

01694



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN Y DE LA
SALUD ANIMAL

FACTORES QUE INCIDEN EN LA TASA DE LA DIGESTIÓN INTESTINAL
DE ÁCIDOS GRASOS Y SU RELACIÓN CON EL VALOR NUTRIMENTAL
DE LAS GRASAS SUPLEMENTADAS EN DIETAS PARA BOVINOS DE
ENGORDA

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS

PRESENTA

ALEJANDRO PLASCENCIA JORQUERA

TUTOR:
RICHARD AVERY ZINN

COMITÉ TUTORAL:
CARLOS GUSTAVO VÁZQUEZ PELÁEZ
GERMÁN DAVID MENDOZA MARTÍNEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Índice

Índice de Cuadros.....	i
Índice de Figuras.....	ii
Introducción.....	1
Revisión de Literatura.....	5
Fuentes y tipos de grasas.....	6
Grasa amarilla.....	6
Sebo.....	8
Grasas mezcladas.....	8
Extractos de jabón y otras fuentes grasas altas en ácidos grasos libres.....	9
Digestión de lípidos en rumiantes.....	9
Digestión ruminal.....	9
Digestión Intestinal.....	13
Factores que inciden en la digestibilidad de las grasas.....	15
Ácidos grasos libres (AGL).....	15
Proporción de insaturados:saturados.....	17
Métodos de adición.....	21
Nivel de inclusión.....	24
Conclusiones.....	34
Literatura Citada.....	35
Experimento I.....	43
Abstract.....	44
Introduction.....	45
Materials and Methods.....	46
Results and Discussion.....	47
Implications.....	52
Literature Cited.....	53
Experimento II.....	63
Abstract.....	64
Introduction.....	65
Materials and Methods.....	66
Results and Discussion.....	67
Implications.....	71
Literature Cited.....	71

Índice de Cuadros

Revisión de Literatura

Cuadro 1. Composición química promedio de las principales grasas comerciales utilizadas en engorda de ganado.....	7
Cuadro2. Comparación del Contenido de EN _m y EN _g (Mcal/kg) de grasas alimenticias estimado por medio de la técnica de reemplazo en novillos con dietas de finalización.....	25
Cuadro 3. Digestibilidad intestinal para rumiantes de las distintas fuentes de grasa.....	26

Experimento I

Table 1. Ingredient and nutrient composition of experimental diets (exp 1).....	56
Table 2. Composition of supplemental yellow grease (exp 1).....	57
Table 3. Influence of body weight and level of fat supplementation on characteristics of digestion (exp 1).....	58
Table 4. Main effects of level of fat supplementation on fatty acid digestion in Holstein steers (exp 1).....	60

Experimento II

Table 1. Ingredient and nutrient composition of experimental diets (exp 2).....	74
Table 2. Composition of supplemental yellow grease (exp 2).....	75
Table 3. Calculated bile flow in steers (215 kg) fed diets with 3 level of supplemental yellow grease (exp 2).....	75
Table 4. Main effects of level of fat supplementation on fatty acid digestion in Holstein steers (exp 2).....	78

Índice de Figuras

Revisión de Literatura

Figura 1. Comparación de los valores observados de digestibilidad intestinal vs. los valores predictivos de acuerdo a Zinn (1994) en animales livianos y pesados.....	33
---	----

Experimento I

Figure 1. Influence of fatty acid intake on intestinal fatty acid digestion (exp1).....	61
---	----

Figure 2. Comparison of the models for predicting intestinal fatty acid digestion (present study vs. Zinn, 1994, exp 1).....	62
--	----

Experimento II

Figure 1. Influence of bile flow on intestinal fatty acid digestion (exp 2).....	76
--	----

Introducción

Excluyendo las interacciones asociativas, el valor de energía neta (**EN**) de las grasas alimenticias adicionadas en las dietas para bovinos está ampliamente relacionado con su digestibilidad intestinal. Considerando el 100% de su valor fisiológico de combustión, un gramo de grasa absorbida en el intestino aporta 9 kilocalorías de energía metabolizable (**EM**), y dado que la eficiencia parcial para la utilización de EM a EN de ganancia (**EN_g**) se ha determinado en 67% (Czerkawsky et al., 1966; Garrett, 1980; Zinn, 1994), entonces el valor de energía neta para ganancia (**EN_g**) de la grasa puede estimarse al multiplicar el valor de EM por la eficiencia parcial para transformarse a **EN_g** ($EN_g = 9.0 * 0.67$) resultando en 0.603 kcal por gramo de grasa digerida en el intestino. En general, los lípidos de la dieta que ingresan al duodeno de los rumiantes están constituidos en un 100% de ácidos grasos de cadena larga (**AGCL**), y aún cuando en rumiantes no se conocen plenamente los factores que afectan su digestibilidad intestinal, el nivel de suplementación se ha determinado como el de mayor relevancia.

En ese sentido, los estándares actuales (NRC, 1996) indican que las grasas suplementarias aportan 6.00 y 4.50 Mcal/kg de **EN_m** y **EN_g** para bovinos y esos valores son consistentes con aquellos observados en pruebas donde el consumo total de grasa no excedió la cantidad de 0.96 g de grasa consumida por kg de peso vivo (Zinn, 1994; Zinn y Plascencia, 2004). Cuando el consumo de grasa es mayor a esa proporción, el valor energético de la grasa disminuye en forma lineal (Zinn y Plascencia, 2002) como resultado directo de la disminución de la digestibilidad intestinal de los ácidos grasos (**AG**),

principalmente C18:0. (Plascencia et al., 1999b). La disminución de la digestibilidad de los AG saturados puede explicar hasta en un 100% la variación del valor nutrimental observado para las grasas adicionadas a las dietas para los rumiantes (Wu et al., 1991; Ferlay et al., 1993; Pantoja et al., 1996; Zinn et al., 2000; Enjalbert et al., 2000) y esto puede estar relacionado con una posible emulsificación incompleta de los AG saturados en el intestino delgado como resultado de una producción inadecuada de jugo biliar con relación a la cantidad presente de éstos ácidos grasos que se observa como resultado del consumo de dietas con alto contenido de grasa (Palmquist, 1991; Bauchart, 1993). Deficiencias en la utilización adecuada de las grasas alimenticias han sido informadas en aves, al respecto, Atteh y Lesson (1985) observaron un incremento en 16% en la digestión intestinal de una mezcla de ácidos palmítico:oleico cuando se añadió 0.2% de ácido cólico a la dieta que se tradujo en una mejora en la energía digestible de la dieta de 14%. Sin embargo, en rumiantes existe información limitada al respecto. La producción biliar se ha determinado en cantidades que van de 0.5 a 1.45 mL/h/kg de peso (Symonds et al., 1982; Moore y Christie, 1984; Merchen, 1988). La afirmación anterior representa producciones de 2,400 hasta 6,960 mL/día para un animal de 200 kg de peso. Las diferencias detectadas en la producción biliar pueden estar mediadas por efectos de las técnicas utilizadas que afectan la producción biliar a corto plazo (Hurwitz et al., 1973), o bien por inexactitud en la técnica de recolección de la totalidad del jugo biliar (Harrison, 1995). Adicionalmente, una variable que afecta potencialmente a la producción biliar es la cantidad de lípidos que ingresan al duodeno, el cual a su vez está estrechamente relacionado con la cantidad de grasa consumida, y tiene un efecto directo sobre la producción de gastrina y colecistoquinina, ambos elementos involucrados en el mecanismo

de flujo biliar hacia el duodeno (Frandsen y Spurgeon, 1992). Hasta el momento de redactar el presente documento no se ha informado de algún estudio realizado expresamente para evaluar la relación del flujo de lípidos al duodeno con la producción biliar y digestión de ácidos grasos de cadena larga (AGCL) en rumiantes.

Por otra parte, aún cuando se ha determinado que el nivel de suplementación es el factor más importante, existe una gran variación e inconsistencia en los resultados obtenidos con respecto a la digestibilidad de los lípidos y el valor energético de las grasas suplementarias. Existen pocos estudios que evalúan la digestión de los AGCL y su relación con la cantidad de los mismos en las dietas. Entre otros, se ha relacionado el nivel de AGCL en la dieta (lípidos, % de la MS de la dieta; Wu et al., 1991), el total de gramos de lípidos consumidos por día (Palmquist, 1991), así como el flujo al duodeno de AGCL (g/d) con respecto a su digestibilidad intestinal. Sin embargo, las ecuaciones de regresión generadas en esos estudios son inconsistentes, ya que las correlaciones indican que la cantidad presente de grasa en la dieta explica la variación de la digestibilidad intestinal de la misma de un 14 a un 82%. Al respecto, en un estudio realizado con novillos de 258 kg de peso (PV), se correlacionó la digestibilidad intestinal de los lípidos con su nivel de consumo diario (g de lípidos consumidos/kg de PV). La correlación resultante fue de 0.95, y la ecuación propuesta expone un potencial de digestibilidad intestinal de lípidos de 75% para una relación de consumo de 1.5 g de lípidos/kg de peso vivo, y por cada décima de gramo de lípidos consumido por encima de esa relación, la digestibilidad de los mismos disminuye en forma lineal en 1.4% (Zinn, 1994). Sin embargo, cuando se analizan resultados de otros estudios considerando estos parámetros, se observa que existen

inconsistencias al respecto, puesto que resultados con niveles de suplementación de grasas que representan consumos que van desde 1.8 g de lípidos consumidos/kg de PV para animales de 325 kg de PV, hasta 2.36 g de lípidos consumidos/kg de PV para animales de 438 kg de peso, presentan digestibilidades intestinales iguales o superiores a 75%, observándose además un aparente incremento, sin menoscabo de la digestibilidad, del potencial de consumo de lípidos (g/kg de PV) en 0.40 g por cada 100 kg de incremento de peso vivo. La explicación para lo anterior, es que probablemente exista un mayor potencial de digestión y absorción intestinal de AG en animales de mayor peso corporal.

La información anterior permite afirmar que las ecuaciones existentes para relacionar el nivel de suplementación de lípidos con su tasa de digestión y valor nutrimental propuestas hasta ahora han mostrado inconsistencias, principalmente cuando se aplican a animales con tasas de consumo y de peso corporal distintos al material experimental de donde fueron calculados.

Con la finalidad de evaluar las principales variables que afectan la digestibilidad intestinal de los AG, considerando el nivel de consumo, el peso corporal y la producción biliar como factores de relevancia, se utilizaron once novillos canulados en dos experimentos de digestión y metabolismo

Revisión de Literatura

Las grasas y aceites son una fuente alimenticia de alta densidad energética y de bajo costo para los rumiantes. Los valores de contenido energético para bovinos de engorda asignados por los estándares actuales (NRC, 1996) son de 6.00 y 4.75 Mcal/kg de EN para mantenimiento y EN para ganancia, respectivamente. Las grasas de grado alimenticio contienen aproximadamente 90% de ácidos grasos totales (AFOA, 1999), y éstos representan casi el 100% de su contenido energético (Zinn, 1989a); Por lo tanto, el valor energético de las grasas está supeditado a la digestibilidad de sus ácidos grasos, la cual se ha determinado en 80% en especies rumiantes (Palmquist, 1991). Sin embargo los resultados generados en diversos estudios muestran a la grasa alimenticia como uno de los insumos de mayor variabilidad en cuanto a su valor nutrimental, por lo que una gran atención se ha dirigido para comprender los factores que lo afectan. Las áreas de énfasis incluyen: tipo o fuente de grasa (Zinn, 1989; Brandt y Anderson, 1990; Krehbiel et al., 1995), contenido de ácidos grasos libres (Zinn, 1992; Zinn et al., 2000), grado de saturación (Johnson y McClure, 1972; Elliott et al., 1997; Plascencia et al., 2001), método de adición (Zinn et al., 1998; Zinn y Plascencia, 2004) y nivel de adición (Haaland et al., 1981; Moore et al., 1986; Zinn 1989a, 1994; Pylot et al., 2000; Plascencia et al., 2002).

El objetivo de esta revisión es discutir los principales factores que influyen en el valor nutrimental de las grasas alimenticias usadas en bovinos de engorda, considerando a la fuente de grasa, así como el método y nivel de adición como factores de relevancia.

Fuentes y tipos de grasas

Los lípidos de los forrajes se encuentran principalmente en forma de ácidos grasos poliinsaturados esterificados como galactosilglicéridos; la concentración de ácidos grasos en esta forma rara vez supera el 1.5% de la materia seca de la dieta. En cambio, el contenido en ácidos grasos de cereales, semillas oleaginosas y grasas libres es variable, más elevado y en forma de triglicéridos.

En relación a las grasas libres, son diversas las fuentes de grasa que son utilizadas en la alimentación de bovinos de engorda, éstas difieren principalmente en contenido de impurezas, de ácidos grasos libres (AGL) y grado de saturación (Cuadro 1). A continuación se describen brevemente las fuentes de grasas más comúnmente utilizadas.

Grasa amarilla. El término de “amarilla” se debe a su apariencia, también se le conoce como grasa de restaurante o grasa de cocina ya que su origen es de cualquier combinación de los desperdicios o sobrantes de grasas y aceites colectados en cafeterías, restaurantes de comida rápida y panaderías. Una vez que llega a la planta, el proceso aplicado es la remoción de agua e impurezas y se le aplican pruebas para asegurar que el producto sea libre de patógenos y sustancias tóxicas (Hamilton, 2002). Como resultado de cocinar cada vez más con aceites vegetales, la mayor parte de grasa amarilla recobrada es de origen vegetal que ha sido parcialmente hidrogenada para un mejor desempeño en el proceso de cocinado, de tal forma que la proporción de insaturados:saturados es de 2.6

Cuadro 1. Composición química promedio y perfil de AG de las principales grasas alimenticias utilizadas en engorda de ganado

Concepto	Grasa amarilla	Sebo de res	Mezcla animal-vegetal	Extractos de jabón	Sales de calcio
Composición química, %					
Humedad ^a	.40	.12	.88	1.4	
Impurezas ^b	.22	.08	.56	4.9	
Materia insaponificable ^c	.71	.31	3.88	3.46	
Valor de iodo ^d	82.06	54.04	67.16	102.6	
Ácidos grasos totales	92.6	92.48	92.9	85.7	81.3
Ácidos grasos libres	13.95	7.8	51.0	54.8	
Perfil de AG, %					
C16:0	18.03	25.23	22.3	21.5	49.8
C18:0	10.32	15.73	13.7	6.0	4.03
C18:1	46.88	42.18	35.5	26.5	36.3
C18:2	17.16	5.26	18.7	40.2	7.46
C18:3	1.42	.47	1.55	3.1	.30

^a Elevados valores de contenido de humedad favorecen la rancidez hidrolítica de las grasas y esto puede afectar la aceptabilidad de las dietas suplementada con grasas, disminuyendo el consumo voluntario.

^b Son materiales filtrables insolubles en keroseno y compuesto principalmente por partículas de tejido muscular, cuero, hueso y metales. En la actualidad, valores altos de estos compuestos representan un riesgo de la presencia del agente que transmite la encefalopatía espongiforme bovina.

^c Son materiales solubles en éter de petróleo que no reaccionan con hidróxido de sodio o de potasio para formar jabón, estos compuestos contribuyen muy poco al valor nutrimental de la grasa y representan un factor de riesgo de contaminación por pesticidas y otras sustancias tóxicas.

^d Refiere a la cantidad de gramos de yodo consumidos por cada 100 gramos de grasa, y es una medida del grado de saturación de los ácidos grasos que contienen las mismas.

Fuentes: para grasa amarilla; Zinn 1992; Krehbiel et al., 1995; Plascencia et al., 1999b; Zinn et al., 2000; Ramírez y Zinn, 2000

Para sebo: Palmquist, 1991; Clary et al., 1993; Krehbiel et al., 1995; Elliot et al., 1997; Beam, 2000; Ramírez y Zinn, 2000

Para mezcla animal-vegetal: Zinn, 1989; Palmquist, 1991; Wu et al., 1991.

Para extractos de jabón: AFOA, 1988; Bock et al, 1991; Zinn, 1992

Jabones de calcio: Coppock y Wilks, 1991; Klusmeyer y Clark, 1991; Palmquist, 1991; Wu et al., 1991,1993.

aproximadamente (Zinn, 1988; Plascencia et al., 1991). Debido a la diversidad de sus fuentes, la grasa amarilla no es muy uniforme en su composición y puede variar de una área o una región a otra, o de una planta a otra. De acuerdo a los parámetros establecidos por la Asociación Americana de Grasas y Aceites (AFOA, 1999), su punto de fusión debe ser menor a 40°C y no debe contener más de 15% de ácidos grasos libres (AGL) y una máximo de 2% de impurezas.

Sebo. El sebo o grasa animal es un subproducto derivado principalmente de desperdicios de carne y vísceras y su origen es mayormente de ganado vacuno. Este tipo de grasa se caracteriza por una mayor uniformidad, además de presentar un alto punto de fusión (>40°C) y un menor contenido de humedad e impurezas comparado con las otras fuentes de grasas (Brandt y Anderson, 1990).

Grasas mezcladas. Son mezclas en diferentes proporciones, de grasas de origen animal, aceites vegetales, así como aceites acidulados y subproductos de refinería. De la misma forma que la grasa amarilla, las mezclas no son uniformes en su composición, de hecho su composición es aún más variable por lo que es difícil caracterizarla de una manera generalizada. Comparada con la grasa amarilla es de apariencia más oscura y con un contenido mayor de AGL y de materia insaponificable, tendiendo además a poseer una proporción mayor de AG saturados reflejándose en un valor de yodo más alto. Las características típicas de calidad para esta fuente de grasa son 90% mínimo de ácidos grasos totales (AGT) y máximos de 50% de AGL, 3.5% de insaponificables, 1.5% de humedad y 1% de impurezas (Zinn, 1989a).

Extractos de jabón y otras fuentes grasas altas en AGL. Son subproductos resultantes de los procesos de la refinación de aceites comestibles. La composición de ácidos grasos es muy similar a la fuente original, pero con más contenido de AGL (> 50%). Otra fuente de grasa alta en AGL es la grasa denominada “grasa de trampa” (griddle grease), la cual es obtenida en las trampas del desagüe de cocinas de cafeterías y restaurantes. Este tipo de grasa se ha incrementado en el mercado en los últimos años como resultado de recientes regulaciones medioambientales que indican que la grasa que se vierte al caño por error debe ser recuperada y reciclada. La composición es muy similar a la grasa amarilla pero contiene tres veces más de AGL (Plascencia et al., 1999b).

Digestión de lípidos en rumiantes

Digestión ruminal. La hidrólisis de los lípidos ocurre por acción de lipasas, galactosidasas y fosfolipasas producidas por bacterias ruminales, principalmente *Anaerovibrio lipolytica* y *Butyrivibrio sp* (Yokohama y Johnson, 1988) y el resultado de este proceso produce ácidos grasos libres (no esterificados) y glicerol. Los lípidos de forrajes, cereales y semillas quedan expuestos a la acción microbiana cuando la matriz vegetal ha sido masticada y degradada. La actividad lipolítica se ve influenciada por el estado de madurez del forraje y el contenido en nitrógeno y por el tamaño de las partículas alimenticias en el rumen (Jenkins, 1993), pero generalmente no es un paso limitante de la digestión ruminal de las grasas. Elliot et al. (1999) y Beam et al. (2000) han demostrado que la velocidad de hidrólisis ruminal está directamente relacionada con el grado de insaturación; los aceites son hidrolizados más rápidamente que el sebo y no se detecta hidrólisis alguna de

glicéridos saturados (hidrogenados). Curiosamente, el aceite de pescado es hidrolizado a niveles comparables al sebo; quizás esto sea debido a la disposición especial de los ácidos grasos de cadena larga (C20-C22) insaturados de estos lípidos. Por otra parte, Van Nevel y Demeyer (1996) observaron que la lipólisis disminuía para pH ruminales inferiores a 6 y que este proceso era más sensible a valores de pH bajos. Siendo la lipólisis un paso esencial para la biohidrogenación, entonces, los factores que afectan a la lipólisis, afectan el grado de biohidrogenación puesto que la disponibilidad del grupo carboxilo es necesario para el proceso (Demeyer y Henderickx, 1967).

