



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GANADERÍA

CURVAS DE PRODUCCIÓN Y COMPOSICIÓN LÁCTEA DE CABRAS
DEL ALTIPLANO POTOSINO

VIELKA JEANETHE CASTAÑEDA BUSTOS

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. MÉXICO.

2008

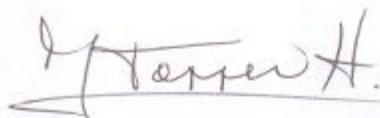
La presente tesis, titulada: Curvas de producción y composición láctea de cabras del altiplano potosino, realizada por la alumna: Vielka Jeanethe Castañeda Bustos, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GANADERÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



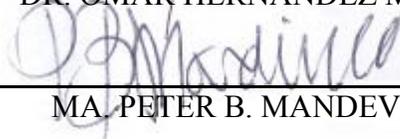
DR. GLAFIRO TORRES HERNÁNDEZ

ASESOR:



DR. OMAR HERNÁNDEZ MENDO

ASESOR:



MA. PETER B. MANDEVILLE

Montecillo, Texcoco, Estado de México, septiembre de 2008

CURVAS DE PRODUCCIÓN Y COMPOSICIÓN LÁCTEA DE CABRAS DEL ALTIPLANO POTOSINO

Vielka Jeanethe Castañeda Bustos, M. C.
Colegio de Postgraduados, 2008

La producción de leche de cabra constituye una fuente muy importante de ingresos para los productores en las zonas áridas y semiáridas de México. Sin embargo, hay información limitada en México sobre caracterización de las curvas de producción de la leche y de sus componentes, por lo que se realizó el presente estudio con objeto de caracterizar las curvas de lactancia y de sus componentes en cabras F_1 (Alpina x Nubia) del Altiplano Potosino, utilizando tres modelos matemáticos. Se evaluaron los modelos monofásico, difásico y gamma incompleta, considerando como criterios el cuadrado medio del error, pseudo R^2 , criterio de información de Akaike, criterio de información Bayesiano y $-2 \log$ likelihood. El modelo difásico fue el más consistente en todos los criterios de ajuste, por lo que resultó más útil que los modelos monofásico y gamma incompleta para la caracterización de la curva de producción de leche. Para los componentes de la leche, el modelo gamma incompleta fue mejor que el monofásico y difásico.

Palabras clave: funciones matemáticas, curvas de lactancia, cabras, modelo multifásico, gamma incompleta.

LACTATION CURVES AND MILK CONSTITUENTS OF GOAT MILK OF ALTIPLANO POTOSINO

Vielka Jeanethe Castañeda Bustos, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2008

Goat milk production is an important income source for producers in arid and semiarid zones in México. However, there is limited information on characterization of milk and constituent production curves. In this study, monophasic, diphasic and incomplete gamma models were evaluated in order to characterize milk and constituent production curves in F₁ (Alpine x Nubian) goats of the Potosino Highland. Measures of goodness-of-fit as mean square error, pseudo R², -2 log likelihood, Akaike's and Bayesian information criteria were used to compare models. Based on these criteria, diphasic model was the best to characterize milk production curve. For milk constituents, incomplete gamma model was the best.

Key words: mathematic functions, lactation curves, goats, multiphasic model, incomplete gamma.

Dedico esta tesis a:

Mi mamá, mi abuelita, Omar, Dra. Marta O. Díaz G;

*Porque son los pilares de mi vida y un claro ejemplo de lucha, amor incondicional,
perseverancia; y parte esencial de mi vida y formación profesional*

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología; por su apoyo en el financiamiento de mi preparación académica y por ser una institución con un gran sentido de desarrollo para México.

Al Colegio de Postgraduados; por brindarme un ambiente académico óptimo para poder realizar mi formación profesional.

Al Departamento de Producción Pecuaria de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí; por el apoyo brindado para la realización de la investigación.

A la Dra. Marta Olivia Díaz G.; por su incondicional apoyo y grandes enseñanzas personales y profesionales.

A los Doctores Glafiro Torres, Jaime Gallegos Sánchez, José Herrera Haro, Arturo Pro, Dra. Ma. Teresa Sánchez Torres–Esqueda; quienes siempre estuvieron dispuestos a brindarme la atención necesaria para cumplir con mi formación tanto profesional como personal.

A los doctores Sergio Pérez y Juan M. González; por su apoyo invaluable para la obtención de mi grado.

A mis compañeros y amigos; por sus consejos, compañía, por los maravillosos momentos y por brindarme su apoyo en los momentos que más lo necesitaba.

A mi mamá, abuelita y hermano; por su amor, confianza, apoyo incondicional; y por ser las personas más importantes y maravillosas que me ha otorgado la vida.

CONTENIDO

| | Página |
|--|--------|
| RESUMEN..... | iii |
| SUMMARY..... | iv |
| ÍNDICE DE CUADROS..... | x |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xii |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| REVISIÓN DE LITERATURA..... | 3 |
| Producción y composición de la leche caprina..... | 3 |
| Factores que afectan la producción y composición láctea..... | 10 |
| Raza..... | 10 |
| Nutrición..... | 12 |
| Época de parto..... | 16 |
| Número de parto..... | 19 |
| Número de crías..... | 20 |
| Etapa de lactancia..... | 20 |
| Curva de lactancia..... | 22 |
| Métodos de estimación..... | 27 |
| Gamma incompleta..... | 29 |
| Polinomio inverso..... | 33 |
| Morant y Gnanasakthy..... | 34 |
| Función multifásica..... | 37 |
| Criterios para definir el mejor modelo..... | 43 |

| | |
|--|----|
| Pseudo- R^2 | 45 |
| Prueba de Durbin – Watson..... | 46 |
| Cuadrado medio del error..... | 47 |
| Estimadores de máxima verosimilitud..... | 47 |
| Criterio de información de Akaike (AIC)..... | 48 |
| Criterio de información Bayesiano (BIC)..... | 49 |
| MODELACIÓN DE CURVAS DE PRODUCCIÓN Y COMPOSICIÓN DE LECHE DE CABRAS EN EL ALTIPLANO POTOSINO..... | 50 |
| LITERATURA CITADA..... | 66 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | Página |
|--|--------|
| Cuadro 2.1. Composición de la leche de cabra y de vaca..... | 4 |
| Cuadro 2.2. Inventario nacional de ganado caprino (número de cabezas)... | 5 |
| Cuadro 2.3. Producción de leche de cabra en México (toneladas)..... | 7 |
| Cuadro 2.4. Perfil de ácidos grasos en la grasa láctea de cabra y vaca (% del total, g 100 g ⁻¹ de grasa)..... | 9 |
| Cuadro 2.5. Producción láctea para diferentes razas caprinas..... | 11 |
| Cuadro 2.6. Composición láctea de algunas razas caprinas..... | 12 |
| Cuadro 2.7. Composición de la leche caprina según el tipo de alimentación..... | 13 |
| Cuadro 2.8. Producción y composición láctea de cabras Alpinas alimentadas con diferentes niveles de energía y proteína..... | 15 |
| Cuadro 2.9. Características de la lactancia de cabras Alpinas alimentadas con diferentes niveles de energía y proteína..... | 16 |
| Cuadro 2.10. Composición de la leche caprina según la estación del año.... | 17 |
| Cuadro 2.11. Perfil de ácidos grasos en la leche de cabra según la estación del año..... | 18 |
| Cuadro 2.12. Variación en grasa y sólidos totales según la semana de lactancia..... | 21 |
| Cuadro 2.13. Parámetros estimados para curvas de lactancia típicas y atípicas para los principales factores ambientales y de manejo..... | 27 |

| | | |
|--------------|---|----|
| Cuadro 2.14. | Parámetros obtenidos mediante la función gamma incompleta considerando algunos factores de variación..... | 32 |
| Cuadro 2.15. | Características de la lactancia obtenidas mediante la función gamma incompleta considerando algunos factores de variación..... | 33 |
| Cuadro 2.16. | Valores de los parámetros obtenidos mediante la función Morant y Gnanasakthy considerando los principales factores de variación..... | 36 |
| Cuadro 2.17. | Investigaciones para la modelación de la curva de lactancia mediante la función multifásica, considerando varios factores y sus efectos en las fases de la curva..... | 41 |
| Cuadro 2.18. | Parámetros estimados, características de la lactancia y criterios de ajuste para diferentes modelos..... | 43 |
| Cuadro 2.19. | Criterios de bondad de ajuste de varios modelos para describir curvas de lactancia..... | 43 |
| Cuadro 2.20. | Coefficiente de determinación (R^2) y varianza residual para diferentes modelos..... | 46 |
| Cuadro 3.1. | Parámetros estimados para la curva de producción de leche de cabras F_1 (Alpina x Nubia)..... | 58 |
| Cuadro 3.2. | Criterios de ajuste para la curva de producción de leche..... | 59 |
| Cuadro 3.3. | Criterios de ajuste para la curva de los componentes lácteos de cabras F_1 (Alpina x Nubia)..... | 61 |
| Cuadro 3.4. | Características de la lactancia de cabras F_1 (Alpina x Nubia).. | 64 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Página |
|---|--------|
| Figura 3.1. Producción de leche observada (•), promedio (—+—) y predicha mediante las funciones difásica (—), monofásica (—•) y gamma incompleta (—) para cabras F ₁ (Alpina x Nubia)..... | 59 |
| Figura 3.2. Producción láctea observada (•), promedio (—+—) y predicha mediante la función difásica [general (—), fase 1 (—) y fase 2 (•)] para cabras F ₁ (Alpina x Nubia)..... | 60 |
| Figura 3.3. Contenido observado (•), promedio (—+—) y predicho mediante la función gamma incompleta (—) de los componentes lácteos [sólidos totales (a), proteína (b) y grasa (c)]..... | 62 |

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 20 años, el porcentaje de cabras alrededor del mundo incrementó en países con bajos (75%), intermedios (25%) y altos ingresos (20%); esta situación, debido a la capacidad de adaptación de las cabras a diferentes ambientes (Morand-Fehr *et al.*, 2004), así como a la importancia de la producción caprina en la solución de algunas necesidades creadas por el crecimiento de la población humana (Boyazoglu *et al.*, 2005). La leche caprina, y sus productos como el yogurt, queso y leche en polvo, tienen importancia en la nutrición humana debido a su composición, ya que puede ser utilizada en personas alérgicas a la leche de vaca o con desordenes gastrointestinales, y por otra parte, puede cubrir las necesidades gastronómicas regionales, lo cual es un mercado en crecimiento en muchos países desarrollados (Barba *et al.*, 2001; Haenlein, 2004). En México, de manera tradicional, los sistemas de producción caprina se manejan en forma extensiva, principalmente en lugares considerados de baja productividad, como lo son las regiones áridas y semiáridas (Romero-Paredes, 2004), en las que la producción láctea es una importante fuente de ingreso; la alta eficiencia de la cabra para convertir recursos forrajeros de baja calidad en leche, suministran la mayor parte de la leche en el país (70%) (Mellado *et al.*, 2004). La producción es de carácter estacional, concentrándose la mayor parte en los meses de mayo a septiembre (Quiñones *et al.*, 1986); por lo que la cantidad de leche disponible a través del año es una consideración importante (Sölkner y Fuchs, 1987), ya que es la que determina los precios.

