

EL FÓSFORO EN NUTRICIÓN ANIMAL. NECESIDADES, VALORACIÓN DE MATERIAS PRIMAS Y MEJORA DE LA DISPONIBILIDAD.

P.G. Rebollar¹ y G.G. Mateos²

¹Consultas y Servicios Agropecuarios, S.L.

²Departamento de Producción Animal. ETSIA, UPM.

1.- INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) es un mineral esencial para el metabolismo del organismo animal donde juega un papel muy importante en el desarrollo y mantenimiento de las estructuras óseas. Es un componente del ATP y los ácidos nucleicos y forma parte de los fosfolípidos que integran y dan flexibilidad a las membranas celulares (McDowell, 1992).

Hasta mediados de los años 80 los purines y el estiércol tenían un valor residual como fertilizante de las tierras de cultivo por su alto aporte de nitrógeno, fósforo y otros nutrientes. Más recientemente, la intensificación de las producciones y la concentración de la ganadería en áreas específicas, junto con las nuevas normas de conservación del medio ambiente, limitó el interés de esta vía de disposición de los purines. La cantidad de estiércol a esparcir en un campo de cultivo está limitada por la capacidad de las plantas para extraer del terreno los minerales aportado por el purin; un exceso de aporte sobre las necesidades resulta en contaminación ambiental. Las materias primas de origen vegetal contienen alrededor de dos tercios del P en forma de fitatos cuya disponibilidad para monogástricos es prácticamente nula. Por tanto, en situaciones normales el P fítico consumido por el animal aparece en las heces casi por completo. Una vez en el terreno este P es liberado mediante la acción de las fitasas contenidas en los microorganismos del suelo y pasa a ríos y lagos dando lugar a los fenómenos de eutrificación de las corrientes de agua y de los reservorios acuáticos. Bajo estas circunstancias hay un crecimiento acelerado de las algas y un agotamiento del contenido en oxígeno del agua lo que provoca mortalidad de la fauna acuática. Por tanto, la escasa disponibilidad del P fítico crea dos problemas al ganadero: la necesidad de suplementar las dietas con P inorgánico, con el consiguiente encarecimiento del producto final, y la excreción al medio de altas cantidades de este macromineral. Actualmente, la legislación de los países desarrollados sobre medio ambiente tiende a penalizar este exceso; así, en el estado de Maryland se han propuesto medidas legislativas (Water Quality Improvement Act, 1998) que

obligan, a partir del final del año 2000, a la inclusión de fitasas u otros aditivos en piensos de aves y cerdos para reducir el nivel de P en las deyecciones (Harter-Denis, 1999). Medidas similares han sido propuestas en los Países Bajos y otros países europeos (Jongbloed et al., 1996; Rodehutsord, 1998).

Desde un punto de vista práctico el P es en la actualidad el nutriente que regula la cantidad de estiércol que puede esparcirse en el suelo y, en numerosas regiones europeas, el censo de ganado está disminuyendo al carecer de alternativas económicas al vertido del P en el terreno (Jongbloed y Kemme, 1997). Existen diversas tecnologías que permiten reducir la cantidad de P excretado al medio a través de las deyecciones. Una primera vía y probablemente la más rentable a nivel global de un país es ajustar el consumo de P a las necesidades reales del animal. Esta estrategia lleva consigo tres posibles líneas de actuación: 1) el estudio exhaustivo de las necesidades de los animales según productividad y estado fisiológico con la subsiguiente revisión de los niveles de P en las dietas, 2) la evaluación del aprovechamiento del P contenido en las diversas materias primas en función de la especie considerada y 3) modificaciones de la dieta con incorporación de aditivos capaces de mejorar la utilización del P. A este particular merece destacarse la influencia sobre el aprovechamiento del P de la relación Ca:P de la dieta, la inclusión de niveles altos de vitamina D₃ o sus análogos, la adición de fitasas y, probablemente, la acidificación de piensos (Kornegay, 1999).

La información actual sobre estas áreas es muy extensa, pero las recomendaciones prácticas varían ampliamente entre países. Existen muchas razones para esta disparidad pero una fundamental es que los criterios aplicados en la evaluación de las necesidades son diferentes. Por tanto la mayoría de las veces los datos no son extrapolables ya que los métodos de valoración de necesidades y de estimación de la utilización del P son distintos en su concepción. Así pues los datos publicados en las tablas del INRA (1989), NRC (1994 y 1998), CVB (1998) y otros organismos, son valiosos pero difícilmente comparables. Además, es preciso utilizar conjuntamente los datos ofrecidos por un mismo investigador para necesidades y valoración de las materias primas (*teoría de la llave y el candado*). En la práctica, la disparidad de criterios produce una gran confusión a la hora de formular en base al contenido en P utilizable de las materias primas y poner mínimos y máximos a las necesidades de los animales, lo que conduce a errores importantes en el diseño de piensos comerciales.

El objetivo de este trabajo es exponer las bases científicas y describir los métodos utilizados en la actualidad para estimar el valor nutritivo del P contenido en los alimentos, así como las recomendaciones en dietas para monogástricos. Esta información nos permitirá comparar los valores publicados por diversos centros de investigación, de uso común en nuestro país. Al final de este trabajo se adjunta el anexo 1 donde se recogen los datos disponibles sobre valoración del P de las materias primas para aves y cerdos según fuentes.

2.- CONTENIDO EN FÓSFORO DE LOS ALIMENTOS

El contenido en P de las materias primas utilizadas en alimentación animal presenta un amplio rango de variación. En general, los forrajes de gramíneas tienen un contenido superior

a los de leguminosas, y las semillas (granos de cereales, leguminosas y oleaginosas) mayor que los forrajes. Los subproductos del procesamiento de granos (salvados de trigo, gluten de maíz o harinas de oleaginosas) son especialmente ricos en P, mientras que tubérculos, raíces y bulbos son los más pobres. Los productos lácteos y las materias primas de origen animal que incluyen parte del esqueleto son los alimentos con mayores niveles de P (ver anexo 1).

El nivel de P varía no sólo entre fuentes sino también dentro de cada fuente. En materias primas de origen vegetal el contenido en P depende del tipo de suelo, variedad cultivada, estado de maduración, condiciones de cultivo, climatología, etc, (Ravindran et al., 1995). En los productos de origen animal, el nivel de P varía en función del contenido en huesos y, por tanto, es inferior pero más constante en los subproductos derivados de la sangre o de la leche (McDowell, 1992). El nivel de P en los suplementos minerales depende de múltiples factores como son el material de origen, proceso de fabricación y el grado de hidratación (Mateos y García, 1998).

2.1.- Naturaleza del fósforo

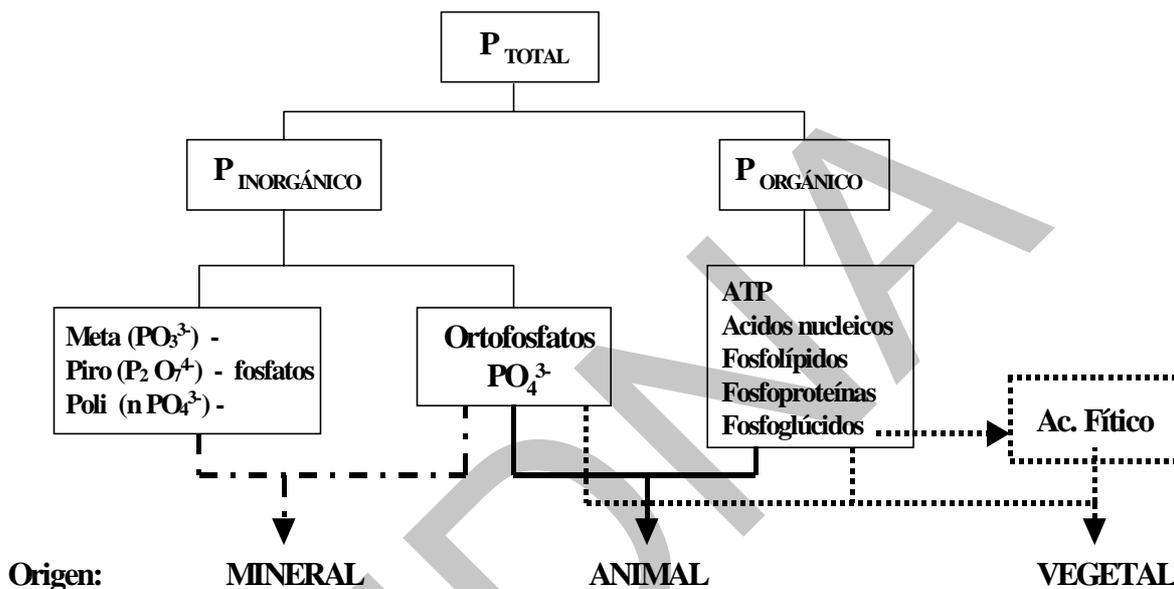
El P contenido en las materias primas se encuentra bien en forma inorgánica, principalmente como ortofosfatos (PO_4^{3-}), bien en forma orgánica en el seno de moléculas tales como ATP, ácidos nucleicos, fosfolípidos, fosfoproteínas y fosfoglicidos. La hidrólisis del P orgánico en el tracto gastrointestinal libera PO_4^{3-} , que es la única forma en que el animal puede absorber y utilizar el P (De Groote, 1990). En los ingredientes vegetales el P orgánico representa la fracción mayoritaria, siendo el ácido fítico el fosfoglicido más abundante. En torno a un 60-80% del P total contenido en los granos y sus subproductos se encuentra como parte del ácido fítico y sus sales, generalmente como fitatos de Ca, K y Mg (Ravindran et al., 1995). Por el contrario, en los alimentos de origen animal predomina el P inorgánico que se encuentra en forma de ortofosfatos en solución en el medio celular y mayoritariamente como fosfatos de calcio en los tejidos óseos y en la leche. Alrededor del 80-85% del P presente en el organismo animal se localiza en el esqueleto como fosfato cálcico $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ e hidroxiapatita $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ y el 15-20% restante se encuentra como P orgánico en los tejidos muscular y nervioso y, especialmente en los glóbulos rojos. La sangre contiene entre 35 y 45 mg de P/100 ml localizado en su mayor parte en el interior de las células ya que la fracción plasmática sólo posee entre 4,5 y 6 mg P/100 ml en adultos y entre 6 y 9 mg P/100 ml en animales jóvenes (McDowell, 1992).

Las fuentes minerales de P más utilizadas en alimentación animal son los ortofosfatos de Na, Ca, K, NH_4 y sus combinaciones. Las diversas fuentes de P pueden contener cantidades variables de meta- [$(\text{PO}_3)^{3-}$] y piro- [$(\text{P}_2\text{O}_7)^{4-}$] fosfatos en función de las temperaturas alcanzadas durante el proceso de obtención (Axe, 1993). Otros fosfatos minerales de menor importancia práctica por su baja disponibilidad en monogástricos, son los fosfatos de roca, los metafosfatos de Na, K y Ca, los pirofosfatos de Na y Ca y los polifosfatos [$n.(\text{PO}_4)^{3-}$] de Na y NH_4 .

La figura 1 muestra la distribución de las dos formas del P (orgánico e inorgánico) en los ingredientes utilizados en alimentación animal. La determinación analítica mediante la

metodología del AOAC (1990) incluye ambas fracciones de P. El contenido en P inorgánico se puede determinar analíticamente por el método de Pons y Guthrie (1946) y el P fítico mediante diversos métodos analíticos basados en técnicas colorimétricas (Latta y Eskin, 1980; Haugh y Lantzsch, 1983) o cromatográficas (Simons et al., 1990 y Bos et al., 1991). El P orgánico se estima por diferencia entre el P total y el P inorgánico.

Figura 1.- Naturaleza del P contenido en las materias primas



Desde el punto de vista práctico se admite que la disponibilidad del P inorgánico y del P orgánico no fítico es similar y cercana al 100% (rango 80-100%). Por el contrario, se considera que el P fítico no puede ser utilizado por los animales monogástricos (aves y cerdos) asignándole un valor de 0, y se asume que el contenido en P fítico de todas las materias primas de origen vegetal es del 70% del P total (Nelson, 1967).

En el cuadro 1 se ofrecen datos sobre el contenido en P total, fítico e inorgánico de algunas materias primas de origen vegetal de uso frecuente, así como el valor de P disponible calculado como el 30% del P total (Hopkins et al., 1987).