Los ácidos grasos insaturados no esterificados producidos durante la lipólisis son muy tóxicos para las bacterias gram-positivas (celulolíticas), las bacterias metanogénicas y los protozoos (Broudiscou et al., 1994) ya que por sus características poseen una acción detergente para la membrana celular microbiana (Garnsworthy, 2002). Los efectos tóxicos de los aceites insaturados sobre la actividad microbiana quedaron demostrados en los trabajos clásicos de Ikwuegbu y Sutton (1982), estos investigadores suministraron a ovejas 0, 13, 26 ó 40 mL/día de aceite de linaza observando una disminución (efecto lineal) en la digestibilidad ruminal y de tracto total de la fibra ácido detergente (FAD) al aumentar la ingesta de linaza. Observaron adicionalmente una disminución de la relación acetico:propiónico y desaparición de los protozoos ruminales.

En el rumen tienen lugar varios procesos que tienden a reducir esa toxicidad, por ejemplo, mientras que los lípidos esterificados se encuentran principalmente en el fluido ruminal, los ácidos grasos aparecen asociados a la superficie de las partículas; las células

microbianas y las partículas alimenticias compiten por la adsorción de los ácidos grasos (Harfoot et al., 1974). Aumentando la cantidad de partículas alimenticias (vgr. forrajes) en el contenido ruminal, disminuye la adsorción de ácidos grasos sobre los microorganismos disminuyendo así su efecto tóxico.

Un mecanismo adicional que reduce los efectos tóxicos de los ácidos grasos es la formación de sales insolubles carboxiladas (principalmente jabones cálcicos). Los ácidos grasos del sebo generalmente no inhiben la digestión de la fibra cuando se suministran en forma de sales insolubles de calcio (Zinn y Plascencia, 1992; Weiss y Wyatt, 2004). Consistente con lo anterior, Doreau et al. (1993) compararon los efectos de suministrar a vacas productoras de leche aceite de colza libre o en forma de jabones de calcio, y observaron que la digestión de la fibra no resultaba alterada cuando los ácidos grasos fueron ofrecidos como jabones de calcio.

Sin embargo, el proceso de detoxificación de mayor importancia lo es la biohidrogenación ya que es el mecanismo mediante el cual los microorganismos ruminales saturan los AG insaturados C18 hasta ácido esteárico (Polan et al., 1964) y los ácidos grasos saturados son menos tóxicos para los microorganismos ruminales que los insaturados. De hecho, las bacterias ruminales almacenan los lípidos primariamente en forma de ácidos grasos saturados.

Aunque la capacidad de hidrogenar numerosos isómeros posicionales ha sido descrita (Harfoot y Hazlewood, 1997), el modelo de mayor interés es la biohidrogenación

del ácido linoleico (cis 9, cis12 18:2) como a continuación se describe:

- 1) isomerización a cis 9, trans 11 18:2
- 2) reducción a trans 11 18:1
- 3) reducción a 18:0 (ácido esteárico).

A menudo en el paso 3 intervienen microorganismos diferentes a los de los pasos 1 y 2. Además, bajo determinadas condiciones de alimentación (alto nivel de aceites, baja proporción de forrajes, pH bajo), la acumulación de t11 18:1 puede ser importante. El primer intermediario, c9, t11 18:2 ("ácido linoleico conjugado" o "CLA") se acumula en cantidades más bajas. Su interés actual es grande ya que es un potencial agente anticancerígeno (Jiang et al., 1996).

Algunos de los factores de mayor importancia que afectan la tasa de biohidrogenación son el pH ruminal (Van Nevel y Demeyer, 1996b) población microbiana (Latham et al., 1972), naturaleza de los lípidos consumidos (Byers y Shelling, 1988; Jenkins, 1993) y tasa de pasaje (recambio ruminal de ácidos grasos; Harfoot y Hazlewood, 1997) entre otros.

En contraste con la extensiva absorción ruminal de los ácidos grasos de cadena corta (<10 C), los ácidos grasos de cadena larga no son absorbidos hasta alcanzar el intestino delgado (Bickerstaffe et al., 1972). De tal manera que el metabolismo ruminal modifica en gran medida el perfil de los ácidos grasos de las grasas dietéticas (Wu et al., 1991; Plascencia et al., 1999b); representando el mecanismo de biohidrogenación el factor

que determina el perfil de ácidos grasos saturados de la grasa de los rumiantes y el principal factor que influye en la digestibilidad intestinal de la grasa en rumiantes.

Digestión intestinal. Como se ha mencionado previamente, la digestibilidad es el factor más importante que determina el valor energético de las grasas. Los rumiantes están bien adaptados a absorber pequeñas cantidades de grasas muy saturadas (menos del 3% de la materia seca) en dietas normales. Los ácidos grasos que llegan al intestino son altamente saturados (>85%, Zinn et al., 2000) y están adsorbidos sobre las partículas alimenticias (Pantoja et al., 1996; Wachira et al., 2000), estas características hacen necesario un efectivo sistema de emulsificación para posibilitar la absorción de los AG a nivel intestinal, de hecho, el principal factor que afecta la absorción de grasas en rumiantes es la presencia de bilis (Merchen, 1988). El jugo biliar en rumiantes contiene de 5000 a 8000 mg/100 mL de ácidos biliares los cuales, a diferencia de los no rumiantes, son ricos en ácido taurocólico (proporción 2.4:1; Peric-Golia y Socic, 1968), éstos permanecen ionizados y solubles en el tramo de pH ácido del duodeno (1.8-2.4, Ruckebusch et al., 1991), actuando como detergentes para emulsificar los ácidos grasos. La fosfolipasa de las secreciones pancreáticas separa el ácido oleico de los fosfolípidos secretados en la bilis. Las lisolecitinas y el ácido oleico resultantes son poderosos emulsionantes que facilitan la solubilización de los ácidos grasos y la formación de micelas, a partir de las cuales los ácidos grasos son absorbidos (Moore y Christie, 1984).

Existe cierta polémica con relación a los efectos de la cantidad y composición de la grasa de la dieta sobre la digestibilidad de los ácidos grasos. Estudios iniciales

demonstraron que la digestibilidad de los ácidos grasos disminuía cuadráticamente al aumentar el consumo (Palmquist, 1991; Wu et al., 1991; Weisbjerg et al., 1992; Zinn, 1994). Sin embargo, otros trabajos no muestran esta relación curvilínea. De hecho, algunos investigadores (Doreau y Ferlay, 1994; Nelson et al., 2001) concluyen que no existe relación entre consumo de ácidos grasos y su digestibilidad. Desde el punto de vista fisiológico, la digestibilidad debería disminuir en forma lineal con consumos muy altos, dada la dependencia clara de las sales biliares para promover la solubilización de los ácidos grasos muy saturados. La producción biliar en ovejas se ha determinado en un rango de 0.5 a 1.45 mL/kg de peso vivo (Harrison, 1962; Moore y Christie, 1984; Merchen, 1988) y por ser el flujo a duodeno más o menos constante en rumiantes (Cant et al., 1999) parece ser independiente de la hora y frecuencia de alimentación (Symonds et al., 1982). Considerando que la digestibilidad de la mayoría de los nutrientes disminuye a medida que el consumo de esos nutrientes se incrementa, con altos consumos de grasa, las secreciones endógenas se diluyen y por lo tanto se espera una disminución en su digestibilidad. Por otra parte, la digestibilidad de los ácidos grasos saturados también depende de la longitud de la cadena. Así, el ácido palmítico es más digestible que el esteárico (Weisbjerg et al., 1992). Adicionalmente, en el intestino existen distintas proporciones de 16:0/18:0 y 18:1/18:0 en función del tipo de grasa de la dieta y estas relaciones influyen sobre la digestibilidad de la grasa (Zinn et al., 2000). El avance más importante en la utilización de grasas por los rumiantes probablemente vendrá de nuevas tecnologías que mejoren la digestibilidad de las grasas. En este contexto, se necesitan estudios concluyentes sobre la producción y composición de las sales biliares en bovinos en función de la cantidad y tipo de grasa de la dieta.

Factores que inciden en la digestibilidad de las grasas

El asignar individualmente un valor energético por fuente o tipo de grasa es difícil. Una revisión de estudios de digestibilidad y de comportamiento muestran una variación sustancial en los valores estimados de su contenido de energía, por otra parte, el principal problema cuando las distintas fuentes de grasas son comparadas, estriba en que las grasas adicionadas en las dietas para rumiantes generalmente no exceden del 6% de la materia seca y la precisión obtenida en esos estudios no permite detectar diferencias tan pequeñas (menos del 10%) en el valor nutricional de las grasas comparadas. De cualquier forma, se puede observar que de acuerdo a la naturaleza de las grasas, se deduce que al comparar distintas fuentes, básicamente se comparan características tales como la cantidad de AGL, el grado de saturación y la proporción de insaturados:saturados. En ese sentido, se han realizado varias pruebas para comparar el valor nutricional de las diferentes características de las grasas utilizadas en la alimentación para ganado en engorda.

Ácidos grasos libres (AGL). Son ácidos grasos no esterificados con glicerol. En grasas y aceites, la presencia de niveles altos de AGL puede indicar un almacenamiento o un manejo inapropiado de la grasa (Valenzuela, 1995). La hidrólisis puede ocurrir en forma de lipólisis enzimática durante el almacenamiento o previo al procesado para su obtención, o presentarse como resultado de una hidrólisis autocatalítica denominada rancidez oxidativa (Barreras-Arellano, 1998).

El efecto del nivel de AGL en la dieta sobre el comportamiento productivo ha sido estudiado en la mayoría de las especies, especialmente en pollos de engorda. En relación a lo anterior, el comportamiento de crecimiento en pollos generalmente no es afectado por consumos de dietas con grasa que contienen niveles altos de AGL (Vila y Esteve-García, 1996). Sin embargo, existen indicios en rumiantes en los cuales los AGL pueden ser menos digestibles que los triglicéridos. En un estudio conducido por Czerkawski et al. (1973) observaron diferencias en la digestión del aceite de semilla de lino dependiendo si se agregaba a la dieta como triglicérido (85% digerido) o en forma de ácidos grasos libres (64% digerido). En contraste, Zinn (1989a,b) no detectó diferencias significativas cuando comparó grasa amarilla, que es una fuente baja en AGL (10%), con una mezcla de grasa animal-vegetal (50% AGL) las cuales fueron adicionadas en dietas de finalización para bovinos a niveles de 4 y 8%. El comportamiento productivo, valor de EN estimada y la digestibilidad intestinal de los ácidos grasos fueron similares en ambas fuentes de grasa y no resultaron influenciados por los niveles de adición.

Considerando la composición química de los triglicéridos, el glicerol es un diluyente del contenido neto de energía, por lo tanto al incrementarse el contenido de ácidos libres en una fuente de grasa se espera que el contenido energético se aumente de la misma manera. En ese sentido, Plascencia et al. (1999b) evaluaron la influencia en el comportamiento productivo y la digestión de nutrimentos de distintos niveles del contenido de AGL en grasa amarilla en dietas para bovinos de engorda. Los niveles estudiados fueron 42.0, 28.5 y 15% de AGL en una dieta que contuvo 5% de grasa amarilla

adicionada y 79% de grano en hojuela (50:50 de cebada y maíz, respectivamente). Aún cuando no existieron diferencias en la digestibilidad postruminal de los AG entre los tratamientos, el incremento de contenido de AGL aumentó en forma lineal la ganancia diaria, el consumo y la conversión alimenticia. Los resultados obtenidos por Plascencia et al. (1999b) han sido utilizados como indicios para soportar la hipótesis del efecto de dilución por glicerol utilizado en no rumiantes (Hamilton, 2002), sin embargo, una de las características de los lípidos que ingresan al intestino en rumiantes, es que en su gran mayoría (>85%) son en forma no esterificada lo que debilita dicha teoría, al menos para esta especie. Una explicación más aceptable cuando se observan respuestas positivas con grasas de mayor contenido de AGL es aquella de que los AGL inhiben la tasa de biohidrogenación ruminal (Noble et al., 1974) lo que aumenta el flujo hacia el duodeno de ácidos grasos de mayor digestibilidad (insaturados), sin embargo esta teoría no ha sido consistente.

Proporción de insaturados:saturados. Recientemente ha surgido la controversia sobre el potencial de la proporción de ácidos insaturados:saturados contenidos en las grasas sobre su valor nutrimental para bovinos en engorda. Aunque existe limitada información para ganado de engorda, estudios *in vitro* (Henderson, 1973; Maczulak et al., 1981) han demostrado que los ácidos grasos insaturados juegan un papel más activo en la inhibición de las bacterias ruminales, particularmente celulolíticas. De los ácidos grasos insaturados evaluados, el oleico (C18:1) fue el más inhibitor. Considerando que las bacterias celulolíticas participan menos en la función digestiva del ganado con dietas de finalización, se ha pensado que los efectos de la proporción de ácidos insaturados estarían limitados en esas condiciones. No obstante lo anterior, se han llevado a cabo varias pruebas de

comportamiento y de digestión en bovinos de engorda alimentados con dietas altas en energía con la finalidad de comparar grasas con alto grado de saturación contra aquellas de menor grado de saturación. Por ejemplo, Brandt y Anderson (1990) cuando compararon sebo de res y grasa amarilla observaron respuestas similares y positivas para ambas fuentes de grasa en un primer experimento, mientras que en el segundo, el comportamiento en los novillos que recibieron las dietas que contenían grasa amarilla, el consumo y ganancia fue marcadamente menor que aquella dieta que contuvo sebo. Los resultados obtenidos por Brandt y Anderson (1990) son desconcertantes, considerando que en ambos experimentos el nivel de adición fue bajo (3.5%) y las dietas y fuentes de grasa similares.

En otros casos, el ganado que consumió dietas con sebo obtuvo menores ganancias y conversión alimenticia que aquellos que consumieron grasa amarilla (Lofgreen, 1965; Huffman et al., 1992). A pesar de esto, la mayoría de los estudios no han detectado diferencias entre ambas fuentes de grasa aún cuando se han añadido en niveles de 6% o más (Robert y McKirdy, 1964; Zinn, 1989a,b,1992; Plascencia y Zinn, 2001).

En general, con el incremento de saturación de una fuente de grasa en particular (por ejemplo mediante hidrogenación) se disminuyen los efectos negativos sobre la fermentación ruminal, pero también se reduce la digestibilidad intestinal de los ácidos grasos. En ese sentido, se han demostrado disminuciones en la digestibilidad de los ácidos grasos de sebo de res de 74% para sebo de res nativo a 37% para sebo altamente hidrogenizado (Macleod y Buchanan-Smith, 1972; Elliott et al., 1999) y reducciones en

23% en la digestibilidad de la grasa amarilla cuando esta se ofrece en forma hidrogenada (Jenkins y Jenny, 1989). Esto no debe ser generalizado entre diferentes fuentes de grasa con grado distinto de saturación. Por ejemplo, Bock et al. (1991) no detectaron diferencias en la digestibilidad intestinal de los ácidos grasos (promedio 75%) del extracto de jabón de aceite de soya (proporción de insaturados:saturados de 3.7) comparado con el sebo de res (proporción de insaturados:saturados de 1.65) los cuales se adicionaron a una dieta de finalización que contenía 78% de trigo quebrado. De igual forma, Plascencia et al. (2001) no observaron diferencias en la utilización intestinal de ácidos grasos (promedio 70%) cuando compararon la adición de 5% de grasa amarilla o sebo vacuno en dietas de finalización. Adicionalmente, Palmquist (1991) no informa diferencias en la digestibilidad de los ácidos grasos cuando compararon cinco distintas fuentes de grasa con diferentes proporciones de insaturados:saturados.

La atenuación de los efectos de la proporción de insaturados:saturados contenidos en las grasas que comúnmente se adicionan a las dietas para rumiantes, se debe principalmente al grado de biohidrogenación elevado que sufren los AG insaturados en su estancia en rumen, aumentando de esta manera la cantidad de AG saturados que llegan al intestino (Jenkins, 1993). Aún cuando la tasa de biohidrogenación de C18:1 aparentemente no está influenciada por el nivel de ácidos grasos consumidos (Duckett et al., 2002), estudios realizados *in vitro* por Beam et al. (2002) observaron que por cada unidad porcentual incrementada de C18:2 en la dieta, la tasa de biohidrogenación de ese ácido graso disminuía en 0.12%/h. Considerando que la lipólisis ruminal de los triglicéridos es intensa (>90% / 60 min; Inming et al., 1993), el grado de biohidrogenación de los ácidos

grasos insaturados es también intensa y se encuentra en un rango entre 60 y 93%, con una media de 70% para grasas no protegidas (Hawke y Silcock, 1970; Wu et al., 1991, Pantoja et al., 1996, Plascencia et al., 1999b; Zinn et al., 2000; Wachira et al., 2000) y de 47 a 57% de las grasas protegidas (Klusmeyer y Clark, 1991; Wu et al., 1991; Doreau et al., 1999; Zinn et al., 2000). Lo anterior se refleja en forma directa en la proporción y tipo de ácido graso que fluye a duodeno. Por ejemplo, Wu et al. (1991) alimentando a vacas con una mezcla animal-vegetal (59% de insaturados), notaron que el consumo de ácido linoleico aumentó de 171 a 296 g/d, sin embargo el flujo hacia el duodeno aumento sólo de 45 a 54 g/d. De igual forma, en novillos alimentados con dietas adicionadas con extractos de jabón de aceite de soya (84% insaturados), el consumo de C18:1 aumentó de 38 a 99 g/d, mientras que el flujo hacia el duodeno sólo fue de 19 a 27 g/d (Bock et al., 1991). Lo anterior provoca que las diferencias entre las proporciones en los AG existentes entre las distintas fuentes de grasa consumidas disminuyan cuando éstos llegan a intestino, de tal forma que la proporción de insaturados:saturados contenido en el alimento tienen una menor relevancia para rumiantes comparado con las especies no rumiantes (Cera et al., 1989; Vila y Esteve-García, 1996).