Las curvas de lactancia se utilizan para describir la producción láctea, individual o de un grupo de animales, a través del tiempo. El comportamiento común de la curva, es que la producción incremente al inicio hasta llegar a un máximo (pico de producción), mantenga este pico, y disminuya lentamente hasta el final de la lactancia (Chang *et al.*, 2001). La curva de lactancia puede modificarse por factores como: raza, estación y número de parto, región, entre otros (Gipson y Grossman, 1989; García y Holmes, 2001; Grossman y Koops, 2003). En cabras lecheras, existen pocos estudios, en relación a los efectuados en vacas lecheras (Masselin *et al.*, 1987). En estos estudios para cabras lecheras, se han utilizado las funciones: exponencial general (en particular, función gamma incompleta o función de Wood), polinomio inverso, polinomio segmentado y multifásica (Gipson y Grossman, 1990). El conocimiento de la curva de lactancia es una herramienta valiosa, ya que mediante los valores de los parámetros obtenidos, podemos conocer características importantes de la lactancia como son: tiempo al pico de producción, producción láctea al pico, persistencia, producción total, entre otras. Estas características son útiles en la toma de decisiones de manejo y selección. Por ejemplo, conocer el tiempo en que ocurre el pico de lactancia ayuda a establecer estrategias de alimentación para mantener esta máxima producción durante el mayor tiempo posible (Tozer y Huffaker, 1999). A pesar de que la producción caprina constituye una fuente importante de ingresos en las zonas áridas y semiáridas de México, no se ha caracterizado una curva de producción o de componentes lácteos para estas regiones, por lo que se realizó el presente estudio con el objetivo de determinar las curvas de lactancia y de componentes lácteos de cabras F₁ (Alpina x Nubia) del altiplano potosino.

REVISIÓN DE LITERATURA

Producción y composición de la leche caprina

La leche se compone de 80% de agua en la mayoría de los mamíferos, el resto son sólidos (lípidos, carbohidratos, proteínas, vitaminas y minerales) (Lombaard, 2006). La leche caprina puede definirse por su mayor potencial en términos de salud (valor nutricional), seguridad (calidad higiénica), y satisfacción (atributos sensoriales). La leche de cabra posee alta digestibilidad, distinta alcalinidad, alta capacidad amortiguadora y ciertos valores terapéuticos en medicina y nutrición humana, conferidos a la composición específica de la grasa de la leche. El porcentaje de vitamina "A", calcio, fósforo y magnesio; supera por mucho, a la leche de vaca (Cuadro 2.1; Ayala-Oseguera y Armendáriz, 2003; Sanz *et al.*, 2006) y el contenido de fierro, manganeso y cobre es mayor que en la leche de oveja (Aganga *et al.*, 2002). Los monoterpenos y sesquiterpenos encontrados en la leche, mayores en aquellos animales alimentados en pastoreo, es superior particularmente en verano, debido a la floración de las plantas; estos ácidos aromáticos, son cada vez más importantes ya que poseen propiedades anti cancerígenas y anti inflamatorias, además de influir en el aroma y sabor. Conjuntamente, la presencia de antioxidantes y la reducción en la cantidad de colesterol, permiten disminuir el riesgo de trastornos cardiovasculares (Galina, 2004). Aunado a esto, la leche caprina, contiene altas concentraciones de ácido linoléico conjugado, que posee propiedades antitumorales, especialmente cuando los animales son alimentados en pastoreo, cuyas concentraciones son cuatro veces mayores que las de aquellos animales mantenidos en estabulación (Minikhiem,

2002). La producción caprina es más común en las zonas áridas y semiáridas (Sanz *et al.*, 2006), y en nuestro país, México, constituye una de las principales fuentes de ingreso de

Cuadro 2.1. Composición de la leche de cabra y de vaca.

| Componente | Leche de cabra | Leche de vaca |
|---|-------------------|-------------------|
| Grasa (%) | 4.25 | 3.50 |
| Proteína (%) | 3.50 | 3.30 |
| Lactosa (%) | 4.40 | 4.86 |
| Ceniza (%) | 0.82 | 0.72 |
| Sólidos Totales (%) | 12.97 | 12.58 |
| Sólidos no grasos (%) | 8.72 | 8.88 |
| Calcio (mg l ⁻¹) | 1.35 | 1.25 |
| Fósforo (mg l ⁻¹) | 1.00 | 0.95 |
| Vitamina A (UI 100 g ⁻¹) | 185 | 126 |
| Niacina (mg 100 g ⁻¹) | 0.23 | 0.08 |
| Energía total (Mcal kg ⁻¹) | 6.90 | 6.10 |
| Colesterol (mg 100 g ⁻¹ leche) | 11.00 | 14.00 |
| pH | 6.5-6.8 | 6.65-6.71 |
| Punto crioscópico (°C) | (-0.56) – (-0.57) | (-0.53) – (-0.57) |

los caprinocultores. La eficiencia de la cabra para convertir recursos forrajeros de baja calidad en leche, es poco apreciada, a pesar de que la mayor parte de la leche caprina en el país (70%), proviene de sistemas extensivos en zonas áridas (Mellado *et al.*, 2004). En

México existen aproximadamente 8.9 millones de caprinos (Cuadro 2.2), los cuales producen 160,000 toneladas de leche, consumida principalmente como queso, cajeta y dulces de leche (INEGI, 2005), y la calidad de éstos depende de los tratamientos de calor aplicados para su procesamiento (Raynal-Ljutovac *et al.*, 2007). Los estados de Coahuila y Durango (zona norte del país) producen casi la mitad de la leche en el país. En la parte central, destacan los estados de Guanajuato, San Luis Potosí y Michoacán con 33% de producción a nivel nacional (Cuadro 2.3) (Valencia, 2002). Dicha producción, en su mayoría, es de carácter estacional, concentrándose en los meses de mayo a septiembre y disminuyendo a partir de octubre, para tener siete meses de escasa producción. Dicha situación ocasiona que el precio que se paga, sea diferente según la época del año (Quiñones *et al.*, 1986).

Cuadro 2.2. Inventario nacional de ganado caprino (número de cabezas).

| Estado | 1997 | 1998 | 1999 |
|---------------------|---------|---------|---------|
| Aguascalientes | 37,150 | 35,420 | 36,634 |
| Baja California | 38,612 | 31,081 | 31,081 |
| Baja California Sur | 112,486 | 116,682 | 117,182 |
| Campeche | 3,124 | 2,520 | 2,566 |
| Coahuila | 511,336 | 480,497 | 492,946 |
| Colima | 8,474 | 13,557 | 10,992 |
| Chihuahua | 235,000 | 206,412 | 206,520 |
| Distrito Federal | 650 | 960 | 930 |
| Durango | 297,118 | 302,020 | 291,479 |

| | | | |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| Guanajuato | 477,104 | 495,850 | 496,654 |
| Guerrero | 684,236 | 679,714 | 712,913 |
| Hidalgo | 305,256 | 303,202 | 296,188 |
| México | 284,338 | 347,642 | 417,417 |
| Jalisco | 170,000 | 171,445 | 173,158 |
| Michoacán | 449,176 | 451,624 | 455,346 |
| Morelos | 24,473 | 24,683 | 26,937 |
| Nayarit | 78,400 | 79,200 | 83,413 |
| Nuevo León | 531,200 | 527,650 | 506,845 |
| Oaxaca | 1'062,210 | 1'074,956 | 1'085,705 |
| Puebla | 1'339,644 | 1'371,795 | 1'404,718 |
| Querétaro | 102,825 | 102,825 | 102,731 |
| Quintana Roo | 2,050 | 1,943 | 1,945 |
| San Luis Potosí | 905,300 | 985,640 | 958,364 |
| Sinaloa | 138,000 | 151,907 | 147,141 |
| Sonora | 24,385 | 15,523 | 16,859 |
| Tamaulipas | 244,548 | 244,360 | 242,863 |
| Tlaxcala | 69,993 | 74,200 | 68,585 |
| Veracruz | 122,596 | 113,263 | 123,870 |
| Yucatán | 0 | 1,555 | 1,553 |
| Zacatecas | 663,316 | 631,781 | 554,900 |
| Total | 8'923,300 | 9'039,907 | 9'068,435 |

Fuente: Ayala-Oseguera y Armendáriz, 2003

Cuadro 2.3. Producción de leche de cabra en México (toneladas).

| Estado | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Baja California | 0 | 178 | 243 | 329 | 345 | 342 |
| Baja California Sur | 1,536 | 2,103 | 3,362 | 2,862 | 3,337 | 2,089 |
| Chihuahua | 3,840 | 2,378 | 3,796 | 4,628 | 4,600 | 4,580 |
| Coahuila | 42,611 | 38,924 | 40,705 | 45,229 | 42,782 | 52,120 |
| Durango | 19,318 | 20,041 | 22,203 | 23,468 | 24,264 | 29,507 |
| Guanajuato | 23,170 | 21,042 | 23,549 | 23,464 | 23,732 | 23,066 |
| Guerrero | 2,416 | 3,140 | 3,560 | 3,640 | 3,545 | 0 |
| Hidalgo | 971 | 816 | 786 | 628 | 586 | 459 |
| Jalisco | 6,020 | 6,090 | 6,154 | 5,031 | 6,323 | 5,198 |
| Michoacán | 3,610 | 3,558 | 3,363 | 3,491 | 3,589 | 3,599 |
| Nayarit | 173 | 166 | 117 | 107 | 96 | 42 |
| Nuevo León | 571 | 3,706 | 5,697 | 5,027 | 5,452 | 5,697 |
| Puebla | 1,157 | 978 | 1,182 | 1,227 | 1,244 | 1,257 |
| Querétaro | 1,280 | 1,070 | 899 | 919 | 956 | 738 |
| San Luis Potosí | 9,924 | 10,396 | 5,017 | 3,663 | 3,269 | 3,264 |
| Sonora | 562 | 564 | 833 | 631 | 485 | 491 |
| Tamaulipas | 186 | 180 | 181 | 193 | 202 | 251 |
| Tlaxcala | 641 | 673 | 615 | 622 | 1,166 | 1,442 |
| Zacatecas | 4,615 | 4,165 | 5,043 | 5,112 | 4,368 | 4,503 |
| Total | 122,925 | 120,528 | 127,744 | 130,998 | 131,177 | 139,873 |