Se observa que el P no fítico varía entre el 30 y el 80% del P total y, por tanto, la asunción de que un 70% del P vegetal es P fítico subestima el aporte de P asimilable de la mayoría de los alimentos de origen vegetal que componen las dietas. La diferencia entre P no fítico y P inorgánico indica que existe un nivel variable de P orgánico de naturaleza no fítica de alta disponibilidad en monogástricos. Los valores más altos corresponden a guisantes, habas y colza (50 a 80% del P total), lo que explica la mayor disponibilidad del P en leguminosas y oleaginosas que en cereales. En dietas para monogástricos debe considerarse la naturaleza del P de las materias primas vegetales, analizando sus contenidos en P total y P fítico, a fin de asignar en la matriz un valor más preciso del contenido en P utilizable para monogástricos

**Cuadro 1.- Contenido en P total, inorgánico y fítico de algunas materias primas (g/kg MS)
 (Hopkins et al., 1987)**

	P total	P fítico	P inorgánico⁽¹⁾	P no fítico⁽²⁾	P disponible⁽³⁾
<i>Gramíneas</i>					
Trigo	3,9	2,2	1,1	1,7	1,2
Cebada	4,3	2,4	1,2	1,9	1,3
Avena	3,6	1,9	1,2	1,7	1,1
Triticale	4,4	3,0	1,5	1,4	1,3
Maíz	3,0	2,0	1,2	1,0	0,9
Gluten feed	7,2	2,9	2,6	4,3	2,2
<i>Leguminosas</i>					
Guisantes	4,3	2,1	1,3	2,2	1,3
Habas	5,8	1,5	1,5	4,3	1,7
Hna de pradera	2,6	1,1	1,2	1,5	0,8
Harina de soja	7,0	3,0	1,4	4,0	2,1
Soja integral	5,3	2,3	1,2	3,0	1,6
Hna de girasol	9,4	3,0	1,4	6,4	2,8
Hna de colza	12,4	2,1	1,7	10,3	3,7

⁽¹⁾ P inorgánico se determina analíticamente (Pons y Guthrie, 1946); ⁽²⁾ P no fítico = P total - P fítico;

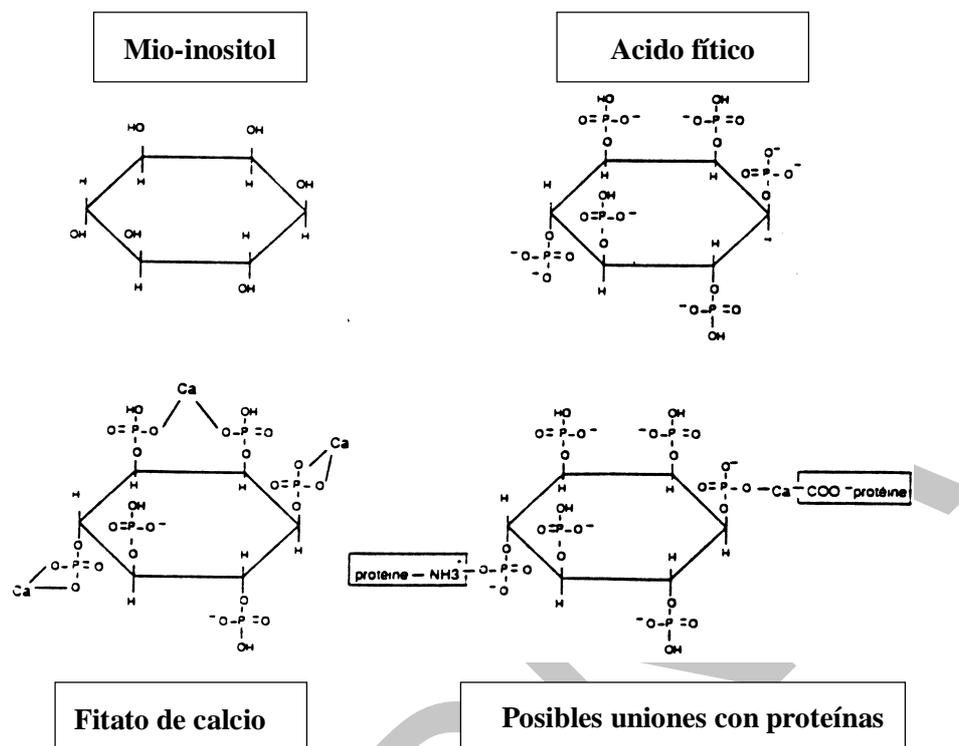
⁽³⁾ P disponible = 30% P total

2.2.- Fitatos

El ácido fítico es un componente esencial de todas las semillas donde constituye una reserva de P y otros minerales que se liberarán durante la germinación (Wodzinski y Ullah, 1995). El ácido fítico fue descrito por primera vez por Pasternak en 1903 y consiste de una molécula de inositol con 1 a 6 grupos ortofosfato unidos mediante enlaces ester. Químicamente, la molécula de IP-6 se define como mioinositol 1, 2, 3, 4, 5, 6, hexakis dihidrógeno fosfato (figura 2), contiene un 28,2% de P y posee 6 grupos ortofosfato con afinidad variable por ciertos cationes y aminoácidos. Los fitatos son sales del ácido fítico con distintos cationes; así la fitina es la sal del ácido fítico con los cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} . Fitatos y fitina no son pues términos equivalentes (Sauveur, 1989).

En la práctica el término ácido fítico se usa tanto para el IP-6 como para los compuestos intermedios de su hidrólisis (desde IP-5 a IP-1). Existen métodos analíticos que permiten analizar por separado el contenido en cada uno de estos compuestos. Mediante espectroscopía de resonancia magnética, Kemme (1998) demostró que en los ingredientes habitualmente utilizados, el fosfato de inositol más abundante es el IP-6 (70 a 80% del P total en los cereales). Los penta (IP-5) y tetra (IP-4) fosfatos de inositol están presentes a niveles de 5 al 20% y de menos del 0,05%, respectivamente, en relación a las cantidades encontradas de IP-6. El resto de fosfatos de inositol (IP-3 a IP-1) no se detectan, lo que indica que se encuentran en cantidades despreciables.

Figura 2.- Estructura química del mioinositol, ácido fítico y fitatos (Sauveur, 1989)



Además de ser la fuente más importante en la naturaleza de inositol, el ácido fítico tiene numerosas aplicaciones en medicina humana tales como prevención de caries dentales (alta afinidad por la hidroxiapatita), agente hipocolesterolémico, reductor del crecimiento tumoral y potente antioxidante (Graf, 1986). Todas estas aplicaciones están relacionadas con su capacidad para quelar metales e interactuar electrostáticamente con ciertas proteínas. El inositol fosfato (IP-6) y sus intermediarios (IP-5 a IP-3) también intervienen en diversos procesos vitales, como el transporte de nutrientes al interior de la célula (Wodzinski y Ullah, 1995).

Como consecuencia de su alto potencial quelante, el ácido fítico forma sales insolubles a pH neutro con numerosos cationes di y trivalentes (Ca, Mg, Zn, Cu, Co, Fe, Mn, Cu; Sauveur, 1989) impidiendo su absorción a nivel intestinal. Por ello se le considera como un antinutriente en alimentación. La principal problemática se da con el Ca, Zn y Cu (Kornegay, 1996). Por ejemplo, al pH normalmente encontrado en el intestino 1 g de P fítico puede unir y formar complejos insolubles con entre 0,64 y 1,30 g de Ca. Wodzinski y Ullah (1995) señalan que sólo el IP-6 y el IP-5 tienen poder quelante con los minerales. Los intermediarios del inositol con menos de 4 grupos ortofosfato (<IP-4) pierden esta capacidad lo que puede explicar, al menos en parte, la acción positiva de las fitasas sobre la absorción del Ca y otros minerales.

El ácido fítico también puede formar complejos insolubles con proteínas y almidón (Kornegay, 1999; Ravindran et al., 1999). La interacción de ácido fítico y proteínas es de tipo iónico y dependiente del pH. A pH bajo el ácido fítico se une con los residuos básicos (grupo amino) de la lisina, arginina y histidina formando complejos insolubles. A pH neutro dichos

complejos se solubilizan y es el grupo carboxilo (COO⁻) quien se une al ácido fítico utilizando como intermediarios cationes multivalentes (Anderson, 1985). Los complejos formados cambian la estructura de las proteínas reduciendo su solubilidad, digestibilidad y funcionalidad. El ácido fítico también puede inhibir la acción de ciertas enzimas tales como α -amilasas (Deshpande y Cherian, 1984), proteasas como la tripsina y pepsina (Singh y Krikorian, 1982) y lipasas (Knuckles, 1988) formando complejos mediante mecanismos aún desconocidos. Probablemente, el nutriente más afectado por esta inhibición enzimática sea la proteína y, en particular, ciertos aminoácidos (Johnston y Southern, 1999; Kornegay, 1999).

Los fitatos son de naturaleza vegetal y por tanto no aparecen en materias primas de origen animal o mineral. Se acumulan preferentemente en las semillas donde cumplen una función de reserva de P, minerales y energía y, por tanto, su contenido en tallos y hojas es muy bajo. Su localización varía según el tipo de grano. En trigo y centeno, así como en la mayor parte de las monocotiledoneas, entre el 80 y el 90% de los fitatos se localiza en las capas de aleurona y en el pericarpio, mientras que en el maíz y sorgo se acumulan en el germen. En las leguminosas se concentran en los cotiledones y en las oleaginosas se distribuyen de forma difusa por toda la semilla asociados a los cuerpos globulares ricos en proteína (Cosgrove, 1980; Sauveur, 1989). Los cereales contienen entre un 0,2 y un 0,3% de P fítico, sus subproductos (excepto para maíz y sorgo) en torno al 0,5 y 1,0% y las harinas proteicas entre el 0,3 y el 0,9% (Pointillart, 1994). El porcentaje de P fítico sobre el P total presenta un rango de variación muy amplio, con valores de entre el 60 y el 80% para los cereales y sus subproductos y de entre el 30 y el 70% para el resto de los ingredientes habituales en piensos de monogástricos (cuadro 2).

Cuadro 2.- Contenido en fósforo fítico y actividad fitásica de algunas materias primas (Ravindran et al., 1995)

Ingredientes	P fítico (g/kg)	P fítico (% P total)	Actividad fitásica(U/kg)¹
<i>Cereales y subproductos</i>			
Trigo	2,4 (1,9 - 2,9) ²	68 (61 - 78) ²	1190
Maíz	2,0 (1,6 - 2,6)	73 (61 - 85)	15
Sorgo	2,2 (1,9 - 2,9)	68 (61 - 76)	25
Cebada	2,1 (1,9 - 2,4)	58 (55 - 62)	580
Avena	2,8 (1,6 - 3,5)	69 (48 - 78)	40
Salvado de trigo	8,8 (6,0 - 12,7)	76 (68 - 93)	2960
<i>Leguminosas grano</i>			
Altramuz	3,0 (2,9 - 3,0)	55 (54 - 55)	0
Guisantes	1,7 (1,3 - 2,1)	45 (36 - 53)	115
<i>Harinas de oleaginosas</i>			
Harina de soja	3,7 (2,8 - 4,0)	57 (46 - 61)	40
Harina de colza	6,5 (4,6 - 7,8)	58 (36 - 70)	15
Harina de girasol	4,4 (3,2 - 5,1)	44 (35 - 47)	60

¹ Una unidad se define como la cantidad de fitasa que libera 1 μ mol/min de fósforo inorgánico de una solución 5,1 mM de fitato sódico a pH 5,5 y 37 °C.

² Rango de variación.

Los fitatos contenidos en las diversas materias primas presentan características diferenciales que influyen en su hidrólisis y en la subsiguiente liberación del P. Así, se observan diferencias en la solubilidad de los fitatos de distintas fuentes que afectan al grado de degradación enzimática y a su utilización por el animal (Pointillart, 1993; Kemme, 1998). En los granos, el ácido fítico está presente bajo forma de fitina y, sobre todo, como fitatos mixtos de K, Mg y Ca. Otros cationes (Zn, Fe, Cu) también están presentes pero en menor cantidad. La solubilidad de las sales formadas con los cationes divalentes sigue el siguiente orden decreciente: $\text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$, según Sauveur (1989). Los oligoelementos están fijados más fuertemente al ácido fítico que los metales alcalino-terreos y éstos, a su vez, son más insolubles que los fitatos de cationes monovalentes (K^+ y Na^+).