Basado en lo anterior, un aspecto que ha sido abordado últimamente en rumiantes, es la proporción de saturados (C16:0 y C18:0) y la cantidad de insaturados que ingresan a duodeno. La mezcla de grasas saturadas (sebo) con insaturadas (aceite de soya) ha resultado en efectos asociativos positivos en el valor nutrimental de las grasas suplementarias para ganado de engorda (Brandt y Anderson, 1990), esta respuesta es atribuida a que potencialmente los ácidos grasos insaturados pueden aumentar la

absorción intestinal de los ácidos grasos saturados (Elliott et al., 1997; Zinn et al, 2000). Al respecto, Firkins y Eastridge (1994) demostraron que a una mayor proporción de C16:0 con respecto a C18:0 del total de AG saturados generalmente mejora la digestibilidad de los ácidos grasos, especialmente si el grado de insaturados de la grasa se incrementa. Zinn et al. (2000) observaron que al disminuir el índice de biohidrogenación mediante la protección de la grasa con una matriz de formaldehído-proteína mejoró la digestión intestinal de los AG totales (87.8 vs. 80.3%), adicionalmente detectaron que por cada 1% de incremento en la proporción de los AG insaturados en relación a la totalidad de los AG que llegan a intestino, la digestibilidad de C18:0 aumentaba en 1% (Digestibilidad de C18:0 =85.72 + 1.01P18:1-15.84FI, donde P18:1 es el C18:1 ingresando al intestino expresado como porcentaje del total de los AG que llegan a duodeno, $r^2= .99$). Apoyados en el concepto de que la digestión intestinal de los ácidos grasos saturados disminuye a medida que la longitud de su cadena aumenta (Steele y Moore, 1968), es razonable esperar entonces, que el ácido palmítico (C16:0) tiene condiciones más favorables para mostrar un efecto sinérgico mayor con los ácidos grasos insaturados a nivel posruminal que el ácido esteárico (C18:0). En ese sentido, Plascencia et al. (2003) evaluaron una fuente de grasa rica en palmítico (>97%) protegida con formaldehído mezclada al 50% con grasa amarilla la cual es rica en insaturados (>65%) añadida a un nivel de 5% de la dieta. La combinación resultó en una mejora de la digestibilidad intestinal de los ácidos grasos de 5% cuando se comparó con las fuentes de grasas originales.

Métodos de adición

Debido a sus características físicas las grasas tienden a formar una capa o recubierta en las partículas alimenticias, principalmente fibra (Devendra y Lewis, 1974). De hecho aproximadamente un 80% de total de lípidos en el rumen está en forma asociada a partículas (McAllan et al., 1983) y de 40 a 75% de las bacterias está adherido a las partículas alimenticias (Owens y Goetsch, 1988). Esto hace que por cubrimiento físico y propiedades hidrófobas de las grasas se pueda ejercer un efecto inhibitorio a la acción enzimática bacteriana interfiriendo en los procesos normales de fermentación (Devendra y Lewis, 1974) y afectando, por efectos asociativos, el valor nutrimental de las grasas alimenticias. En ese sentido, se han conducido una serie de estudios con la finalidad de evaluar si el método de adición de grasa puede influir en su valor nutrimental. Al efecto, Zinn et al. (1998) evaluaron la adición de grasa amarilla añadida primeramente al grano (maíz en hojuela) y el producto resultante se mezclaba con el resto de los ingredientes de la dieta o bien, la grasa amarilla era añadida al final del mezclado. En ambas situaciones la cantidad final de grasa en la dieta fue de 5%. No se detectaron diferencias entre los métodos de adición sobre los parámetros digestivos o el comportamiento productivo del ganado. En virtud de que el punto de fusión de las grasas afecta su grado de lipólisis (Beam, 2000), entonces una fuente de grasa de mayor punto de fusión pudiese tener un efecto diferente en cuanto a su método de adición. Para tal efecto Plascencia et al. (2001) evaluaron, mediante un aprueba de digestión y metabolismo, el mismo esquema de tratamientos utilizados por el estudio de Zinn et al. (1998), para estudiar si el método de adición pudiese ser afectado por el punto de fusión de la fuente de grasa utilizada (sebo vs. grasa amarilla). Al igual que en el estudio de Zinn et al. (1998), no existieron efectos de los tratamientos sobre el sitio o grado de digestión de los diferentes componentes de la

dieta. La digestión intestinal de la grasa promedió 69.3%. El realizar mezcla de grasa-forraje también ha sido evaluado en dietas de finalización para bovinos en engorda. En ese sentido, una mezcla de 80% de alfalfa con 20% de grasa fue utilizada en 15, 30 y 45% en dietas de finalización. La dieta que incluyó la mezcla al nivel de 15% contuvo 71% de trigo en hojuela, mientras que las dietas que utilizaron los niveles de 30 y 45%, éstas se incluyeron sustituyendo en proporción idéntica al trigo en hojuela. El sustituir el grano con la mezcla alfalfa-grasa no afectó el consumo o la ganancia diaria, sin embargo, la EN contenida de la dieta disminuyó en forma lineal al aumentar la proporción de la mezcla en la dieta. De igual manera, la digestibilidad intestinal de los ácidos grasos se vió afectada a medida que se aumentaba la mezcla en la ración. Se concluyó que la cantidad de grasa consumida fue el factor principal que limitó el contenido de EN y la digestibilidad de los AG mientras que el método de adición no tuvo un papel relevante en los resultados (Plascencia y Zinn, 2002).

Con la finalidad de comprobar los resultados obtenidos en los estudios anteriores se realizó un experimento de comportamiento productivo con 216 novillos (Zinn y Plascencia, 2004). En la prueba se evaluaron 3 métodos (ácidos grasos de sebo añadido en el grano, en el forraje o en la ración completa) con tres niveles de inclusión (3, 6 y 9%). El aumento del nivel de grasa en la dieta disminuyó el consumo, la ganancia diaria y la EN de la grasa en forma lineal, el método de adición no afectó la EN de la grasa. De nueva cuenta el nivel de consumo fue el factor primordial mientras que el método de adición no mostró efectos asociativos sobre el valor nutrimental de la grasa adicionada.

Nivel de inclusión

Las recomendaciones para el uso de grasas alimenticias para dietas de rumiantes indican que ésta no deben exceder el 5% de la dieta, puesto que se han observado efectos detrimentales sobre consumo y eficiencia alimenticia cuando la grasa se incluye a las dietas con niveles superiores al 5% (Haaland et al., 1981; Ngidi et al., 1990; Zinn, 1994). Sin embargo, las restricciones prácticas para su óptima utilización no han sido aún resueltas, ya que se han registrado casos negativos en comportamiento productivo con niveles de inclusión igual o menor al 3% (Hatch et al., 1972; Krehbiel et al., 1995), mientras que niveles de 8% han resultado en ganancias y conversiones superiores con relación a animales no suplementados (Zinn, 1989a). Lo anterior se refleja en una variabilidad del valor nutrimental observado para la energía neta (EN) de la grasa que oscila de 3.77 y 2.95 (Clary et al., 1993) hasta 6.35 y 5.15 Mcal/kg (Plascencia et al., 2002) de EN para mantenimiento y EN para ganancia, respectivamente (Cuadro 2). De cualquier forma, una respuesta generalizada cuando se aumenta el nivel de grasa en la dieta es la disminución del valor energético de la grasa. Por ejemplo, Zinn y Plascencia (2004) informan que cuando se aumentó el nivel de grasa de 3 a 9% en una dieta de finalización para novillos, se observaron disminuciones en el consumo, ganancia diaria y conversión alimenticia. La EN de la dieta resultó en 103% para el nivel de 3% y declino a 90% cuando la grasa fue añadida en un 9% en la dieta. La EN calculada de la grasa declinó de 6.4 Mcal/kg a 3.44 Mcal/kg. Lo anterior se ha atribuido principalmente a variaciones en la tasa de digestión intestinal de lípidos (Wu et al., 1991; Zinn, 1994). El valor de la energía bruta (EB) para las grasas es de 9.4 Kcal/g; sin embargo, el valor combustible "utilizable" por

los tejidos debe de considerarse a partir de su digestibilidad . Las grasas de grado alimenticio contienen aproximadamente 90% de ácidos grasos totales (AFOA, 1999), y éstos representan casi el 100% de su contenido energético (Zinn, 1989a); Por lo tanto, el

Cuadro2. Comparación del Contenido de ENm y ENg (Mcal/kg) de grasas alimenticias estimado por medio de la técnica de remplazo^a en novillos con dietas de finalización

ENm	ENg	Nivel adicionado en la dieta, %	Fuente
6.35	5.15	1.5	Plascencia et al., 2002
6.20	4.53	4	Zinn, 1988
6.06	4.90	3	Plascencia et al., 2002
6.02	4.77	5	Zinn, 1992
5.82	4.69	6	Zinn et al., 2000
5.78	4.61	6	Zinn, 1989a
5.55	4.46	4	Ramirez y Zinn, 2000
5.34	4.41	3.5	Brandt y Anderson, 1990
5.54	4.38	3	Richards et al., 1998
5.33	4.30	6	Zinn y Plascencia, 2004
4.98	3.85	5	Plascencia et al., 1999b
4.92	3.90	6	Plascencia y Zinn, 2000
4.78	3.87	5	Zinn y Shen, 1996
4.68	3.69	9	Plascencia y Zinn, 2000
4.63	3.50	6	Zinn y Plascencia, 1996
4.38	3.45	5	Zinn et al., 1998
3.77	2.95	4	Clary et al., 1993
3.66	2.80	9	Zinn y Plascencia, 2004

^a La técnica de reemplazo determina comparativamente el valor nutrimental de un ingrediente testigo el cual sustituye parcial o totalmente a un ingrediente prueba, y se basa, por lo tanto, en la comparación del contenido de energía del ingrediente en prueba considerando a un ingrediente estándar o de valor energético conocido. Esta técnica asume que las dietas son idénticas en composición salvo por el ingrediente prueba que reemplaza al ingrediente conocido en diferentes proporciones y se calcula de la siguiente manera: (energía de la dieta prueba-energía de la dieta estándar/proporción reemplazada) + energía contenida del ingrediente estándar (Plascencia y Zinn, 1996).

valor energético de las grasas está supeditado a la digestibilidad de sus ácidos grasos la cual es aproximadamente del 77% (Cuadro 3). Bauchart (1993) indica un 80% de digestibilidad para los AG saturados y de 93% para los insaturados cuando se consumen dietas con moderado contenido de lípidos (2-3%). La elevada capacidad de los rumiantes

Cuadro 3. Digestibilidad posruminal de las distintas fuentes de grasa

Tipo de grasa ^a	Nivel adicionado, %	Digestibilidad, %	Fuente
MAV	3.0	73.8	Wu et al., 1991
GA	3.0	76.2	Plascencia et al., 2002
GA	3.0	82.0	Plascencia y Zinn, 2002
SV	3.5	77.1	Bock et al., 1991
GA	4.0	80.0	Zinn, 1989b
GA	4.0	79.1	Zinn, 1988
TG	5.0	76.0	Elizalde et al., 1999
GA	5.0	80.2	Zinn Y Shen, 1996
SV	5.0	72.0	Ramirez y Zinn, 2000
GA	5.0	84.2	Plascencia y Zinn, 1992
GA	5.0	75.5	Zinn y Plascencia, 1993
GA	5.0	84.2	Plascencia y Zinn, 1992
SV	5.5	81.2	Palmquist et al., 1993
GA	6.0	77.5	Plascencia et al., 1991
MAV ^b	6.0	66.9	Wu et al., 1991
GA	6.0	75.6	Plascencia y Zinn, 2002
GA	6.0	77.1	Zinn, 1989b
MAV	6.0	78.4	Zinn, 1989b
GA	6.0	79.5	Zinn et al., 2000
GA	6.0	77.5	Plascencia et al., 1991
GA	6.0	75.6	Plascencia y Zinn, 2002
GA	8.0	69.3	Zinn, 1989b
GA	9.0	70.1	Plascencia y Zinn, 2002

^a MAV=mezcla animal-vegetal, GA= grasa amarilla, TG= triglicéridos, SV= sebo vacuno.

^b Ácidos grasos de grasa animal-vegetal.

para digerir AG saturados, con respecto a los no rumiantes, está dada por las condiciones de pH duodenal (2-2.5, Christiansen y Webb, 1990), la proporción de fosfatidilcolina (80%) con alto contenido de oleico (Christie, 1973), así como la proporción elevada de taurocolatos (Peric-Golia y Socic, 1968) de las sales biliares. Por otra parte, el concepto generalizado de que la longitud de la cadena en los AG saturados afecta negativamente su digestibilidad (Steele y Moore, 1968) no parece ser de importancia en rumiantes cuando los consumos de lípidos son moderados (Weisbjerg et al., 1992), sin embargo, a altos consumos, la digestibilidad de C18:0 es 5 a 8% menor en relación a C16:0 (Bauchart, 1993). Como se mencionó anteriormente, la digestibilidad de los ácidos grasos insaturados es mayor que la de los saturados y no parece ser afectada aún con altos consumos de grasa (Avila et al., 2000; Enjalbert et al., 2000) aunque existen informes que indican que el linolénico es absorbido menos eficientemente que el palmítico (Doreau y Ferlay, 1994), esos resultados pueden ser reflejo de problemas metodológicos en su determinación dada la baja concentración de C18:3 (< 2%) en el flujo duodenal.

Lo anterior demuestra, en gran medida, que el principal factor que afecta a la digestibilidad de la grasa en rumiantes es el nivel de consumo de lípidos (Palmquist y Conrad, 1980; Ngidi 1990; Coppock y Wiks, 1991; Palmquist, 1991; Khorasani et al., 1992; Zinn, 1992,1994; Pylot et al., 2000). Por ejemplo, Zinn (1989b) demostró una disminución de la digestibilidad intestinal de grasa amarilla en forma lineal con el nivel de inclusión (83, 81 y 74% para 0, 4 y 8% de grasa suplementaria, respectivamente), calculando una disminución de la digestibilidad de la grasa en 3.4% por cada unidad

porcentual por encima de 4% de inclusión. Similar a lo anterior se muestra en los resultados de Palmquist (1991), quien observó que la digestibilidad de los ácidos grasos disminuía en 2.2% por cada 100 g de ácidos grasos consumidos. Adicionalmente, Palmquist y Conrad (1980) indican que a niveles moderados de inclusión (por debajo de 5%) la digestibilidad verdadera de la grasa es aproximadamente de 80%, más si se agrega la grasa por encima de ese nivel se digiere menos eficientemente (56%). Por otra parte, Wu et al. (1991) determinaron que la reducción de la digestibilidad total de ácidos grasos se debía principalmente al efecto negativo de la digestibilidad del ácido esteárico (C18:0), ya que registraron una disminución en su digestibilidad en 21% cuando la grasa suplementada fue incrementada en la dieta del 3 al 6% (72 al 59%, respectivamente), estos datos son similares al 75% y 50.9% de digestibilidad para C18:0 obtenidos por Zinn (1992) en dietas con 90% de concentrados suplementados con 0% y 6% de grasa animal.

Los estudios anteriores concuerdan que a mayor nivel de inclusión es menor la eficiencia de utilización intestinal de los ácidos grasos, principalmente C18:0. Sin embargo, entre los estudios no existe concordancia con relación a que porcentaje de inclusión es la que permite el máximo de utilización de grasa sin afectar negativamente su digestibilidad, y por lo tanto su valor de EN. Aún así, las recomendaciones prácticas actuales indican que la inclusión no exceda del 5% de la dieta. Aunque Doreau y Ferlay (1994) cuando relacionaron la digestibilidad intestinal con el consumo de grasa de 13 experimentos no encontraron relación entre el nivel de grasa en la dieta y la digestión de los ácidos grasos, es importante hacer notar que la relación establecida por esos investigadores fue la de la concentración de lípidos (g/kg de MS) contra digestibilidad expresada en porcentaje. Esta

relación puede confundir los efectos, ya que indica solo la concentración de lípidos en la dieta y no la cantidad total de lípidos consumidos. Con relación a lo anterior, Brandt et al. (1992) indican que mucha de la inconsistencia en la respuesta del comportamiento productivo del ganado cuando consume dietas suplementadas con grasa, puede estar más asociada con la cantidad total de lípidos consumidos que con el porcentaje de inclusión.

Desafortunadamente son pocos los estudios que han dirigido la atención para evaluar el efecto del nivel de consumo de lípidos sobre el valor nutricional de las grasas relacionándolo con su tasa de utilización intestinal. En ese sentido, Zinn (1994) ha determinado una correlación negativa de la cantidad de lípidos consumidos (g/kg de peso corporal) contra su digestibilidad intestinal, el cual ha expresado en el modelo de regresión $Y = 83.18 - 4.52X - 0.68X^3$ ($R^2 = .95$, $n=20$), donde Y = digestibilidad intestinal y X = lípidos consumidos (g/kg de peso corporal). Esta correlación implica que sin afectar la digestibilidad, el consumo para lípidos en dietas de finalización es de 1.0 g/kg de peso corporal. Lo anterior indica que la principal limitante en la digestibilidad sucede cuando la cantidad de los lípidos que llegan a duodeno sobrepasa la capacidad enzimática intestinal y, por consiguiente, su absorción (Bauchart, 1993). Los ácidos grasos que llegan al intestino en rumiantes son altamente saturados [65%] y asociados a partículas (Wu et al., 1991; Pantoja et al., 1996; Plascencia et al., 1999b) y los ácidos grasos saturados son físicamente menos voluminosos y más viscosos que los insaturados, lo cual dificulta la formación de la fase micelar (Moore y Christie, 1984), y la tasa de absorción, puesto que se ha determinado que la absorción de los AG saturados es más lenta (Doreau y Ferlay., 1994). Debe de considerarse que la forma de evaluar la digestibilidad se basa no sólo en el

potencial de digestión del nutrimento en el organismo, sino básicamente en su potencial de absorción en el tracto gastrointestinal y es importante que se considere esta limitante cuando se presenten niveles altos de consumo de lípidos. La disminución de la digestibilidad de los AG saturados puede explicar de 85% a 100% la variación del valor nutrimental observado para las grasas adicionadas a las dietas para los rumiantes (Pantoja et al., 1995; Ramírez y Zinn, 2000; Ávila et al., 2000; Enjalbert et al., 2000), y esto puede estar relacionado con una posible emulsificación incompleta de los AG saturados en el intestino delgado como resultado de una producción inadecuada de jugo biliar con relación a la cantidad presente de éstos ácidos grasos que se observa como resultado del consumo de dietas con alto contenido de grasa (Palmquist, 1991; Xu et al., 1998). En ese sentido, deficiencias en la utilización adecuada de las grasas alimenticias por insuficiencia de jugo biliar ha sido informado en aves, al respecto, Atteh y Lesson (1985) observaron 16% de incremento en la digestión intestinal de una mezcla de ácidos palmítico:oleico cuando se añadió 0.2% de ácido cólico a la dieta; lo que se tradujo en una mejora en la energía digestible de la dieta de 14%. Sin embargo, en rumiantes existe información limitada al respecto. Por ejemplo, estudios en los cuales se ha utilizado un emulsificante de grasa (principalmente lecitina) combinado con la grasa suplementaria no han obtenido beneficios en la digestión postruminal de los ácidos grasos (Zinn, 1989b; Jenkins y Fotohui, 1990; Plascencia et al., 1991). Lo anterior puede explicarse por la alta hidrólisis ruminal de la lecitina la cual evita que llegue con sus características emulsificantes al intestino (Jenkins, 1990). Un indicio de la limitada capacidad de emulsificación a nivel intestinal en rumiantes lo muestra el estudio conducido por Børsting et al. (1992) quienes informan coeficientes de digestión de 92% para C18:0 cuando las vacas consumieron

dietas con grasas vegetales emulsificadas las cuales fueron protegidas contra la hidrólisis ruminal mediante una matriz de formaldehído-caseína. Estos investigadores concluyeron que los bajos coeficientes de digestión observados en la mayoría de los estudios para C18:0 en altos consumos de lípidos es debido principalmente a una pobre emulsificación más que a un inefectivo sistema de lipasas.