Fuente: Ayala-Oseguera y Armendáriz, 2003

Así como el nivel de producción es de gran importancia, también lo es la composición, ya que en ella radican el establecimiento del precio de la leche (Oishi *et al.*, 2007), es decir, aquella leche que contiene niveles elevados de proteína, es más valiosa para los procesadores. La composición varía considerablemente entre especies, y aún dentro de la misma especie, varía durante la lactancia, con mayor cambio al inicio de la lactancia. La grasa es el componente de mayor variación, mientras que la lactosa es la menos variable; la variación entre individuos dentro de una misma raza puede ser aún mayor que entre razas. La producción de grasa y proteína están inversamente relacionadas con el nivel de producción (Lombaard, 2006), teniendo una correlación de -0.29 y de -0.30 entre el nivel de producción y el contenido de grasa y proteína; respectivamente; y de 0.58 entre el contenido de grasa y proteína (Oravcová *et al.*, 2004). Los tres componentes más importantes son grasa, proteína y lactosa (Lennox *et al.*, 1993; García y Holmes, 2001; Fekadu *et al.*, 2005), y tienen gran relación con la producción, firmeza, color y sabor de los subproductos lácteos. Los predictores más significativos para producción de queso son: el contenido de sólidos totales y proteína (Guo *et al.*, 2003; Delacroix-Buchet y Lamberet, 2000; Gallego *et al.*, 1994); el contenido de grasa está más involucrado con la firmeza, el color y el sabor. Esta grasa, se compone en su mayoría de ácidos grasos de cadena mediana (Cuadro 2.4; Ayala-Oseguera y Armendáriz, 2003) (C8, ácido caprílico y C10, ácido capróico), mientras que la leche de vaca es más alta en ácido butírico (C4) y palmítico (C16:0) (Glass *et al.*, 1967). La peculiaridad de la composición de ácidos grasos en la leche caprina, juegan un papel importante en el desarrollo del sabor (ácidos grasos ramificados, cadena media) o rancidez (ácido butírico en exceso) (Chilliard *et al.*, 2003), propiedades de coagulación (Dimassi *et al.*, 2004) y beneficio obtenido en la salud de los consumidores

(Dewhurst *et al.*, 2006); la intensidad del sabor varía según el tipo de producto, por ejemplo: fuerte, para quesos madurados; ligeramente fuerte, para quesos blancos o leche fermentada; y ligero o mínimo, para la leche tomada como tal (Jaubert, 1997). Además de lo anteriormente mencionado, se debe considerar la calidad de la leche, la cual depende esencialmente de su composición física y química, y factores sanitarios; ya que al incrementar la calidad, se incrementarán los ingresos de los productores (Pirisi *et al.*, 2006).

Cuadro 2.4. Perfil de ácidos grasos en la grasa láctea de cabra y vaca (% del total, g 100 g⁻¹ de grasa).

| Ácido graso | Cabra | Vaca |
|-------------------------|-------|-------|
| C4:0 (Butírico) | 1.30 | 4.80 |
| C6:0 (Capríco) | 2.80 | 2.20 |
| C8:0 (Caprílico) | 8.30 | 1.80 |
| C10:0 (Caprónico) | 12.90 | 4.30 |
| C12:0 (Laurico) | 4.50 | 3.60 |
| C14:0 (Mirístico) | 10.20 | 12.50 |
| C16:0 (Palmítico) | 25.80 | 28.20 |
| C18:0 (Esteárico) | 9.80 | 11.40 |
| Cis C18:1 (Oléico) | 9.70 | 21.10 |
| Trans C18:2 (Linoléico) | 2.20 | 3.60 |
| C18:3 (Linolénico) | 0.40 | 1.20 |
| C20:0 (Araquídico) | 0.10 | 0.50 |
| C20:4 (Lignocérico) | 0.17 | 0.26 |

Factores que afectan la producción y composición láctea

Los factores que pueden modificar la producción y composición de la leche, y como consecuencia la calidad de los subproductos, pueden ser relacionados con el animal (raza, número de parto, número de crías, etapa de lactancia, nivel de producción, estatus nutricional, peso) o con las condiciones de producción (región, alimentación y época de parto) (Jaubert, 1997; Díaz *et al.*, 2004b; Vega *et al.*, 2004b). Así mismo, además de los factores anteriores, el desempeño productivo de un animal también se puede afectar por la edad de la cría o el año de parto (Hatungumukama *et al.*, 2007). Mediante la manipulación de algunos de estos factores, se puede perfeccionar la producción y composición de la leche caprina, satisfaciendo la demanda del consumidor (Chilliard *et al.*, 2003).

Raza

La raza es el principal factor determinante tanto para el nivel de producción láctea (Pletcher y Jaffrézic, 2002) como para la composición de la misma (Kala y Prakash, 1990), y además de la diferencia entre razas, existe diferencia entre individuos de raza similar. Existen razas reconocidas por su habilidad para mayor producción láctea, dentro de estas se encuentran: Saanen, La Mancha, Alpina y Toggenburg, además de estas razas lecheras, también ha sido objeto de estudio la raza Nubia, la cual se considera como de doble propósito. Dentro de estas, a pesar de ser de especialización lechera, existen diferencias para cada raza (Cuadro 2.5; Gipson y Grossman, 1989); afectando las características de mayor importancia en la lactancia: producción (total y al pico), tiempo al pico, y persistencia de la máxima producción (Gipson y Grossman, 1990; Montaldo *et al.*, 1997).

Cuadro 2.5. Producción láctea para diferentes razas caprinas.

| Raza | Nivel de producción* (kg) | | |
|------------|---------------------------|------------|-------|
| | Baja | Media | Alta |
| Alpina | <685 | 685 – 975 | >975 |
| Saanen | <690 | 690 – 1025 | >1025 |
| Toggenburg | <690 | 690 – 980 | >980 |
| La Mancha | <580 | 580 – 840 | >840 |
| Nubia | <510 | 510 – 765 | >765 |

*Producción por lactancia de 305 días.

La heredabilidad estimada para producción láctea es de 0.19 ± 0.06 (Weppert y Hayes, 2004) y tiende a incrementar de la mitad de la lactancia hasta el final de la lactancia (Silvestre *et al.*, 2005). Razas como La Mancha y Nubia, tienen producción láctea al pico menor, cerca de 1 kg. La raza Saanen, presenta el pico de producción al día 50 de la lactancia, 10 días después que las otras razas ya mencionadas, pero con mayor persistencia (Gipson y Grossman, 1990).

Además del nivel de producción láctea, la raza tiene un claro efecto en la composición de la leche, y en especial, para el contenido de grasa y proteína (Valencia *et al.*, 2005) (Cuadro 2.6); y la heredabilidad estimada para la producción de grasa es de 0.21 ± 0.06 y de 0.17 ± 0.06 para producción de proteína (Weppert y Hayes, 2004). El nivel de polimorfismo en los genes α_{S1} -caseína y α_{S2} -caseína, tiene impacto en la composición de la leche caprina, principalmente en cuanto a la producción de grasa y proteína entre razas, sin afectar niveles de producción láctea o contenido de lactosa (Marletta *et al.*, 2003; Moiola *et*

al., 2006). Además del contenido de grasa, este gene modifica el perfil de ácidos grasos, particularmente ácidos palmítico, esteárico, oleico, linoléico y ruménico (Jaubert, 1997; Vega *et al.*, 2004b; Chilliard *et al.*, 2006). Estos genotipos, son importantes ya que tiene grandes efectos en las propiedades de la leche caprina, especialmente en la nutrición humana (Sztankóová *et al.*, 2006). Además del efecto de la raza, el perfil de ácidos grasos, es menor al inicio y al final de la lactancia; contribuyendo así a la modificación del sabor específico de los productos caprinos (Chilliard *et al.*, 2003).

Cuadro 2.6. Composición láctea de algunas razas caprinas.

| Raza | Grasa (%) | Proteína (%) | Sólidos totales (%) | Lactosa (%) |
|-----------------------------|-----------|--------------|---------------------|-------------|
| Alpina ¹ | 4.03 | 3.23 | 12.78 | 4.80 |
| Saanen ¹ | 3.75 | 3.08 | 11.98 | 4.50 |
| Alpina x Nubia ² | 3.42 | 3.57 | 12.12 | |
| Boer ³ | 7.1* | 5.1** | | 5.4* |
| Austaliana ³ | 3.3* | 3.6** | | 5.6* |

¹ Vega *et al.*, 2004a; ² Díaz *et al.*, 2004b; ³ Iaschi *et al.*, 2003.

* Valores obtenidos en la semana 6 de lactancia.

** Valores obtenidos en la semana 4 de lactancia.

Nutrición

El segundo factor de mayor importancia en las características productivas de la leche es la nutrición (Min *et al.*, 2005), aunque algunos autores no han encontrado diferencias significativas (Cuadro 2.7; Doyon *et al.*, 2005) en la producción o composición láctea de cabras (Doyon *et al.*, 2005); la mayoría de los autores mencionan que la nutrición tiene efecto en las características productivas lácteas; por lo que el alimento proporcionado debe

ser suficiente en cantidad y calidad para lograr alta producción y buena composición, y así, obtener mejores ingresos; dicha alimentación, debe basarse principalmente en forrajes frescos y alimentos ricos en celulosa. Los temas de nutrición caprina, generalmente son acerca del comportamiento alimenticio, y en particular de pastizales o pasturas; digestibilidad, utilización de subproductos y efectos de éstos en el crecimiento y producción de pelo o leche (Morand-Fehr, 2005).

Cuadro 2.7. Composición de la leche caprina según el tipo de alimentación.

| Componente | Tipo de alimentación | | Probabilidad |
|---|----------------------|-------------------|--------------|
| | Heno | Silo | |
| Producción láctea (kg d ⁻¹) | 1.91 ^a | 1.85 ^a | 0.706 |
| Grasa (%) | 3.27 ^a | 3.35 ^a | 0.493 |
| Proteína (%) | 3.34 ^a | 3.39 ^a | 0.471 |
| Caseína (%) | 2.52 ^a | 2.56 ^a | 0.468 |
| Lactosa (%) | 4.20 ^a | 4.25 ^a | 0.353 |

^{a, b, c} Literales diferentes en la misma línea son diferentes estadísticamente.

La producción láctea está mayormente ligada al nivel de energía contenida en la dieta, más que en la cantidad de proteína, sin embargo; una dieta altamente energética ocasionará disminución en el contenido de grasa debido al incremento en el nivel de producción; por lo que se debe proporcionar una ración balanceada para tener estas dos cualidades (Corcy, 1993). El balance energético, o desbalance, es la diferencia entre los requerimientos

energéticos, incluyendo de producción, y la ingesta de nutrientes y movilización de reservas corporales (Mao *et al.*, 2004; Wathes *et al.*, 2007).

En la mayoría de los estudios tanto en vacas (Lennox *et al.*, 1992; Roche, 2003) como en cabras (Sahlu *et al.*, 1995; Barba *et al.*, 2001; Díaz *et al.*, 2004a), coinciden con el hecho que un incremento en el nivel de energía en la dieta, ocasionará un elevado nivel de producción; mientras que, al incrementar el nivel de proteína (Cuadro 2.8; Sahlu *et al.*, 1995.) en la dieta, se obtendrán resultados no deseables, al disminuirse el nivel de producción láctea ocasionado por un balance de energía negativo (Lennox *et al.*, 1992; Sahlu *et al.*, 1995). Sin embargo, Chiofalo *et al.* (2004), observaron que la suplementación diaria con pasta de aceituna, como fuente proteica, incrementa la producción láctea de las ovejas de 649 a 772 g d⁻¹. Mientras que Serrato y Sánchez (2004), mencionan que, en cabras en pastoreo, no es necesaria la suplementación diaria, basta proporcionar 350 g de concentrado cada 7 días para obtener incrementos de 1042.00 a 1419.9 ml d⁻¹ en el nivel de producción.