El P contenido en los fitatos es muy poco disponible para aves y porcino ya que el organismo animal carece de la enzima precisa, al menos en cantidad suficiente, para romper y separar el P de la molécula de inositol. En situaciones normales, la mayor parte del P fítico aparece en las heces incrementando el problema de contaminación ambiental. Su hidrólisis mediante la acción de las fitasas de origen endógeno o exógeno mejora en proporciones variables la absorción y retención del P, Ca, Mg, Zn, Cu, Fe y aminoácidos, especialmente en dietas deficientes (Kornegay, 1999). Hoppe (1992) y Harter-Denis, (1999) indican que la problemática de la contaminación ambiental por minerales puede reducirse hasta en un 50% si se utilizan alimentos ricos en fitasas naturales o cuando se adicionan fitasas exógenas. En rumiantes y parcialmente en animales coprófagos tales como el conejo, la producción de fitasas por los microorganismos del rumen y ciego es abundante por lo que la utilización del P fítico no supone ningún problema (Cromwell, 1992; Mateos y de Blas, 1998).

3.- FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA DISPONIBILIDAD DEL FÓSFORO

3.1.- Fitasas

Las fitasas (mioinositol hexafosfato fosfohidroxilasas) son fosfatasa ácidas que catalizan el proceso de hidrólisis del ácido fítico (IP-6) liberando de forma secuencial hasta 6 grupos ortofosfatos libres, plenamente disponibles para los monogástricos (Irving, 1980; Gibson y Ullah, 1990). Las fitasas hidrolizan únicamente los fitatos en solución, por lo que su actuación requiere humedad en el medio y unas condiciones determinadas de pH y temperatura que son variables según el tipo de fitasa (Wodzinsky y Ullah, 1990). La hidrólisis de fitatos *in vitro* da lugar a una acumulación temporal de fosfatos de mioinositol con 3 a 1 grupos fosfato (IP-3 a IP-1), los cuales no se detectan en la digesta ileal de cerdos y aves que reciben dietas suplementadas con fitasas microbianas (Kemme, 1998). Esto indica que en el organismo animal la acción de las fitasas se ve favorecida por la existencia de otras fosfatasa, probablemente de origen endógeno, sinérgicas en su acción.

Las fitasas están presentes de forma natural en numerosos cultivos de bacterias y hongos, así como en ciertos granos. También están presentes en el tracto intestinal de todos los animales debido bien a la ingestión de plantas que las contienen, bien a la producción por la propia microflora intestinal o bien a la producción enzimática endógena por la mucosa u

órganos secretores del digestivo (Sebastian et al., 1997). En la naturaleza se conocen las siguientes fuentes de fitasas:

3.1.1.- Fitasas intestinales endógenas

La actividad fitásica de la mucosa intestinal es muy reducida aunque demostrable experimentalmente (Davies y Motzok, 1972; Pointillart, 1993). Al menos en el cerdo, las fosfatasa intestinal endógenas sólo son capaces de hidrolizar las moléculas de intermediarios del inositol fosfato con escaso número de iones ortofosfatos (IP-3 a IP-1) dando lugar a inositol libre (Kemme, 1998). El contenido digestivo del estómago e intestino del cerdo (Yi y Kornegay, 1996) y del buche, estómago e intestino de las aves (Liebert et al., 1993) tiene escasa actividad fitásica propia. La producción de fitasas en la mucosa intestinal puede verse favorecida por niveles bajos de P y Ca y altos de colecalciferol en la dieta (Näsi et al., 1999). En cualquier caso, se estima que su interés práctico es muy reducido (Jongbloed et al., 1993; Pointillart, 1994).

3.1.2.- Fitasas endógenas contenidas en los ingredientes de la ración

Existe un cierto número de semillas con actividad fitásica propia, particularmente dentro del grupo de los cereales (cuadro 2), pero no es posible establecer una correlación significativa entre el contenido en P fítico del grano y su actividad fitásica (Eeckout y De Paepe, 1994). El contenido es importante en el caso del trigo, centeno y triticale y de poco interés en el resto de granos utilizados en la práctica. La actividad fitásica es muy reducida en harinas proteicas (soja, colza y algodón) y leguminosas grano (Sauveur, 1989; Ravindran et al., 1995). En cualquier caso, su contenido varía en función de la variedad y de factores medioambientales. Así, la concentración de fitasas aumenta en todos los granos durante el proceso de germinación (Wodzinsky y Ullah, 1990). En la cebada es bajo en las variedades de primavera y casi nulo en las de invierno (Jongbloed et al., 1993), mientras que para el trigo es mayor en el trigo blando que en el duro (Sauveur, 1989). Los subproductos de molinería, en especial aquellos que proceden del trigo (salvados) o los obtenidos mediante procesos fermentativos o por vía húmeda (solubles de destilería, raicilla de cebada, gérmenes de maíz) son ricos en actividad fitásica. La razón es que las fitasas se concentran en el pericarpio en el caso de los salvados de centeno y trigo y, que los procesos de fermentación, especialmente a pH ligeramente ácido y temperaturas altas, incrementan la población microbiana y la actividad fitásica. De aquí, que los granos contenidos en ensilados de maíz tengan una importante actividad fitásica (Cromwell, 1992; Pointillart, 1993).

Las fitasas vegetales son del tipo 6-fitasa (EC 3.1.3.26) cuyo proceso inicial consiste en liberar el grupo ortofosfato en la posición 6 de la molécula de mioinositol (Gibson y Ullah, 1990). El primer intermediario obtenido es el D-mioinositol 1, 2, 3, 4, 5 pentakisfosfato. A partir de aquí la 6-fitasa actúa de forma secuencial, defosforilando la molécula en su totalidad (Wodzinski y Ullah, 1995; Rodehutschord, 1988). Por tanto, al menos teóricamente una molécula de ácido fítico podría dar lugar a una molécula de inositol y 6 moléculas de ortofosfato (PO_4^{3-}). El pH óptimo para la actuación de estas enzimas está entre 4,0 y 7,5, con la mayoría de ellas por encima de 5,0, perdiendo irreversiblemente su actividad a pH

comprendidos entre 2,5-3 (Sauveur, 1989; Pointillart, 1993). La temperatura óptima de acción se sitúa entre 45 y 60°C, degradándose rápidamente a temperaturas superiores (Reddy et al., 1982).

Se estima que las fitasas contenidas en las plantas son al menos un 10% menos eficientes que las de naturaleza fúngica (Kornegay, 1996). La razón podría ser el estrecho rango de pH al cual las fitasas vegetales son activas (Hoppe, 1992), ya que los valores óptimos de pH para su máxima actividad son superiores a los encontrados en el buche o en el estómago de aves y cerdos, principales puntos de acción de las fitasas (Liebert et al., 1993; Yi y Kornegay, 1996).

La cantidad de fitasas de origen vegetal que se encuentra en la mayoría de los piensos para monogástricos es insuficiente para liberar de los fitatos todo el P inorgánico que el animal necesita (Wodzinski y Ullah, 1995). Además, su contenido es muy variable y se destruyen fácilmente por acción del calor, por lo que resulta difícil su valoración en formulación práctica. Son pues fuentes poco fiables de suministro de actividad fitásica, especialmente en condiciones de bajo pH digestivo o de altas temperaturas durante el proceso de fabricación de los piensos (Jongbloed et al., 1993).

3.1.3.- Fitasas de origen microbiano producidas por la flora digestiva

Numerosos hongos y microorganismos presentes en el tracto intestinal producen 3-fitasa (E.C.3.1.3.8). Los rumiantes y parcialmente los animales coprófagos, tales como el conejo, pueden beneficiarse de esta actividad fitásica. Sin embargo, en la mayoría de las especies monogástricas, tales como aves y porcino, la actividad de la flora microbiana tiene lugar en el intestino grueso. De aquí que, aunque las fitasas microbianas hidrolicen los fitatos y liberen el P inorgánico, el animal no pueda beneficiarse ya que este P se excretará enteramente en las heces (Kemme, 1998).

3.1.4.- Fitasas de origen microbiano de producción industrial

Hongos y bacterias son capaces de producir fitasas en condiciones naturales o de laboratorio. Las fitasas bacterianas (a excepción del *Bacillus subtilis*) son de naturaleza intracelular y, en general, no tienen un buen comportamiento en cuanto a productividad en condiciones de laboratorio. Además su pH óptimo de actividad es neutro o alcalino lo que reduce su interés como aditivo en piensos (Wodzinski y Ullah, 1995).

Las fitasas de origen fúngico son producidas por numerosas especies. La mayoría de ellas dan lugar a enzimas extracelulares, siendo el género *Aspergillus* el principal microorganismo utilizado como fuente en la actualidad. Sus enzimas son del tipo 3-fitasa (EC 3.1.3.8) y su sustrato preferido es el mioinositol hexafosfato (IP-6). La hidrólisis de los fitatos *in vitro* transcurre de forma secuencial, actuando en primer lugar sobre los fosfatos de inositol con mayor número de grupos ortofosfato desde IP-6 hasta IP-1 (Kemme, 1998). La 3-fitasa no parece ser capaz de hidrolizar el inositol monofosfato (IP-1; Van Loon et al., 1997) y precisa de la ayuda de otras fosfatasas, bien la 6-fitasa o las fosfatasas endógenas del animal para

completar el proceso. El pH óptimo de estas fitasas se encuentra entre 2,5 y 7,5 siendo activas en un amplio rango de temperaturas, entre 35 y 63°C (Wodzinski y Ullah, 1995). Son, por tanto, los microorganismos de elección actual para la producción de fitasas comerciales.

El *Aspergillus niger* (NRRL 3.1.3.5) es el hongo más utilizado en la actualidad para obtener fitasas con fines comerciales. Produce 2 tipos de 3-fitasas: la A con dos pH óptimos de actividad (2,5 y 5,5) y la B cuyo pH óptimo se sitúa en torno a 2,0. Además, produce también una fosfatasa ácida con un pH óptimo de 6 que no tiene actividad sobre IP-6 (Wodzinski y Ullah, 1995). A estos pH, la fitasa fúngica muestra actividad en el buche y en el estómago de aves y cerdos pero sólo parcialmente en la parte proximal del intestino delgado (Liebert et al., 1993; Yi y Kornegay, 1996) debido a que en yeyuno e íleon, el pH está en torno a 6,5-7,6 que está fuera del rango óptimo para una acción eficiente de las fitasas. El proceso de digestión y de degradación de las fitasas por los enzimas digestivos se inicia en el duodeno, por lo que estas enzimas de naturaleza proteica son digeridas por las proteasas. De hecho, no se detecta degradación alguna del IP-6 a 25 cm del píloro en porcino (Kempe, 1998) ni en el contenido del intestino delgado de aves (Liebert et al., 1993).

La capacidad de las fitasas fúngicas para hidrolizar el P fítico ha sido ampliamente demostrada en numerosas especies. Hasta mediados de los años 90's su uso se vio limitado por el precio. Sin embargo, los problemas de contaminación ambiental, la reducción de sus costes de producción por la aplicación de nuevas tecnologías y la consideración por parte del nutricionista de otros efectos adicionales, como la mejora de la absorción de Ca, Zn, Mg y aminoácidos entre otros nutrientes, ha hecho que su uso sea común en las condiciones europeas.

Aunque existen numerosas fitasas comercializadas o en vías de desarrollo a nivel mundial (Roche, Alltech, etc), en España sólo hay disponibles 3 productos (BASF-Gist Brocades; Novo-Nordisk y Primalco). Todas ellas se obtienen a partir del *Aspergillus niger* mediante tecnologías basadas en el DNA recombinante (Wodzinski y Ullah, 1995). Estos microorganismos genéticamente modificados (clonación de la fitasa producida a partir de *Aspergillus niger*) producen mayores cantidades de fitasas a precios más competitivos que los organismos originales. Las características y niveles de inclusión de estas tres fuentes se detallan en el cuadro 3. Aún cuando los productos comerciales incluyen niveles en exceso a fin de cumplir con el contenido que figura en la etiqueta en situaciones extremas, si las temperaturas a aplicar son superiores a los 75 °C se recomienda su aplicación líquida posterior al granulado.

En la actualidad existen numerosas fitasas fúngicas en vías de desarrollo mediante procesos distintos al patentado por Gist-Brocades. En Estados Unidos y otros países se está comercializando una fitasa natural no producida por microorganismos genéticamente modificados (Alltech).