Considerando que en rumiantes la producción de jugo biliar oscila de 0.5 a 1.45 mL/h/kg de peso (Harrison, 1962; Moore y Christie, 1984; Merchen, 1988); entonces, para un bovino de 200 kg de peso vivo la producción biliar varía desde 2,400 hasta 6,960 mL/día. Sin embargo, las diferencias detectadas en la producción biliar evaluada por métodos de cateterización del conducto biliar utilizando técnicas de recolecciones repetidas de muestras pueden estar supeditadas a: 1) la disminución de la resorción de jugos biliares en las partes distales del intestino (reflejo enterocólico; Hurwitz et al., 1973) que afectan la producción biliar a corto plazo, 2) la disminución del flujo biliar debido a irritación directa en el conducto biliar (Harrison, 1995), 3) por inexactitud en la técnica de recolección de la totalidad del jugo biliar o bien 4) por características propias de la dieta. Con respecto a este último punto, aún cuando se ha determinado que el flujo biliar en rumiantes tiende a ser independiente de la hora del día o la frecuencia alimenticia (Symonds et al., 1982); es importante considerar a la cantidad de ácidos grasos y a la proporción de insaturados:saturados que ingresan al duodeno como una variable potencial sobre la producción biliar, ya que ésta tiene un efecto directo sobre la producción de gastrina y colecistoquinina, ambos elementos involucrados en el mecanismo de flujo biliar a duodeno (Studzinsky y Bobowiec, 1979; Kato et al., 1991). Se ha argumentado que el

grado de formación de micelas, el primer paso para la absorción de lípidos, puede variar con el tipo de dieta, lo que podría suceder solo si se aumenta la producción biliar o la proporción de sales biliares:lípidos, o bien si la proporción de ácidos grasos insaturados:saturados en duodeno se aumenta. Sin embargo, hasta el momento de redactar el presente documento no se ha informado de algún estudio realizado para evaluar la relación de flujo a duodeno de lípidos con la producción biliar y digestión intestinal de AG en rumiantes.

De cualquier forma, la ecuación propuesta por Zinn (1994) expone específicamente que considerando una digestibilidad intestinal para lípidos de 77% para una relación de consumo diario de 1.2 g de lípidos/kg de peso vivo; por cada décima de gramo de lípidos consumido por encima de esa relación, la digestibilidad se disminuye en forma lineal en 1.4%. Sin embargo, analizando resultados de varios estudios, se han observado las siguientes cantidades potenciales que permiten una tasa de absorción intestinal de lípidos en un mínimo de 77%: 1) 0.413 kg·d⁻¹ en novillos de 258 kg de peso (1.5 g de lípidos consumidos/kg de PV) alimentados con dietas de finalización (>85% de concentrados) (Zinn, 1994); 2) 0.600 kg·d⁻¹ en novillos de 325 kg de peso (1.8 g de lípidos consumidos/kg de PV) alimentados con pajas (Moore et al., 1986); 3) 0.632 kg·d⁻¹ en novillos de 325 kg de peso (1.94 g de lípidos consumidos/kg de PV) alimentados con 90% de forraje (Pylot et al., 2000), 4) 1.102 kg·d⁻¹ para vacas en lactación de 529 kg (2.08 g de lípidos consumidos/kg de PV) alimentadas con 60% de concentrado (Plascencia et al., 1999a) y 5) 1.155 kg·d⁻¹ para vacas en lactación de 488 kg (2.36 g de lípidos consumidos/kg de PV) alimentadas con 60% de concentrados (Pantoja et al., 1996). Lo anterior, parece indicar que a mayor

peso del animal, mayor es el potencial de utilización intestinal de lípidos por los rumiantes (Figura 1). Sin embargo, no existen informes en la literatura revisada sobre la interacción entre peso vivo del animal y el nivel de consumo de grasa sobre la utilización intestinal de los ácidos grasos en rumiantes.

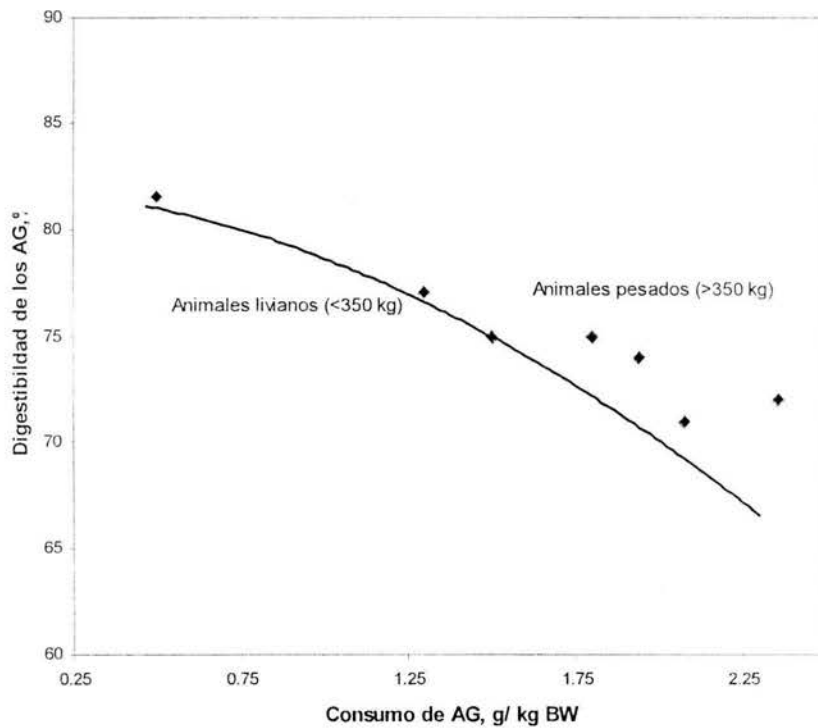


Figura 1. Comparación de los valores observados de digestibilidad intestinal vs. los valores estimados de acuerdo a Zinn (1994) en animales liviano y pesados.

Conclusiones

Como resultado de la literatura revisada en este documento se puede concluir que:

- 1) La digestibilidad intestinal de los AG es el factor principal que determina el valor nutrimental de la grasa en los rumiantes.
- 2) Las diferencias en el perfil de ácidos grasos y contenido de AGL de las distintas fuentes de grasas alimenticias tiene poco impacto sobre el valor nutrimental de la grasa en rumiantes dado por la extensiva biohidrogenación a nivel ruminal, Sin embargo, la proporción de insaturados:saturados que fluye a duodeno parece ser un factor de mayor relevancia.
- 3) El método de adición de grasa a la ración (orden de incorporación y mezcla previa de ingredientes) ha demostrado hasta ahora no ser factor importante.
- 4) La cantidad de lípidos consumidos, más que el nivel de adición de grasa a la dieta, es el factor de mayor relevancia que incide sobre la digestibilidad de los AG.
- 5) De acuerdo a las relaciones existentes entre la cantidad de lípidos consumidos (g de lípidos/ kg de peso vivo) y digestibilidad observada de los AG, existe un aparente efecto del peso corporal sobre el potencial de absorción de AG en rumiantes.
- 6) La baja digestibilidad para ácidos grasos observada con consumos elevados de grasa es el reflejo de la baja digestibilidad intestinal de los AG saturados, y dada las características de éstos, la emulsificación es un requisito indispensable para su utilización, por lo que en dietas con alta cantidad de grasa, una producción adecuada de bilis pudiese ser el factor limitante para la absorción intestinal de los ácidos grasos.

Literatura Citada

- AFOA. 1999. Trading and Arbitration Rules. American Fats and Oils Association, Inc. New York.
- Atteh, J.O., and S. Lesson. 1985. Influence of age dietary cholic acid and calcium levels on performance, utilization of free fatty acids and bone mineralization in broilers. *Poultry Sci.* 64:1959-1971.
- Avila, C.D., E.J. DePeters, H. Perez-Monti, S.J. Taylor, and R.A. Zinn. 2000. Influences of saturation ratio of supplemental dietary fat on digestion and milk yield in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 83:1505-1519.
- Barreras-Arellano, D. 1998. Estabilidad y utilización de nitrógeno en grasas y aceites. Instituto de la grasa (CSIC) *Revista Grasas y Aceites.* 49:56-64. España.
- Bauchart, D. 1993. Lipid absorption and transport in ruminants. *J. Dairy Sci.* 76:3864-3881.
- Beam, T.M., T.C. Jenkins, P.J. Moate, R.A. Khon, and D.L. Palmquist. 2000. Effects of amount and source of fat on the rates of lipolysis and biohydrogenation of fatty acids in ruminal contents. *J. Dairy Sci.* 83:2564-2573.
- Bickerstaffe, R., D.E. Noakes, and E.F. Annison. 1972. Quantitative aspects of fatty acid biohydrogenation, absorption and transfer into milk fat in the lactating goat, with special reference to the cis- and trans- isomers of octadecenoate and linoleate. *Biochem. J.* 130:607-617.
- Bobowiec, R., and U. Kosior-Korzecka. 1999. Relationships amongst liver bile salt clearance, bile secretion and infusion of lipids in calves. *J. Vet. Med.* 46: 409-420.
- Bock, B.J., D.L. Harmon, Brandt, R.T. Jr. and J.E. Schneider. 1991. Fat source and calcium level effects on finishing steer performance, digestion, and metabolism. *J. Anim. Sci.* 69:2211-2224.
- Børsting, C.F., M.R. Weisbjerg, and T.H. Hvelplund. 1992. Fatty acid digestibility in lactating cows fed increasing amounts of protected vegetable oil, fish oil or saturated fat. *Acta. Agric. Scand., Sect. A. Animal Sci.* 42:148-156.
- Børsting, C.F., M.R. Weisbjerg. 1989. Fatty acid metabolism in the digestive tract of ruminants. PhD Thesis. The Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen.
- Brandt Jr, R. T., and S. J. Anderson. 1990. Supplemental fat source affects feedlot performance and carcass traits of finishing yearling steers and estimated diet net energy value. *J. Anim. Sci.* 68:2208-2216.
- Brandt R.T., Jr, G. L. Kuhl, R. E. Campbell, C. L. Kastner, and S. L. Stroda. 1992. Effects of steam-flaked sorghum grain or corn and supplemental fat on feedlot performance, carcass traits, longissimus composition, and sensory properties of steers. *J. Anim Sci.* 70: 343-34.
- Broudiscou L., S. Pochet, and C. Poncet. 1994. Effect of linseed oil supplementation on feed degradation and microbial synthesis in the rumen of ciliate free and defaunated sheep. *Anim. Feed Sci. Technol.* 49:189-202.
- Bueno L., J. Fioramonti, and Y. Ruckebusch. 1975. Rate of flow of digesta and electrical activity of the small intestine in dogs and sheep. *J. Physiol.* 249:69-85.
- Byers, F.M., and G.T. Shelling, 1988. Lipids in ruminant nutrition. Page 298 in *The ruminant*

- animal: Digestive physiology and nutrition. D.C. Church, ed. Prentice-Hall, New Jersey.
- Cant, J.P., P.H. Luimes, T.C. Wright, and B.W. McBride. 1999. Modeling intermittent digesta flow to calculate glucose uptake capacity of the bovine small intestine. *Am J Physiol Gastrointest Liver Physiol* 276:1442-1451.
- Cera, K.R., D.C. Mahan, and G.A. Reinhart. 1989. Apparent fat digestibilities and performance response of postweaning swine fed diets supplemented with coconut oil, corn oil, or tallow. *J.Anim.Sci.*67:2040-2047.
- Christie, W.W. 1973. The structures of bile phosphatidylcholines. *Biochim. Biophys. Acta.* 316:204-211.
- Christiansen, M.L., and K.E. Webb, Jr.1990. Intestinal acid flow, dry matter, starch and protein digestibility and amino acid absorption in beef cattle fed a high concentrate diet with defluorinated rock phosphate, limestone or magnesium oxide. *J. Anim. Sci.*68:2105-2118.
- Clary, E.M., R.T. Brandt, Jr., D.L. Harmon, and T.G. Nagaraja. 1993. Supplemental fat and ionophores in finishing diets: Feedlot performance and ruminal digesta kinetics. *J. Anim. Sci.*71:3115-3123.
- Czerkawsky, J.W. 1973. Effect of linseed oil fatty acids and linseed oil rumen fermentation in sheep. *J. Agric. Sci.(Camb.)*81:517-531.
- Czerkawsky, J. W., L. Blaxter, and F. W. Wainman. 1966. The metabolism of oleic, linoleic and linolenic acids by sheep with reference to their effects on methane production. *Br. J. Nutr.* 20:349-361.
- Coppock, C.E. and D.L. Wilks. 1991. Supplemental fat in high-energy rations for lactating cows: Effects on intake, digestion, milk yield, and composition. *J.Anim.Sci.*69:3826-3837.
- Demeyer, D.I., and H.K. Henderickx. 1967. The effect of C18 unsaturated fatty acids on methane production in vitro by mixed rumen bacteria. *Biochim. Biophys. Acta.* 137:484-497.
- Devendra, C.A., and D. Lewis. 1974. Interaction between dietary lipids and fiber in the sheep. *Anim. Prod.* 19:67-76.
- Doreau, M., and A. Ferlay. 1994. Digestion and utilization of fatty acids by ruminants. *Anim. Feed Sci. Technol.*45:379-396.
- Doreau, M., A. Ferlay, and Y. Elmeddah. 1993. Organic matter and nitrogen digestion by dairy cows fed calcium salts of rapeseed oil fatty acids or rapeseed oil. *J. Dairy Sci.*71:499-504.
- Doreau, M., Y. Chilliard, H. Rulquin, and D.I. Demeyer. 1999. Manipulation of milk fat in dairy cows. Page 81 in *Recent Advances in Animal Nutrition*. P.C. Garnsworthy and J. Wiseman, ed. Nottingham University Press.
- Duckett, S.K., J. G. Andrae, and F. N. Owens. 2002. Effect of high-oil corn or added corn oil on ruminal biohydrogenation of fatty acids and conjugated linoleic acid formation in beef steers fed finishing diets *J. Anim. Sci.* 2002. 80:3353-3360.
- Elizalde, J.C., C.G. Aldrich, D.W. LaCount, J.K. Drackley, and N. R. Merchen. 1999. Ruminal and total tract digestibilities in steers fed diet containing liquefied or prilled saturated fatty acids. *J. Anim. Sci.*77:1930-1939.
- Elliott, J.P., J.K. Drakley, C.G. Aldrich, and N.R. Merchen. 1997. Effect of saturation and

- esterification of fat sources on site and digestion of organic matter, fiber, and nitrogen. *J. Anim. Sci.* 75:2803-2812.
- Elliott, J. P., J. K. Drackley, A.D. Beaulieu, G.C. Aldrich, and N.R. Merchen. 1999. Effect of saturation and esterification of fat sources on site and extent of digestion in steers: Digestion of fatty acids, triglycerides, and energy. *J. Anim. Sci.* 77:1919-1929.
- Enjalbert, F., M.C. Nicot, C. Bayourthe, and R. Moncoulon. 2000. Effect of duodenal infusion of palmitic, stearic or oleic acids on milk composition and physical properties of butter. *J. Dairy Sci.* 83:1428-1433.
- Ferlay, J. Chabrot, Y. Elmeddah, and M. Doreau. 1993. Ruminant lipid balance and intestinal digestion by dairy cows fed calcium salts of rapeseed oil fatty acids or rapeseed oil. *J. Anim. Sci.* 71: 2237-2245.
- Frandsen, R.D., and T.L. Spurgeon. 1992. *Anatomy and Physiology of Farms Animals* (5th ed.). Waverly Inc, Maryland.
- Firkins, J.L., and M.L. Eastridge. 1994. Assessment of the effect of iodine value on fatty acid digestibility, feed intake, and milk production. *J. Dairy Sci.* 77:2357-2366.
- Garnsworthy, P.C. 2002. Fats in dairy cow diets. Page 399 in *Recent Developments in Ruminant Nutrition 4*. J. Wiseman and PC Garnsworthy (Ed). Nottingham University Press. Hampshire, Engl.
- Garret, W. N. 1980. Energy utilization of growing cattle as determined in seventy-two comparative slaughter experiments. Page 3 in *Energy Metabolism*. Butterworths, London, England.
- Haaland, G.L., J.K. Matsushima, D.E. Johnson and G.M. Ward. 1981. Effect of replacement of corn by protected tallow in a cattle finishing diet on animal performance and composition. *J. Anim. Sci.* 52:696-702.
- Hamilton, C.R. 2002. Value of animal fats and recycled greases in animal feeds. Darling International Inc. pp. 1-17. Irving Tx.
- Harfoot, G.C., M.L. Crouchman, R.C. Noble, and J.H. Moore, 1974. Competition between food particles and rumen bacteria in the uptake on long-chain fatty acids and triglyceride. *Appl. Bact.* 37:633-641.
- Harfoot, C.G., and G.P. Hazlewood. 1997. Lipid metabolism in the rumen. Page 382 in *The rumen microbial ecosystem*. P.N. Hobson, ed. Elsevier Applied Science. London, New York.
- Harrison, F.A. 1962. Bile secretion in the sheep. *J. Physiol.* 162:212-224.
- Harrison, F.A. 1995. *Surgical techniques in experimental farm animals*. Oxford University Press, UK.
- Harrison, F.A., and K.L. Hill. 1960. Bile secretion in conscious sheep. *J. Physiol.* 154:610-620.
- Hatch, C.F., T.W. Perry, M.T. Mohler, and W.M. Beeson. 1972. Effect of added fat with graded levels of calcium and urea-containing rations for beef cattle. *J. Anim. Sci.* 34:483-487.
- Hawke, J.C., and W. R. Silcock. 1970. The in vitro rate of lipolysis and biohydrogenation in rumen contents. *Biochim. Biophys. Acta.* 218:201-212.
- Henderson, C. 1973. The effects of fatty acids on pure cultures of rumen bacteria. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 81:107-112.
- Huffman, R.P., R.A. Stock, M.H. Sindt, and D.H. Shain. 1992. Effect of fat type and forage