La composición láctea se puede modificar mediante los niveles de concentrado (Díaz *et al.*, 2004a; Soryal *et al.*, 2004; Chiofalo *et al.*, 2004), suplementación lipídica (Vega *et al.*, 2004a; Chilliard *et al.*, 2003; Sanz *et al.*, 2006) y tipo de forraje (Akingbade *et al.*, 2004; Lennox *et al.*, 1993; García y Holmes, 2001), principalmente se afecta el contenido de grasa, proteína y lactosa. La ingesta total de energía metabolizable, no tiene efectos significativos en los porcentajes de grasa y lactosa; sin embargo, la ingesta de proteína, si tiene efectos en el contenido de grasa y lactosa (Lennox *et al.*, 1993). Además de la cantidad de ingesta energética, el origen de esta, influye en el perfil de ácidos grasos (Vega *et al.*, 2004a; Chilliard, 1993); incrementando la concentración de ácido linoléico

conjugado (CLA), con suplementos lipídicos, como aceite de soya y pescado, entre otros; así como la alimentación con zacate fresco o granos enteros (Chilliard *et al.*, 2003). La suplementación con betaína, incrementa la producción láctea (0.28 kg d⁻¹) y el porcentaje de grasa (0.29%) (Fernández *et al.*, 2004); y al igual que la suplementación con 5% de semilla de canola (Khorasani *et al.*, 1991), modifica el perfil de ácidos grasos de cadena corta y mediana.

Cuadro 2.8. Producción y composición láctea de cabras Alpinas alimentadas con diferentes niveles de energía y proteína.

| Característica | Proteína cruda (%) | | | Energía metabolizable (Mcal kg ⁻¹) | | |
|----------------------------------|--------------------|------|------|--|------|------|
| | 8.5 | 11.5 | 14.5 | 1.80 | 2.16 | 2.53 |
| Producción (kg d ⁻¹) | 2.59 | 3.26 | 3.07 | 2.63 | 3.05 | 3.26 |
| Grasa (%) | 3.69 | 3.98 | 4.08 | 3.78 | 3.76 | 4.19 |
| Proteína (%) | 2.76 | 2.80 | 2.79 | 2.79 | 2.78 | 2.78 |
| Lactosa (%) | 4.39 | 4.37 | 4.40 | 4.36 | 4.38 | 4.43 |
| Sólidos no grasos (%) | 7.75 | 7.79 | 7.81 | 7.75 | 7.77 | 7.82 |

En cuanto a la persistencia, tiempo al pico de la lactancia y producción al pico (características de importancia en la lactancia); se pueden modificar también según el alimento proporcionado (Min *et al.*, 2005), y en particular, los niveles de energía metabolizable (EM) o proteína cruda (PC) incluida en la dieta; siendo más afectado el tiempo al que se presenta el pico de producción y el nivel de producción del mismo (Cuadro 2.9; Sahlu *et al.*, 1995).

Cuadro 2.9. Características de la lactancia de cabras Alpinas alimentadas con diferentes niveles de energía y proteína.

| Característica | PC (%) | | | EM (Mcal kg ⁻¹) | | |
|--|--------|------|------|-----------------------------|------|------|
| | 8.5 | 11.5 | 14.5 | 1.80 | 2.16 | 2.53 |
| Producción al pico (kg d ⁻¹) | 3.20 | 3.79 | 3.86 | 3.27 | 3.78 | 3.81 |
| Tiempo al pico (d) | 30 | 40 | 41 | 36 | 39 | 44 |
| Persistencia (semanas) | 6.34 | 6.44 | 6.43 | 6.27 | 6.30 | 6.64 |

Época de parto

El tiempo en el que pare el animal, es un factor de gran importancia en vacas (García y Holmes, 2001), ovejas (Cappio-Borlino *et al.*, 1997; Ruiz *et al.*, 2000; Sevi *et al.*, 2003) y cabras (Gipson y Grossman, 1989). La época de parto afecta el nivel de producción, ya que la demanda fisiológica, está sincronizada con la disponibilidad de alimento (García y Holmes, 2001; Ray *et al.*, 1992; Gipson y Grossman, 1989) y la longitud del día (Aharoni *et al.*, 2000). Por lo que los efectos estacionales y fisiológicos en la forma de la curva de lactancia, generalmente, se confunden en aquellos animales que paren en primavera, pero no para los que paren en otoño. La curva de lactancia de vacas que paren en primavera es “típica”, es decir, llega a un pico y es seguida de una disminución. Contrario a lo sucedido en las que paren en otoño, ya que es diferente en forma y con menor producción al pico de lactancia, pero con mayor producción en la lactancia intermedia y final, lactancias más prolongadas, mayor producción total, mayor contenido de grasa (Cuadro 2.10; Doyon *et al.*, 2005), modificación del perfil de ácidos grasos (Cuadro 2.11; Doyon *et al.*, 2005), menor

contenido de proteína en leche y una disminución en el contenido de sólidos totales menos marcada durante toda la lactancia (García y Holmes, 2001; Doyon *et al.*, 2005).

Cuadro 2.10. Composición de la leche caprina según la estación del año.

| Componente | Estación del año | | | | Probabilidad |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| | Primavera | Verano | Otoño | Invierno | |
| Grasa (%) | 3.21 ^b | 2.93 ^c | 3.70 ^a | 3.54 ^a | <0.01 |
| Proteína (%) | 3.21 ^c | 3.20 ^c | 3.62 ^a | 3.39 ^b | <0.01 |
| Caseína (%) | 2.45 ^c | 2.39 ^c | 2.74 ^a | 2.57 ^b | <0.01 |
| Lactosa (%) | 4.25 ^a | 4.10 ^b | 4.22 ^a | 4.29 ^a | <0.01 |

^{a, b, c} Literales diferentes en la misma línea son diferentes estadísticamente.

Las cabras (Gipson y Grossman, 1990) que paren de diciembre a marzo, tienen menor producción láctea, pero mayor persistencia. Mientras que, las ovejas (Ruiz *et al.*, 2000) que paren dentro de este mismo periodo, presentan variaciones en el nivel de producción y duración de la lactancia; observándose máxima producción cuando paren en noviembre y diciembre; y menor producción cuando paren en marzo. La época de parto en las ovejas, al igual que el nivel de producción, afecta el contenido de grasa (6.71 vs. 6.93%), proteína (5.15 vs. 5.39%), calcio y fósforo, siendo éste menor cuando el parto sucede en el invierno en comparación con las hembras que paren en otoño, esta reducción afecta la capacidad de coagulación y por lo tanto, la eficiencia para la producción de queso (Sevi *et al.*, 2003). La mayor producción obtenida, al igual que en vacas (Barash *et al.*, 1996; García y Holmes, 2001) y cabras (Gipson y Grossman, 1990), es debido a que presentan mayor longitud de

lactancia debido a la mayor disponibilidad de alimento y mejor condición corporal. Por otra parte, cuando las ovejas tienen crías en febrero, incrementan la producción láctea debido a que se coincide con el inicio del crecimiento de los pastos por la primavera. La época de parto también afecta el tiempo al pico de producción, presentándolo antes aquellas hembras que paren en noviembre, diciembre y febrero (Ruiz *et al.*, 2000).

Cuadro 2.11. Perfil de ácidos grasos en la leche de cabra según la estación del año.

| Ácido graso | Estación del año | | | | Probabilidad |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------|
| | Primavera | Verano | Otoño | Invierno | |
| C4:0 | 3.44 ^a | 3.43 ^a | 3.29 ^a | 3.44 ^a | 0.630 |
| C6:0 | 2.87 ^a | 2.69 ^a | 2.82 ^a | 2.79 ^a | 0.607 |
| C8:0 | 3.15 ^a | 2.92 ^b | 3.16 ^a | 3.09 ^a | < 0.01 |
| C10:0 | 9.78 ^b | 9.42 ^b | 10.37 ^a | 9.80 ^b | < 0.01 |
| C12:0 | 4.09 ^b | 4.15 ^b | 4.96 ^a | 4.32 ^b | < 0.01 |
| C14:0 | 9.82 ^b | 10.59 ^a | 10.73 ^a | 10.09 ^b | < 0.01 |
| C16:0 | 24.17 ^b | 25.61 ^a | 24.27 ^b | 24.27 ^b | < 0.01 |
| C16:1 | 0.48 ^b | 0.53 ^a | 0.56 ^a | 0.53 ^a | < 0.01 |
| C18:0 | 11.56 ^a | 10.13 ^b | 9.83 ^b | 11.37 ^a | <0.01 |
| C18:1 <i>cis</i> - 13 | 0.08 ^a | 0.06 ^{ab} | 0.05 ^b | 0.06 ^{ab} | < 0.05 |
| C18:1 <i>trans</i> | 2.29 ^a | 2.22 ^a | 2.26 ^a | 2.21 ^a | 0.662 |
| C18:2 | 2.41 ^a | 2.39 ^a | 2.44 ^a | 2.45 ^a | 0.967 |
| C20:0 | 0.26 ^a | 0.26 ^a | 0.23 ^b | 0.25 ^{ab} | < 0.01 |

^{a, b} Literales diferentes en la misma línea son diferentes estadísticamente.

Número de parto

El número de parto, afecta tanto el nivel de producción como la composición láctea. La mayoría de los estudios reportan que conforme incrementa el número de parto, se incrementa el nivel de producción (Miranda y Schnitkey, 1995; Ruiz *et al.*, 2000; García y Holmes, 2001) y el tiempo en que se presenta el pico de la lactancia; presentando antes el pico de producción los animales de dos o más partos (Gipson y Grossman, 1990; Ruiz *et al.*, 2000), de la misma manera, las heredabilidades para persistencia también son modificadas por el número de parto (Rekaya *et al.*, 2001) y son menores en el primer parto que en el segundo o tercer parto (0.15, 0.39 y 0.38; para los partos 1, 2 y tres; respectivamente) (Togashi *et al.*, 2007). El incremento en el nivel de producción, va acompañado de la disminución en la persistencia del nivel máximo de producción (Gipson y Grossman, 1990; Ruiz *et al.*, 2000; Epaphras *et al.*, 2004), y contenido de grasa (De Boer *et al.*, 1989) y proteína en leche (Pirlo *et al.*, 2000; Macciotta *et al.*, 2005). La disminución en el contenido de grasa es debido a un efecto de dilución como consecuencia del incremento en el volumen de producción, así como por la movilización de grasas como resultado de mayor demanda energética para la elevada producción, lo que disminuye la disponibilidad de ácidos grasos para síntesis de lípidos dirigidos hacia la leche (Chilliard *et al.*, 2003). Por lo que se dice que existe correlación negativa entre el nivel de producción y el contenido de grasa, observándose que por cada ml de leche producida, disminuye 0.00063% el contenido de grasa. Mientras que, por cada kg de aumento en el peso vivo, incrementa 0.041% el contenido de grasa (Díaz *et al.*, 2004b).