Aunque todavía en fase experimental, se dispone de la técnica necesaria para transferir el gen fitasa A del *Aspergillus niger* a plantas tales como el tabaco y la colza. En un futuro no

muy lejano, la adición de pequeñas cantidades de colza u otras semillas clonadas ejercerá la misma acción que la adición de las fitasas exógenas (Wodzinski y Ullah, 1995).

3.2.- Especies y estado fisiológico

Aunque es frecuente utilizar para aves y porcino los mismos valores de P disponible de las distintas materias primas, las recomendaciones más recientes (INRA, 1989; NRC, 1994, 1998; CVB, 1998) tienden a distinguir entre especies.

Las diferencias anatomo-fisiológicas entre cerdos y aves influyen en el aprovechamiento de los nutrientes de la dieta. En el caso del P, el buche permite que las fitasas de los vegetales empiecen a actuar de forma inmediata sobre los sustratos presentes en el pienso sin esperar a llegar al estómago. Asimismo, aves y cerdos presentan diferencias notables a nivel del pH de la digesta (cuadro 4) en los primeros tramos del aparato digestivo previos a la absorción (duodeno), del tiempo de permanencia del alimento en dichos tramos y del contenido en sustancia seca de la digesta, que influirán en gran medida sobre el aprovechamiento del P de la dieta (Kemme, 1998).

El pH determina la eficacia de las fitasas de la dieta (endógenas y exógenas) e influye en la solubilización de los fitatos y de los fosfatos minerales de peor calidad (Sauveur, 1989; De Groote, 1990), mientras que tiempos de permanencia prolongados permiten una mayor extensión de la actividad enzimática. El contenido en materia seca de la digesta es superior en aves que en porcino, lo que podría facilitar el contacto enzima-sustrato e incrementar la eficacia del proceso.

Cuadro 4.- Condiciones de pH en el tracto gastrointestinal de aves¹ y cerdos²

Órgano	pH medio (mín.-máx.)			
	Aves		Cerdos	
Buche	6,3	4,0 - 7,8	-	-
Proventrículo	1,8	0,3 - 4,1	-	-
Molleja	2,5	0,4 - 5,4	-	-
Estómago	-	-	-	1,0 - 4,5
Duodeno	6,4	5,2 - 7,6	4,8	4,0 - 6,2
Yeyuno	6,6	5,5 - 7,7	6,0	5,5 - 6,9
Íleon	7,2	5,7 - 8,2	7,0	7,0 - 7,4
Ciego	6,9	5,7 - 8,4	6,3	5,9 - 6,8
Colon	7,0	5,4 - 8,4	6,2	5,8 - 6,5

¹ Herpol y Van Grembergen (1967).

² Chesson (1987)

El lugar de acción de las fitasas en el aparato digestivo es distinto en aves y en cerdos. Liebert et al. (1993) demostraron que en broilers la hidrólisis del ácido fítico tiene lugar fundamentalmente en el buche (69 a 86% de la actividad fitásica añadida) y en menor

medida en el proventrículo (31-38%), no detectándose actividad en el intestino delgado. En porcino las fitasas actúan mayoritariamente en el estómago (Kemme, 1998; Kornegay, 1999). Yi y Kornegay (1996) observaron que un 40-50% de la actividad de las fitasas añadidas a la dieta de cerdos se detecta en el estómago y sólo entre un 16 y un 30% en el tramo superior del intestino delgado.

Jongbloed et al. (1996) compararon la digestibilidad del P en aves y cerdos utilizando muestras del mismo lote de diversos alimentos (cuadro 5). En general, la digestibilidad del P resultó mayor en aves que en cerdos para alimentos de origen vegetal, mientras que se observó la tendencia contraria para alimentos de origen animal y fuentes minerales. Además, las aves parecen tener mayor capacidad que los cerdos para discriminar aquellas fuentes de P inorgánico de peor calidad.

Cuadro 5.- Coeficientes de digestibilidad del P (%) en cerdos y broilers de distintos ingredientes (Jongbloed et al., 1996).

	Cerdos	Broilers	Cerdos-Broilers
<i>Origen vegetal</i>			
Trigo	49	55	- 6
Trigo (fitasas inactivadas)	27	45	-18
Salvado de trigo	33	43	-10
Salvado trigo (fitasas inactivadas)	19	33	-14
Salvado trigo (granulado)	24	42	-18
Haba de soja (tostada)	39	59	-20
Harina de soja 45% PB	38	58	-20
Harina de soja 48% PB	33	68	-35
Harina de colza	22	32	-10
<i>Origen animal</i>			
Harina de huesos	75	63	12
Harina de pescado danesa	61	67	-6
Harina de pescado chilena	84	70	14
Harina de carne	69	63	7
Harina de carne y huesos	81	68	13
<i>Origen mineral</i>			
Fosfato de Ca y Na	85	59	26
Fosfato bicálcico (anhidro)	64	55	9
Fosfato bicálcico (hidratado)	70	77	-7
Fosfato monocálcico A (hidratado)*	76	81	-5
Fosfato monocálcico B (hidratado)*	83	84	-1
Fosfato mono-bicálcico (hidratado)	82	79	3
Fosfato monosódico (hidratado)	88	92	-4

* Diferentes procesos de fabricación.

La razón de estas diferencias entre especies no es conocida. En los alimentos de origen animal y fosfatos inorgánicos, la digestibilidad del P resulta favorecida en cerdos por el mayor tiempo de permanencia del alimento en el aparato digestivo (2 horas en el estómago de cerdos vs 15-60 minutos en el proventrículo/molleja de aves; Moran, 1982). Además, aunque las diferencias de pH entre el proventrículo/molleja en aves y el estómago en cerdos no son importantes, el pH del duodeno es más bajo en cerdos (4,8 vs 6,4) lo que favorecería la solubilización del P inorgánico a este nivel y su absorción por el animal.

Algunos autores (Pointillart, 1994; Jongbloed et al., 1996; Näsi et al., 1999) señalan que la mayor digestibilidad del P de los vegetales en aves se debe a la mayor actividad fosfatasa endógena, especialmente en dietas con un bajo contenido en fósforo y calcio. Van der Klis y Versteegh (1996) observaron que la degradación de los fitatos era superior en broilers que consumían dietas con niveles bajos de P y Ca que con dietas prácticas (cuadro 6). La degradación del P fítico por enzimas endógenas de la mucosa digestiva ha sido también demostrada en ponedoras alimentadas con dietas maíz-soja que contenían 3,3 g de P/kg (2,7 g P fítico/kg). La degradación de los fitatos fue del 34 y del 10% para aves que consumían 30 y 40 g de Ca/kg, respectivamente (Van der Klis et al., 1994).

Cuadro 6.- Efecto del nivel de Ca y P de la dieta sobre la degradación del ácido fítico (IP-6) de la harina de soja y guisantes en pollos de 4 semanas (Van der Klis y Versteegh, 1996)

Alimentos	Dietas, g/kg		Degradación IP-6
	Ca	P disp	%
Harina de soja	5,0	1,8	69 ^d
	5,0	3,0	58 ^c
	8,3	3,0	36 ^b
Guisantes	5,0	1,8	38 ^b
	5,0	3,0	35 ^b
	8,3	3,0	28 ^a
P			***
SD			2,5

*** P<0.001; SD, Error estándar de la diferencia entre dos medias.

^{a-d} Valores con distintos superíndices son significativamente diferentes (P>0,05).

Las posibles diferencias en cuanto al aprovechamiento del P en función de la edad y el estado fisiológico del animal son difíciles de valorar. El tiempo de retención de la digesta y los valores de pH en el aparato digestivo son más favorables a la actividad fitásica en animales adultos que en animales jóvenes, pero la eficacia de absorción disminuye con la edad (Ambrecht, 1987; McElroy et al., 1991). Kemme et al. (1997) indican que en porcino la eficacia de las fitasas microbianas disminuye en el orden siguiente: lactantes, crecimiento-cebo (40-100 kg), final gestación (100 d), lechones (30-38 kg) y mitad de gestación (60 d). Otros trabajos no han detectado diferencias de eficacia de las fitasas en cerdos en crecimiento o acabado (Harper et al., 1997) o en lechones entre 16 y 39 kg de peso vivo (Rodehutsord,

1998). A la vista de estos resultados, es prematuro buscar conclusiones sobre la eficacia de las fitasas microbianas en función del peso o del estado fisiológico del cerdo.

En aves la eficacia de las fitasas exógenas es mayor en ponedoras que en broilers o pavos (Van der Klis y Versteegh, 1996; Kornegay, 1999), lo que no es fácil de entender. Los piensos para ponedoras contienen un nivel más elevado de Ca que los de broilers o pavos lo que debería afectar negativamente a la actividad fitásica. Razones a favor de una mayor efectividad serían el pH más ácido en buche y estómago y los niveles más altos de fitasas endógenas intestinales en el caso de aves adultas. Maenz y Classen (1998) trabajando con preparaciones de la mucosa del intestino delgado observaron que la actividad fitásica total fue un 35% superior en ponedoras que en broilers, lo que concuerda con los datos de Nelson (1967) indicando que la capacidad de hidrolizar el fósforo fítico aumenta con la edad de las aves. La mayor eficacia de las fitasas encontrada en numerosos ensayos tiene su reflejo en las recomendaciones de dosificación en piensos comerciales (cuadro 3).

3.3.- Composición de la dieta

Los ingredientes de origen vegetal son los componentes mayoritarios de las dietas para monogástricos y, por tanto, una fracción importante del P está presente como P fítico. Todos los factores relacionados con el metabolismo y absorción del P en el organismo, tales como los niveles de Ca y vitamina D, junto con aquellos factores que afecten a la eficacia de la actividad fitásica (endógena o exógena) pueden influir en el aprovechamiento del P de la dieta.

3.3.1.- Relación Ca:P total (Ca:P disponible)

Un exceso de Ca con relación al P de la dieta reduce la absorción de este último, al igual que la de otros minerales (Mg, Mn, Zn, etc), y resulta en menores crecimientos y peores índices de mineralización ósea (NRC, 1994; 1998). Además, una relación Ca:P alta disminuye la efectividad de las fitasas. El descenso de la actividad fitásica puede ser explicado en base a: 1) la utilización del P fítico está influenciada por el nivel de Ca y P de las dietas; 2) el Ca extra puede unirse a los fitatos formando complejos insolubles menos accesibles a las fitasas y 3) el Ca extra puede reprimir directamente la actividad de las fitasas compitiendo con ellas por los lugares de actuación del enzima (Kornegay, 1996, 1999). El efecto negativo de altas relaciones Ca:P es mayor cuanto menores sean las dosis de fitasas añadidas y los niveles de P no fítico o total. En este caso la cantidad de P liberado de los fitatos, debido a la baja actividad fitásica, será menor acentuándose el efecto negativo de niveles bajos de P en la dieta sobre los rendimientos de los animales.

La importancia de mantener la relación Ca:P total (ó Ca:P disponible) de las dietas dentro de márgenes estrechos para mejorar la eficacia de las fitasas ha sido demostrada en ratas (Ballam et al., 1985), broilers (Quian et al., 1997), pavos (Quian et al, 1996a) y cerdos (Quian et al, 1996b, Liu et al., 1998). Estos trabajos sugieren que la relación óptima Ca:P total es de 1,1:1 a 1,4:1 en broilers y pavos y de 1:1 a 1,1:1 en cerdos. Relaciones Ca:P total más altas

(2:1 en broilers y pavos ó 1,5:1 en cerdos) reducen la utilización del P, la mineralización ósea y la velocidad de crecimiento.

3.3.2.- Nivel de vitamina D

La vitamina D estimula el transporte activo de Ca y P a través del epitelio intestinal por lo que se recomienda adicionar dosis superiores a las necesidades estrictas para mejorar la utilización del P. Edwards (1993) encontró que la suplementación con 1,25 dihidroxicalciferol [(OH)₂ Vit. D₃] incrementó la retención del P fítico en broilers del 31 al 68%. Quian et al. (1997) demostraron que la suplementación en exceso de vitamina D₃ (66 vs 660 µg/kg) en dietas de broilers aumentó la retención de P y mejoró los parámetros productivos, con independencia de la adición o no de fitasas o del nivel de Ca de la dieta.

Por el contrario, Lei et al. (1994) no observaron diferencias en los rendimientos de cerdos que recibían dietas con 660 ó 6660 UI/kg de vitamina D. Resultados similares han sido publicados por Li et al. (1998) en lechones donde no observaron mejora alguna en el aprovechamiento del P de la dieta al suplementar el pienso con 2000 UI/kg de vitamina D con o sin adición de fitasas.