- level on performance of finishing cattle. *J. Anim. Sci.* 70:3889-3898.
- Hurwitz, S., A. Bar, M. Katz, D. Skan, and P. Budowsky. 1973. Absorption and secretion of fatty acids and bile acids in intestine of the laying fowl. *J. of Nutr.* 103:543-547.
- Ikwuegbu, O.A., and J.D. Sutton. 1982. The effect of varying the amount of linseed oil supplementation on rumen metabolism in sheep. *Brit. J. Nutr.* 48:365-375.
- Inming, I., C. Van Nevel, and D.I. Demeyer. 1993. Lipolysis and hydrogenation of soybean oil in the rumen of sheep. *Proceeding of Society Nutrition Physiology.* pp 59.
- Jenkins, T.C. 1990. Nutrient digestion, ruminal fermentation and plasma lipids in steers fed combinations of hydrogenated fat and lecithin. *J. Dairy Sci.* 73: 2934-2939.
- Jenkins, T.C. 1993. Lipid metabolism in the rumen. *J. Dairy Sci.* 76:3851-3863.
- Jenkins, T.C., and B.L. Jenny. 1989. Effect of hydrogenated fat on feed intake, nutrient digestion, and lactational performance of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 72:2316-2324.
- Jenkins, T.C., and N. Fotohui. 1990. Effects of lecithin and corn oil on site of digestion, ruminal fermentation and microbial protein synthesis. *J. Anim. Sci.* 68:460-466.
- Jiang, J., L. Bjoerck, R. Fonden, and Y. M. Emanuelson. 1996. Occurrence of conjugated cis-9,trans-11-octadecadienoic acid in bovine milk: effects of feed and dietary regimen. *J. Dairy Sci.* 79: 438-445.
- Johnson, R.R., and K.E. McClure. 1972. High fat rations for ruminants. I. The addition of saturated and unsaturated fats to high roughage and high concentrate rations. *J. Anim. Sci.* 34:501-509.
- Kato, S. K. Katoh, and W. Barej. 1991. Regulation of exocrine pancreatic secretion in ruminants. Page 89 in *Physiological aspects of digestion and metabolism in Ruminants.* T. Tsuda, Y. Sasaki and R. Kawashima, ed. *Proc. of 7th International Symp. on Ruminant Phys.* Academic Press. San Diego, CA.
- Khorasani, G.R., G. de Boer, P.H. Robinson and J.J. Kennely. 1992. Effect of canola fat on ruminal and total tract digestion, plasma hormones and metabolites in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 75:492-501.
- Klusmeyer, T. H., and J. H. Clark. 1991. Effects of dietary fat and protein on fatty acids flow to the duodenum and milk produced by dairy cows. *J. Dairy Sci.* 74:3055-3067.
- Krehbiel, C.R., R.A. McCoy, R.A. Stock, T.J. Klopfenstein, D.H. Shain, and R.P. Huffman. 1995. Influence of grain type, tallow level, and tallow feeding system on feedlot cattle performance. *J. Anim. Sci.* 73:2916-2921.
- Latham, M.J. J.E. Storry, and M.E. Sharpe. 1972. Effect of low-roughage diet on the microflora and lipid metabolism in the rumen. *Appl. Microbiol.* 24:871-877.
- Lofgreen, G.P. 1965. Net energy of fat and molasses for beef heifers with observations on method for net energy determination. *J. Anim. Sci.* 24:480-487.
- MacLeod, G.K. and J.G. Buchannan-Smith. 1972. Digestibility of hydrogenated tallow, saturated fatty acids and soybean oil supplemented diets by sheep. *J. Anim. Sci.* 35:890-895.
- Maczulak, A.E., B.A. Dehority and D.L. Palmquist. 1981. Effects of long-chain fatty acids on growth of rumen bacteria. *Appl. and Environ. Microbiol.* 42:856-862.
- McAllan, A.B., B.R. Knight, and J.D. Sutton. 1983. The effect of free and protected oils on the digestion of dietary carbohydrates between the mouth and duodenum of sheep. *Br. J. Nutr.* 48:433-440.
- Merchen, N.R. 1988. Digestion, absorption and excretion in ruminants. Page 174 in *The*

- ruminant animal: Digestive physiology and nutrition. D.C. Church, ed. Prentice-Hall, New Jersey.
- Moore, J.A., R.S. Swingle and W.H. Hale. 1986. Effects of whole cottonseed, cottonseed oil or animal fat on digestibility of wheat straw diets by steers. *J. Anim. Sci.* 63:1267-1273.
- Moore, J. H., and W.W. Christie. 1984. Digestion, absorption and transport of animal fats in ruminant animal. Page 123 in *Fats in Animal Nutrition*. J. Wiseman, ed. Butterworths, London, Engl.
- Nelson, M. L., H. H. Westberg, and S. M. Parish. 2001. Effects of tallow on the energy metabolism of wethers fed barley finishing diets. *J. Anim. Sci.* 79:1892-1904.
- Ngidi, M.E., S.C. Loerch, F.L., Fluharty, and D.L. Palmquist. 1990. Effect of calcium soaps of long-chain fatty acids on feedlot performance carcass characteristics and ruminal metabolism in steers. *J. Anim. Sci.* 68:2555-2565.
- Noble, R.C., J.H. Moore, and C.G. Harfoot. 1974. Observations of the pattern of biohydrogenation of sterified and unesterified linoleic acid in the rumen. *Br. J. Nutr.* 31:99-108.
- NRC. 1996. *Nutrient Requirements of Beef Cattle*. 7th ed. National Academy of Sciences Press. Washington, DC.
- Owens, F.N., and A.L. Goetsch. 1988. Ruminal fermentation. Page 145 in *The Ruminant Animal: Digestive Physiology and Nutrition*. D.C. Church, ed. Prentice-Hall, New Jersey.
- Palmquist, D. L. 1991. Influence of source and amount of dietary fat on digestibility in lactating cows. *J. Dairy Sci.* 74:1354-1360.
- Palmquist, D.L., and H.R. Conrad. 1980. High fat rations for dairy cows. Tallow and hydrolyzed blended fat at two intakes. *J. Dairy Sci.* 63, 391-395.
- Palmquist, D.L., M.R. Weisbjerg, and T. Hvelplund. 1993. Ruminal, intestinal, and total tract digestibilities of nutrients in cow fed diets high in fat and undegradable protein. *J. Dairy Sci.* 76:1356-1364.
- Pantoja, J., J. L. Firkins, and M. L. Eastridge. 1995. Site of digestion and milk production by cows fed fats differing in saturation, esterification, and chain length. *J. Dairy Sci.* 78: 2247-2258.
- Pantoja, J., J. L. Firkins, and M. L. Eastridge. 1996. Fatty acid digestibility and lactation performance by dairy cow fed fats varying in degree of saturation. *J. Dairy Sci.* 79:429-437.
- Peric-Golia, L., and C. Socic. 1968. Biliary bile acids and cholesterol in developing sheep. *Am. J. of Physiol.* 215:1284-1287.
- Plascencia, A., E. Alvarez y R.A. Zinn. 1991. Efecto de lecitina y grasa suplementaria sobre digestión de nutrientes y fermentación ruminal en dietas para cabras lactantes. *Rev. Cs. Agrop.* 3:49-58.
- Plascencia, A., A. Barreras y R.A. Zinn. 1999a. Adición de grasa suplementaria en sustitución de forraje en dietas para vacas en lactancia: Digestión de nutrimentos y función ruminal. *Vet. Méx.* 30:135-141.
- Plascencia, A., M. Estrada, and R.A. Zinn. 1999b. Influence of free fatty acid content on the feeding value of yellow grease in finishing diets for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 77:2603-2609.

- Plascencia, A., M. A. Cervantes, and R.A. Zinn. 2001. Influence of fat titer and method of addition on characteristics of ruminal and total tract digestion. *Proc. West. Sect. Am. Soc. Anim. Sci.* 52:548-550.
- Plascencia, A., E. G. Alvarez, M. F. Montano, M. Machado, S. Rodriguez, R. A. Ware, and R. A. Zinn. 2002. Influence of level of intake on the comparative feeding value of fat in finishing diets for feedlot cattle. *Proc. West. Sect. Am. Soc. Anim. Sci.* 53:613-618.
- Plascencia, A., L. Corona-Gochi, R.A. Ware y R.A. Zinn. 2003. Influencia de la proporción entre ácidos grasos insaturados y ácido palmítico que fluyen a duodeno sobre la digestión intestinal de ácidos grasos en novillos con dietas de crecimiento-finalización suplementadas con grasa. XIII Reunión Internacional de Producción de Carne y Leche en Climas Cálidos, Mexicali, B.C., 9-10 octubre, p 185-189.
- Plascencia, A. y R.A. Zinn. 1996. Valor nutrimental de grasas suplementarias en dietas de crecimiento-finalización para novillos en confinamiento. *Vet. Méx.* 27:83-88.
- Plascencia, A., and R.A. Zinn. 2001. Comparative feeding value of tallow vs yellow grease in finishing diets for feedlot cattle. *Proc. West. Sect. Am. Soc. Anim. Sci.* 52:566-568.
- Plascencia, A., and R.A. Zinn. 2002. Evaluation of a forage-fat blend as an isocaloric substitute for steam-flaked wheat in finishing diets for feedlot cattle: Growth-performance and digestive function. *Prof. Anim. Sci.* 18:247-253.
- Polan, C.C., J.J. McNeill, and S.B. Store. 1964. Biohydrogenation of insaturated fatty acid by rumen bacteria. *J. of Bacteriol.* 88:1056-1064.
- Pylot, S. J., J. J. McKinnon, A. F. Mustafa, V. J. Racz, and D. A. Christensen. 2000. Effects of processing and fat content of coarse canola screenings on voluntary intake and total tract nutrient digestibility of beef steers. *Can. J. Anim. Sci.* 80:153-159.
- Ramirez, J. E., and R. A. Zinn. 2000. Interaction of dietary magnesium level on the feeding value of supplemental fat in finishing diets for feedlot steers. *J. Anim. Sci.* 78:2072-2080.
- Richards, C.J., R.A. Stock, T.J. Klopfenstein, and D.H. Shain. 1998. Effect of wet corn gluten feed, supplemental protein, and tallow on steer finishing performance. *J. Anim. Sci.* 76:421-428.
- Robert, W.K. and J.A. McKirdy. 1964. Weight gains, carcass fat characteristics and ration digestibility in steers as affected by dietary rapeseed oil, sunflowerseed oil, and animal tallow. *J. Anim. Sci.* 63:682-687.
- Ruckebusch, Y., L.P. Phaneuf, and R. Dunlop. 1991. *Physiology of small and large animals.* Becker B.C., Inc. Philadelphia, PA.
- Steele, W., and J. H. Moore. 1968. The effects of monounsaturated and saturated fatty acids in the diet on milk fat secretion. *J. Dairy Res.* 35:353-360.
- Studzinski, T., and Bobowiec R. 1979. Effect of intra-duodenal administration of HCl and NaHCO₃ on the secretion and content of sodium, potassium and calcium in the pancreatic juice and bile of sheep. *Pol. Arch. Weter.* 22:205-217.
- Symonds, H.W., D.L. Mather, and E.D. Hall. 1982. Surgical procedure for modifying the duodenum in cattle to measure bile flow and the diurnal variation in biliary manganese, iron, copper and zinc excretion. *Res Vet Sci.* 32:6-11.
- Valenzuela, A.B. 1995. Natural antioxidants: A new perspective for the problems or oxidative rancidity of lipids in biotechnology in the feed industry. Lyons T.P. & K.A.

- Jacques (Ed). Proc.of Eleven Symp. London, Eng.
- Van Nevel, C.J., and D.I. Demeyer. 1996. Influences of pH on lipolysis and biohydrogenation of soybean oil by rumen contents in vitro. *Reprod. Nutr. Dev.* 36:53-63.
- Vila, B., and E.Esteve-Garcia.1996.Studies on acid oils and fatty acids for chickens. II. Effect of free fatty acid content and degree of saturation of free fatty acids and neutral fat on fatty acid digestibility. *Br.Poultry Sci.*37:119-130.
- Wachira, A. M., L. A. Sinclair, R. G. Wilkinson, K. Hallett, M. Enser, and J. D. Wood. 2000. Rumen biohydrogenation of n-3 polyunsaturated fatty acids and their effects on microbial efficiency and nutrient digestibility in sheep. *J. Agric. Sci.* 135:419–428.
- Weiss, W.P., and D. J. Wyatt. 2004. Digestible energy values of diets with different fat supplements when fed to lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.*87:1446-1454.
- Weisbjerg, M.R., T. Hvelplund, and C.F. Børsting.1992. Digestibility of fatty acids in gastrointestinal tract of dairy cows fed with tallow or saturated fats rich in stearic acid or palmitic acid. *Acta Agric. Scand. Sect. A, Anim. Sci.*42:115-120.
- Wu, Z., O. A. Ohajuruka, and D. L. Palmquist. 1991. Ruminal synthesis, biohydrogenation, and digestibility of fatty acids by dairy cows. *J. Dairy Sci.* 74:3025-3034.
- Xu, C., T. Wensing, and A. C. Beynen . 1998. Effects of high calcium intake on fat digestion and bile acid excretion in feces of veal calves. *J. Dairy Sci.*81: 2173-2177.
- Yokoyama, M.T., and K.A. Johnson. 1988. Microbiology of the rumen and intestine Page125 in *The ruminant animal: Digestive physiology and nutrition*. D.C. Church, ed. Prentice-Hall, New Jersey.
- Zinn, R. A. 1988. Comparative feeding value of supplemental fat in finishing diets for feedlot steers supplemented with and without monensin. *J. Anim.Sci.* 66:213-227.
- Zinn, R. A. 1989a. Influence of level and source of dietary fat on its comparative feeding value in finishing diets for steers: Feedlot cattle growth performance *J. Anim. Sci.* 67:1029-1037.
- Zinn, R. A. 1989b. Influence of level and source of dietary fat on its comparative feeding value in finishing diets for steers: Metabolism. *J. Anim. Sci.* 67:1038-1049.
- Zinn, R. A. 1992. Comparative feeding value of supplemental fat in steam-flaked corn- and steam-flaked wheat- based finishing diets for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 70:2959-2969.
- Zinn, R. A. 1994. Effects of excessive supplemental fat on feedlot cattle growth performance and digestive function. *Prof. Anim. Sci.* 10:66-72.
- Zinn, R.A. and A. Plascencia. 1992. Comparative digestion of yellow grease and calcium Soaps of long-chain fatty acids in cattle. *Proc. West. Sect. Am. Soc.Anim. Sci.* 43:454-457.
- Zinn, R. A., and A. Plascencia. 1993. Interaction of whole cottonseed and supplemental fat on digestive function in cattle. *J. Anim. Sci.* 71:11-17.
- Zinn, R.A. and A. Plascencia. 1996. Effect of forage level on the comparative feeding value of supplemental fat in growing-finishing diets. *J. Anim.* 74:1194-1201.
- Zinn, R. A., and A. Plascencia. 2004. Influence of level and method of supplementation on the utilization of supplemental fat by feedlot steers. *J. of Anim. and Vet. Adv.* 3:473-477.
- Zinn, R. A. S. K. Gulati , A. Plascencia, and J. Salinas. 2000. Influence of ruminal

- biohydrogenation on the feeding value of fat in finishing diets for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 78:1738-1746.
- Zinn, R.A., E.G. Alvarez, A. Plascencia and Y. Shen 1998. Influence of method of supplementation on the utilization of supplemental fat by feedlot steers. *Proc. West. Sect. Am. Soc. Anim. Sci.* 49:291-296.
- Zinn, R.A. and Y. Shen. 1996. Interaction of dietary calcium and supplemental fat on digestive function and growth performance in feedlot steers. *J. Anim. Sci.* 74:2303-2309.

Experimento I.

Title: **Relationship Between Body Weight and Level of Fat Supplementation on Fatty Acid Digestion in Feedlot Cattle**

Authors: Alejandro Plascencia*, Germán David Mendoza[†], Carlos Vásquez^{††} and Richard A. Zinn^{‡2}

Address: *Instituto de Investigaciones en Ciencias Veterinarias, UABC, Mexicali, México

‡Department of Animal Science, Desert Research and Extension Center, University of California, El Centro 92243

†Programa de Ganadería, Colegio de Posgraduados, Montecillo, México

††Universidad Nacional Autónoma de México

ABSTRACT: Eight Holstein steers with cannulas in the rumen and proximal duodenum were used in a split plot design experiment to evaluate the interaction of body weight (175 vs 370 kg) and level of fat supplementation (0, 3, 6 and, 9% yellow grease) on characteristics of digestion and feeding value of fat in finishing diets. Dry matter intake was restricted to 2% of BW. There were no interactions between BW and level of fat supplementation ($P > 0.10$) on ruminal or total tract digestion. Level of supplemental fat decreased (linear effect, $P < 0.01$) ruminal digestion of OM and NDF, and increased (linear effect, $P < 0.05$) ruminal N efficiency. There were no treatment effects ($P > 0.10$) on postruminal digestion of OM, NDF, and N. There tended to be an interaction ($P < 0.10$) between BW and level of fat supplementation on postruminal starch digestion. Increasing level of fat supplementation increased postruminal digestion of starch in heavy-weight steers, but did not affect starch digestion in light-weight steers. There were no interactions ($P > 0.10$) between BW and level of fat supplementation on postruminal fatty acid digestion. Increasing level of fat supplementation decreased (linear effect, $P < 0.01$) postruminal fatty acid digestion. This was due to a decreased (linear effect, $P < 0.01$) postruminal digestion of C16:0 and C18:0. Supplemental fat decreased (linear effect, $P < 0.01$) total tract digestion of OM, and NDF. The estimated NEm (Mcal/kg) of yellow grease averaged (linear effect, $P < 0.01$) 6.02, 5.70, and 5.06 for the 3, 6, and 9% of level supplementation, respectively. We conclude that intestinal fatty acid digestion (**FAD**, %) is a predictable function ($R^2 = 0.89$; $P < 0.01$) of total fatty acid intake (**FAI**) per unit body weight: $FAD = 87.560 - 8.591FAI$. Depressions in fatty acid digestion with increasing level of intake are due primarily to decreased intestinal absorption of palmitic and stearic acid. Level of fatty acids intake does not appreciably affect intestinal absorption of unsaturated fatty acid.

Changes in intestinal fatty acid digestion account for most of the variation in NE value of supplemental fat.

Key words: Fatty acid, Cattle, Body weight, Digestion.

Introduction

Current standards (NRC, 1996) for the NE_m and NE_g values of supplemental fats are 6.00 and 4.50 Mcal/kg. Estimates based on these values are consistent with empirically derived measures when total fat intake did not exceed 0.96 g/kg of BW (Zinn, 1994). When fat intake has exceeded 0.96 g/kg of BW, the NE value of fat declined (Zinn and Plascencia, 2002). This decline has been largely attributable to decreased postruminal fatty acid digestion (Zinn, 1994). An equation for predicting intestinal fatty acid digestion (IFD, %) was derived based on fat intake (FI, g/kg BW; Zinn, 1994): $IFD = 83.18 - 4.52FI - .68FI^3$. Estimates based this equation are in reasonably good agreement with observed intestinal fatty acid digestion in light-weight cattle (Zinn, 1989; Ramirez and Zinn, 2000; Zinn et al., 2000). However, the equation appears to underestimate intestinal fat digestion in heavier cattle (>350 kg) fed high-fat diets (> 1.2 g fat/ kg BW; White et al., 1987; Elliot et al., 1996; Pantoja et al., 1996). The basis for this discrepancy is not certain. A limitation of the Zinn (1994) prediction equation is that it was derived using a data set containing only one data point where fat intake exceeded 2 g/kg BW. Furthermore, the interaction of BW and fatty acid intake was not directly assessed. The objective of present study was to directly evaluate the interaction of body weight and level of fat supplementation on postruminal fatty acid digestion.

Materials and Methods

Eight Holstein steers with cannulas in the rumen and proximal duodenum (Zinn and Plascencia, 1993) were used in a split plot design, consisting of two 4 x 4 Latin squares to evaluate the influence of body weight and level of fat supplementation on characteristics of digestion and feeding value of fat. Whole plots (Latin squares replicates) consisted of four "light-weight" (17514.7 kg) and four "heavy-weight" (3706.7 kg) steers. Subplots consisted of 0, 3, 6, and 9% supplemental yellow grease. Composition of experimental diets is shown in Table 1. Composition of the yellow grease (YG) used in this study (Table 2) is similar to the standards set by American Fats and Oils Association (AFOA, 1988), and was very similar to with those used in other experiments conducted at this center (Zinn, 1988, 1989, 1992). Supplemental yellow grease was added to the mixer as the next to the last step, prior to adding molasses.