Número de crías

El número de crías nacidas vivas, afecta significativamente la producción láctea total. Cuando se tienen dos o más crías, se tiene mayor producción, en comparación con hembras que solo tienen una cría o ninguna al pie. Este incremento en la producción, es asociado con el estímulo que produce la cría al momento del amamantamiento. Además del incremento en la producción, el efecto del amamantamiento, modifica el tiempo en el que se presenta el pico de producción, presentándolo antes aquellas hembras que tienen una o 2 crías al pie, en comparación con las que no tienen ninguna; sin embargo, se observa una correlación negativa entre el número de crías y la persistencia de la máxima producción (Ruiz *et al.*, 2000). En cuanto a la composición láctea, Macciotta *et al.* (2005) observaron que las cabras de raza Sarda que tienen 2 crías presentan menor contenido de grasa y proteína en la leche.

Etapa de lactancia

El efecto de la etapa de lactancia en cabras y vacas, es similar; sin embargo, la respuesta de la producción y composición láctea (contenido de grasa y proteína) difieren grandemente (Chilliard *et al.*, 2003). La etapa de lactancia afecta principalmente el contenido de grasa (Soryal *et al.*, 2004; Díaz *et al.*, 2004b; Chilliard *et al.*, 1986), observándose el mayor contenido graso en la primera semana (Cuadro 2.12; Díaz *et al.*, 2004b), para luego descender ligeramente y mostrar un nuevo incremento gradual; mientras que para el contenido de sólidos totales y lactosa, disminuyen gradualmente a medida que avanza la lactancia (Díaz *et al.*, 2004b; Greyling *et al.*, 2004).

Los patrones generales muestran menor concentración de sólidos en la lactancia temprana, y las mayores concentraciones en la lactancia tardía son más evidentes para

proteína que para grasa (García y Holmes, 2001). Esto, ocasionado por dos fenómenos: un efecto de dilución causado por el incremento en volumen de leche hasta el pico de lactancia; y por un efecto de disminución en la movilización de grasa que reduce la disponibilidad de ácidos grasos no esterificados (AGNE) en plasma, especialmente C18:0 y C18:1, para la síntesis de lípidos. Existen correlaciones altamente significativas entre contenido de grasa en leche y balance de energía, con el contenido de AGNE en plasma o con el porcentaje de C18:1 en leche, respectivamente. El estado nutricional de animales lactantes puede ser estimado por su balance de energía (proteína, mineral, etc.) mediante la diferencia entre ingredientes ingeridos y los requerimientos para mantenimiento y producción láctea. Este balance es altamente variable, de acuerdo al potencial genético, etapa de lactancia; y composición y densidad de la dieta. Cuando el balance de energía es negativo, los animales movilizan los lípidos almacenados en el tejido adiposo, en forma de AGNE, principalmente (Chilliard *et al.*, 2003).

Cuadro 2.12. Variación en grasa y sólidos totales según la semana de lactancia.

| Semana | Grasa (%) | Sólidos totales (%) |
|--------|-----------|---------------------|
| 1 | 4.66 | 14.6 |
| 2 | 3.43 | 12.5 |
| 3 | 3.19 | 11.6 |
| 4 | 2.75 | 11.2 |
| 5 | 2.99 | 11.5 |
| 6 | 3.52 | 11.7 |
| 7 | 3.38 | 11.6 |

En vacas, al inicio de la lactancia, la producción láctea diaria y sólidos lácteos fueron consistentemente mayores para vacas que parieron en primavera, pero a mitad de la lactancia, la producción fue mayor para vacas que parieron en otoño; resultando en una interacción entre estación de parto y etapa de lactancia (García y Holmes, 2001).

Curva de lactancia

Los registros de producción láctea son importantes ya que proporcionan la información necesaria para la toma de decisiones de manejo y mejoramiento genético (Basdagianni *et al.*, 2005), estos registros nos permiten la elaboración de una curva de lactancia, que es la representación gráfica de la producción láctea a través del tiempo (Macedo *et al.*, 2001; Faro y Albuquerque, 1999; 2002). El objetivo principal de esta curva es predecir la producción de cada día de lactancia con el mínimo error posible, en presencia de la variación como resultado de diversos factores (Lombaard, 2006). La curva es un resumen de la producción de leche determinada por la eficiencia biológica; ésta puede ser utilizada para: 1) manejo alimenticio, ya que si una porción de la curva incrementa, indica que los animales están en un plan nutricional alto, y si por el contrario, la curva cae; indica un bajo plan nutricional (Weigel *et al.*, 1992; Lennox *et al.*, 1993; Sherchand *et al.*, 1995), este comportamiento sucede comúnmente en regiones tropicales, donde las condiciones en las que se realiza la explotación, no son las mejores para que expresen su máximo potencial genético; 2) predicción de la producción futura, individuales o de un rebaño; 3) conocimiento de la distribución láctea a través del año, 4) manejo reproductivo, 5) identificación de animales enfermos, 6) selección de hembras que presentan más temprano el pico de lactancia, y mantienen este pico a través de la lactancia (Gipson y Grossman,

1990; Lombaard, 2006); y 7) conocimiento de características importantes de la lactancia: producción láctea total, producción máxima, día en que ocurre la máxima producción y persistencia (Peralta-Lailson *et al.*, 2005; Kamidi, 2005). Dentro de estas características, la persistencia, definida como la expresión de la habilidad que tiene un animal para mantener la alta producción, es al igual que la producción total, de las de mayor importancia económicamente hablando, ya que una disminución abrupta en la producción láctea, ocasionará un incremento en los costos de producción (Tekerli *et al.*, 2000; Togashi y Lin, 2007). Por lo que la gran variedad de los investigadores se han enfocado más en dicha característica, y además de buscar una mejor definición de persistencia, buscan la mejor manera de medirla; la definición más amplia y aceptada de la persistencia es que la persistencia es la tasa de disminución en la producción láctea después del pico, y la medida de ésta se ha desarrollado en función de esta definición incluyendo la proporción de la producción durante varias etapas de la lactancia (Lombaard, 2006).

La curva de lactancia ha sido descrita para vacas (Grossman y Koops, 2003; Osorio y Segura, 2005; Quinn *et al.*, 2006;), cabras (Gipson *et al.*, 1990; Ruvuna *et al.*, 1995; Montaldo *et al.*, 1997) y ovejas (Franci *et al.*, 1999; Pollott y Gootwine, 2000; Ruiz *et al.*, 2000) utilizando diversas ecuaciones matemáticas; que a pesar de la diferencia en la formulación matemática, todas producen una gráfica similar, reflejando las características biológicamente deseables, que son: que el promedio de producción láctea por unidad de tiempo llegue a un pico y disminuya conforme avanza la lactancia (Tozer y Huffaker, 1999). La utilidad de cada una de estas funciones dependerá de que tan bien describan o imiten el proceso biológico de la lactancia y de qué tan bien ajusten considerando los efectos ambientales que puedan influir el nivel de producción (Lombaard, 2006; Olori *et*

al., 1999). Los parámetros obtenidos en la curva de lactancia deben tener significado biológico; estos parámetros, exhiben la variación genética y medio ambiental (Chang *et al.*, 2001). Sin embargo, se ha mencionado que no existe suficiente relación entre los factores biológicos que afectan la producción láctea y los parámetros estimados. Como consecuencia, estas funciones no son útiles para predecir o evaluar el efecto del medio ambiente o factores biológicos en la forma de la curva de lactancia (De Boer *et al.*, 1989), por lo que se requiere un modelo apropiado para estudiar las variables que afectan la producción láctea (Pollott y Gootwine, 2000). Como una posible solución, se desarrolló la función multifásica, la cual considera el proceso de lactancia como la suma de varias funciones logísticas asociadas con el comportamiento principal de la lactancia, el cual involucra periodos de incremento y disminución en la producción (Gipson y Grossman, 1989), estas funciones describen el proceso biológico de la lactancia. Por ejemplo, en cabras, existen dos fases de incremento y dos fases de disminución en la producción láctea. Donde la primera fase de incremento ocurre durante las primeras 3 semanas de lactancia (asociada con el aumento en el número celular) y la segunda fase de incremento sucede de la tercera a la octava semana (ocasionado por la mayor producción por célula); mientras que la primera fase de disminución en la producción láctea ocurre de la semana 8 a la 23 después del pico de lactancia como consecuencia de la baja en la producción por célula y número celular; y la segunda fase de disminución ocurrida en la lactancia tardía (de la semana 23 a la 36) ocasionada por la disminución en la producción por célula (Grossman y Koops, 2003). Así que, con base en que el principal comportamiento de la lactancia consiste en diferentes fases que pueden ser resumidas en dos fases, una de incremento y otra de disminución; se propone que la función difásica es suficiente para describir la

lactancia, sugiriendo que la primera fase o de incremento, al ser la más próxima al pico y de corta duración, se considera como la fase del “pico”. Mientras que la segunda fase, es interpretada como la fase de “persistencia” (Gipson y Grossman, 1989).

El interés del comprador en la composición láctea es primordial ya que con base en el contenido de grasa, proteína o sólidos totales se establecen los precios, y por lo tanto, también es de gran importancia considerar el ajuste de curvas para los componentes lácteos cuando se estudia la lactancia (Lombaard, 2006). En la caracterización de las curvas de componentes lácteos, se ha observado que los porcentajes de grasa y proteína son funciones típicamente convexas a través del tiempo, lo cual indica que varían inversamente a la producción, declinan inmediatamente después del parto, alcanzan el mínimo contenido a la semana 8 y 12 de la lactancia (grasa y proteína, respectivamente); seguido por un incremento ligero durante el resto de la lactancia. Mientras que el contenido de lactosa sigue una tendencia opuesta, incrementando al máximo a semana 10 después del parto para después declinar lentamente hasta el final de la lactancia. Considerando el comportamiento de los componentes lácteos, el contenido de grasa y proteína pueden ser modelados con la misma función que se utiliza para la producción láctea, con la condición que la función pueda tomar forma convexa; por otra parte, el contenido de lactosa, requiere una función que tenga la habilidad para modelar su continua disminución a través de la lactancia (Lennox *et al.*, 1993; Lombaard, 2006).

Generalmente, la curva estándar de lactancia se puede aplicar a la mayoría de las especies mamíferas, esto es que la producción incremente hasta alcanzar un pico, mantenga la producción y posteriormente decline gradualmente hasta el final de la lactancia. Sin embargo, algunas veces al graficar la producción láctea observada, resulta una forma de

curva diferente, una en la que no hay pico y continuamente declina. Estas curvas generalmente se conocen como “atípicas”, y existen varias razones para que se puedan presentar; por ejemplo: 1) que la toma de muestras se realice después de que el animal haya alcanzado el pico de producción, 2) intervalo de muestreo muy grande, por lo que no se alcanza a detectar el pico de producción; 3) errores al momento de pesar la leche producida, 4) número de parto (Lombaard, 2006), o 5) incapacidad del modelo para describir un punto crítico en la lactancia (Faro y Albuquerque, 2002). La probabilidad de que se presente una curva atípica es de 20 – 30% (Macciotta *et al.*, 2006). Una curva se considera como atípica cuando no se muestra un incremento en la primera fase ($b < 0$) o cuando se observa una producción firmemente creciente ($c < 0$), en el Cuadro 2.13 se muestran valores de parámetros para vacas Holstein–Friesian obtenidos mediante la función gamma incompleta para curvas típicas o atípicas (Rekik y Ben, 2004). La forma de la curva puede afectarse por diversos factores como resultado de la modificación en el nivel de producción o composición láctea. Por ejemplo, la época de parto modifica la forma de la curva, pudiendo presentar curvas típicas o atípicas cuando las hembras paren en primavera o en otoño, respectivamente (García y Holmes, 2001). Otros factores que modifican la curva son: raza, número de parto, nivel de producción (Gipson y Grossman, 1989), días abiertos (De Boer *et al.*, 1989), sistema de producción (Macedo *et al.*, 2001) y región (Stanton *et al.*, 1991). La consideración de estos factores para cambiar la forma de la curva pueden ser útiles para la mejora en nuestro rebaño, y se mencionan dos maneras para cambiar la forma de la curva, las cuales son: mediante selección genética o mediante estrategias de manejo (Grossman y Koops, 2003).

