otros sensores. Así lo entendemos, y por ello, desde los inicios de nuestro trabajo NIRS, hemos trabajado paralelamente en diferentes estrategias de información en Alimentación Animal como las del desarrollo e implementación práctica, de un Banco de Datos Informatizados y de Muestras Biológicas Valoradas (Gómez et al., 1993). La información NIRS acumulada y sintetizada en este apartado, avalan y confirman nuestra estrategia de uso integral del NIRS.

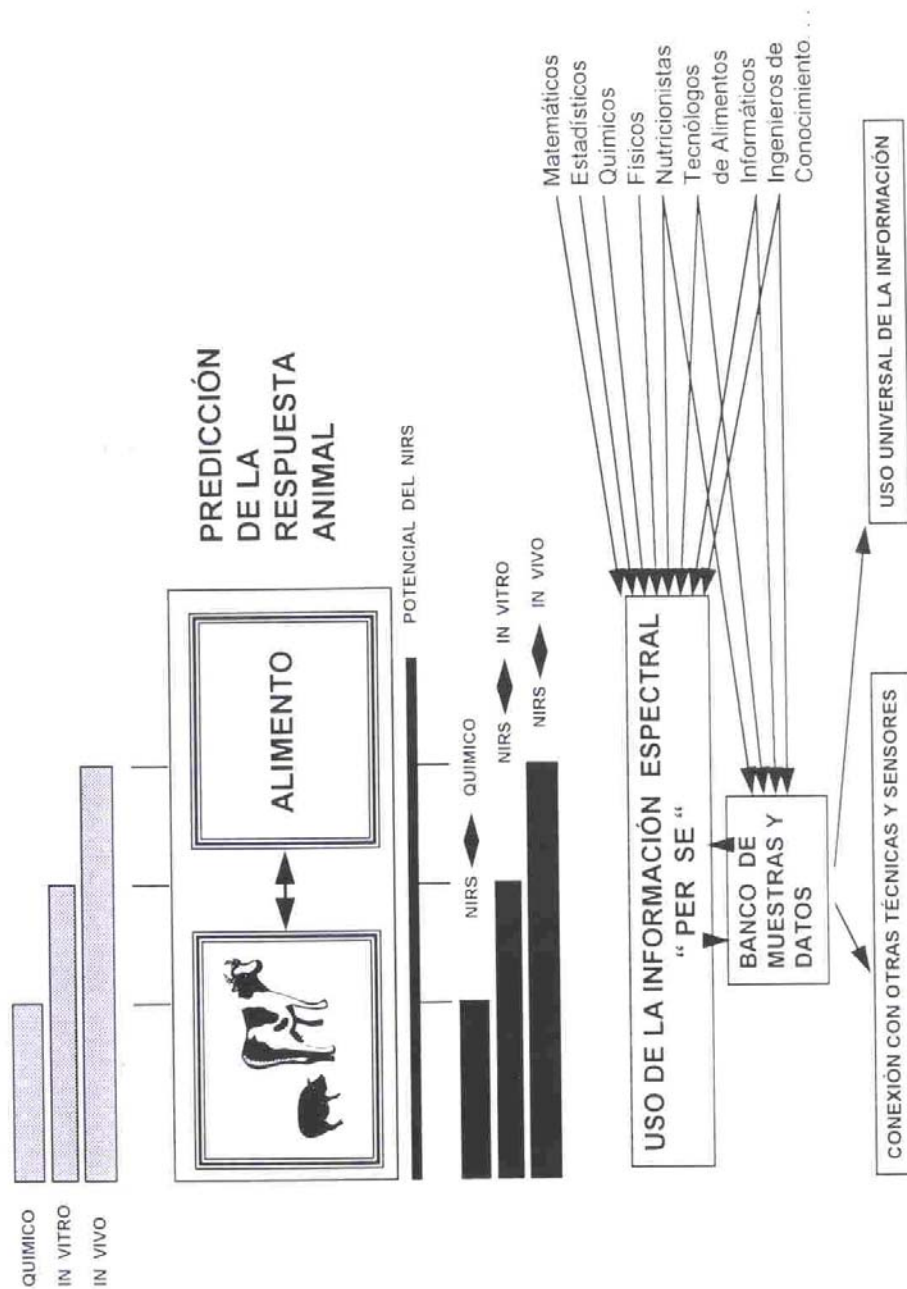
Particularmente, y en lo que respecta a la complementación NIRS-Banco de Muestras, consideramos que existe una doble estrategia. Por un lado, la conservación de grandes colecciones de muestras de un determinado alimento y cuyos espectros NIRS hayan sido obtenidos previamente, permite que únicamente en base a información espectroscópica NIRS, se pueda decidir el grupo de muestras que mejor representen al material objeto de estudio, de modo que podamos aplicar sobre ellas el esfuerzo y gasto analítico correspondiente, mejorando así la calidad de las estimas obtenidas, comparadas estas, a la que se obtendría, utilizando como colectivo de calibración, un número similar de muestras elegidas al azar o de forma arbitraria. De igual forma, el colectivo inicial podría ser modificado de forma dinámica, incorporándose nuevas muestras (ej. de diferente origen o campaña), y que serían seleccionadas también, en base a información espectral, hasta obtener lo que se denominan ecuaciones globales y universales, o bien calibraciones específicas, para determinadas condiciones.