3.3.3.- Adición de ácidos orgánicos

Los ácidos orgánicos son sustancias de uso común en dietas para lechones por su efecto beneficioso sobre la calidad microbiológica del pienso y sobre la productividad del animal. Aunque en menor medida, su uso en dietas para aves y porcino en cebo está incrementándose, especialmente tras las normas restrictivas sobre el uso de promotores del crecimiento en la CEE. Aunque su mecanismo de acción es objeto de debate, la suplementación con ácidos orgánicos reduce el pH de la dieta y de la digesta mejorando la solubilidad de los minerales y creando una barrera protectora al paso de los microorganismos. Una mejora en la solubilidad junto a la modificación del pH puede contribuir de forma indirecta a mejorar la utilización por el animal del P y de otros minerales, particularmente de aquellos unidos al ácido fítico.

Numerosos trabajos experimentales (Höler y Pallauf, 1993; Han et al., 1998; Boling et al., 1999 y Edwards y Baker, 1999) muestran la compatibilidad y el efecto aditivo de la suplementación conjunta de fitasas exógenas y de ácidos orgánicos, en cuanto a mejora en la liberación del P fítico y de la productividad animal. Así, Boling et al. (1999) observan que la adición de 1450 U/kg de fitasas en combinación con un 6% de ácido cítrico mejoró el contenido en cenizas de la tibia y la ganancia de peso en broilers, resultados que fueron superiores a los obtenidos cuando utilizaron ácido cítrico exclusivamente. Resultados similares han sido presentados por Han et al. (1998) en lechones de 6 a 12 semanas de vida alimentados con dietas a base de maíz, soja y salvado a las que se adicionó 300 U/kg de fitasas y 1,5% de ácido cítrico.

Sin embargo, existen muy pocos trabajos que muestren un efecto sinérgico entre fitasas y ácidos orgánicos en cuanto a la liberación del P de los fitatos de la dieta. Eidelsburger

(1998) observó que la suplementación con ácido fórmico o con fitasas en cerdos de 22 a 44 kg de peso mejoró la digestibilidad del P que pasó del 25% con el pienso control al 30 y al 42%, respectivamente. El uso conjunto de ambos aditivos elevó este porcentaje al 51%. Asimismo, Kemme (1998) observó que la adición de ácido láctico (30 g/kg) y fitasas en dietas de cerdos aumentó significativamente la digestibilidad del P de la dieta (51,6 vs 27,3%) que superó en 26,9 ud porcentuales a la obtenida por la suma de utilizar sólo fitasas (16,2 ud porcentuales) o ácido láctico (2,6 ud porcentuales). Por el contrario, Li et al. (1998) no observaron diferencias significativas en la digestibilidad del P cuando se añadían fitasas y ácido cítrico ó fitasas exclusivamente (55 vs 53,2%, respectivamente).

3.3.4.- Método de procesado (granulación)

Algunos trabajos han observado que la granulación de los piensos aumenta el aprovechamiento del P fítico en aves y cerdos (Bayley y Thomson, 1969; Bayley et al., 1975) probablemente por la ruptura de la integridad de las células que lo contienen. Jongbloed (1987) demostró que el granulado con vapor de dietas de cerdos, con o sin P inorgánico añadido, aumentaba en 3 ud porcentuales la digestibilidad del P. Sin embargo en un trabajo posterior, Jongbloed y Kemme (1990a) no observan diferencias significativas por efecto del granulado sobre la digestibilidad del P de dietas basadas en maíz-soja o en leguminosas grano con baja actividad fitásica (50-100 UFT/kg). En dietas a base de grano y salvado de trigo, con alta actividad fitásica (1.174 UFT/kg), la granulación a temperaturas en torno a 80°C redujo la digestibilidad del P, probablemente porque a estas temperaturas las fitasas de origen vegetal resultaron irreversiblemente dañadas y perdieron su capacidad enzimática.

Recientemente, Kasim y Edwards (1998) han observado que las materias primas vegetales procesadas tienen una mayor proporción de IP-5 e IP-4 sobre el total de P fítico que los ingredientes sin procesar. Dado que estos compuestos son hidrolizados más fácilmente en el tracto digestivo que el IP-6 (Edwards, 1993; Kemme, 1998), el aprovechamiento del P fítico podría mejorar con el tratamiento térmico. Sin embargo, Skoglund et al. (1997) y Edwards et al. (1999) demostraron que ni el granulado con vapor ni la extrusión aumentan los niveles de IP-5 e IP-4 en el pienso y que la utilización del P fítico en cerdos y broilers no resulta mejorada por el procesado.

4.- VALORACIÓN DEL CONTENIDO EN P UTILIZABLE DE LAS MATERIAS PRIMAS

Existen numerosos métodos para valorar la utilización del P de los alimentos por las distintas especies animales. Los primeros sistemas de valoración aceptaban que la disponibilidad del P de las materias primas de origen vegetal era del 30-35% en aves y porcino y del 100% en rumiantes y conejos. El sistema se basaba en considerar para todos los vegetales un contenido en P fítico del 70% y en admitir que como tal no podía ser asimilado por monogástricos no coprófagos. Paralelamente, estos sistemas asumían que el aprovechamiento del P para las materias primas de origen animal y los fosfatos minerales era del 100%. Teniendo en cuenta el amplio rango de variación del contenido en P fítico de las

materias primas vegetales (0 a 90%; De Groot, 1990), tal simplificación resultaba sin duda excesiva. La publicación de numerosos resultados y la inclusión de los valores de P fítico en las tablas de valoración de alimentos en los últimos años (NRC, 1994; CVB, 1998; SETNA, 1998; FEDNA, 1999) permiten disponer hoy día de estimaciones más precisas del contenido en P no fítico de las materias primas.

Por otro lado, la existencia de actividad fitásica en ciertos ingredientes vegetales y las diferencias en el aprovechamiento digestivo del P dietético entre aves y cerdos han obligado a los científicos a diseñar métodos empíricos, basados en ensayos dosis-respuesta, para valorar la utilización del P consumido por el animal.

Un factor importante a considerar en estos ensayos es el parámetro elegido para evaluar la respuesta, el cual debe ser suficientemente sensible a variaciones en el aporte de P de la dieta. Dado que el 80% del P del organismo se almacena en el tejido óseo, la elección de parámetros relacionados con el desarrollo de este tejido (contenido en cenizas o resistencia del hueso a la rotura) parece apropiada. Además, las necesidades en P para conseguir la máxima mineralización ósea son mayores que las correspondientes a óptimos crecimientos o índices de conversión, lo que permite utilizar dietas experimentales con niveles de P más próximos a los utilizados en la práctica y aumentar la precisión de las estimaciones. En aves, la consistencia ósea se estima valorando el contenido en cenizas de la tibia. En algunos casos, por su fácil ejecución, se ha recomendado su evaluación en el pico o en los dedos (Mendez et al., 1998) aunque la precisión de las medidas es mayor cuando se usa la tibia (Ammermam, 1995). En cerdos la complejidad de las medidas es mayor y los huesos generalmente evaluados son el 3er y el 4º metacarpos y metatarsos (Cromwell, 1992; Kornegay, 1996).

Otro de los parámetros elegidos para valorar la utilización del P dietético es la digestibilidad, que depende fundamentalmente de los ingredientes utilizados y, en menor medida, de la forma de presentación y del valor nutritivo de la mezcla. En animales que consumen niveles de P apropiados a sus necesidades metabólicas, una alta proporción (85-98%) del P digerido es retenido en el organismo (Vipperman et al., 1974). Por el contrario, cuando los niveles de P absorbido superan a las necesidades, se pone en marcha un mecanismo de control homeostático que incrementa la excreción del P en la orina. La utilización del P está, por tanto, estrechamente relacionada con la digestibilidad cuando se determina en animales que consumen niveles de P reducidos y lo más cercanos posible a sus necesidades metabólicas (Dellaert et al., 1990).

La mayor parte de los datos existentes sobre el aprovechamiento del P de las materias primas en aves y cerdos han sido determinados utilizando uno de los siguientes métodos experimentales:

a) Método de la relación entre pendientes (“slope-ratio”):

Los animales reciben cantidades crecientes de P del alimento cuya disponibilidad se pretende determinar y se evalúa la respuesta con parámetros relacionados con la mineralización ósea. La disponibilidad del P de la materia prima objeto de estudio se estima

por la relación (pendiente) entre el P retenido y el P digerido y se define respecto a la disponibilidad del P de una fuente elegida como patrón a la que se asigna una disponibilidad del 100% (Cromwell, 1992; Littell et al., 1995). La fuente de P normalmente utilizada como referencia es el fosfato monosódico o el monocálcico.

b) Método de balance digestivo (digestibilidad aparente):

Se basan en determinar la digestibilidad del P utilizando una dieta basal de bajo contenido en P a la que se incorpora el ingrediente a valorar (Düngelhof et al., 1994; Jongbloed et al., 1996). El contenido en P digestible del alimento testado se define como la diferencia entre el consumo total de P y la cantidad de P excretada en heces (ensayos con cerdos) o en heces y orina (ensayos con aves) y se expresa como porcentaje del total de P consumido. Para minimizar las pérdidas de P en orina en los ensayos con aves se utilizan niveles bajos de P en las dietas experimentales (Van der Klis y Verteegh, 1996). Los valores de P digestible obtenidos son pues equivalentes a P retenido.

En ambos métodos se establecen unos niveles fijos de Ca y P en las dietas experimentales sea cual sea el ingrediente a valorar y siempre inferiores a las necesidades del animal. En estas condiciones la relación dosis-respuesta en los ensayos “slope-ratio” es lineal y el contenido en P de las heces en las pruebas de digestibilidad corresponde al P no absorbido. En este último caso se admite que el contenido en P endógeno de las heces es constante e independiente del tipo de ingredientes de la dieta.

Las tablas de composición de alimentos actuales valoran el aporte de P utilizable para aves y cerdos utilizando distinta terminología. Así, las Tablas del INRA (1989) y del NRC (1998) se refieren a P disponible, las del NRC (1994) a P no fítico y las del CVB (1998) a P digestible. El término elegido pretende, no siempre con éxito, reflejar el método utilizado para su determinación. Así, el término disponibilidad hace referencia a que han sido determinados mediante ensayos “slope-ratio” y son, por tanto, valores relativos obtenidos en relación a una fuente de P a la que se asigna arbitrariamente un valor de disponibilidad del 100%. Por el contrario, el P digestible indica valores absolutos determinados mediante ensayos de digestibilidad aparente. Ambos términos pueden relacionarse multiplicando los valores de P disponible por la digestibilidad del P de la fuente elegida como referencia para expresar la disponibilidad. A efectos prácticos, si aplicamos un factor de corrección de 0,9 (correspondiente a la digestibilidad del P para el fosfato monosódico) a los valores de P disponible, obtenemos con cierta precisión su equivalencia en términos de P digestible.

Para facilitar la comprensión, en el cuadro 7 se indican los métodos y terminología utilizada por las diversas fuentes para valorar el P utilizable por el animal. En los cuadros 8, 9 y 10 figuran los valores de utilización del P en aves y cerdos estimados a partir de los datos de P total y P no fítico/disponible/digestible que aparecen en las tablas publicadas por distintos organismos.

Cuadro 7.- Métodos para determinar la utilización del P contenido en las materias primas.