Cuadro 2.13. Parámetros estimados para curvas de lactancia típicas y atípicas para los principales factores ambientales y de manejo.

| Factor | Curva típica | | | Curva atípica | | |
|---------------------------------|--------------|----------|--------------------------------|---------------|----------|--------------------------------|
| | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> (x 10 ⁻³) | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> (x 10 ⁻³) |
| <i>Número de parto</i> | | | | | | |
| 1 | 13.89 | 0.25 | 3.63 | 48 | - 0.14 | 0.16 |
| 2 | 17.46 | 0.24 | 4.55 | 166 | - 0.16 | 0.77 |
| 3 | 19.56 | 0.23 | 4.77 | 63 | - 0.16 | 1.08 |
| 4 | 17.86 | 0.26 | 5.08 | 78 | - 0.17 | 1.12 |
| <i>Época de parto</i> | | | | | | |
| Otoño | 16.44 | 0.25 | 4.37 | 56 | - 0.14 | 0.90 |
| Invierno | 16.48 | 0.25 | 4.48 | 60 | - 0.15 | 0.78 |
| Primavera | 16.51 | 0.24 | 4.28 | 173 | - 0.17 | 0.49 |
| Verano | 16.83 | 0.23 | 4.15 | 59 | - 0.15 | 0.49 |
| <i>Número de ordeñas al día</i> | | | | | | |
| 2 | 13.78 | 0.24 | 4.09 | 50 | - 0.15 | 0.46 |
| 3 | 17.18 | 0.24 | 4.38 | 102 | - 0.16 | 0.69 |

Métodos de estimación

La curva de lactancia se determina mediante modelos; un modelo matemático es una función que describe cómo los parámetros de una distribución de probabilidad cambian conforme cambian los valores de una variable independiente; es decir, los valores predichos, los cuales están relacionados al parámetro de la distribución de probabilidad mediante una función (Lindsey, 1974). Estos modelos deben proporcionar un resumen de la

información de la producción láctea (Olori *et al.*, 1999). Las curvas de lactancia han sido ampliamente estudiadas, especialmente a partir de los modelos propuestos por Wood (Pedraza *et al.*, 2002; Ramírez *et al.*, 2004). Existen diversos métodos para la modelación de la curva de lactancia que pueden ser lineales, lineales intrínsecos o no lineales (Faro y Albuquerque, 2002); estos modelos, buscan parámetros descriptivos considerando los factores que afectan la forma de la curva, y así, poder utilizarlos como herramienta para la predicción de la producción láctea, así como para el conocimiento de las características importantes de la lactancia, como son: días al pico de producción, producción máxima, persistencia, producción total, entre otras (Olori *et al.*, 1999; Choumei *et al.*, 2006). La mayoría de los modelos utilizados para describir curvas de lactancia, son no lineales, los cuales son preferidos por algunos autores (Keskin y Tozluca, 2004); aunque algunos modelos pueden ser linealizados. Un modelo es llamado no lineal si la derivación de sus parámetros depende de uno o más parámetros. Los modelos no lineales tienen algunas ventajas: 1) son derivados de consideraciones físicas o biológicas, 2) usualmente tienen interpretación directa y 3) tienen más fuerza que los modelos lineales. Sin embargo, una de sus desventajas es que el proceso es iterativo y se necesitan valores iniciales para su cálculo hasta ajustar el valor verdadero del parámetro, por lo que se debe tener especial cuidado al escoger el valor inicial (Schabenberger, 2008). Dentro de los métodos para la modelación de la curva, existen los modelos cuadráticos (Kamidi, 2005; Ruiz *et al.*, 2000), la función gamma incompleta, el polinomio inverso, el polinomio segmentado, y la función multifásica (Gipson y Grossman, 1990). Dentro de éstas, la función gamma incompleta ha sido la más utilizada (Tozer y Huffaker, 1999), pero se tiene la desventaja de no corregir efectos biológicos; por lo que, se han propuesto varias ecuaciones como consecuencia de la

falta de ajuste para modelar el periodo de lactancia bajo ciertas condiciones, así como también por la difícil interpretación biológica de sus parámetros (Ruiz *et al.*, 2000; Gipson y Grossman, 1989). Los modelos existentes para la elaboración de las curvas de lactancia, caen en dos categorías: a) modelos mecánicos, los cuales se basan en la biología de la lactancia (es decir, en el crecimiento y regresión de la glándula mamaria, o flujo de nutrientes), y b) modelos empíricos, basados en los datos actuales de producción (datos de muestreo diarios) (Grossman y Koops, 2003).

Gamma incompleta

La función gamma incompleta, que es de las funciones más utilizadas para modelar la curva de lactancia, tiene la siguiente forma:

$$Y_t = at^b e^{-ct}$$

Donde Y_t = promedio de producción láctea a un periodo t de la lactancia. Los parámetros a , b y c determinan la forma global de la curva. El parámetro a determina la producción inicial y el nivel máximo de leche producida, mientras que los parámetros b y c determinan la forma de la curva, y cómo cambia esta a través de la lactancia (Tozer y Huffaker, 1999). Los parámetros a , b y c deben ser positivos; y de estos, b y c deben ser menores de 1. El componente t^b proporciona el efecto de incremento en la curva conforme avanza la lactancia; mientras que e^{-ct} grafica la caída de la curva (Chang *et al.*, 2001). Este modelo estima la producción láctea en el pico de $a(b/c)^b e^{-b}$, lo cual ocurre (b/c) semanas después del parto, cuando t está dado en semanas (Sherchand *et al.*, 1995); y la persistencia está dada por $-(b+1)/\ln(c)$ (Gipson y Grossman, 1990; Rekik y Ben, 2004).

La función gamma incompleta al ser la más utilizada, también ha sido la más criticada. Algunas de las críticas recibidas son: 1) producción al parto igual a cero (lo cual es inapelable biológicamente, debido a que un animal tiene la habilidad de producir leche antes de parir), 2) sobrestimación de la producción en la lactancia temprana y subestimación en la lactancia tardía (Tozer y Huffaker, 1999; Gipson y Grossman, 1989; Faro y Albuquerque, 1999), 3) no corrige efectos ambientales, por lo que no funciona en ciertas situaciones, 4) alta correlación entre sus parámetros, ocasionando problemas en la definición de la curva (Chang *et al.*, 2002), 4) difícil interpretación biológica de los parámetros (Ruiz *et al.*, 2000; Pedraza *et al.*, 2002); aunque se menciona que la interpretación biológica de los parámetros de la gamma incompleta reside en las vías de utilización de la energía en la lactancia (Gipson y Grossman, 1989); 5) no puede ser utilizada en caso que existan lactancias atípicas (Rekaya *et al.*, 2001; Faro y Albuquerque, 2002) y 6) altos coeficientes de variación en la estimación de sus parámetros (Faro y Albuquerque, 2002). Desde su planteamiento, la función gamma incompleta, manifestó ciertos problemas en cuanto a la precisión para la estimación de la producción láctea ya que cerca del 25% de la producción no podía ser explicada; dentro de este 25% se encuentran factores como edad, número de parto, época de parto, raza, nivel de producción, sexo de la cría, entre otros (López, 1995).

A pesar de ser muy criticada, existen otros autores que consideran a la función gamma incompleta como el mejor modelo para describir la lactancia (Lombaard, 2006), ya que con solo tres parámetros determina características importantes de la lactancia, además de tener menor porcentaje de autocorrelación, en comparación con la función parabólica exponencial (Ramírez *et al.*, 2004). En estudios realizados en cabras, se ha encontrado que

la función gamma incompleta tiene menor cuadrado medio del error que otros modelos, por lo que se considera que es una buena opción en el estudio de los factores que afectan la curva de lactancia en cabras. Los parámetros de la función gamma incompleta se afectan por factores como la época de parto, la edad y la raza (Cuadros 2.14 y 2.15; Montaldo *et al.*, 1997). Además, mediante esta función se obtuvieron valores de interés en la mejora genética como lo es la repetibilidad de 0.26 y de 0.34 para tiempo al pico de producción y producción total, respectivamente (Tekerli *et al.*, 2000). Así mismo, se han encontrado heredabilidades consideradas como moderadas de 0.35, 0.35 y 0.27 para los parámetros a , b y c , respectivamente; estos parámetros son los que determinan la forma de la curva de lactancia; por lo que nos indica la posibilidad de modificar la forma de la curva mediante selección (Chang *et al.*, 2001).

Cuadro 2.14. Parámetros obtenidos mediante la función gamma incompleta considerando algunos factores de variación.

| Factor | Parámetro | | | Nivel de significancia | | |
|-----------------------|-----------|----------|----------|------------------------|----------|----------|
| | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> |
| <i>Genotipo</i> | | | | * | * | ** |
| 1 | 0.375 | 0.640 | 0.010 | | | |
| 2 | 0.224 | 0.794 | 0.014 | | | |
| <i>Edad (años)</i> | | | | NS | NS | * |
| 2 | 0.204 | 0.734 | 0.013 | | | |
| 3 | 0.336 | 0.713 | 0.012 | | | |
| 4 | 0.443 | 0.594 | 0.011 | | | |
| ≥ 5 | 0.216 | 0.828 | 0.014 | | | |
| <i>Época de parto</i> | | | | NS | NS | ** |
| Noviembre – febrero | 0.264 | 0.683 | 0.010 | | | |
| Marzo – octubre | 0.336 | 0.751 | 0.014 | | | |

NS = $P > 0.05$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

Genotipo 1 = Cruzas de Alpina, Saanen y Toggenburg; Genotipo 2 = Cruzas de Granadina y Nubia.