Por otro lado, y dada la dificultad, tiempo y esfuerzo necesarios, para obtener la información química o biológica de referencia, el Banco de Muestras permitiría, centralizar y conservar muestras analizadas o valoradas, en técnicas más ó menos complejas (ej. AAs, vitaminas, factores antinutritivos, digestibilidad, etc) y por diferentes laboratorios ó Centros de Investigación. La acumulación con el tiempo, de suficiente número de muestras valoradas, permitiría asimismo, el desarrollo de ecuaciones robustas y

de uso compartido. Por otra parte, las eventuales discrepancias entre técnicas y/o laboratorios que el NIRS es capaz de poner en evidencia, permitiría su contrastación y eventualmente el ajuste de los resultados analíticos.

La necesidad de esta homologación de resultados parece evidente, y queda de manifiesto en la existencia de organismos de acreditación, y nos es de extrañar que en un futuro, la existencia de dicha acreditación sea requisito necesario para publicación de resultados obtenidos en laboratorios de investigación.

Figura 2.- Diferentes aproximaciones del NIRS para la predicción de la respuesta animal



3.4.3.- Predicción NIRS de otros parámetros de interés en Alimentación y Producción Animal

Si bien la mayor parte de los trabajos NIRS reflejados en la bibliografía, hacen referencia al análisis de los parámetros indicados en el cuadro 1, los trabajos de investigación NIRS comienzan a extenderse a otras interesantes aplicaciones (cuadro 2), en el terreno de la alimentación animal, mejora genética, clínica animal, control de calidad de productos, etc. (Garrido et al., 1993).

Ante la imposibilidad de revisar en extenso los resultados de estas nuevas aplicaciones, hemos preferido resumir algunas de ellas, que podríamos englobar en lo que se denomina tipificación y/o autentificación de productos y que nos ayudarán a profundizar en la estrategia de uso "per se" de la información espectral.

El espectro de productos agrícolas proporciona una huella característica que viene determinada por todos los grupos funcionales que absorben radiación NIRS, los cuáles a su vez están relacionados con las características químicas, físicas y sensoriales del producto. Pero el espectro a su vez, contiene también toda la información debido a la interacción de la radiación con la muestra, errores instrumentales, de toma de datos, computacionales, etc. (Shenk et al; 1992). En los inicios del desarrollo de la tecnología NIRS, algunos intentos de utilizar la técnica para análisis cualitativos y/o de autentificación (ej: identificación de variedades de trigo) se vieron limitados debido fundamentalmente a lo inadecuado de los tratamientos matemáticos utilizados para extraer la información espectroscópica relevante y asimismo, en otros casos, por la dificultad de utilizar muestras 100% auténticas y/o puras.

Los progresos en el conocimiento del espectro y sus propiedades (Murray, 1986) y asimismo la incorporación en los softwares que acompañan a los equipos, de diferentes algoritmos matemáticos para el análisis multivariante de datos espectrales, ha hecho posible la extracción eficiente de información espectral relevante y que el análisis cualitativo NIRS sea una realidad. Hoy es posible utilizar la información espectral "per se" sin necesidad de relacionar esta a un método de referencia (Downey et al., 1990; Downey, 1995; de Pedro et al., 1995). Así, mediante la construcción de librerías espectrales bien estructuradas y que contienen información sobre espectros representativos de productos agro-industriales, una vez procesadas matemáticamente utilizando técnicas de análisis multivariante lineal (ej: análisis discriminante) y no lineal (ej: redes neurales), posibilita que el NIRS sea un método de identificación automática con múltiples aplicaciones (ej: detección de productos que se desvían de un determinado standard de calidad, detección de adulteraciones, etc). Teniendo en cuenta esta característica de la técnica, a continuación se exponen algunos ejemplos de aplicación del análisis cualitativo NIRS, a un aspecto de gran importancia en el comercio e industria de alimentos animales, como es la declaración de ingredientes en mezclas y piensos y la detección de mezclas fraudulentas.

Un número de directivas y decisiones Comunitarias, hacen referencia a normativas relativas a la circulación de materias primas y piensos y algunas de ellas señalan la importancia de la descripción detallada de los productos usados en alimentación animal y fijan normas para la declaración de ingredientes en mezclas (77/101/EEC, 79/373/EEC, 90/44/EEC). En el momento actual sólo la microscopía permite la identificación de ingredientes en mezclas y piensos y a pesar de ello, aún con ciertas dificultades (sobrestimación de ingredientes fácilmente distinguibles, subestimación de ingredientes muy finos, necesidad de pretratamiento de productos pelletizados que podrían alterar la proporción original de ingredientes, necesidad de personas con alta experiencia en el examen microscópico, etc).