Steers were individually maintained in concrete slotted-floor pens (3.9 m²) with access to water at all times. Dry matter intake was restricted to 2% of BW, 3.5 and 7.4 kg/d for light and heavy-weight steers, respectively. Diets were fed in equal portions at 0800 and 2000 daily. Experimental periods consisted of a 10-d diet adjustment period followed by a 4-d collection period. During the collection period duodenal and fecal samples were taken from all steers, twice daily as follows: d 1, 0750 and 1350 h; d 2, 0900 and 1500 h; d 3, 1050 and 1650 h; and d 4, 1200 and 1800 h. Individual samples consisted of approximately 750 mL duodenal chyme and 200 g (wet basis) fecal material. Samples from

each steer and within each collection period were composited for analysis. Upon completion of the trial, ruminal fluid was obtained from all steers and composited for isolation of ruminal bacteria via differential centrifugation (Bergen et al., 1968). Feed and digesta samples were subjected to all or part of the following analysis: DM (oven drying at 105 °C until no further weight loss); ash, NDF, Kjeldahl N, ammonia N (AOAC, 1986); purines (Zinn and Owens, 1986); NDF (ash-corrected; Chai and Uden, 1998); fatty acids (Sukhija and Palmquist, 1988); and chromic oxide (Hill and Anderson, 1958). Composition of supplemental yellow grease was analyzed according to AOCS (1978) procedures as follows: moisture (method Ca 2a-45), impurities (method Ca 3-46), unsaponifiables (method Ca 6a-40), iodine value (method Tg 1a-64). Microbial organic matter (MOM) and microbial N (MN) leaving the abomasums were calculated using purines as a microbial marker (Zinn and Owens, 1986). Organic matter fermented in the rumen (OMF) was considered equal to OM intake minus the difference between the amount of total OM reaching the duodenum and MOM reaching the duodenum. Feed N that escapes to the small intestine was considered equal to total N leaving the abomasum minus ammonia-N and MN and, thus, includes any endogenous contributions. Data were analyzed using a split-plot design (Hicks, 1973). The statistical model for the trial was as follows: $Y_{ijkl} = \mu + B_j + S_{j(i)} + P_k + F_l + BF_{jl} + \epsilon_{ijkl}$, where μ is the common experimental effect, B is body weight (whole plot), S is steer within body weight level effect (whole plot error), P is period effect, F is fat level effect, BF is the interaction of body weight and fat level, and ϵ is the residual error. Subplot treatment effects were tested using the orthogonal polynomials. The protocol for this trial was approved by the University of California Animal Use and Care Administrative

Committee.

Results and Discussion

Treatment effects on characteristics of digestion are shown in Table 3. There were no interactions between BW and fat level ($P > 0.10$) on ruminal or total tract digestion. However, the proportion of starch digested in rumen was lower (2.8%, $P < 0.05$) for heavy-weight steers than for light-weight steers. The basis for this effect is not certain, although a tendency for lower ruminal starch digestion in older cattle has been observed previously (Rainey et al., 2002).

Increasing the level of supplemental fat from 0 to 9% depressed (linear component, $P < 0.01$) ruminal digestion of OM and NDF, and increased (linear component, $P < 0.05$) ruminal N efficiency (nonammonia N flow to the small intestine/N intake). The negative effects of supplemental fat on ruminal OM and NDF digestion has been reported previously (Boggs et al., 1987; Zinn, 1988, 1989; Elliot et al., 1996). In vitro studies (Henderson, 1973; Maczulak et al., 1981) demonstrated that the unsaturated fatty acids, particularly C18:1 inhibit ruminal cellulolytic microbes. MacLeod and Buchanan-Smith (1972) postulated that the depressing effects of fat on fiber digestion might also be partially due to physical coating of fiber particles, forming a lipid barrier that impedes enzyme penetration. However, no differences in ruminal fiber digestion were noted when supplemental fat was added directly to the grain, the forage, or as the final ingredient in the feed mix (Zinn et al., 1998; Plascencia et al., 2001; Plascencia and Zinn, 2002).

The depression in ruminal OM digestion observed here can be attributed partially (~28%) to differences in NDF digestion, and partially to ruminal indigestibility of fat. Consistent with previous studies, supplemental fat did not affect ($P > 0.10$) ruminal digestion of starch McAllan et al., 1983; Krehbiel et al., 1995), or N (Elliot et al., 1996; Plascencia et al., 1999).

There were no treatment effects ($P > 0.10$) on postruminal digestion of OM, NDF and N. There tended to be an interaction ($P < 0.10$) between BW and level of fat supplementation on postruminal starch digestion. Increasing level of fat supplementation increased postruminal digestion of starch in heavy-weight steers, but did not affect starch digestion in the light-weight steers.

Treatment effects on postruminal fatty acid digestion are shown in Table 4. There were no interactions between BW and fat level ($P > 0.10$) on fatty acid digestion. Across BW (whole plot effects), flow of fatty acids to the small intestine was 113, 112, 102 and 101% of intake for the 0, 3, 6, and 9% levels of supplemental fat, respectively, reflecting decreased de novo microbial fatty acid synthesis at the higher levels of fat supplementation (Klusmeyer and Clark, 1991; Pantoja et al., 1996; Ramirez and Zinn, 2000). Postruminal fatty acid digestion decreased (linear component, $P < 0.01$) with increasing level of fat supplementation, averaging 82.6, 80.7, 75.5 and 67.4% for the 0, 3, 6, and 9% level of fat supplementation, respectively.

Intestinal digestion of unsaturated fatty acids was not affected ($P > 0.10$) by level of fat intake, averaging 87 and 77% for C18:1 and C18:2, respectively. The lower digestibility observed for C18:2 vs C18:1 in this study may be more apparent than real. Very little C18:2 ($< 0.5\%$ of duodenal DM) was supplied to the small intestine, affecting the analytical accuracy of the measure. The coefficient of variation associated with intestinal digestion of C18:2 (9.5%) was 3 fold greater than that of the other fatty acids.

Postruminal digestion of saturated fatty acids declined markedly (linear component, $P < 0.01$) with increasing levels of fat intake. The decline in postruminal digestion with increasing level of fat intake was 121% greater for C18:0 than for C16:0 (consistent with the concept that intestinal digestion of saturated fatty acids decreases with increasing chain length; Steele and Moore, 1968; Zinn, 1989). Furthermore, whereas C18:0 comprised only 4 to 13% of fatty acid intake, it comprised 56 to 64% of total fatty acid flow to the small intestine. Hence, decreased digestion of C18:0 explained most of the depression in total intestinal fatty acid digestion with increasing levels of fat intake (Coppock and Wilks, 1991; Wu et al., 1991; Plascencia et al., 1999).

However, a delimitation of metabolism studies of this nature is that it doesn't take into consideration the potential for biohydrogenation of unsaturated fatty acids in the lower intestinal tract. To the extent that some C18:1 entering the small intestine was hydrogenated to C18:0 before excretion in the feces, intestinal digestion of C18:1 and C18:0 would be overestimated and underestimated, respectively.

The relationship between fatty acid intake (FAI, g/kg of BW, mean) and intestinal fatty acid digestion observed in this, and 6 other studies conducted at this center and elsewhere (Wu et al., 1991; Pantoja et al., 1996; Zinn and Shen, 1996; Ramirez and Zinn, 2000; Zinn et al., 2000; Plascencia and Zinn, 2002) is shown in Figure 1. Fatty acid digestion decreased linearly with increasing intake: fatty acid digestion, % = $87.560 - 8.591\text{FAI}$; $R^2 = 0.89$ ($P < 0.01$). Fatty acid digestion exceeded 80% when fatty acid intake was less than 0.86 g/kg of BW, decreasing by 0.85% for each 0.1 g/kg BW increase in total fatty acid intake. In contrast, Zinn (1994) observed a curvilinear response in intestinal lipid digestion with increasing levels of lipid intake. A comparison of the two models is shown in Figure 2. Both models give similar results when fatty acid intakes are less than 2.0 g/kg of BW. However, at higher intakes, the earlier model (Zinn, 1994) underestimates intestinal fatty acid digestion. As stated previously, a limitation of the earlier model is that it contained only 1 data point where fatty acid intake exceeded 2.0 g/kg BW.

Given that one gram of intestinally digestible fat (IDF) has a ME value of 9 Kcal (100% of its physiological fuel value); and the partial efficiency of utilization of ME from dietary fat for BW gain is 67% (Czerkowsky et al., 1966; Garrett, 1980; Zinn, 1994), the NE_g value of dietary fat may be calculated as 6.03 Kcal/g IDF. Accordingly, applying digestibility values, the NE_g values for the yellow grease used in this study are 4.87, 4.55, and 4.06 Mcal/kg for the 3, 6, and 9% of level supplementation, respectively. Corresponding NE_m values are 6.02, 5.66, and 5.10 Mcal/kg, respectively [where $\text{NE}_m = (\text{NE}_g + 0.41)/0.877$; derived from NRC, 1984].

The NE values obtained for yellow grease supplemented at the rate of 3, 6, and 9% of dietary DM (fatty acid intake = 1.17, 1.67, and 2.14 g/kg BW) were 100, 94, and 85% of the tabular value (NRC, 1996). The linear decrease in NE value of supplemental fat with increasing level of fat intake observed in this study are in close agreement with NE values obtained at this center based on growth performance (Zinn, 1994; Zinn and Plascencia, 2002). The good agreement observed between NE measures based on metabolism studies and NE measures based on growth performance is supportive of the concept that intestinal fatty acid digestion is the primary determinant of level of intake effects on NE value of supplemental fats.

Supplemental fat decreased (Table 3; linear component, $P < 0.01$) total tract digestion of OM and NDF. Depressed total tract fiber and OM digestion due to fat supplementation is well documented (Moore et al., 1986; Zinn and Plascencia, 1993).

Implications

Intestinal fatty acid digestion is a predictable function of level of total fatty acid intake per unit body weight. Depressions in fatty acid digestion with increasing level of intake are due primarily to decreased intestinal absorption of palmitic and stearic acids. Level of fatty acid intake does not affect intestinal absorption of unsaturated fatty acids. Changes in intestinal fatty acid digestion account for most of the variation in net energy value of supplemental fat.

Literature Cited

- AFOA. 1988. Trading and Arbitration Rules. American Fats and Oils Association, Inc. New York.
- AOAC. 1986. Official methods of analysis. 14th ed. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA.
- AOCS. 1978. Official and tentative Methods (3rd Ed.). American Oil Chemists' Society, Champaign, IL.
- Bergen, W. G., D. B. Purser, and J. H. Cline. 1968. Effect of ration on the nutritive quality of microbial protein. *J. Anim. Sci.* 27:1497-1501.
- Boggs, D. L., W. G. Bergen, and D. R. Hawkins. 1987. Effects of tallow supplementation and protein withdrawal on ruminal fermentation, microbial synthesis and site of digestion. *J. Anim. Sci.* 64:907-914.
- Czerkawsky, J. W., L. Blaxter, and F. W. Wainman. 1966. The metabolism of oleic, linoleic and linolenic acids by sheep with reference to their effects on methane production. *Br. J. Nutr.* 20:349-361.
- Chai, W., and P. Uden. 1998. An alternative oven method combined with different detergent strengths in analysis of neutral detergent fiber. *Anim. Feed Sci. Technol.* 74:281-288.
- Coppock, C. E., and D. L. Wilks. 1991. Supplemental fat in high-energy rations for lactating cows: Effects on intake, digestion, milk yield, and composition. *J. Anim. Sci.* 69:3826-3837.
- Elliot, J. P., J. K. Drackley, and D. J. Weigel. 1996. Digestibility and effects of hydrogenated palm fatty acid distillate in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 79:1031-1039.
- Garret, W. N. 1980. Energy utilization of growing cattle as determined in seventy-two comparative slaughter experiments. Page 3 in *Energy Metabolism*. Butterworths, London.
- Henderson, C. 1973. The effects of fatty acids on pure culture in rumen bacteria. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 81:107-112.
- Hicks, C. R. 1973. *Fundamental concepts in the design of experiments*. Holt, Rinehart and Winston, New York.
- Hill, F. N., and D. L. Anderson. 1958. Comparison of metabolizable energy and productive determinations with growing chicks. *J. Nutr.* 64:587-603.
- Klusmeyer, T. H., and J. H. Clark. 1991. Effects of dietary fat and protein on fatty acids flow to the duodenum and milk produced by dairy cows. *J. Dairy Sci.* 74:3055-3067.
- Krehbiel, C. R., R. A. Stock, D. H. Shain, C. J. Richard, G. A. Ham, R. A. McCoy, T. J. Klopfenstein, R. A. Britton, and R. P. Huffman. 1995. Effect of level and type of fat on subacute acidosis in cattle fed dry-rolled corn finishing diets. *J. Anim. Sci.* 73:2438-2446.
- MacLeod, G. K., and J. G. Buchanan-Smith. 1972. Digestibility of hydrogenated tallow, saturated fatty acids and soybean oil-supplemented diets by sheep. *J. Anim. Sci.* 35: 890-895.

- Maczulak, A. E., B. A. Dehority, and D.L. Palmquist. 1981. Effect of long chain fatty acids on growth of rumen bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 42:856-862.
- McAllan, A. B., B. R. Knight, and J. D. Sutton. 1983. The effect of free and protected oils on the digestion of dietary carbohydrates between the mouth and duodenum of sheep. *Br. J. Nutr.* 48:433-440.
- Moore, J. A., R. S. Swingle, and W. H. Hale. 1986. Effects of whole cottonseed, cottonseed oil or animal fat on digestibility of wheat straw diets by steers. *J. Anim. Sci.* 63:1267-1273.
- NRC. 1984. *Nutrient Requirements of Beef Cattle*. 6th ed. National Academy of Sciences Press. Washington, DC.
- NRC. 1996. *Nutrient Requirements of Beef Cattle*. 7th ed. National Academy of Sciences Press. Washington, DC.
- Pantoja, J., J. L. Firkins, and M. L. Eastridge. 1996. Fatty acid digestibility and lactation performance by dairy cow fed fats varying in degree of saturation. *J. Dairy Sci.* 79:429-437.
- Plascencia, A., M. Cervantes, and R. A. Zinn. 2001. Influence of fat titer and method of addition on characteristics of ruminal and total tract digestion. *Proc. West Sect. Amer. Soc. Anim. Sci.* 52:548-550.
- Plascencia, A., M. Estrada, and R. A. Zinn. 1999. Influence of free fatty acid content on the feeding value of yellow grease in finishing diets for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 77:2603-2609.
- Plascencia, A., and R. A. Zinn. 2002. Evaluation of a forage:fat blend as an isocaloric substitute for steam-flaked wheat in finishing diets for feedlot cattle: growth-performance and digestive function. *Prof. Anim. Sci.* 18:247-253.
- Rainey, B. M., J. A. Paterson, R. J. Lipsey, R. N. Funston, G. W. Brester, and W. T. Choat. 2002. Effect of age and grain processing method on diet digestibility of beef cattle. *Proc. West Sect. Amer. Soc. Anim. Sci.* 53:585-588.
- Ramirez, J. E., and R. A. Zinn. 2000. Interaction of dietary magnesium level on the feeding value of supplemental fat in finishing diets for feedlot steers. *J. Anim. Sci.* 78:2072-2080.
- Steele, W., and J. H. Moore. 1968. The effects of monounsaturated and saturated fatty acids in the diet on milk fat secretion. *J. Dairy Res.* 35:353-360.
- Sukhija, P., and D. L. Palmquist. 1988. Rapid method for determination of total fatty acid content and composition of feedstuff and feces. *J. Agric. Food Chem.* 36:1202-1206.
- White, B.G., J. R. Ingalls, H. R. Sharma, and J. McKirdy. 1987. The effect of whole sunflower seeds on the flow of fat and fatty acids through the gastrointestinal tract of cannulated Holstein steers. *Can. J. Anim. Sci.* 67: 447-459.
- Wu, Z., O. A. Ohajuruka, and D. L. Palmquist. 1991. Ruminal synthesis, biohydrogenation, and digestibility of fatty acids by dairy cows. *J. Dairy Sci.* 74:3025-3034.
- Zinn, R. A. 1988. Comparative feeding value of supplemental fat in finishing diets for feedlot steers supplemented with and without monensin. *J. Anim. Sci.* 66:213-227.
- Zinn, R. A. 1989. Influence of level and source of dietary fat on its comparative feeding value in finishing diets for steers: Metabolism. *J. Anim. Sci.* 67:1038-1049.
- Zinn, R. A. 1992. Comparative feeding value of supplemental fat in steam-flaked corn- and

- steam-flaked wheat- based finishing diets for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 70:2959-2969.
- Zinn, R. A. 1994. Effects of excessive supplemental fat on feedlot cattle growth performance and digestive function. *Prof. Anim. Sci.* 10:66-72.
- Zinn, R. A., and A. Plascencia. 1993. Interaction of whole cottonseed and supplemental fat on digestive function in cattle. *J. Anim. Sci.* 71:11-17.
- Zinn, R. A., and A. Plascencia. 2002. Influence of level and method of supplementation on the utilization of supplemental tallow fatty acids by feedlot steers. *J. Anim. Sci.* (Suppl. 1) 80:270 (Abstr.).
- Zinn, R. A., and F. N. Owens. 1986. A rapid procedure for purine measurement and its use for estimating net ruminal protein synthesis. *Can. J. Anim. Sci.* 66:157-166.
- Zinn, R. A., and Y. Shen. 1996. Interaction of dietary calcium and supplemental fat on digestive function and growth performance in feedlot steers. *J. Anim. Sci.* 74:2303-2309.
- Zinn, R. A., G. E. Alvarez, A. Plascencia, and Y. Shen. 1998. Influence of method of supplementation on the utilization of supplemental fat by feedlot steers. *Proc. West Sect. Amer. Soc. Anim. Sci.* 49:291-296.
- Zinn, R. A. S. K. Gulati , A. Plascencia, and J. Salinas. 2000. Influence of ruminal biohydrogenation on the feeding value of fat in finishing diets for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 78:1738-1746.

Table 1. Ingredient and nutrient composition of experimental diets

Item	Fatty acids intake, g/kg BW			
	0.47	1.17	1.62	2.14
Ingredient, g/kg (DM basis)				
Alfalfa hay	60	60	60	60
Sorghum sudan hay	60	60	60	60
Steam-flaked corn	786	756	726	696
Yellow grease	---	30	60	90
Urea	11	11	11	11
Molasses	60	60	60	60
Limestone	15	15	15	15
Trace mineral salt ^a	4	4	4	4
Chromic oxide ^b	4	4	4	4
Nutrient composition (DM basis)				
NE, Mcal/kg ^c				
Maintenance	2.11	2.20	2.30	2.40
Gain	1.44	1.52	1.61	1.70
Crude protein, %	12.53	13.26	13.65	14.22
Ether extract, %	3.7	6.5	9.3	12.2
Calcium, %	0.80	0.80	0.80	0.80
Phosphorus, %	0.47	0.48	0.49	0.49

^aTrace mineral salt contained: CoSO₄, 0.068%; CuSO₄, 1.04%; FeSO₄, 3.57%; ZnO, 1.24%; MnSO₄, 1.07%; KI, 0.052%; and NaCl, 92.96%

^bChromic oxide was added as a digesta marker

^cBased on tabular values for individual feed ingredients (NRC, 1996).

1

Table 2. Composition of supplemental yellow grease

Item	Yellow grease
Fatty acid, %	
C16:0	14.55
C18:0	10.03
C18:1	45.70
C18:2	17.32
Others	2.90
Iodine value, g iodine/100 g fat ^a	82.77
Moisture, %	0.60
Impurities, %	0.50
Unsaponifiable matter, %	0.62

^a A measure of the degree of saturation of fatty acids.