Cuadro 2.15. Características de la lactancia obtenidas mediante la función gamma incompleta considerando algunos factores de variación.

| Factor | Característica | | | Nivel de significancia | | |
|-----------------------|----------------|------|-----|------------------------|----|-----|
| | MP | PD | DMP | MP | PD | DMP |
| <i>Genotipo</i> | | | | * | ** | * |
| 1 | 2.39 | 1.40 | 60 | | | |
| 2 | 2.12 | 1.08 | 56 | | | |
| <i>Edad (años)</i> | | | | * | ** | * |
| 2 | 1.78 | 0.98 | 58 | | | |
| 3 | 2.38 | 1.36 | 61 | | | |
| 4 | 2.54 | 1.41 | 54 | | | |
| ≥ 5 | 2.31 | 1.20 | 58 | | | |
| <i>Época de parto</i> | | | | NS | ** | ** |
| Noviembre – febrero | 2.16 | 1.32 | 63 | | | |
| Marzo – octubre | 2.34 | 1.16 | 53 | | | |

NS = P > 0.05; * P < 0.05; ** P < 0.01.

Genotipo 1 = Cruzas de Alpina, Saanen y Toggenburg; Genotipo 2 = Cruzas de Granadina y Nubia. MP = Máxima producción (kg); PD = Producción diaria (kg); DMP = Día a la máxima producción.

Polinomio inverso

La función del polinomio inverso considerada como intrínsecamente lineal (Faro y Albuquerque, 2002), se desarrolló con el fin de mejorar los modelos existentes para la descripción de la lactancia. El polinomio inverso tiene la siguiente forma:

$$Y_t = t / \left[\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 \right]$$

Donde Y_t = producción láctea en un periodo t , y β 's = coeficientes de regresión (Gipson y Grossman, 1990). Para este modelo, la producción láctea en el pico es β_0 / β_2 , y ocurre al tiempo $\sqrt{\beta_0 / \beta_2}$ (Lombaard, 2006).

El polinomio inverso, solo ha sido reconocido como buen descriptor solo en lactancias para vacas que paren en verano, y para aquellas que comienzan la lactancia con bajas producciones lácteas y alcanzan el pico de la lactancia antes que el promedio (Ruiz *et al.*, 2000). En estudios realizados para evaluar esta función se ha observado que tiende a sobrestimar la producción láctea (Faro y Albuquerque, 1999) y más del 70% de sus residuos están correlacionados, lo que implica un ajuste casi nulo (Faro y Albuquerque, 2002); además de esto, no puede ser aplicado en casos que se presenten curvas de lactancia atípicas (Lombaard, 2006).

Morant y Gnanasakthy

Morant y Gnanasakthy consideran que la curva de lactancia es el resultado de las tasas de cambio proporcionales en la producción láctea, y el patrón matemático del cambio proporcional es definido por $(dy/dt)/y$. La curva de lactancia se obtiene de esta tasa de cambio proporcional al determinar la integral de $(dy/dt)/y$, lo cual después resultará en el logaritmo natural de la producción al tiempo t o $\ln y_t$ (Lombaard, 2006). La ecuación de Morant y Gnanasakthy fue propuesta como una alternativa de la gamma incompleta para la modelación de curvas de lactancia cuando la tasa de cambio proporcional en la producción láctea no sigue un constante valor negativo, como lo requiere la ecuación gamma incompleta. Por ejemplo, en un estudio realizado por Ruiz *et al.* (2000), se observó que el uso de esta ecuación, proporciona el mejor ajuste en términos de menores valores de:

cuadrado medio del error, suma de cuadrados residual, así como la menor autocorrelación entre sus parámetros determinada mediante el coeficiente de Durbin – Watson, lo que nos proporcionará una mejor descripción del patrón que sigue la lactancia. La ecuación de Morant y Gnanasakthy es de la siguiente manera:

$$y_n = e^{(a - bn_1 - cn_1^2 - d/n)}$$

Aunque se le ha intentado dar una explicación biológica a sus parámetros, esto no se ha podido conseguir por completo; algunos autores, en vacas lecheras, interpretan el parámetro a como el logaritmo de la producción láctea esperada al día 150 de la lactancia, considerando lactancias de 305 días; sin embargo, para el caso de las ovejas (Cuadro 2.16), se considera como la producción láctea a la mitad de la lactancia; y se considera que tiene alta correlación de una lactancia a otra (0.60). En cuanto al parámetro b , es la proporción de cambio a la mitad de la lactancia, y se utiliza como medida de persistencia, es decir, qué tanto se mantiene la producción día a día en cualquier etapa de la lactancia. El parámetro c , se puede describir como el cambio que sufre la persistencia a través de la lactancia. Finalmente, el parámetro d , nos proporciona la tasa de incremento en la producción láctea antes del pico de lactancia (Ruiz *et al.*, 2000).

Cuadro 2.16. Valores de los parámetros obtenidos mediante la función Morant y Gnanasakthy considerando los principales factores de variación.

| Factor de variación | Parámetro | | | |
|------------------------------|-----------|----------|----------|----------|
| | <i>A</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> |
| <i>Mes de parto</i> | | | | |
| Noviembre | -0.234 | 0.801 | -0.067 | 1.331 |
| Diciembre | -0.018 | 0.758 | 0.134 | 0.859 |
| Enero | 0.0079 | 0.762 | 0.484 | 1.008 |
| Febrero | 0.0623 | 0.836 | 0.517 | 0.614 |
| Marzo | 0.0336 | 0.868 | 0.582 | 2.009 |
| <i>Número de crías vivas</i> | | | | |
| 0 | 0.0132 | 0.587 | 0.505 | 0.443 |
| 1 | -0.009 | 0.769 | 0.344 | 0.845 |
| 2 | 0.0745 | 0.940 | 0.406 | 1.087 |
| <i>Número de parto</i> | | | | |
| 1 | 0.0154 | 0.587 | 0.651 | 0.578 |
| 2 | 0.0058 | 0.799 | 0.431 | 0.781 |
| 3 – 6 | 0.0083 | 0.832 | 0.272 | 0.892 |
| ≥ 7 | -0.0408 | 0.803 | 0.245 | 1.501 |

Después de observar algunos inconvenientes para la descripción de la curva de lactancia, Morant y Gnanasakthy reestructuraron su modelo quedando de la siguiente manera:

$$y_t = a \exp \left(b t^r + r t^r \right) \left[c t^2 + d / t \right]$$

La mayor ventaja de este modelo es que los parámetros tienen interpretaciones relativamente simples. El logaritmo del parámetro a representa la producción esperada al t_0 . El parámetro b es definido como la tasa de cambio en la producción al t_0 y es el principal parámetro que afecta la forma de la curva. El parámetro c también afecta la forma de la curva de lactancia y se dice que mide hasta que punto cambia la persistencia durante la lactancia. Definiendo la persistencia como que tanto se mantiene la producción día a día en cualquier estado de la lactancia y puede ser determinada mediante $1 - \frac{c}{a + 2c} \left[\frac{a}{r - c} \right]^{100 - d/t^2}$. El parámetro d proporciona la tasa a la cual incrementa la producción durante la lactancia temprana y r es la pendiente de regresión para los parámetros c y b (Lombaard, 2006).

Función multifásica

La función multifásica se ha propuesto recientemente como un modelo para las curvas de lactancia con el objeto de remediar las pequeñas diferencias de ajuste de la función gamma incompleta al considerar factores genéticos y ambientales (Gipson y Grossman, 1989), y al tener seis parámetros la hace más flexible (Macedo *et al.*, 2001). Esta función, no solo ha sido utilizada para describir la lactancia, sino también en la caracterización de curvas de crecimiento en cerdos (Koops y Grossman, 1991) y pollos (Grossman y Koops, 1988b). Al igual que la lactancia, el crecimiento, como todo proceso biológico incluye varias fases (France *et al.*, 1996) y es difícil aplicar un modelo que con tres o cuatro parámetros pueda describir el complicado proceso del crecimiento animal (Koops, 1986); por lo que se ha aplicado el modelo multifásico para tratar de explicar más detalladamente el crecimiento de un organismo o parte de él.

La función multifásica está diseñada para modelar múltiples picos cuando el número de fases es mayor o igual a dos. Se ha observado que la lactancia puede ser descrita apropiadamente utilizando la función difásica (Grossman y Koops, 1988a; Weigel *et al.*, 1992); aunque se menciona que el utilizar la función trifásica, brinda una mejor apreciación del nivel de la producción láctea en la lactancia temprana, la cual presenta el pico de máxima producción al día 25; sin embargo, ésta función trifásica solo puede ser utilizada en el caso que los intervalos de muestra sean cada tercer día a partir del cuarto día después del parto (De Boer *et al.*, 1989).

Los factores que influyen en la forma de la curva de lactancia más estudiados son: raza, nivel de producción, manejo, número y época de parto (Gipson y Grossman, 1990; García y Holmes, 2001; Grossman y Koops, 2003); factores que, como ya se explico anteriormente, tienden a modificar la forma de la curva de lactancia. La función multifásica propuesta por Grossman y Koops (1988a) tiene la siguiente forma:

$$Y_t = \sum_{i=1}^n a_i b_i \left[1 - \tanh^2 \left(\frac{t - c_i}{\sigma_i} \right) \right]$$

Donde:

y_t = producción de leche en tiempo t .

n = número de fases en la curva.

a_i = promedio del total de producción por etapa (kg).

b_i = tasa de producción relativa de a_i (por día) por cada etapa i .

c_i = tiempo del pico de producción (en días) por cada etapa i .

t = tiempo (días).

\tanh = función hiperbólica de la tangente.

Mediante esta función se puede estimar la producción láctea en el pico (a/b), tiempo en que ocurre el pico de producción (c) y la duración en días ($2/b$) de cada fase (Gipson y Grossman, 1990). La distribución de esta función tiene $\mu = c$, y varianza $\sigma^2 = \pi^2 b^2 / 3$ ($\sigma = \pi b / \sqrt{3}$); esta distribución logística se aproxima a la distribución normal, así que se asume que $c \pm 3\sigma$ contiene alrededor de 99% de la distribución centrada en c ; además, $6\sigma = 6\pi b / \sqrt{3} = 10.88b$ contiene 99% de la distribución. Por consiguiente, 99% de la distribución es $10.88b$, con $c \pm \frac{1}{2}(10.88)b$ centrada en c (Grossman y Koops, 2003). La obtención de la curva global, y producción láctea total esperada, es mediante la suma de las funciones a través de las fases; y sus parámetros pueden ser utilizados como criterio de selección (Weigel *et al.*, 1992), al igual que nos permiten desarrollar factores de ajuste (De Boer *et al.*, 1989).

Las variantes más utilizadas de la función multifásica son:

- Función monofásica (Sherchand *et al.*, 1995):

$$Y_t = a_i b_i \left[-\tanh^2 \left(\frac{t - c_i}{b_i} \right) \right]$$

- Función difásica (Gipson y Grossman, 1989):

$$Y_t = \sum_{i=1}^2 a_i b_i \left[-\tanh^2 \left(\frac{t - c_i}{b_i} \right) \right]$$

La función difásica divide la lactancia en: Fase 1 “fase del pico” y Fase 2 “fase de persistencia” (Macedo *et al.*, 2001); esta última es más afectada por el número de parto y por la selección para obtener mayor producción (Gipson y Grossman, 1989). El modelo difásico se basa en la función de densidad para probabilidad logística, derivada primero de la función de distribución acumulativa con respecto de t , parametrizada en términos de la función de la tangente hiperbólica (Grossman y Koops, 2003). Dicho modelo, se ha

mostrado superior a la función gamma incompleta en términos de menos y menores residuos correlacionados (Weigel *et al.*, 1992).