Desde el punto de vista de la importación de alimentos animales, el gluten feed (GF) representa un problema importante para la UE, por el volumen importado (6,5 millones de Tm) y porque al ser un subproducto mezcla de diferentes residuos de la industria del maíz (vía húmeda), y su posición aduanera libre de aranceles, han sido numerosos los conflictos UE-EEUU, particularmente debidos a la adición de maíz partido al GF. En el marco del GATT y ante los casos detectados de adulteración del GF con maíz grano partido, la UE y EEUU han acordado la obligación de acompañar todas las partidas exportables, de un certificado de "conformidad" expedido por el FGIS (Federal Grain Inspection Service) y la industria USA de procesamiento del maíz por vía húmeda. Entre otros, este certificado debe hacer constar que el GF no contiene más del 10% en peso de maíz amarillo. Hasta el presente, no existe acuerdo en el método analítico a determinar para caracterizar el GF y el análisis microscópico no es aceptado por USA.

Todo lo anterior nos lleva a justificar la necesidad de explorar la viabilidad de la tecnología NIRS, para resolver problemas de gran importancia, no sólo para la circulación y mercado de alimentos animales, sino asimismo para la cualificación nutricional de estos alimentos. Los cuadros 8 y 9 ponen de manifiesto que la tecnología NIRS permite su aplicación para la "autenticación" de alimentos animales.

Un estudio piloto realizado en ADAS-Strafford Uppon-Avon, UK (Deaville, 1995) en 1994 ha mostrado, que el NIRS permite predecir con gran precisión el porcentaje de trigo y soja en mezclas binarias (cuadro 8). De forma similar, un estudio piloto realizado en el Dpto. de Producción Animal de la ETSIAM en 1995 (datos no publicados) ha mostrado resultados muy esperanzadores para cuantificar el porcentaje de maíz partido en gluten feed (cuadro 9).

Cuadro 8.- Predicción NIRS del porcentaje de ingredientes en una mezcla trigo/soja (Deaville et al., 1994).

Identificación	Real		Predicho		R ²
	Trigo (%)	Soja (%)	Trigo (%)	Soja (%)	
65/35	65	35	64,35	34,58	0,99
25/75	25	75	25,45	74,80	0,96

Cuadro 9.- Predicción NIRS del porcentaje de adición de maíz grano a gluten feed.

Identificación	Real (%)	Predicho (%)¹
Maíz 5	5	4,56
Maíz 10	10	9,54
Maíz 15	15	15,15

¹Valor medio de dos submuestras de cada mezcla. R2= 1,0

No obstante conviene indicar, que el abordar de forma completa el desarrollo de una metodología NIRS para la identificación y cuantificación de ingredientes en mezclas, es un problema complejo que exige un diseño experimental cuidadoso para la creación de librerías espectrales NIRS, que contengan espectros de muestras "auténticas", lo que sin duda alguna requiere una colaboración de la industria y/o asimismo, de las autoridades responsables de las Inspecciones Oficiales (Laboratorios Arbitrales MAPA, Laboratorios Aduanas).

4.- NIRS: UNA TECNOLOGIA DE APOYO PARA UN SERVICIO INTEGRAL EN ALIMENTACION ANIMAL

En el contexto actual, la fragilidad de los sistemas agroganaderos y sobre todo, las garantías de competitividad de los mismos, demandan urgentemente la modernización y automatización de los sistemas de control de la alimentación a nivel de explotación, industria y servicios relacionados. La tecnología NIRS permite realizar avances en este sentido. Numerosas aplicaciones en alimentación y producción animal son ya una realidad, como se ha mostrado en apartados anteriores, si bien algunas aplicaciones potenciales se encuentran aún en fase de investigación.

Hoy más que nunca podemos decir, que la expansión de la tecnología NIRS en el sector ganadero, precisa de una parte, de la petición fehaciente por parte de los usuarios (ganaderos, fabricantes de piensos, etc) y de otra parte, de una aceptación oficial, lo que sin duda alguna requiere la incorporación de la técnica en el acervo de las comunidades científicas, que sustentan el progreso analítico, legislativo y reglamentario en Alimentación Animal.

A continuación resumimos algunos argumentos que justificarían la expansión e implementación del NIRS a nivel de la industria y servicios oficiales de inspección de productos agro-ganaderos.

A nivel de la industria, la introducción del NIRS para el control de calidad supondría:

- la posibilidad de aumentar el volumen de materias primas y productos controlados
- la selección de suministradores y el impacto psicológico sobre los mismos.
- una forma autorizada de cuantificar las reclamaciones a proveedores.
- una forma de clasificar materias primas para su procesamiento.
- la posibilidad de realizar toma de decisiones en tiempo real.

- una imagen de calidad para el cliente.
- un incremento en la velocidad de respuesta a las tendencias del mercado.
- un método abordable de cumplir con normativas y reglamentaciones relativas a etiquetado de productos.
- un método para el establecimiento de una política de marcas y tipificación de productos.
- unos efectos asociados de reducción de residuos analíticos y contaminación ambiental y de incremento de motivación en el analista, consecuencia de la mejora en la calidad y salubridad del trabajo analítico.
- un multisensor clave para integrar con otros de diferente naturaleza, lo que permitiría abordar estrategias de conocimiento y decisión impensables a nivel de la industria y explotaciones.