Fuente	Unidad	Especie	Método de determinación	Referencias
INRA (1989)	P disponible	Aves	Recopilación de datos bibliográficos existentes sobre la disponibilidad del P determinada por ensayos “slope-ratio”. Para los alimentos que no hay datos se estima como un 30% del P total. Fuente de referencia: fosfato monosódico	INRA (1989)
NRC (1994)	P no fítico	Aves	Determinación analítica del contenido en P y en P fítico de los ingredientes vegetales. El P no fítico se calcula por diferencia. P no fítico = P total – P fítico.	NRC (1994)
NRC (1998)	P disponible	Cerdos	Ensayos “slope-ratio” donde los parámetros evaluados son el contenido en cenizas o la resistencia de los huesos a la rotura. Fuente de referencia: fosfato monosódico o fosfato monocálcico	Cromwell (1992) NRC (1998)
CVB (1998)	P digestible (o retenido)	Aves (broilers)	Digestibilidad aparente $P \text{ digestible} = \frac{P \text{ ingerido} - P \text{ (heces+orina)}}{P \text{ ingerido}}$ Dietas experimentales: 1,8 g P digestible/kg y 5 g de Ca/kg para minimizar pérdidas en orina. Duración del ensayo: 3-4 semanas Medida cuantitativa del consumo y recogida de excretas en los días 21 a 24.	Van der Klis y Versteegh (1996) Jongbloed et al., (1996)
CVB (1998)	P digestible	Cerdos	Digestibilidad aparente $P \text{ digestible} = \frac{P \text{ ingerido} - P \text{ heces}}{P \text{ ingerido}}$ Condiciones experimentales: - Para alimentos de origen vegetal: Dietas: 1,6 g P digestible/kg; 5 g de Ca/kg Cerdos de 45-110 kg - Para alimentos de origen animal y fosfatos: Dietas: 2,0 g P digestible/kg; 7,5 g de Ca/kg Lechones destetados de 28-33 d de edad. Duración del ensayo: 4-5 semanas Recogida de muestras en 3ª, 4ª y 5ª semanas	Jongbloed y Kemme (1990b) Dellaert et al. (1990)

Cuadro 8.- Comparación de los valores de utilización del P (%) en materias primas de origen vegetal según distintas fuentes.

	AVES			CERDOS	
	INRA (1994) P _{disponible} ¹	NRC (1994) P _{no fitico}	CVB (1998) P _{digestible}	NRC (1998) P _{disponible} ²	CVB (1998) P _{digestible}
Avena	24	19	50	22	27
Cebada	49	47	38 (43) ³	30	30 (39) ³
Centeno	50	19	38 (48) ³	-	25 (48) ³
Trigo	53	35	38 (48) ³	50	26 (48) ³
Triticale	55	33	-	46	26 (48) ³
Maíz	19	29	30	14	20
Sorgo	17	-	30	20	17
Salvado de trigo	40	35	27 (37) ³	41	20 (30) ³
Germen maíz	30 ⁴	-	40	12	20
Gluten maíz	30 ⁴	28	40	59	20
DDGs maíz	86	54	-	77	20
Cilindro arroz	10	15	-	25	14
Altramuz	20	-	49	-	50
Guisantes	31	-	42	-	45
Habas	25	-	44	-	37
Soja integral	19	-	41	-	39
Hna soja 44	16	42	42	31	39
Hna soja 47	14	35	42	23	39
Hna colza	20	26	33	27	27
Hna girasol	17	15	27	3	15
Hna algodón	10	23	30	1	24
Hna cacahuete	10	21	38	12	28
Mandioca	33	-	66	-	10
Melaza caña	50	-	50	-	50
Melaza remolacha	50	-	50	-	50
Pulpa cítricos	30 ⁴	-	-	-	50
Pulpa remolacha	30 ⁴	-	-	-	50
Hna alfalfa	88	100	75	100	50
Cascarilla soja	18	-	-	-	15

¹ Disponibilidad en relación al fosfato monosódico. ² Disponibilidad en relación al fosfato monosódico o monocálcico. ³ Valores entre paréntesis incluyen la actividad fitásica endógena. ⁴ Estimados como 30% del P total.

Cuadro 9.- Comparación de los valores de utilización del P (%) en materias primas de origen animal según distintas fuentes.

	AVES		CERDOS	
	INRA (1994)	CVB (1998)	NRC (1998)	CVB (1998)
	P _{disponible} ¹	P _{digestible}	P _{disponible} ²	P _{digestible}
Hna carne	80	62	90 ³	74
Hna pescado	85	74	94	77
Hna sangre	88	80	92	80
Hna plumas	86	70	31	75
Leche descremada	-	-	91	92
Suero desecado	-	80	97	82

^{1,2} Ver cuadro 8.

³ En algunas harinas de carne los valores de disponibilidad pueden estar en torno al 70%.

Cuadro 10.- Comparación de los valores de utilización del P (%) de fosfatos minerales según distintas fuentes.

	AVES		CERDOS		
	INRA (1994)	CVB (1998)	INRA (1994)	NRC (1998)	CVB (1998)
	P _{disponible} ¹	P _{digestible}	P _{disponible} ¹	P _{disponible} ²	P _{digestible}
Fosfato monocálcico	100	85	100	100	83 (82,5-84,2)
Fosfato bicálcico .0H ₂ O	85 (80-87)	55	-	-	64 (62,7-65,4)
Fosfato bicálcico .2H ₂ O	93 (85-97)	78	90 (70-98)	95-100	70 (68,8-70,7)
Fosfato mono-bicálcico	95 (90-100)	79	-	-	82 (74,0-87,4)
Fosfato mono o bisódico	98 (95-100)	91	100	100	87-89
Fosfato monoamónico	-	-	95	100	-
Acido fosfórico	-	-	100	-	-
Fosfato Ca-Mg-Na	98	-	-	-	81-85
Fosfato roca	60 (40-80)	-	-	40-60	-
Fosfato roca defluorinado	85 (80-90)	-	90	85-95	-
Hna huesos	85 (80-90)	62	80 (60-95)	80-90	74

^{1,2} Ver cuadro 8.

4.1.- Materias primas de origen vegetal

La utilización del P alcanza el 50-55% en cereales y subproductos con actividad fitásica endógena (trigo, centeno, triticale). En el maíz y sorgo, cuya actividad fitásica es reducida, los valores son más bajos y en torno al 14-20%. La avena muestra un valor de P digestible para aves superior al resto de cereales (CVB, 1998), pero la razón se desconoce. Temperaturas superiores a los 75 °C destruyen la estructura de las enzimas contenidas en el grano y reducen drásticamente su actividad fitásica (CVB, 1998). En este caso, las diferencias en cuanto al contenido en P digestible de los distintos cereales son prácticamente nulas.

El CVB (1998) da la misma digestibilidad del P (20% en cerdos, 40% en aves) para todos los subproductos del maíz con independencia del tipo de procesado utilizado para su obtención. Las restantes tablas asignan valores más altos de disponibilidad a los subproductos obtenidos por vía húmeda (DDGS y gluten feed) que a los obtenidos por vía seca (germen).

Los valores de P digestible para las leguminosas grano son elevados (40-50%) y superiores a los de los cereales, debido a su menor concentración en P fítico. El P de la harina de soja es sólo moderadamente disponible para aves (14-16%; INRA, 1989) y cerdos (23-31%; NRC, 1998) mientras que los valores de P digestible del CVB (1998) son proporcionalmente más elevados (42% para aves y 39% para cerdos) y no distinguen entre sojas del 44 y del 47% de proteína. Estas diferencias entre digestibilidad y disponibilidad del P de la soja, especialmente en el caso de aves, no son fáciles de entender. Como se aprecia en el cuadro 8 los valores de disponibilidad del INRA (1989) son próximos a los del NRC (1994) excepto para los ingredientes que contienen fitasas endógenas. Basándonos en el contenido en P no fítico de la soja propuesto por el NRC, 42 y 35% del P total para los tipos 44 y 47% respectivamente, y asumiendo que su aprovechamiento es de al menos un 80%, la disponibilidad sería de alrededor al 35%, valor próximo al propuesto por el CVB (1998). Parece, por tanto, que el INRA (1989) subestima el aporte de P disponible de la soja respecto a otras fuentes. Además, para el resto de harinas de oleaginosas, a excepción de la harina de cacahuete, las diferencias entre fuentes para las aves no son tan grandes. Para cerdos cabe destacar los bajos valores de disponibilidad asignados por el NRC (1998) para las harinas de girasol, algodón y cacahuete. La escasa importancia de estas fuentes de proteína en Estados Unidos así como diferencias en el contenido en P fítico de las variedades de oleaginosas o en el proceso de obtención podrían explicar al menos parcialmente las diferencias entre fuentes.

Por último destacar que raíces, tubérculos, hojas y tallos están prácticamente desprovistos de P fítico ya que éste tiende a acumularse en el grano. Por tanto, ingredientes tales como alfalfa y mandioca deberían presentar altos niveles de utilización del P total tanto para aves como para porcino. Sin embargo, resalta la gran diversidad de los datos a este respecto. Así, el CVB (1998) propone para la mandioca una digestibilidad en aves del 60% y en porcino de sólo un 10%, valores muy inferiores a lo que cabría esperar en base a su contenido en P fítico. Para la alfalfa deshidratada, el INRA (1989) y el NRC (1994, 1998) dan una disponibilidad cercana al 100% para aves y porcino y el CVB (1998) propone una digestibilidad del 75% en aves y del 52% en porcino. Estos últimos valores son en cualquier caso muy superiores a los tabulados para la mandioca.

Para el conjunto de los vegetales las diferencias entre disponibilidad del P entre aves y cerdos no son grandes, lo que justifica en parte la práctica habitual de utilizar el mismo valor para ambas especies. Por el contrario, los valores de P digestible son más altos en aves que en cerdos especialmente para cereales y sus subproductos que, como se recordará, poseen una proporción de P fítico sobre P total mayor que el resto de los vegetales. Los bajos niveles de Ca y P de las dietas utilizadas en las determinaciones de digestibilidad del P en aves (cuadro 7) favorecen un aprovechamiento máximo del P fítico de la dieta (Van der Klis et al., 1994; Van der Klis y Versteegh, 1996) y explican las grandes diferencias observadas entre especies.

4.2.- Materias primas de origen animal: harinas y productos lácteos

La utilización del P es siempre mayor en alimentos de origen animal que vegetal, ya que la mayor parte del P está en forma inorgánica. Los valores más altos corresponden a los productos lácteos y la sangre sin excesivas diferencias entre disponibilidad y digestibilidad. En el caso de las harinas de carne y pescado se observan grandes discrepancias entre fuentes, probablemente debidas a los distintos procesos de fabricación utilizados (Jongbloed et al., 1993). En este sentido De Groote (1990) señala que una molienda fina del material a evaluar puede resultar en una mejora del aprovechamiento del P de entre un 15 a un 20%.

4.3.- Materias primas de origen mineral: fosfatos

El aprovechamiento del P de las fuentes minerales está directamente relacionado con su solubilidad en el medio ácido digestivo (De Groote, 1990). Así, todas las fuentes coinciden en asignar valores superiores de utilización del P a los fosfatos monosódicos o monocálcicos que a las sales cálcicas o magnésicas y a las formas hidratadas frente a las anhidras. Cuando los valores de disponibilidad se multiplican por el factor de corrección de 0,9, los valores propuestos por INRA (1989) y NRC (1998) son similares a los del CVB (1998) para los fosfatos monosódicos, monocálcicos y fosfatos naturales. Cabe destacar, no obstante, los bajos valores asignados al fosfato bicálcico por el CVB (1998) sin explicación aparente. Para la forma anhidra las diferencias son de hasta 25 ud. porcentuales en aves y algo menores para la forma dihidratada (6 y 12 ud. porcentuales en aves y cerdos, respectivamente) respecto a los valores del INRA (1989) y NRC (1998).

5.- MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LAS NECESIDADES DEL ANIMAL

Los niveles de P recomendados en dietas de cerdos y aves por los diferentes organismos (WPSA, 1984, 1985; INRA, 1989; NRC, 1994, 1998; CVB 1994, 1996) varían notablemente. Parte de esta variación se debe a diferencias entre países en cuanto a los ingredientes utilizados, niveles de energía de las dietas, manejo de la alimentación, genotipo de los animales, método de evaluación y criterios utilizados para establecer las recomendaciones (necesidades mínimas, requerimientos o recomendaciones prácticas con un margen variable de seguridad).

Los métodos más utilizados para estimar las necesidades en P de los animales son el empírico y el factorial. El primero se basa en ensayos del tipo dosis/respuesta. Las dietas experimentales se elaboran con ingredientes habituales en condiciones prácticas y las recomendaciones se expresan como la concentración del mineral que optimiza el parámetro de respuesta elegido. El método factorial define las necesidades de P como la suma de la cantidad de P endógeno excretado en heces y orina (necesidades de mantenimiento) y de la acumulación de P en cada tipo de producción (ganancia de peso, tejidos maternos y fetos, leche, huevos, etc). Los valores así obtenidos corresponden a las necesidades netas de P para cada tipo de producción y se expresan en g/d.

El método empírico presenta la ventaja de que la información se obtiene en animales bajo condiciones normales de producción. Sin embargo plantea problemas para la extrapolación de resultados a condiciones diferentes a las experimentales. Por otra parte, la concentración óptima determinada con el método empírico varía según el método estadístico utilizado para evaluar la respuesta y de acuerdo con el parámetro elegido (rendimientos productivos o máxima mineralización ósea) (De Groote, 1990; Gueguen y Perez, 1991; Ammerman, 1995).