Table 3. Influence of body weight and level of fat supplementation on characteristics of digestion

Item	Body weight, kg								SEM
	175				370				
	Supplemental yellow grease, %				Supplemental yellow grease, %				
0	3	6	9	0	3	6	9		
Steers	4	4	4	4	4	4	4	4	
Intake, g/d									
DM	3,497	3,497	3,497	3,497	7,401	7,401	7,401	7,401	
OM	3,337	3,339	3,325	3,315	7,063	7,068	7,037	7,017	
NDF	530	530	497	492	1122	1123	1052	1042	
Starch	1,939	1,899	1,664	1,513	4,104	4,020	3,522	3,203	
N	72.0	70.9	69.2	67.8	152.4	150.2	146.5	143.6	
Fatty acids	82.6	203.9	283.4	373.8	174.9	431.6	599.8	791.4	
Flow to duodenum, g/d									
OM ^{ab}	1,364	1,521	1,614	1,683	3,035	3,290	3,474	3,628	70
NDF ^{ab}	283	312	338	357	618	684	750	776	25.4
Starch ^b	190	251	221	181	571	528	513	497	50
NAN ^b	62.5	60.5	61.0	62.0	133	137	143	148	4.5
Microbial N ^b	45.9	44.0	40.5	46.2	98.5	96.7	92.8	95.1	4.7
Feed N ^b	16.5	16.5	20.5	15.9	34.8	39.8	50.3	52.6	4.3
Fatty acid ^{abcd}	97.1	234.9	287.1	381.9	189.6	471.0	611.0	789.4	15.1
Ruminal digestion, %									
OM ^a	72.9	67.6	63.7	63.1	70.9	67.1	63.6	61.8	1.7
NDF ^a	46.6	41.0	32.1	27.51	44.9	39.1	28.8	25.5	3.0
Starch ^c	90.2	86.8	86.6	88.3	86.1	86.6	85.4	84.5	1.7
Feed N	76.8	76.8	70.6	76.5	77.2	73.5	65.6	63.3	3.6
MN efficiency ^f	18.9	19.5	19.0	22.0	19.6	20.4	20.6	22.0	1.1
N efficiency ^{gh}	0.87	0.85	0.88	0.91	0.87	0.91	0.97	1.02	0.03

Table 3 (cont)

Fecal excretion, g/d									
OM ^{ab}	554.9	626.8	720.1	782.4	1,241.5	1,378.9	1,413.2	1,563.7	53.2
NDF ^{bh}	255.9	278.2	300.2	307.5	555.9	589.5	641.1	662.7	26.4
Starch ^{bce}	7.7	10.1	7.8	9.8	31.6	22.5	14.7	15.2	2.6
N ^b	18.0	18.8	17.7	19.8	42.2	42.0	38.5	41.8	1.8
Fatty acid ^{abc}	16.9	44.8	72.6	126.0	31.0	91.6	146.3	261.1	11.2
Postruminal digestion, %									
OM	59.5	58.7	54.8	54.0	59.0	58.0	59.3	56.6	2.9
NDF	9.6	10.9	11.4	13.9	10.0	13.6	14.0	14.4	2.2
Starch ^c	95.8	96.3	96.1	94.0	93.9	95.7	97.2	96.9	0.9
N	72.4	70.2	72.2	69.7	68.5	70.3	73.7	72.5	1.8
Fatty acid ^a	82.3	80.8	74.8	67.4	82.7	80.5	76.1	67.3	2.8
Total tract digestion, %									
OM ^a	83.4	81.2	78.2	76.5	82.4	80.5	79.9	77.7	1.2
NDF ^a	51.8	47.4	39.8	37.5	50.5	47.5	39.0	36.4	3.2
Starch	99.6	99.5	99.5	99.3	99.2	99.4	99.6	99.5	0.1
N	75.0	73.6	74.5	71.0	72.3	72.0	73.4	71.0	1.5
Fatty acid ^a	79.6	78.0	74.5	66.6	82.3	78.8	75.6	67.1	2.2

^a Fat supplementation linear effect, P<0.01.

^b Body weight effect, P<0.01.

^c Body weight by level of fat supplementation interaction, P<0.10.

^d Fat supplementation quadratic effect, P<0.01.

^e Weight effect, P<0.10.

^f Duodenal microbial N, g kg⁻¹ OM fermented in the rumen.

^g Duodenal non-ammonia N, g g⁻¹ N intake.

^h Fat supplementation linear effect, P<0.05.

Table 4. Main effects of level of fat supplementation on fatty acid digestion in Holstein steers

Item	Supplemental yellow grease, %				SEM
	0	3	6	9	
Fatty acid intake, g/d					
C16:0	27.2	62.9	107.9	144.5	
C18:0	5.3	24.4	54.0	76.0	
C18:1	38.5	134.6	217.5	301.6	
C18:2	51.2	81.0	50.5	34.8	
Total	128.7	317.8	441.6	582.6	
Fatty acid intake, g/kg BW	0.47	1.17	1.62	2.14	
Flow to duodenum, g/d					
C16:0 ^a	23.4	59.7	75.3	99.5	3.8
C18:0 ^a	91.2	229.8	282.9	347.4	17.9
C18:1 ^a	22.6	52.9	78.9	130.4	12.2
C18:2 ^b	5.5	8.2	9.8	10.0	1.9
Total fatty acid ^a	143.4	353.0	449.1	590.2	15.2
Fecal excretion, g/d					
C16:0 ^a	3.7	9.7	14.3	25.5	1.6
C18:0 ^a	16.0	50.0	82.1	141.4	10.1
C18:1 ^a	2.7	6.0	10.6	23.6	2.5
C18:2 ^b	1.3	1.7	1.7	2.2	0.3
Total fatty acid ^a	23.9	68.2	109.4	193.60	11.9
Postruminal digestion, %					
C16:0 ^a	83.5	83.8	80.4	74.3	2.1
C18:0 ^a	81.6	78.2	70.2	59.3	2.5
C18:1	87.4	88.8	86.5	82.4	2.5
C18:2	80.2	78.9	72.0	78.2	7.3
Total fatty acid ^a	81.9	80.1	75.1	65.7	2.2

^a Fat supplementation linear effect, P<0.01.

^b Fat supplementation linear effect linear effect, P<0.10.

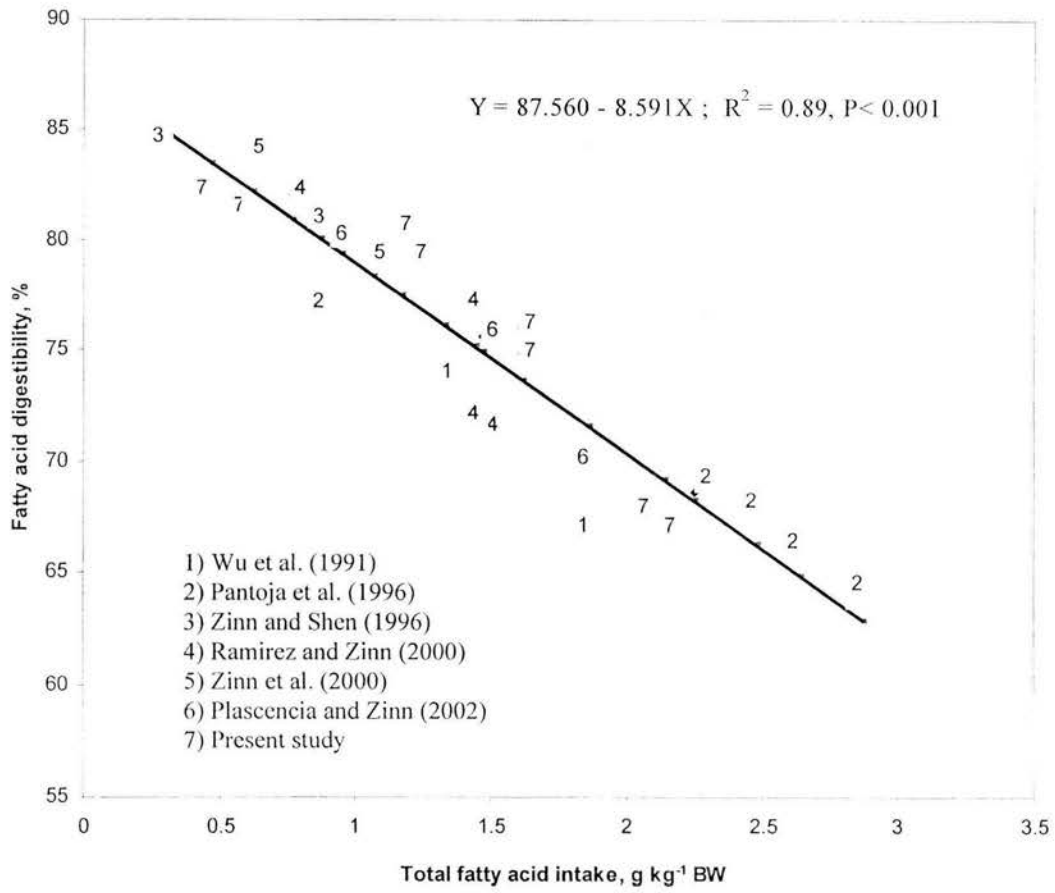


Figure 1. Influence of fatty acid intake on intestinal fatty acid digestion.

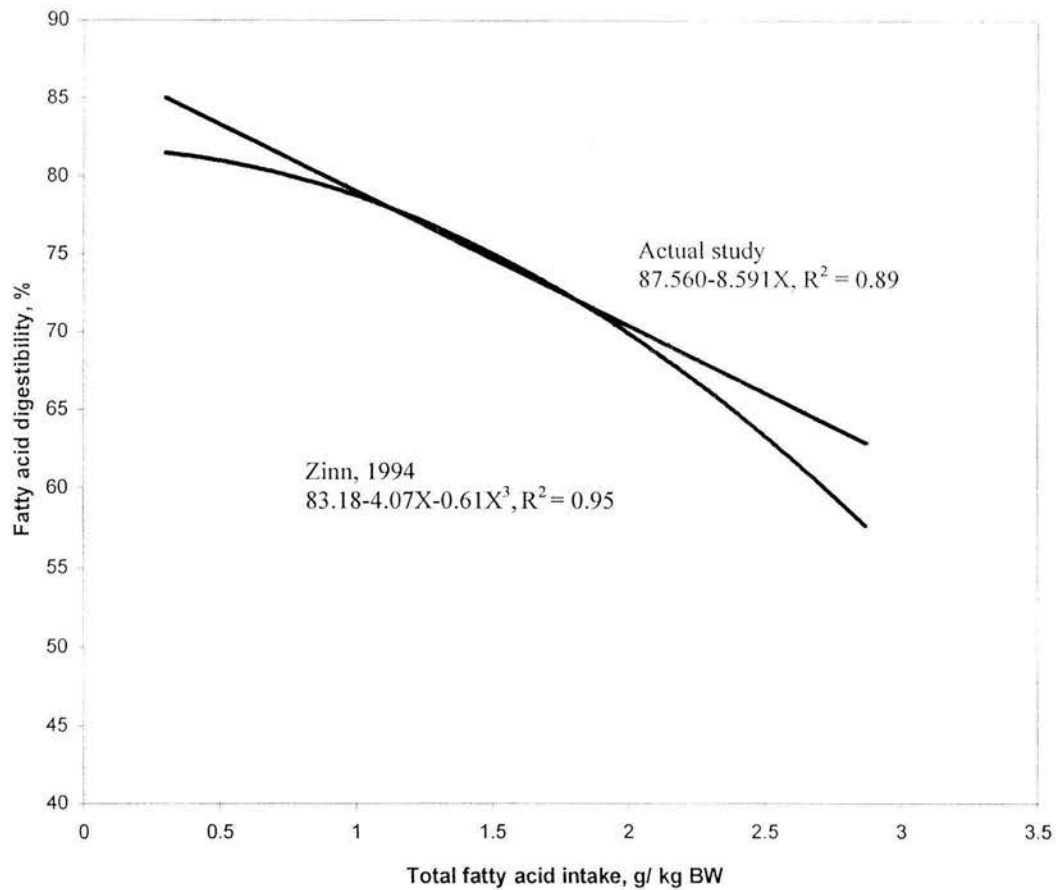


Figure 2. Comparison of the models for predicting intestinal fatty acid digestion (present study vs Zinn, 1994).

Experimento II.

Title: **Influence of levels of fat supplementation on bile flow and fatty acid digestion in cattle.**

Authors: Alejandro Plascencia*, Germán David Mendoza[†], Carlos Vásquez^{††} and Richard A. Zinn^{‡2}

Address: *Instituto de Investigaciones en Ciencias Veterinarias, UABC, Mexicali, México.

[‡]Department of Animal Science, Desert Research and Extension Center, University of California, El Centro 92243.

[†]Programa de Ganadería, Colegio de Posgraduados, Montecillo, México.

^{††}Universidad Nacional Autónoma de México.

ABSTRACT: Three Jersey x Holstein steers (215 ± 4.8 kg) with cannulas in the rumen and proximal duodenum were used in a 3 x 3 Latin squares design experiment to evaluate the level of fat supplementation (0, 4, and, 8% yellow grease) on characteristics of duodenal chyme, bile production, and digestion of fatty acids. Dry matter intake was restricted to 2.15% of BW. Characteristics of bile obtained during evisceration of 18 beef carcasses were as follows: pH = 7.48 ± 0.29; total solids = 8.32% ± 0.66; density, 1.012 ± 0.02 g/mL and total lipids, 1468 ± 82 mg/dL. Increasing level of fat supplementation decreased (linear effect, $P = 0.07$) postruminal fatty acid digestion, due primarily to decreased absorption of saturated fatty acids. The estimated NE_m (Mcal/kg) of yellow grease averaged 5.87 and 5.46 for the 4, and 8% of level supplementation, respectively. There were no treatment effects ($P > 0.20$) on pH and density of duodenal chyme. Although, pH was lower (2.34 vs 3.81, $P < 0.01$), and density was greater (1.3% $P < 0.01$) for proximal duodenum than for distal duodenum chyme. Bile production averaged 31.9 ± 0.35 mL/kg BW. Increasing level of fat intake increased (linear effect, $P = 0.07$) bile production. Increasing the level of supplemental fat from 4 to 8% increased bile production and duodenal lipid flow by 10.3 and 35.7%, respectively. Thus, with increasing level of fat supplementation, the bile:lipid ratio (mL of bile/g of lipid in duodenum) of distal duodenal chyme decreased (linear effect, $P < 0.01$) from 23.4 to 16.7. The bile:lipid ratio of distal duodenal chyme explained 69% of the variation in intestinal fatty acid digestion. We conclude that the decrease in NE value of supplemental fat with increasing level of fat intake is largely due to disproportionate increases in bile production, and hence, decreased bile:lipid ratios.

Key words: Fat level, Fatty acid, Cattle, Bile flow, Digestion.

Introduction

Current standards (NRC, 1996) for the NE_m and NE_g values of supplemental fats are 6.00 and 4.50 Mcal/kg. Estimates based on these values are consistent with empirically derived measures when total fatty acid intake did not exceed 0.86 g/kg of BW (Zinn, 1994). When fatty acid intake exceeded 0.86 g/kg of BW, the NE value of fat declined (Zinn and Plascencia, 2002). This decline has been largely attributable to decreased postruminal fatty acid digestion (Zinn, 1994), mainly stearic and palmitic acids (Enjalbert et al., 2000; Plascencia et al., 2003). Bouchart (1993) suggested that decreased fatty acid digestion might be due to insufficient bile production. The flow of digesta into the duodenum stimulates bile secretion rates (Harrison, 1962). However, the influence of fat intake on bile secretion has not been assessed in ruminants. Early reports (Harrison and Hill, 1960; Harrison, 1962) indicated wide discrepancies (0.6 to 1.45 mL/h/kg BW) in estimates of bile production in sheep. The basis for this variation is not certain. Bile flow was determined using permanent cannulation of the common bile duct of sheep fed forage-based diets. Collected bile was not returned to the duodenum, interfering with normal recycling (enterohepatic circulation; Merchen, 1988). As an alternative to cannulation of the bile duct, net bile production may also be determined as the difference in bile flow between intestinal cannulas located proximal and distal to the bile duct. Lipid absorption along this first segment of the small intestine (about 60 cm) is negligible due to low pH (1.8-2.7, Leat and Harrison, 1969), and high rate of passage (Bueno et al., 1975). The objective of present study was to directly assess the relationship between bile production and intestinal fatty acid digestion in cattle fed high-grain finishing diets.

Materials and Methods

Three Jersey x Holstein steers (215 ± 4.8 kg) with cannulas in proximal (6 cm of pyloric sphincter; Zinn and Plascencia, 1993) and distal duodenum (10 cm posterior to the bile duct) were used in a 3 x 3 Latin square design to evaluate the influence of level of fat supplementation (0, 4 and 8%) on characteristics of bile flow and fat utilization in cattle fed finishing diets. Composition of experimental diets is shown in Table 1. Composition of the yellow grease (YG) used in this study (Table 2) was similar to the standards set by American Fats and Oils Association (AFOA, 1988), and to measures for YG used in other experiments conducted at this center (Zinn, 1988, 1989b, 1992). Supplemental fat was added to the diet during the next to the last step in the batch mixing process, just prior to adding molasses.

Eighteen gall bladders were obtained during postmortem evisceration of beef carcasses at a commercial slaughter plant. Bile from excised gall bladders was quantitatively transferred into individual plastic jars (500 mL). Sample-jars were then placed on ice and promptly transported to the laboratory for immediate analyses.

Steers were individually maintained in concrete slotted-floor pens (3.9 m^2) with access to water at all times. Dry matter intake was restricted to 2.15% of BW (4.6 ± 0.056 kg/d). Diets were fed in equal portions at 0800 and 2000 daily. Experimental periods consisted of a 10-d diet adjustment period followed by a 4-d collection period. During the collection period duodenal and fecal samples were taken from all steers, twice daily as follows: d 1, 0750 and 1350 h; d 2, 0900 and 1500 h; d 3, 1050 and 1650 h; and d 4, 1200

and 1800 h. Individual samples consisted of approximately 750 mL proximal duodenal chyme, 750 mL from distal duodenal chyme, and 200 g (wet basis) fecal material. Samples from each steer and within each collection period were composited for analysis. Feed and digesta samples were subjected to all or part of the following analysis: DM (oven drying at 105 °C until no further weight loss); ash (AOAC, 1986); fatty acids (Sukhija and Palmquist, 1988); lipid (acidified chloroform-methanol extraction; Zinn, 1994); pH (pHmeter-Orion Mod 2345); density (w/v); and chromic oxide (Hill and Anderson, 1958). Lipid content and physical characteristics of bile used as a reference to calculate bile flow were determined as follows: density (w/v); total solids (oven drying at 65°C until no further weight loss); pH (pHmeter-Orion Mod 2345); and total lipid (colorimetric method; TECO diagnostics, Anaheim, CA). Composition of supplemental yellow grease was analyzed according to AOCS (1978) procedures as follows: moisture (method Ca 2a-45), impurities (method Ca 3-46), unsaponifiables (method Ca 6a-40), iodine value (method Tg 1a-64). Bile flow was calculated as the difference in lipid content in duodenal chyme divided by lipid concentration the bile reference:

Bile flow, L/d = (lipid in distal duodenum-lipid in proximal duodenum)/lipid concentration of reference bile, g/L

Data for bile flow and digestion of lipid and fatty acids were analyzed using a 3 x 3 Latin square design (Hicks, 1973). Treatment effects were tested using the orthogonal polynomials. Characteristics of duodenal chyme were analyzed using a 3 x 3 Latin square design with repeated measures, as outlined by Hicks (1973).