A nivel de los Servicios Oficiales de Inspección, la introducción del NIRS para el control de calidad supondría:

- la posibilidad de aumentar el volumen de materias primas y productos controlados.
- un sistema rápido y de rutina para analizar los productos importados y sometidos a aranceles aduaneros.
- un método automático e instantáneo para detectar y marcar materiales de dudosa calidad y para detectar adulteraciones y/o mezclas ilegales.
- un sistema disuasorio de prevención de fraudes.
- un método instantáneo para proporcionar una declaración provisional y/o un certificado de conformidad, que acelere litigios y evite demoras innecesarias en los circuitos de aprovisionamiento de materias primas.
- un método de armonización de resultados analíticos que evite disputas, por su menor variación inter-laboratorios.

Tratando de avanzar en lo que sería nuestra propuesta final, esto es el diseño de un Servicio Integral en Alimentación Animal que integrara la tecnología NIRS, conviene apuntar, que a nivel mundial, cada vez son más numerosas las iniciativas públicas y privadas que prestan servicio analítico NIRS a agricultores y ganaderos. Resumimos a continuación algunas de estas iniciativas, lo que nos permitirá abordar con mayor optimismo nuestra propuesta de futuro. Una mayor información puede obtenerse de la lectura de algunas publicaciones internacionales (Biston y Dardenne, 1990; Dardenne et al., 1992; Garrido et al., 1993; Givens, 1993; Hellamaki et al., 1992, Shenk y Westerhaus, 1995; Flinn y Downes, 1996) y nacionales (Gómez y de Pedro, 1993).

- Destacamos en primer lugar por razones de orden cronológico y su gran actualidad, la iniciativa de servicio de "unidades móviles NIRS", iniciada por Shenk y colaboradores en Pensilvania en 1978. Estos investigadores desarrollaron un equipo NIRS portátil montado sobre un remolque, que podía desplazarse a diferentes explotaciones ganaderas y mercados de henos. Posteriormente esta iniciativa se extendió a otros estados de EEUU y más recientemente empieza a introducirse en otros países (ej. Francia).

- La Station de Haute Belgique en Libramont, uno de los centros de I+D del Ministerio de Agricultura Belga, desde 1987 tiene implantado un servicio NIRS de análisis rápido para agricultores y ganaderos. En el momento actual tienen en uso ecuaciones para los productos tradicionalmente utilizados en alimentación animal y diferentes productos agrícolas.

- Los ganaderos daneses pueden hacer uso de servicios de análisis NIRS, a través de la Red de Agencias Locales gestionadas por el National Committee of Danish Cattle Husbandry (Aarhus) y el ARC (Foulum). Los centros locales recogen aproximadamente 18.000 muestras de forraje/año, que son enviadas a un laboratorio central situado en Brorup (Steins Laboratorium) donde son analizadas por NIRS y predichos valores de MS, PB, FB, cenizas, DMO, etc. Los valores predichos son transmitidos diariamente a la base de datos de Aarhus. Allí los datos son convertidos a las unidades energéticas vigentes oficialmente (Scandinavian Feed Units) y estos datos son usados por los asesores en nutrición para establecer los planes de racionamiento.

- Los laboratorios ADAS en Inglaterra y Gales, los de SAC en Escocia y los del Departamento de Agricultura de Irlanda del Norte (DANI), proporcionan un servicio de análisis de ensilados, utilizando una misma ecuación. El valor energético es estimado por NIRS calibrado directamente usando valores de DMO *in vivo* como referencia. Los laboratorios de ADS analizan unas 10.000 muestras de ensilado al año.

- Agri-King es uno de los principales laboratorios que da servicio a la industria animal en EEUU (Centro y Este). Este laboratorio comenzó a utilizar el NIRS, hace más de diez años. Reciben diariamente más de 250 muestras de todos los tipos de forrajes y alimentos. Las muestras son procesadas por la noche y son analizadas a la mañana siguiente. Los datos analíticos son incorporados en programas informáticos que contienen datos del cliente, boletín de análisis, datos del rebaño y asimismo suministra una ración en 24 horas. Es el primer laboratorio USA que suministra análisis rápido a bajo coste de 11 aminoácidos para productos de porcino y aves.

- Los productores de vacuno de leche en Finlandia tienen a su disposición una serie de laboratorios de análisis NIRS de ensilado, los cuales analizan unas 35.000 muestras anualmente. En principio estos laboratorios predecían por NIRS, el contenido en PB y FB del ensilado y a partir de estos valores estimaban la energía neta. Desde inicios de los 80, el valor energético es calculado a partir de la digestibilidad *in vivo* de la materia orgánica predicha por NIRS, tras mostrar, que en los ensilados de alta calidad (alta DMO), el valor energético era 15-19% más alto que el que se obtenga con la estimación clásica a través de PB y FB (cuadro 10).