En los apartados siguientes se comparan los niveles de Ca y P recomendados por distintas fuentes en unas condiciones prácticas españolas. A este respecto, cabe señalar que las necesidades de Ca se determinan con los mismos métodos utilizados para el P por la WPSA (1984, 1985), INRA (1989) y NRC (1994) pero en el caso del CVB (1994, 1196) se establecen a partir de una relación recomendada entre Ca y P digestible.

5.1.- Aves

En el cuadro 11 se comparan los principales métodos de valoración de las necesidades de P para aves (WPSA, 1984, 1985; INRA, 1989; NRC, 1994 y CVB, 1994). En todos los casos, el criterio base para establecer las recomendaciones es la optimización de los rendimientos productivos: ganancia de peso e índice de conversión en broilers y producción de huevos y solidez de la cáscara en ponedoras. Sin embargo, las fuentes citadas difieren en cuanto a la unidad utilizada para expresar las necesidades (P no fítico, P disponible o P digestible) y en que los aportes recomendados sean niveles mínimos o prácticos (es decir, incluyendo un margen de seguridad).

Las recomendaciones de P establecidas por dichos organismos para distintos tipos de aves, expresadas como porcentaje de la dieta, se muestran en el cuadro 12. Estos valores se han particularizado para concentraciones energéticas estándar en condiciones prácticas españolas.

Para broilers y pollitas de recría, los valores recomendados por WPSA (1985), INRA (1989) y NRC (1994) son similares, aunque están expresados con unidades diferentes. Las recomendaciones del CVB (1994) son inferiores ya que no incluyen las pérdidas endógenas en heces y orina (estimadas en 14 mg P/kg PV y d) y están expresadas como aportes mínimos para cubrir exactamente las necesidades.

Las recomendaciones para ponedoras de WPSA (1984) e INRA (1989) no diferencian entre estirpes y son ligeramente mayores a las del NRC (1994), si bien estas últimas no incluyen margen de seguridad. Las normas del CVB (1994) proponen niveles próximos a los establecidos por el NRC (1994) ya que, en este caso, consideran que existen unas necesidades de mantenimiento para producción de huevos (2,4 mg de P/g de huevo y d), correspondientes al P excretado en heces procedente de la movilización ósea durante la puesta.

Las recomendaciones propuestas por las distintas fuentes aplicando las correcciones correspondientes a las unidades utilizadas (P no fítico o P disponible vs P digestible) son similares. Sin embargo, si se comparan las recomendaciones en términos de P total en las dietas, se observan diferencias notables entre fuentes. El uso de P disponible en formulación parece en principio preferible al uso de P no fítico, ya que el primero tiene en cuenta las diferencias de actividad fitásica en los ingredientes y de aprovechamiento digestivo del P contenido en los alimentos. Como se aprecia en el cuadro 8, la disponibilidad del P en el trigo es 3 veces superior a la del maíz o a la de la harina de soja, pero si se comparan en base a su contenido en P no fítico, su valor relativo es similar. Dado que en condiciones prácticas españolas los piensos de aves se ofrecen en su mayoría granulados, la actividad fitásica endógena de los vegetales resulta destruida en gran parte y, por tanto, la valoración como P disponible sobreestima el aporte de P utilizable de los ingredientes ricos en fitasas. En este sentido, los valores propuestos por el CVB (1998) presentan la ventaja de ofrecer valores diferenciados para alimentos que hayan sufrido o no tratamiento térmico.

5.2.- Porcino

Las principales características de los métodos actuales de valoración de las necesidades de P se resumen en el cuadro 13. Como puede apreciarse, existen diferencias tanto en las unidades como en las bases para establecer las recomendaciones (rendimientos productivos óptimos en INRA (1989) y NRC (1998) frente a máxima mineralización ósea en CVB (1996). En el cuadro 14 se presentan las necesidades diarias de Ca y P calculadas para distintos tipos de cerdos. A partir de estos datos y de los consumos medios de pienso en condiciones prácticas, se han estimado las concentraciones dietéticas de Ca y P del cuadro 15.

Las recomendaciones de P total para cerdos en crecimiento-cebo y cerdas gestantes estimadas por el INRA (1989) y el NRC (1994) son similares. Para cerdas lactantes, en cambio, las discrepancias son mayores. Parte de las diferencias pueden ser debidas a que el NRC (1994) recomienda un único nivel de P para gestantes y lactantes con independencia del peso vivo, el nº del parto o el tamaño de la camada. Por el contrario, las necesidades calculadas por el método factorial del INRA (1989) son variables en función de estos parámetros.

Los valores de P digestible recomendados por el CVB (1996) son inferiores a los de P disponible del NRC (1998), pero a diferencia de lo comentado en aves, no pueden ser explicados sólo por diferencias en la forma de expresar las recomendaciones. El método factorial propuesto por el CVB (1996) incluye como margen de seguridad unas necesidades

de mantenimiento (7 mg P/kg PV) para considerar que los valores de digestibilidad del P de las materias primas han sido obtenidos en condiciones experimentales que aseguran un máximo de absorción. A partir de las pérdidas endógenas en heces (10 mg P/kg PV) estimadas por Gueguen y Perez (1981), Jongbloed y Everts (1992) señalan que la diferencia entre las necesidades de P disponible y P digestible es muy pequeña (3 mg P/kg PV, es decir entre 0,05-0,10 g/kg para cerdos en cebo y cerdas en lactación y 0,25 g/kg en cerdas gestantes).

Las mayores discrepancias entre las recomendaciones de P de ambos organismos se observan durante las primeras fases del crecimiento del lechón. A partir de los 50 kg de PV en cerdos en cebo y, también en cerdas lactantes, las recomendaciones son similares. Esto se debe a que el método factorial propuesto por el CVB (1996) parte de un contenido más bajo de P en la ganancia de peso, basado en las estimaciones de Jongbloed y Everts (1992) para cerdos con un tipo “normal” de crecimiento (% de músculo en la canal al sacrificio menor del 54%). En el cuadro 16 se resumen las bases de cálculo de las necesidades de crecimiento del CVB (1996) y del INRA (1989).

Cuadro 16.- Comparación de las necesidades netas de P del cerdo en crecimiento según pesos (g de P/kg ganancia de peso).

Referencia	Tipo de Crecimiento	Peso vivo (kg)			
		< 20	20-50	50-100	≥ 100
INRA (1989)	Normal	7,00	6,00	5,50 – 6,00	5,50
Jongbloed y Everts (1992)	Normal	5,20	5,06	4,80	4,65
	Muy magro	5,45	5,31	5,05	4,90

Parte de estas diferencias pueden ser explicadas en base al genotipo o a la velocidad de crecimiento de los animales utilizados en los ensayos experimentales de sacrificio. Ni el INRA (1989) ni el NRC (1998) han modificado sus recomendaciones desde sus anteriores ediciones en 1984 y 1988, respectivamente. Por su parte, las estimaciones de Jongbloed y Everts (1992) están basadas en ensayos de sacrificio con cerdos de 1 a 110 kg de PV realizados entre los años 1960 y 1985 y considerando exclusivamente los datos que aseguraban una mineralización ósea máxima del incremento de peso. Por tanto, según el CVB (1996) pueden ser considerados actualmente como un tipo normal de crecimiento.

6.- CONCLUSIONES

Durante la última década los minerales y, especialmente el P, han cobrado especial importancia debido a problemas de contaminación medioambiental en áreas de intensa actividad ganadera. La excreción de P en estas zonas supera la cantidad que puede ser extraída del terreno por los cultivos lo que puede provocar eutrificación de las aguas. Para reducir la excreción, los niveles de P en las dietas deben estar balanceados con las necesidades del animal para cada estado de producción. Esto implica un conocimiento más

preciso del aprovechamiento del P contenido en los ingredientes de los piensos. Numerosos factores afectan a la utilización del P como son la relación Ca:P, el nivel de vitamina D₃, los tratamientos térmicos y, probablemente, la adición de ácidos orgánicos. La incorporación de fitasas microbianas en piensos de cerdos y aves para aumentar el aprovechamiento del P vegetal es una práctica habitual en muchos países. Existe una gran confusión en la terminología utilizada para expresar el valor nutritivo del P en la formulación de aves y cerdos. Además distintos términos suponen diferentes sistemas de evaluación de las necesidades del animal. Los criterios para establecer las recomendaciones de los distintos organismos deben ser definidos con más exactitud. A partir de un mayor conocimiento del valor nutritivo del P, los márgenes de seguridad utilizados en formulación práctica podrían reducirse.

6.- REFERENCIAS

- AMMERMAN, C.B. (1995) En: *Bioavailability of nutrients for animals: amino acids, minerals and vitamins*. Eds. C.B. Ammerman, D.H. Baker y A.J. Lewis. Academic Press Inc. pp 83-94.
- AMBRECHT, H.J. (1987) *Nutr. Res.* 7: 1169-1177.
- ANDERSON, P.A. (1985) En: *Digestibility and amino acid availability in cereals and oilseeds*. Eds. G.W. Finley y D.T. Hopkins. American Association of Cereal Chemists, St. Paul. Minneapolis. pp 31-46.
- AOAC (1990) *Official Methods of Analysis*. 15th ed. Association of Official Analytical Chemists Inc., Arlington. Virginia.
- AXE, D.E. (1993) *Macrominerals*. IMC-Agrico. Feed Ingredients Division, Mundelein. Illinois.
- BALLAM, G.C., NELSON, T.S. y KIRBY, L.K. (1985) *Nutr. Rep. Int.* 32: 909-913.
- BAYLEY, H.S. y THOMSON, R.G. (1969) *J. Anim. Sci.* 28: 484-491.
- BAYLEY, H.S., POS, J. y THOMSON, R.G. (1975) *J. Anim. Sci.* 40: 857-863.
- BOLING, S.D., PARSONS, C.M. y BAKER, D.H. (1999) *Poultry Sci.* 78 (1): 64 (Abst.)
- BOS, K.D., VERBEEK, C., VAN EEDEN, C.P.H., SLUMP, P. y WOLTERS, M.G.E. (1991) *J. Agric. Food Chem.* 39: 1770-1773.
- CHESSON, A. (1987) En: *Recent Advances in Animal Nutrition*. Eds. W. Haresign y D.J.A. Cole. Butterworths, London. pp. 71-89.
- COSGROVE, D.J. (1980) En: *Inositol phosphates: their chemistry, biochemistry and physiology*. Elsevier Science Publishing, Co., New York.
- CROMWELL, G.L. (1992) *Pig News Inf.* 13 (2): 75N-78N.
- CVB (1994) *Voorlopig systeem opneembaar fosfor pluimvee. (Interim System Available Phosphorus for poultry)*. Centraal Veevoeder Bureau, Lelystad, Países Bajos.
- CVB (1996) *Verkorte tabel: Gegevens over chemische samenstelling, verteerbaarheid en voederwaarde van voedermiddelen*. Centraal Veevoeder Bureau, Lelystad, Países Bajos.
- CVB (1998) *Veevoedertabel: Gegevens over chemische samenstelling, verteerbaarheid en voederwaarde van voedermiddelen*. Centraal Veevoeder Bureau, Lelystad, Países Bajos.
- DAVIES, M.I. y MOTZOK, I. (1972) *Poultry Sci.* 51: 494-501.
- DE GROOTE, G. (1990) En: *VI Curso de Especialización FEDNA*. Madrid. 45 pp.
- DELLAERT, B.M., VAN DER PEET, G.F.V., JONGBLOED, A.W. y BEERS, S. (1990) *Neth. J. Agric. Sci.* 38: 555-566.
- DESHPANDE, S.S. y CHERIAN, M. (1984) *J. Food Sci.* 49: 516-519.