Results and Discussion

Characteristics of reference bile obtained during evisceration of 18 beef carcasses were as follows: pH = 7.48 ± 0.29 ; total solids = $8.32\% \pm 0.66$; density, 1.012 ± 0.02 g/mL and total lipids, 1468 ± 82 mg/dL. These results are close in agreement with those reported by others (Ruckebusch et al., 1991; Moore and Christie, 1984; Merchen, 1988). There were no treatment effects ($P > 0.20$) on density and pH of duodenal chyme. Although, density was greater (1.3% $P < 0.01$), and pH was lower (2.34 vs 3.81, $P < 0.01$) for proximal duodenal chyme than for distal duodenal chyme. Increased pH at the distal duodenum reflects bile and pancreatic secretion. Differences in pH between the proximal and distal segments of the duodenum are consistent with previous studies (Moore and Christie, 1984; Christiansen and Webb, 1990). Although very little has been reported with respect to chyme density, it is reasonable to expect that density would be lower in the distal duodenum due to dilution with bulky bile salts.

Bile production is shown in Table 3. Across treatments, bile secretion averaged 32 mL/kg BW, in good agreement previous studies (32.4 mL/kg BW, Studzinsky and Bobowiec, 1979; 34.8 mL/kg BW, Harrison, 1962; 26.8 mg/kg BW, Bobowiec and Kosior-Korzecka, 1999). Fat supplementation increased (linear effect, $P = .07$) bile secretion. However, bile secretion per g of lipid flow to the small intestine decreased (linear effect, $P < .01$) with increasing level of fat supplementation.

In cattle, intestinal fat digestion is a predictable function of level of fat intake (Palmquist, 1991; Zinn, 1994; Plascencia et al., 2003). Decreases in fat digestion with increasing level of fat intake are largely attributable to decreased digestibility of saturated fatty acids (Wu et al., 1991; Pantoja et al., 1996; Plascencia et al., 1999). Lipids are highly

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

insoluble in water, their absorption from the small intestine is dependent on emulsification and the formation of micelles mediated by bile acids. Unsaturated fatty acids are physically much more bulky and less viscous than saturated fatty acids. Consequently, the critical bile concentration necessary for micellar formation is less than that needed for saturated fatty acids (Freeman, 1984). Although fat supplementation evokes increased bile flow, the magnitude of the increase is disproportionately low compared with the increase in saturated fatty acid flow to the small intestine as a result of ruminal biohydrogenation. In the present study, the bile:lipid ratio explained 69% of variation in intestinal fatty acid digestion (Figure 1).

Treatment effects on flow and digestion of fatty acids are shown in Table 4. Because DMI was constant across treatments (4.6 kg/d) intakes of individual fatty acids varied according to the content of the diets. Flow of fatty acids to the small intestine was 103, 107, and 107 % of intake for the 0, 4, and 8% levels of supplemental fat, respectively, reflecting de novo microbial fatty acid synthesis (Klusmeyer and Clark, 1991; Pantoja et al., 1996; Ramirez and Zinn, 2000).

Postruminal fatty acid digestion decreased (linear component, $P = 0.07$) with increasing level of fat supplementation, averaging 80.2, 78.6, and 72.63% for the 0, 4, and 8% level of fat supplementation, respectively. As mentioned previously, has been previously demonstrated (Zinn, 1994) postruminal digestion of supplemental fatty acids is largely a function of total fatty acid intake. Plascencia et al. (2003) observed a close relationship ($R^2 = 0.89\%$) between the total fatty acid intake (FAI, g/kg BW) and postruminal fatty acid digestion: fatty acid digestion (%) = $87.560 - 8.591\text{FAI}$. Accordingly, observed

postruminal fatty acid digestion in the present study was 1.00 and 0.99% of expected for the 4 and 8% levels of supplemental fat, respectively.

Post ruminal digestion of saturated and unsaturated fatty acids averaged 73.8 and 85.3%, respectively. The greater digestibility of unsaturated fatty acids is consistent with previous studies (Enjalbert et al., 2000; Zinn et al., 2000; Avila et al., 2000). Digestibility of both saturated (linear effect, $P = 0.13$) and unsaturated fatty acids (linear effect, $P < 0.05$) declined with increasing fat intake. Nevertheless, the slope of the decline was 243% greater (2.14 vs 0.88% per unit increase in supplemental fat) for the saturated fatty acids. Furthermore, the decline in postruminal digestion with increasing level of fat intake was 109% greater for C18:0 than for C16:0, consistent with the concept that intestinal digestion of saturated fatty acids decreases with increasing chain length (Steele and Moore, 1968; Zinn, 1989b). At low to medium levels of fat supplementation (less than 5% supplemental fat), postruminal digestibility of C18:0 has been consistently 5% less than that of C16:0 (Bauchart, 1993). However, these differences become greater at higher levels of fatty acid intake (greater than 5% supplemental fat; Plascencia et al., 2003).

Because C18:0 is the predominant fatty acid entering the small intestine (comprising 48 to 52% of total fatty acid flow), the decrease in digestion of C18:0 with increasing levels of fat intake explained 85% ($P < 0.01$) of the variation in total intestinal fatty acid digestion. This result is consistent with previous studies conducted at this Center, where similar fat source and levels of supplementation were compared (Plascencia et al., 1999, 2003; Zinn et al., 2000). However, a delimitation of metabolism studies of this nature is that it doesn't take into consideration the potential for biohydrogenation of unsaturated fatty acids in the

lower intestinal tract. To the extent that some C18:1 entering the small intestine was hydrogenated to C18:0 before excretion in the feces, intestinal digestion of C18:1 and C18:0 would be overestimated and underestimated, respectively.

Given that one gram of intestinally digestible fat (IDF) has a ME value of 9 Kcal (100% of its physiological fuel value); and the partial efficiency of utilization of ME from dietary fat for BW gain is 67% (Czerkowsky et al., 1966; Garrett, 1980; Zinn, 1994), the NE_g value of dietary fat may be calculated as 6.03 Kcal/g IDF. Accordingly, the NE_g values for the yellow grease used in this study are 4.74, and 4.38 Mcal/kg for the 4, and 8% of level supplementation, respectively. Corresponding NE_m values are 5.87, and 5.46 Mcal/kg, respectively [where $NE_m = (NE_g + 0.41)/0.877$; derived from NRC, 1984]. Thus, NE values obtained for yellow grease supplemented at the rate of 4, and 8% of dietary DM (1.07, and 1.72 g fatty acid intake/kg BW) were 98, and 91% of the tabular value (NRC, 1996).

Implications

Bile production explains 69% of variation in fatty acid intestinal digestibility. Depressions in fatty acid digestion with increasing level of intake are due primarily to negative effect on intestinal absorption of stearic acid. Intestinal fatty acid digestion, and the net energy value of supplemental fat is a predictable function of total fatty acid intake.

Literature Cited

- AFOA. 1988. Trading and Arbitration Rules. American Fats and Oils Association, Inc. New York.
- AOAC. 1986. Official methods of analysis. 14th ed. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA.
- AOCS. 1978. Official and tentative Methods (3rd Ed.). American Oil Chemists' Society,

Champaign, IL.

- Avila, C.D., E.J. DePeters, H. Perez-Monti, S.J. Taylor, and R.A. Zinn. 2000. Influences of saturation ratio of supplemental dietary fat on digestion and milk yield in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 83:1505-1519.
- Bobowiec, R., and U. Kosior-Korzecka. 1999. Relationships amongst liver bile salt clearance, bile secretion and infusion of lipids in calves. *J. Vet. Med.* 46: 409-420.
- Bueno L., J. Fioramonti, and Y. Ruckebusch. 1975. Rate of flow of digesta and electrical activity of the small intestine in dogs and sheep. *J. Physiol.* 249:69-85.
- Czerkawsky, J. W., L. Blaxter, and F. W. Wainman. 1966. The metabolism of oleic, linoleic and linolenic acids by sheep with reference to their effects on methane production. *Br. J. Nutr.* 20:349-361.
- Christiansen, M.L., and K.E. Webb, Jr. 1990. Intestinal acid flow, dry matter, starch and protein digestibility and amino acid absorption in beef cattle fed a high-concentrate diet with defluorinated rock phosphate, limestone or magnesium oxide. *J. Anim. Sci.* 68:2105-2118.
- Enjalbert, F., M.C. Nicot, C. Bayourthe, and R. Moncoulon. 2000. Effect of duodenal infusion of palmitic, stearic or oleic acids on milk composition and physical properties of butter. *J. Dairy Sci.* 83:1428-1433.
- Freeman, C.P. 1984. The digestion, absorption and transport of fats-non ruminants. Page 108 in *Fats in Animal Nutrition*. J. Wiseman, ed. Butterworths, London, England.
- Garret, W. N. 1980. Energy utilization of growing cattle as determined in seventy-two comparative slaughter experiments. Page 3 in *Energy Metabolism*. Butterworths, London, England.
- Harrison, F.A. 1962. Bile secretion in the sheep. *J. Physiol.* 162:212-224.
- Harrison, F.A., and K.L. Hill. 1960. Bile secretion in conscious sheep. *J. Physiol.* 154:610-620.
- Hicks, C. R. 1973. *Fundamental concepts in the design of experiments*. Holt, Rinehart and Winston, New York.
- Hill, F. N., and D. L. Anderson. 1958. Comparison of metabolizable energy and productive determinations with growing chicks. *J. Nutr.* 64:587-603.
- Klusmeyer, T. H., and J. H. Clark. 1991. Effects of dietary fat and protein on fatty acids flow to the duodenum and milk produced by dairy cows. *J. Dairy Sci.* 74:3055-3067.
- Leat, W.M.F., and F.A. Harrison. 1969. Lipid digestion in the sheep: Effect of bile and pancreatic juice on the lipids intestinal content. *Quart. J. Exp. Physiol.* 59:131-139.
- Merchen, N.R. 1988. Digestion, absorption and excretion in ruminants. Page 174 in *The ruminant animal: Digestive Physiology and Nutrition*. D.C. Church, ed. Prentice-Hall, New Jersey.
- Moore, J. H., and W.W. Christie. 1984. Digestion, absorption and transport of animal fats in ruminant animal. Page 123 in *Fats in Animal Nutrition*. J. Wiseman, ed. Butterworths, London, Engl.
- NRC. 1984. *Nutrient Requirements of Beef Cattle*. 6th ed. National Academy of Sciences Press. Washington, DC.
- NRC. 1996. *Nutrient Requirements of Beef Cattle*. 7th ed. National Academy of Sciences Press. Washington, DC.
- Palmquist, D. L. 1991. Influence of source and amount of dietary fat on digestibility in lactating cows. *J. Dairy Sci.* 74:1354-1360.
- Pantoja, J., J. L. Firkins, and M. L. Eastridge. 1996. Fatty acid digestibility and lactation

- performance by dairy cow fed fats varying in degree of saturation. *J. Dairy Sci.* 79:429-437.
- Plascencia, A., M. Estrada, and R. A. Zinn. 1999. Influence of free fatty acid content on the feeding value of yellow grease in finishing diets for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 77:2603-2609.
- Plascencia, A., G.D. Mendoza, C. Vazquez, and R. A. Zinn. 2003. Relationship between body weight and level of fat supplementation on fatty acid digestion in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 81:2653-2659.
- Ramirez, J. E., and R. A. Zinn. 2000. Interaction of dietary magnesium level on the feeding value of supplemental fat in finishing diets for feedlot steers. *J. Anim. Sci.* 78:2072-2080.
- Ruckebusch, Y., L.P. Phaneuf, and R. Dunlop. 1991. *Physiology of small and large animals.* Becker B.C., Inc. Philadelphia.PA.
- Steele, W., and J. H. Moore. 1968. The effects of monounsaturated and saturated fatty acids in the diet on milk fat secretion. *J. Dairy Res.* 35:353-360.
- Studzinski T., and Bobowiec R. 1979. Effect of intra-duodenal administration of HCl and NaHCO₃ on the secretion and content of sodium, potassium and calcium in the pancreatic juice and bile of sheep. *Pol. Arch. Weter.* 1979:22:205-217.
- Sukhija, P., and D. L. Palmquist. 1988. Rapid method for determination of total fatty acid content and composition of feedstuff and feces. *J. Agric. Food Chem.* 36:1202-1206.
- Wu, Z., O. A. Ohajuruka, and D. L. Palmquist. 1991. Ruminant synthesis, biohydrogenation, and digestibility of fatty acids by dairy cows. *J. Dairy Sci.* 74:3025-3034.
- Zinn, R. A. 1988. Comparative feeding value of supplemental fat in finishing diets for feedlot steers supplemented with and without monensin. *J. Anim.Sci.* 66:213-227.
- Zinn, R. A. 1989b. Influence of level and source of dietary fat on its comparative feeding value in finishing diets for steers: Metabolism. *J. Anim. Sci.* 67:1038-1049.
- Zinn, R. A. 1992. Comparative feeding value of supplemental fat in steam-flaked corn- and steam-flaked wheat- based finishing diets for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 70:2959-2969.
- Zinn, R. A. 1994. Effects of excessive supplemental fat on feedlot cattle growth performance and digestive function. *Prof. Anim. Sci.* 10:66-72.
- Zinn, R. A., and A. Plascencia. 1993. Interaction of whole cottonseed and supplemental fat on digestive function in cattle. *J. Anim. Sci.* 71:11-17.
- Zinn, R. A., and A. Plascencia. 2002. Influence of level and method of supplementation on the utilization of supplemental tallow fatty acids by feedlot steers. *J. Anim. Sci.* (Suppl. 1) 80:270 (Abstr.).
- Zinn, R. A., S. K. Gulati, A. Plascencia, and J. Salinas. 2000. Influence of ruminal biohydrogenation on the feeding value of fat in finishing diets for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 78:1738-1746.

Table 1. Ingredient and nutrient composition of experimental diets

Item	Fatty acids intake, g/kg BW		
	0.51	1.07	1.72
Ingredient, g/kg (DM basis)			
Alfalfa hay	60	60	60
Sorghum sudan hay	60	60	60
Steam-flaked corn	781	741	705
Yellow grease	---	40	80
Urea	7	8	9
Molasses	63	62	61
Limestone	13	13	13
Magnesium oxide	2	2	2
Trace mineral salt ^a	4	4	4
Chromic oxide ^b	4	4	4
Nutrient composition (DM basis)			
NE, Mcal/kg ^c			
Maintenance	2.13	2.27	2.41
Gain	1.47	1.59	1.72
Crude protein, %	11.6	11.50	11.41
Ether extract, %	3.6	7.4	11.2
Calcium, %	0.65	0.67	0.68
Phosphorus, %	0.30	0.29	0.29

^aTrace mineral salt contained: CoSO₄, 0.068%; CuSO₄, 1.04%; FeSO₄, 3.57%; ZnO, 1.24%; MnSO₄, 1.07%; KI, 0.052%; and NaCl, 92.96%.

^bChromic oxide was added as a digesta marker.

^cBased on tabular values for individual feed ingredients (NRC, 1996).

Table 2. Composition of supplemental yellow grease

Item	Yellow grease
Fatty acid, %	
C16:0	15.55
C18:0	8.80
C18:1	48.88
C18:2	15.13
Others	4.03
Iodine value, g iodine/100 g fat ^a	82.77
Moisture, %	0.60
Impurities, %	0.50
Unsaponifiable matter, %	0.62

^a Measure of the degree of saturation of fatty acids.

Table 3. Calculated bile flow in steers (215 kg) fed diets with 3 level of supplemental yellow grease

Item	Supplemental yellow grease, %			SEM
	0	4	8	
Steers	3	3	3	
Lipids, g/d				
Intake	128.4	253.8	405.9	
Flow to proximal duodenum ^a	156.6	279.4	434.7	3.9
Flow to distal duodenum ^a	251.7	375.0	541.2	3.3
Difference	95.1	95.6	106.5	
Bile flow				
mL/d ^b	6483	6510	7254	149
mL/[kg BW] ^b	30.4	31.4	34.2	0.8
mL/[kg BW h] ^b	1.26	1.29	1.42	0.03
mL bile/lipid flow to duodenum ^a	41.2	23.4	16.7	1.07

^a Fat supplementation linear effect, $P < 0.01$.

^b Fat supplementation linear effect linear effect, $P < 0.10$.

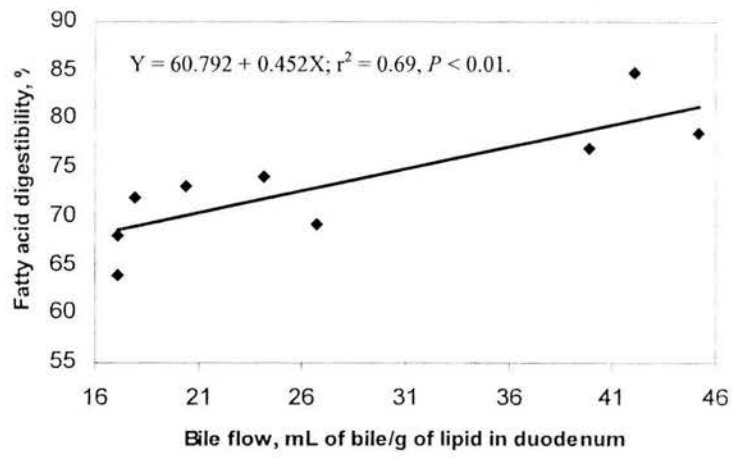


Figure 1. Influence of bile flow on intestinal fatty acid digestion.

Table 4. Main effects of level of fat supplementation on fatty acid digestion in Holstein steers

Item	Supplemental yellow grease, %			SEM
	0	4	8	
Steers	3	3	3	
Intake, g/d	4,586	4,616	4,613	
Fatty acid intake, g/d				
C16:0	25.3	88.5	104.5	
C18:0	4.2	46.2	56.7	
C18:1	36.7	164.9	240.3	
C18:2	54.6	54.2	39.4	
Total	109.6	228.9	369	
Fatty acid intake, g/kg BW	0.51	1.07	1.72	
Flow to duodenum, g/d				
C16:0 ^a	19.45	45.0	75.32	4.7
C18:0 ^a	52.8	117.6	206.5	9.7
C18:1 ^b	24.7	63.0	129.9	17.4
C18:2 ^a	12.2	15.3	18.3	0.4
Total fatty acid ^a	112.8	245.4	394.0	9.4
Fecal excretion, g/d				
C16:0 ^c	3.96	8.56	20.57	2.3
C18:0 ^c	10.5	31.0	67.8	0.6
C18:1 ^b	2.9	9.3	23.1	3.6
C18:2	1.2	1.7	3.0	0.4
Total fatty acid ^a	22.4	58.4	115.9	3.6
Postruminal digestion, %				
C16:0	79.5	79.9	72.6	4.3
C18:0	79.2	72.2	67.7	4.7
C18:1	88.0	85.5	82.0	2.1
C18:2	90.2	88.5	81.9	2.0
Saturated fatty acids	81.5	75.9	63.9	5.1
Unsaturated fatty acids ^c	88.7	85.5	81.7	1.1
Total fatty acid ^b	82.7	78.6	72.6	1.9

^a Fat supplementation linear effect, $P < 0.01$.

^b Fat supplementation linear effect linear effect, $P < 0.10$; ^c Fat supplementation linear effect linear effect, $P < 0.05$.