- En Australia, el racionamiento óptimo de animales en pastoreo ha representado y representa un gran reto para los nutricionistas debido a la dificultad para estimar la cantidad de pasto consumido, a la gran variabilidad en la calidad del mismo y asimismo a la gran variabilidad de suplementos alimenticios utilizados y su calidad (forrajes conservados, granos, subproductos). Esto ha dado lugar al desarrollo de programas de

racionamiento informatizados como el denominado GRAZFEED desarrollado por el CSIRO. Este programa permite la toma de decisiones informadas sobre la cantidad y tipo de suplemento a utilizar, para lo cuál requiere, entre otros datos, el que el usuario suministre datos de digestibilidad y composición del pasto y suplementos. El NIR está siendo utilizado para suministrar esta información y existe una demanda creciente por estos servicios de análisis de alimentos. El denominado Agriculture Victoria FEEDTEST Service, ha desarrollado durante años ecuaciones de calibración NIRS para estimar parámetros como MS, PB y digestibilidad de henos, ensilados, pastos, granos de cereales y piensos.

Cuadro 10.- Unidades Forrajeras (UF/kg MS) calculadas usando PB y FB ó DMO como predictores y diferencia entre la estimación por ambos métodos (Hellamaki, 1991).

DMO % (rango)	61-65	66-70	71-75	76-80
Base de cálculo:				
Otoño 1990				
PB, FB	0,71	0,71	0,72	0,75
DMO _{NIR}	0,73	0,78	0,83	0,88
Diferencia (%)	3	10	15	17
Primavera 1991				
PB, FB	0,70	0,70	0,72	0,74
DMO _{NIR}	0,73	0,78	0,83	0,88
Diferencia (%)	4	11	15	19

La experiencia acumulada durante 20 años en el FEEDTEST Service, fué expuesta por P. Flinn durante la VIII International NIR Conference, celebrada en Montreal en 1995. Entre las conclusiones de estos años de trabajo resaltaba la de la dificultad de poseer suficientes muestras valoradas *in vivo* para obtener ecuaciones NIRS robustas y adecuadas para la gran variabilidad de alimentos animales utilizados en la práctica. Pese a ello, han acumulado un número elevado de muestras procedentes de una amplia variedad de ensayos y localizaciones geográficas y obtenidos en diferentes especies animales. Como se observa en el cuadro 11 la precisión de las ecuaciones disponibles en la actualidad es adecuada, si tenemos en cuenta la posibilidad que representa el poder obtener una medida *in vivo* de forma instantánea y económica, y de los alimentos utilizados a nivel de explotación, lo que representa un salto cualitativo respecto al sistema clásico de valoración de alimentos.

Cuadro 11.- Medida de la digestibilidad *in vivo* de la materia seca (%) por NIRS (FEEDTEST Service, Hamilton, Victoria, 1995).

	Heno/Ensilado/Pasto	Granos Cereales
N	72	80
Media (%)	62,8	80,2
Rango (%)	43,1-77,3	62,3-92,4
DT (%)	9,19	8,10
R ²	0,84	0,86
ETP (%)	3,61	3,10
CV (%)	5,70	3,80

- A nivel español además de una creciente implantación de la tecnología a nivel de la industria de piensos y cooperativas en todo el territorio nacional, por lo que respecta a Centros Públicos si bien con algunas diferencias en el tipo de servicio suministrado, cabe destacar los servicios NIRS del IEPA (Asturias), LAGR-Cabrils (Cataluña) y Servicio Centralizado NIRS-Banco de Muestras, Córdoba (Andalucía). Aunque no establecido formalmente como servicio al exterior, cabe destacar por su carácter pionero y por su contribución al desarrollo científico de la técnica NIRS y por sus interesantes aplicaciones en el análisis NIRS de pastos y forrajes, el equipo liderado por García Criado y García Ciudad en el CSIC (Salamanca). Algunas de las actividades de los grupos mencionados fueron expuestas durante las IV Jornadas de Alimentación (Gómez y de Pedro, 1993).

En el momento actual, los autores no poseen una información actualizada de otros servicios a nivel español, aunque en los últimos años ha habido una creciente implantación de la tecnología en laboratorios públicos y privados, particularmente en la cornisa Cantábrica, Aragón y Extremadura. Cabe decir pues, que existe un potencial real a nivel de diferentes comunidades autónomas, lo que facilitaría la organización a nivel regional y nacional de Servicios de Apoyo a Ganaderos basados en NIRS.

Finalmente, no resta sino exponer, lo que en nuestra opinión podría constituir lo que hemos denominado Servicio Integral en Alimentación Animal, apoyado en la tecnología NIRS. La imagen reflejada en la figura 3, nos ayudará a sintetizar la potencialidad y complejidad dicho Servicio.

Básicamente en un estadio desarrollado, el diseño podría ser cercano al siguiente:

1º) Necesidades del sistema:

Las explotaciones agro-ganaderas demandan información y apoyo a la toma de decisiones. Una demanda esencial la constituye, el conocimiento de las características nutricionales de los alimentos a fin de establecer planes de racionamiento adecuados. En la figura 3, hemos representado cinco grandes grupos de alimentos (forrajes-pastos, subproductos, alimentos simples, piensos compuestos y mezclas), producidos a nivel de la explotación ó adquiridos fuera de la misma, y generalmente elaborados ó gestionados por industrias de piensos, las cuáles deberían contar con servicios de asesoramiento en

alimentación, más ó menos desarrollados, dependiendo de su dimensión. Dichas industrias podrían contar a su vez, con un importante apoyo externo.