- DÜNGELHOEF, M., RODEHUTSCORD, M., SPIEKERS, H. y PFEFFER, E. (1994) *Anim. Feed Sci. Techn.* 49: 1-10.
- ECKOUT, W. y DE PAEPE, M. (1994) *Anim. Feed Sci. Techn.* 47: 19-29.
- EDENS, F.W., PARKHURST, C.R. y HAVENSTEIN, G.B. (1999) En: *Biotechnology in the feed industry*. Proc. Alltech's 15th Annual Symposium. Ed. T.P. Lyons y K.A. Jacques. Nottingham University Press, Reino Unido. pp: 491-510.
- EDWARDS, H.M. (1993) *J. Nutr.* 123: 567-577.
- EDWARDS, H.M. y BAKER, D.H. (1999) *Poultry Sci.* 78 (1): 113 (Abstr.).
- EDWARDS, H.M., CARLOS, A.B., KASIM, A.B. y TOLEDO, R.T. (1999) *Poultry Sci.* 78:96-101.
- EIDELSBURGER, V. (1998) En: *Recent Advances in Animal Nutrition*. Eds. P.C. Gransworthy y J. Wiseman. Nottingham University Press, Reino Unido. pp: 93-106.
- FEDNA (1999) *Normas FEDNA para la formulación de piensos compuestos*. Eds. C. de Blas, G.G. Mateos y P.G. Rebollar. Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal. Madrid.
- GIBSON, D.M. y ULLAH, A.B.J. (1990) En: *Inositol metabolism in plants*. Eds. D.J. Morre, W.F. Boss y F.A. Loewus. Wiley-Liss, New York. pp: 77-92.
- GRAF, E. (1986) En: *Phytic acid chemistry & applications*. Ed. E.Graf. Pilatus Press, Minneapolis. pp:1-21.
- GUEGUEN, L. y PEREZ, J.M. (1981) *Proc. Nutr. Soc.* 40: 273-278.
- HAN, Y.M., RONEKER, K.R., POND, W.G. y LEI, X.G. (1998) *J. Anim. Sci.* 76: 2649-2656.
- HARPER, A. F.; KORNEGAY, E.T. y SCHELL, T.C. (1997) *J. Anim. Sci.* 75: 3174-3186.
- HARTER-DENIS, J. (1999) En: *Biotechnology in the feed industry*. Proc. Alltech's 15th Annual Symposium. Ed. T.P. Lyons y K.A. Jacques. Nottingham University Press. pp: 511-522.
- HAUGH, H. y LANTZSCH, H.J. (1983) *J. Sci. Food Agric.* 34: 1423-1426.
- HERPOL, C. y VAN GREMBERGEN, G. (1967) *Ann. Biol. Anim. Biochem. Biophys.* 7: 33-41.
- HÖLER, D. y PALLAUF, J. (1993) *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 69: 132-134.
- HOPKINS, J.R., BALLANTYNE, A.J. y JONES, J.L.O. (1987) En: *Recent Advances in Animal Nutrition*. Eds. W. Haresign y D.W.A. Cole. Butterworths, London. pp: 39-46.
- HOPPE, P.P. (1992) *Review of the biological effects and the ecological importance of phytase in pigs*. BASF Fine Chemicals. 30 Edn. Use of Natuphos in pigs and poultry. Ludwigshafen, Alemania.
- INRA (1989) *Alimentation des animaux monogastriques*. 2nd. Ed. Institute National de la Recherche Agronomique, París.
- IRVING, G.C.J. (1980). En: *Phytate. Inositol phytates. their chemistry, biochemistry and physiology*. Ed. D.J. Cosgrove. Elsevier Scientific Publishers, Países Bajos. pp: 85-127.
- JOHNSTON, S.L. y SOUTHERN, L.L. (1999) *Poultry Sci.* 78 (Suppl. 1): 120.
- JONGBLOED, A.W. (1987) *Phosphorus in the feeding of pigs. Effect of diet on the absorption and retention of phosphorus by growing pigs*. PhD Thesis. Agricultural University of Wageningen. Países Bajos.
- JONGBLOED, A.W. y KEMME, P.A. (1990a) *Anim. Feed Sci. Techn.* 28:233-242.
- JONGBLOED, A.W. y KEMME, P.A. (1990b) *Neth. Agric. Sci.* 38:567-575.
- JONGBLOED, A.W. y EVERTS, P.A. (1992) *Neth. Agric. Sci.* 40:123-136.
- JONGBLOED, A.W., EVERTS, P.A. y KEMME, P.A. (1993) En: *Recent developments in pig nutrition 2*. Eds. D.J.A. Cole y W. Haresign. Nottingham University Press, Reino Unido. pp: 163-178.
- JONGBLOED, A.W., EVERTS, P.A. y KEMME, P.A. (1994) *Verteerbaar fosfornormen voor varkens. CVB - Documentation rapport n° 10*. Central Veevoederbureau, Lelystad, Países Bajos.
- JONGBLOED, A.W. y KEMME, P.A. (1997) En: *XIII Curso de Especialización FEDNA*. Eds. P. García, C. de Blas y G.G. Mateos, Madrid. pp: 191-201.

- JONGBLOED, A.W., VAN DER KLIS, J.D., KEMME, P.A., VERSTEEGH, H.A.J. y MROZ, Z. (1996) Proc. 47th European Association for Animal Production (EAAP), Lillehammer, Austria. pp:1-17.
- KASIM, A.B. y EDWARDS, H.M. (1998) *J. Sci. Food Agric.* 76: 1-19.
- KEMME P.A. (1998) *Phytate and phytases in pig nutrition*. PhD Thesis. Agricultural University of Wageningen, Países Bajos.
- KEMME, P.A., JONGBLOED, A.W., MROZ, Z. y BEYNEN, A.C. (1997) *J. Anim. Sci* 75: 2129-2138.
- KNUCKLES, B.L. (1988) *J. Food Sci.* 50: 250-252.
- KORNEGAY, E.T. (1996) En: *Nutrient management of food animals to enhance and protect the environment*. Ed. E.T. Kornegay. CRC Press, Inc., New York. pp: 277-302.
- KORNEGAY, E.T. (1999). En: *Biotechnology in the feed industry*. Proc. Alltech's 15th Annual Symposium. Ed. T.P. Lyons y K.A. Jacques. Nottingham University Press. Reino Unido. pp: 461-490.
- LATTA, M. y ESKIN, M. (1980) *J. Agric. Food Chem.* 28: 1313-1315.
- LEI, X.G., KU, P.K., MILLER, E.R., YOKOYAMA, M.T. y ULLREY, D.E. (1994) *J. Anim. Sci.* 72: 139-143.
- LI, D, CHE, X., WANG, Y., HONG, C. y THACKER, P.A. (1998) *Anim. Feed Sci. Techn.* 73: 173-186.
- LIEBERT, F., WECKE, C. y SCHÖNER, F.J. (1993) En: *Proc. 1st Symposium on Enzymes in Animal Nutrition*. Ed. C. Wenk y M. Boessinger. Karthause Ittingen, Suiza. pp: 202-205.
- LITTELL, R.C., LEWIS, A.J. y HENRY, P.R. (1995) En: *Bioavailability of nutrients for animals: amino acids, minerals and vitamins*. Eds. C.B. Ammerman, D.H. Baker y A.J. Lewis. Academic Press Inc. pp: 5-33.
- LIU, J., BOLLINGER, D.W., ZYLA, K., LEDOUX, D.R. y VEUM, T.L. (1998) *J. Anim. Sci.* 76: 808-813.
- MAENZ, D.D. y CLASSEN, H.L. (1998) *Poultry Sci.* 77: 557-563.
- MATEOS, G.G. y DE BLAS, C. (1998) En: *The nutrition of the rabbit*. Ed. C. de Blas y J. Wisseman. CAB International, University Press, Cambridge. pp: 145-175.
- MATEOS, G.G. y GARCÍA, M. (1998) En: *XIV Curso de Especialización FEDNA*. Eds. P. García, C. de Blas y G.G. Mateos. Expoaviga 98. Fira de Barcelona. pp: 173-190.
- McDOWELL, L.R. (1992) En: *Minerals in Animal and Human Nutrition*. Ed. L.R. McDowell. Academic Press, New York. pp: 27-77.
- McELROY, S.T., LINK, E.J., DOWDY, R.P., ZINN, K.R. y ELLERSIECK, M.R. (1991) *J. Nutr.* 121: 492-497.
- MENDEZ, A., DALE, N. y GARCÍA, M. (1998) *Poultry Sci.* 77 (Suppl. 1): 152.
- MORAN, E. (1982) *Comparative nutrition of fowl and swine: the gastrointestinal systems*. Ed. E. Moran. University of Guelph, Ontario, Canadá.
- NRC (1994) *Nutrient requirements of poultry*. 9th revised ed. National Research Council, National Academy Press, Washington D.C.
- NRC (1998) *Nutrient requirements of swine*. 10th revised ed. National Research Council, National Academy Press, Washington D.C.
- NÄSI, M., PIRONEN, J. y PARTANEN, K. (1999) *Anim. Feed. Sci. Techn.* 77: 125-137.
- NELSON, T.S. (1967) *Poultry Sci.* 46: 862-871.
- PASTERNAK (1903) *Compt. Rend.* 137: 202.
- POINTILLART, A. (1993). En: *Proc. 1st Symposium on Enzymes in Animal Nutrition*. Eds. C. Wenk y M. Boessinger, Kartause Ittingen, Switzerland. pp: 192-199.
- POINTILLART, A. (1994) *INRA Prod. Anim.* 7: 29-39.
- PONS, W.A. Y GUTHRIE, J.D. (1946) *Ind. Engineer. Chem.* 18: 184-186.

- QUIAN, H., KORNEGAY, E.T. Y DENBOW, D.M. (1996a) *Poultry Sci.* 75: 69-81.
- QUIAN, H., KORNEGAY, E.T. Y CONNER, D.E. (1996b) *J. Anim. Sci.* 74: 1288-1297.
- QUIAN, H., KORNEGAY, E.T. Y CONNER, D.E. (1997) *Poultry Sci.* 76: 37-46.
- RAVINDRAN, V., BRYDEN, W.L., y KORNEGAY, E.T. (1995) *Poultry Av. Biol. Rev.* 6: 125-143.
- RAVINDRAN, V. CABHUG, S., RAVINDRAN, G. y BRYDEN, W.L. (1999) *Poultry Sci.* 78: 699-706.
- REDDY, N.R., SATHE, S.K. y SALUNKHE, D.K. (1982) *Adv. Food Res.* 28: 1-92.
- RODEHUTSCORD, M. (1998) En: *Proc. BASF Technical Symposium*. Raleigh, NC. pp: 32-45.
- SAUVEUR, B. (1989) *INRA Prod. Anim.* 2: 343-351.
- SEBASTIAN, S., TOCHBURN, S.P., CHAVEZ, F.R. y LAGUE, P.C. (1997) *Poultry Sci.* 76: 1760-1769.
- SETNA (1998) *Tablas de composición de materias primas*. Grupo SETNA, Madrid.
- SIMONS, P.C.M., VERSTEEGH, H.A.J., JONGBLOED, A.W., KEMME, P.A., SLUMP, P., BOS, K.D., WOLTERS, M.G.E., BENDEKER, R.F. y VERSCHOOR, G.J. (1990) *Br. J. Nutr.* 64: 525-540.
- SINGH, M. y KRIKORIAN, A.D. (1982) *J. Agric. Food Chem.* 30: 799-800.
- SKOGLUND, E., LAUEN, T. y SANDBERG, A. (1997) *Can. J. Anim. Sci.* 77: 471-477.
- VAN DER KLIS, J.D., VERSTEEGH, H.A.J. y SCHEELE., C.W. (1994) En: *Proc. BASF Technical Symposium during the Carolina Poultry Nutrition Conference*, Charlotte, pp: 113-128.
- VAN DER KLIS, J.D. y VERSTEEGH, H.A.J. (1996) En: *Recent Advances in Animal Nutrition*. Eds. P.C. Garnsworthy, J. Wiseman y W. Haresign. Nottingham University Press, Reino Unido. pp: 71-83.
- VAN LOON, A.P.G.M., WYSS, M. MITCHELL, D., TOMSCHY, A., LOHMAN, M., KOSTREWA, D., VOGEL, K. y PASAMONTES, L. (1997) Abstracts of the Symposium on the Biochemistry of phytate and phytases. Copenhagen, Dinamarca. pp: 25-28.
- VIPPERMAN, F.E., PEO, E.R. y CUNNINGHAM, P.J. (1974) *J. Anim. Sci.* 38: 758-765.
- WODZINSKI, R.J. y ULLAH, A.H. (1995) *Adv. Appl. Microbiol.* 42: 263-302.
- WPSA (1984) *World Poultry Sci. J.* 40: 183-187.
- WPSA (1985) *World Poultry Sci. J.* 41: 252-258.
- YI, Z y KORNEGAY, E.T. (1996) *Anim. Feed Sci. Techn.* 61: 361-368.