Otra demanda por otra parte creciente la constituye, la caracterización y/o tipificación del producto final obtenido.

2º) Elementos de control y de información del sistema

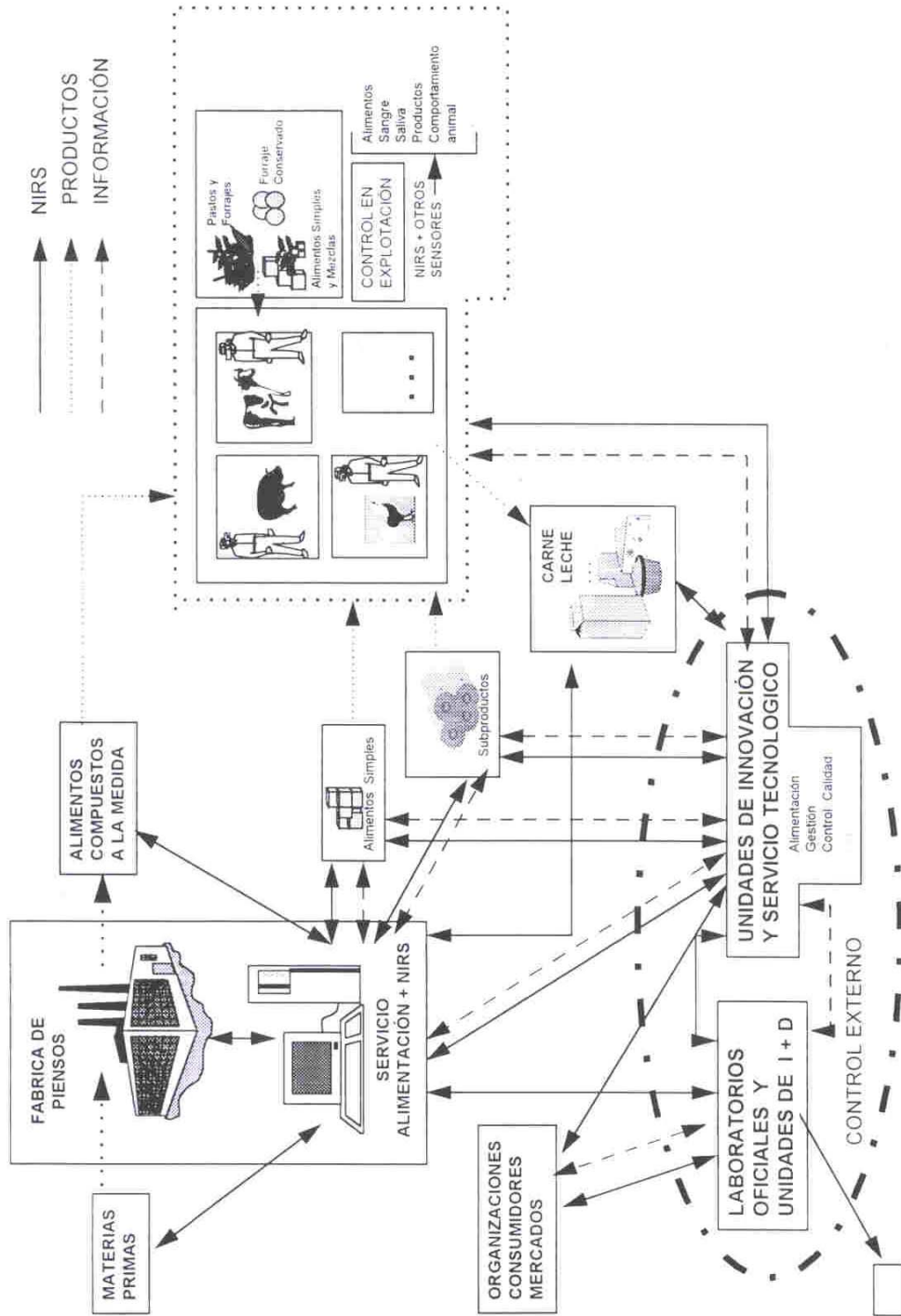
Se proponen dos elementos fundamentales de control y apoyo a la decisión:

a) Uno a nivel de la explotación, denominado en la figura 3, y en el cual el NIRS tendría un papel protagonista, como un multisensor que conectado a otros sensores fuentes de información, posibilitaría el control de las condiciones dinámicas (internas y externas) del animal y su entorno productivo (ej: control de parámetros fisiológicos del animal, estado sanitario, calidad del producto, parámetros ambientales, etc). Conviene recordar que las "unidades móviles" NIRS, son una realidad y que aunque aún en fase de investigación, el desarrollo de equipos miniaturizados NIRS es, asimismo, posible. Ambas soluciones, representan una simplificación importante del control de diferentes elementos en la explotación (alimentos, suelo, agua, cultivos, etc).

b) Un segundo elemento clave para el control lo constituiría, lo que denominamos Control Externo, que estaría basado en Unidades de Innovación y Servicio Tecnológico, en perfecta coordinación con los Laboratorios Oficiales y Unidades de I + D. Las Unidades de Innovación y Servicio Tecnológico deberían suministrar un apoyo integral (ej: planificación de la alimentación, gestión ganadera, control de calidad ,etc), y deberían incorporar de forma dinámica en su estrategia de conocimiento y apoyo a la decisión, la información proveniente de la propia explotación, suministrada por ganaderos y técnicos de campo. La perfecta coordinación de estas Unidades de Innovación con los Laboratorios Oficiales, garantizará un servicio ágil, armonizado y oficial y asimismo un elemento básico de contraste y garantía para las organizaciones de consumidores y para el control de productos y procesos. Las unidades de I + D, actuarían como verdaderas unidades de transferencia de tecnología, abordando nuevas y variadas aplicaciones del NIRS en el sector agro-ganadero.

Entendemos, que el esquema propuesto admite múltiples variantes en su implementación en la práctica, particularmente en lo referente a los organismos (públicos ó privados), que deberían sustentarlo, sin embargo, el servicio que debería prestar y sobre todo, el papel que la tecnología NIRS debería jugar, exige de una importante labor de coordinación entre Administración, Centros de Investigación y Universidades y Centros de Experimentación y Formación de agricultores y ganaderos, por lo que concebimos su organización y funcionamiento en el marco de la Administración Pública y más concretamente, bajo la tutela de los organismos responsables de la Investigación, Desarrollo y Formación en Agricultura y particularmente en Alimentación y Producción Animal.

Figura 3.- NIRS como elemento de control y apoyo a la decisión en Alimentación Animal



5.- REFERENCIAS

- ABRAMS, S.M. (1989) En: *Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS): Analysis of forage quality*. USDA-ARS. Agriculture Handbook n° 643., pp: 55-56.
- ARGAMENTERIA, A., MUÑOZ, F. y ANDUEZA, D. (1993) En: *Nuevas Fuentes de Alimentos para la Producción Animal IV*. Gómez, A. y de Pedro, E. (Eds). Junta de Andalucía. Congresos y Jornadas n°30. pp: 227-234.
- AUFRERE, J. y GAVIOU, D. (1995) *Ann. Zootech.* (44). Suppl. 43, pp. 43. n° 30. pp: 227-234.
- BISTON, R. y DARDENNE, P. (1990) En: *The Proceedings of the 2nd International NIRS Conference*. Iwamoto, M. and Kawano, S. (Eds). Koring Publishing; Ltd., Japan. pp: 11-20.
- BUCHMANN, N.B. (1995) En: *Leaping ahead with Near Infrared Spectroscopy*. Ed. Batten, GD et al. Royal Australian Chemical Institute, pp: 245-248.
- BUCHMANN, N.B. (1996) En: *The 8th International NIR Conference*. Montreal. Canadá. Agosto 1995 (en prensa).
- DARDENNE, P., BISTON, R., y SINNAEVE, G. (1992) En: *Near Infrared Spectroscopy: Bridging the gap between data analysis and NIRS applications*. Ed. Hildrum, K.I et al. Ellis Horwood, N.Y. pp: 1-10.
- DARDENNE, P., ANDRIEU, J., BARRIERE, Y., BISTON, R., DEMARQUILLY, C., FENEMIAS, N., LILA, M., MANPETIT, P., RIVIERE, F. y RONSIN, T. (1993) *Ann. Zootech* **42**: 251-270.
- DEAVILLE, E.R. (1995) The application of infrared reflectance spectroscopy NIRS technology to product recognition in the feeds industry (comunicación personal).
- DEAVILLE, E.R., MOSS, A.R. y GIVENS, D.I. (1994) *Anim. Feed. Sci. Technol.* **49**: 261-276.
- DE BOEVER, J.L., COTTYN, B.G., VANACKER, J.M. y BOUCQUE, Ch. V. (1993) En: *NIR Spectroscopy Developments in Agriculture and Food*. International Conference. ADAS. Drayton Birmingham. U.K.
- DE BOEVER, J.L., COTTYN, B.D., VANACKER, I.M y BOUCQUE, C.V. (1995) *Anim. Feed Sci. Technol.* **51**: 243-253.
- De PEDRO, E., GARRIDO, A., LOBO, A., DARDENNE, P. y MURRAY, I. (1995) En: *Leaping Ahead with Near Infrared Spectroscopy*. Ed. Batten, GD et al. Royal Australian Chemical Institute, pp: 291-295.
- DOWNEY, G., ROBERT, P., BERTRAND, D. y KELLY, P. (1990) *Applied Spectroscopy* **44**: 150-155.
- DOWNEY, G. (1995) En: *Leaping ahead with Near Infrared Spectroscopy*. Ed. Batten, G.D. et al. Royal Australian Chemical Institute, pp: 107-110.
- FLINN, P.C. y DOWNES, G.J. (1996) En: *The 8th International NIR Conference*. Montreal. Canadá. Agosto 1995 (En prensa).
- GARRIDO, A., GUERRERO, J.E. y GOMEZ CABRERA, A. (1993) *Application of Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) for evaluation of animal feedstuffs*. 44 th Animal Meeting of the EAAP. Aarhus. Denmark 16 -19 Agosto.
- GIGER-REVERDTN. S. AUFE;TERE, J., SAUVANT. O.. DEMARQUILLI, C y VERMOREL, M. (1994) *Anim. Feed. Sci. Technol.* **48**: 73-98.
- GIGER-REVERDIN, S. (1995) *Anim. feed Sci. Technol.* **55**: 295-334.
- GIVENS, D.I. (1993) En: *NIR Spectroscopy Developments in Agriculture and Food*. International Conference. ADAS. Dryton. Birmingham. UK.
- GOMEZ CABRERA, A. y DE PEDRO, E. (1993) *Nuevas Fuentes de Alimentos para la Producción Animal IV*. Junta de Andalucía. Congresos y Jornadas n° 30.
- GOMEZ, A., GUERRERO, J.E. y GARRIDO, A. (1993). En: *Nuevas Fuentes de Alimentos para la Producción Animal IV*. Junta de Andalucía. Congresos y Jornadas n° 30. pp: 343-352
- HELLAMAKI, M. (1992) En: *Making Light Work. Advances in Near Infrared Spectroscopy*. Ed. Ian Murray and Ian Cowe. VCH. London. pp: 264-268.
- HOWARD, M y WORKMAN, Y (1991) *Statistics in Spectroscopy*. Academic Press, Inc. NY.
- JENSEN, E.P. (1993) En: *NIR Spectroscopy Developments in Agriculture and Food*. International Conference. ADAS. Drayton Birmingham. U.K.
- LIZASO, J. (1993) En: *Nuevas Fuentes de Alimentos para la Producción Animal IV* Ed Gómez, A. y de Pedro, E. Junta de Andalucía. Congresos y Jornadas n° 30. pp: 281-289.

- MAFF (1993) *Prediction of the Energy Values of Compound Feeding Stuffs for Farm Animals*. Summary of the Recommendations of a Working Party. pp:7.
- MOSS, A.R. y GIVENS, D.I. (1994) *Anim. Feed. Sci. Technol.* **47**: 335-351.
- MOYA, L. (1993) *Aplicación de la tecnología NIRS al control de calidad en la industria de piensos compuestos*. Trabajo Profesional Fin de Carrera. ETSIAM. Universidad de Córdoba. Garrido, A. y Lizaso, J. (Directores).
- MOYA, L., GARRIDO, A., GUERRERO, J.E., LIZASO, J. y GOMEZ, A. (1995) En: *Leaping Ahead with Near Infrared Spectroscopy*. Ed. Batten, G. D., et al. Royal Australian Chemical Institute, pp: 111-117
- MURRAY, I. (1986) En: *Near Infrared Diffuse Reflectance / Transmittance Spectroscopy*. Ed. Hollo. i.; Kafi-ka, K.J. and Gonczy, J.L. Akademiai Kiado. Budapest. pp: 13-28.
- OSBORNE, B.G., FEARN, T. y HINDLE, P.H. (1993) *Practical NIR Spectroscopy with applications in food and beverage analysis*. Longman Scientific Technical. UK.
- PUIGDOMENECH, A., GARRIDO, A., DE LA ROZA, B., ARAGAY, M., LUCENA, B. y MARTINEZ, A. (1995) En: *Leaping ahead with Near Infrared Spectroscopy*. Ed. Batten, G.D. et al. Royal Australian Chemical Institute, pp: 107-110.
- SHENK, J.S. (1992) En: *Making Light Work. Advances in Near Infrared Spectroscopy*. Ed. Ian Murray and Ian Cowe. VCH. London. pp:223-228
- SHENK, J.S., WORKMAN, J.J., y WESTERHAUS, M.O. (1992) En: *Handbook of Near-Infrared Analysis*. Marcel Dekker, Inc. NY., pp. 383-427.
- SHENK, J. S. y WESTERHAUS, M.O. (1995) *Analysis of Agricultural and Food Products by Near Infrared Reflectance Spectroscopy*. Monograph. NIRSystems.
- TEMPLETON, W.C., SHENK, J.S., NORRIS, K.H. y varios (1983) En: *Proc. 14th. Int. Grassl. Cong.* pp: 528-531. Lexington, K.Y. Westview Press, Boulder, Co.
- VAN DER MEER, J.M. y ECKES, F.C. (1987) En: *Forage Spectroscopy CEC*, 3-4 Diciembre 1987.
- VERHEGGEN, J., DARDENNE, P., THEWIS, A. y BISTON, R. (1991) En: *The 3rd. International Conference on Near Infrared Spectroscopy*. Ed. Biston, R y Bartiaux - Thill, N. ARC. Gembloux (Bélgica) pp: 287-290.
- WILLIAMS, P. C. y SOBERING, D. C. (1992) En: *Making Light Work. Advances in Near Infrared Spectroscopy*. Ed. Ian Murray y Ian Cowe. VCH. London, pp: 217-222.