Algunas investigaciones realizadas con esta función confirman su utilidad al describir la lactancia en cabras (Macedo *et al.*, 2001) y definir claramente los efectos (Cuadro 2.17) que tienen diversos factores como la estación de parto (García y Holmes, 2001; Gipson y Grossman, 1989), días abiertos (De Boer *et al.*, 1989), nivel de producción, número de parto y raza (Gipson y Grossman, 1989) en la forma de la curva de lactancia, y con más precisión, la fase de la lactancia en la que tienen mayor efecto. Por ejemplo, en vacas (García y Holmes, 2001) y en cabras (Gipson y Grossman, 1989), la época de parto tiene mayor influencia en la fase 2, modificando todas las características importantes de la lactancia. En cuanto a los días abiertos, en cabras, afectan en la fase 2 la producción inicial y al pico; y en la fase 3 la duración de la fase (De Boer *et al.*, 1989). Los factores raza y número de parto (Gipson y Grossman, 1989), afectan el tiempo al pico de producción en la fase 1, presentando más temprano el pico de producción las cabras de dos o más partos y las razas Alpina y Nubia en comparación con La Mancha, Saanen y Toggenburg. Para fase 2, la producción inicial y al pico es similar entre razas, pero menor para el primer parto; el tiempo al pico es similar entre razas, pero se presenta más tarde para el primer parto; y la duración de la fase es menor para la raza Saanen y cabras de dos o más partos. El nivel de producción modifica la producción al pico, a los 305 días y el tiempo al pico de producción en la fase 1; y en la fase 2, modifica los ya mencionados, además de la producción inicial y la duración de la fase.

Cuadro 2.17. Investigaciones para la modelación de la curva de lactancia mediante la función multifásica, considerando varios factores y sus efectos en las fases de la curva.

| Autor | Factor estudiado | Característica de la lactancia | Efecto en la curva | | | |
|------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------------------|--------|--------|--|
| | | | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 | |
| García y Holmes, 2001 | Época de parto | Producción al pico | ** | *** | | |
| | | Tiempo al pico de producción | * | *** | | |
| | | Producción total | *** | *** | | |
| De Boer <i>et al.</i> , 1989 | Días abiertos | Producción inicial | NS | ** | NS | |
| | | Producción al pico | NS | ** | NS | |
| | | Tiempo al pico de producción | NS | NS | NS | |
| | | Duración de la fase | NS | NS | ** | |
| | Raza | Producción al pico | NS | NS | | |
| | | Producción a los 305 días | NS | NS | | |
| | | Tiempo al pico de producción | ** | NS | | |
| | | Duración de la fase | NS | * | | |
| | | Producción al pico | NS | ** | | |
| | | Producción a los 305 días | NS | NS | | |
| Gipson y Grossman, 1989 | Número de parto | Tiempo al pico de producción | ** | ** | | |
| | | Duración de la fase | NS | * | | |
| | | Producción al pico | ** | ** | | |
| | Época de parto | Producción a los 305 días | ** | ** | | |
| | | Tiempo al pico de producción | NS | ** | | |
| | | Duración de la fase | ** | ** | | |
| | | Producción al pico | ** | ** | | |
| | | Producción a los 305 días | ** | ** | | |
| | | Nivel de producción | Tiempo al pico de producción | ** | ** | |
| | | | Duración de la fase | NS | * | |

* P<0.05; ** P<0.01; *** P<0.001; NS = No significativo

El tiempo al pico de la primera fase, en cabras, es usualmente entre el día 30 y 60 de lactancia, y cerca del tiempo al pico en la curva de lactancia global, mientras que el tiempo

al pico de la segunda fase, usualmente es después del día 120 de lactancia. Por esto, la primera fase, la cual es de menor duración y más próxima al pico global de producción, se dice que corresponde a la “fase del pico” en la lactancia. En contraste, la segunda fase, que no es de mucha duración, corresponde a la “fase de persistencia”. La duración de la primera fase no se afecta por el número de parto o nivel de producción, mientras que la duración de la segunda fase, disminuye conforme incrementa el número de parto o el nivel de producción, por lo que se ha propuesto que la duración de la segunda fase sea utilizada como medida de persistencia (Gipson y Grossman, 1989).

A pesar de estas evidencias de la gran utilidad de la función multifásica, Tozer y Huffaker (1999) mencionan que existen dificultades asociadas con la justificación de que la lactancia pueda ser considerada como un proceso multifásico. Y como respuesta a esto, Grossman y Koops (2003) se dieron a la tarea de explicar la producción láctea como respuesta a una serie de fases biológicas; señalando que el modelo multifásico representa la producción como un incremento en la primera fase y una serie de fases de disminución, descritas por funciones logísticas de tiempo; donde la fase de incremento en la producción, está asociada con el aumento en el número y producción de células de la glándula mamaria; mientras que las fases de descenso en la producción, están asociadas con la disminución en el número celular, debido a apoptosis, acompañado de la baja producción por célula como consecuencia de la preñez. Por lo tanto, la regresión de la glándula mamaria y la consecuente disminución en la producción láctea; es el resultado neto de la caída en el número de células mamarias por muerte celular (apoptosis) y la menor tasa de secreción por señales hormonales específicas durante la preñez. Estas fases de crecimiento

y regresión de la glándula mamaria, proveen la base biológica para el ajuste multifásico en la modelación de la curva de lactancia.

Criterios para definir el mejor modelo

Los principales criterios utilizados para comparar modelos son: a) cuadrado medio del error (CME) (García y Holmes, 2001), b) residuales (Olori *et al.*, 1999), c) estadístico Durbin – Watson (DW) (Ruiz *et al.*, 2000; Grossman y Koops, 2003; Ramírez *et al.*, 2004), d) coeficiente de determinación R^2 (De Boer *et al.*, 1989; Olori *et al.*, 1999; Ruiz *et al.*, 2000), e) número de iteraciones requeridas (López, 1995) y f) estimadores de máxima verosimilitud (Lindsey, 1974), dentro de los que se encuentran el criterio de información de Akaike (AIC) y el criterio de información bayesiano (BIC) (Juneja *et al.*, 2006). La mayoría de estos criterios, con excepción del coeficiente de determinación, sugieren como mejor modelo aquel que muestre los valores menores (Cuadros 2.18; Olori *et al.*, 1999; y 2.19; Ruiz *et al.*, 2000.), y en la medida de lo posible, un significado biológico para los parámetros (López, 1995). Por ejemplo, si un modelo tiene valores pequeños del CME y DW, es considerado como superior debido a que tiene menor variación residual reflejada en la mejor distribución aleatoria de sus residuos. Mientras que para R^2 , el mejor modelo será el que tenga mayor valor (Ruiz *et al.*, 2000). Además de estos criterios, Chang *et al.* (2002) menciona un criterio denominado D^2 , definido por $\sum (d_i - 1/2)^2$; donde d_i es la probabilidad de que el *i*-ésimo registro presente un valor mayor al predicho; este valor debe estar alrededor de $1/2$ si el modelo tiene buen ajuste.

Cuadro 2.18. Parámetros estimados, características de la lactancia y criterios de ajuste para diferentes modelos.

| Modelo | Parámetro | | | Característica | | | Criterio | |
|--------|-----------|----------|----------|----------------|------|-----------------------|----------|------|
| | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | PSP | PLP | <i>R</i> ² | RCME | RESC |
| GI | 3.210 | 0.176 | -0.017 | 9 | 31.1 | 0.944 | 0.67 | 0.28 |
| PCI | 0.024 | 0.030 | 0.0004 | 8 | 31.8 | 0.979 | 0.39 | 0.04 |
| LM | 28.90 | -7.25 | 11.00 | 9 | 31.4 | 0.964 | 0.52 | 0.19 |
| RP | -26.10 | 72.80 | -23.80 | 6 | 31.9 | 0.996 | 0.17 | 0.04 |

GI= $Y_t = at^b e^{-ct}$; PCI= $Y_t = a + bt^{-1} + ct$; LM= $Y_t = a + bt^{1/2} + c \log t$;
 RP= $Y_t = a + bt + ct^2 + d \log t + \epsilon$ ($\log t$); $d = 41.0$; $\epsilon = -8.35$.
 PSP = Pico semanal predicho; PLP = Producción láctea predicha; RCME = Raíz del cuadrado medio del error; RESC = Correlación entre la producción y los residuos.

Cuadro 2.19. Criterios de bondad de ajuste de varios modelos para describir curvas de lactancia.

| Ecuación | CMEP | RES | SCR | DW |
|----------|--------|-------|------|------|
| GI | 0.0196 | 0.119 | 0.18 | 2.67 |
| GIL | 0.0195 | 0.117 | | 2.90 |
| CLD | 0.0139 | 0.118 | 0.24 | 2.30 |
| MG | 0.0075 | 0.079 | 0.13 | 3.27 |

GI= $y_t = an^b e^{-ct}$; GIL= $\log y_t = \log a + b \log t - ct$; CLD= $y_t = a - bt - ae^{-ct}$;
 MG= $y_t = e^{(-bt_1 - cn_1^2 - d/n)}$
 CMEP= Cuadrado medio del error de predicción; RES=Residuos; SCR=Suma de cuadrados residual; DW=Estadístico Durbin – Watson.

Algunos autores mencionan que la ecuación de mejor ajuste dependerá de la frecuencia de registro de producción, del genotipo del animal (Ramírez *et al.*, 2004) o de si el objetivo

es predecir la producción individual o acumulada (Olori *et al.*, 1999). Sin embargo, el modelo puede resultar como mejor o peor dependiendo del criterio utilizado, por lo que al seleccionar un modelo como el mejor, deberá ser el más consistente en los diferentes criterios de ajuste.

Pseudo-R²

En los modelos lineales, la calidad de ajuste puede ser expresada mediante el coeficiente de determinación R². Sin embargo, en los modelos no lineales, tal medida aun no está muy bien definida. Uno de los problemas con la definición de R² es que ésta requiere la presencia de un intercepto, el cual, muchos de los modelos lineales no lo tienen. Por lo que se ha propuesto una medida relativamente muy cercana a R² en modelos no lineales denominada pseudo – R² (Juneja *et al.*, 2006; Schabenberger, 2008), que se define por:

$$Pseudo - R^2 = 1 - \frac{SC_{Residual}}{SC_{Total\ Corregida}}$$

A pesar de no ser el coeficiente de determinación R² (Cuadro 2.20; Macedo *et al.*, 2001), como tal, el más indicado en modelos no lineales como criterio de ajuste, ha sido utilizado por varios autores como Ruiz *et al.* (2000), Macedo *et al.* (2001), Oishi *et al.* (2007).

Cuadro 2.20. Coeficiente de determinación (R^2) y varianza residual para diferentes modelos.

| Modelo | R^2 | Varianza residual |
|---|-------|-------------------|
| Gamma incompleta lineal ¹ | 0.47 | 0.2949 |
| Gamma incompleta no lineal ² | 0.84 | 0.0530 |
| Morant lineal ³ | 0.48 | 0.0540 |
| Morant no lineal ⁴ | 0.84 | 2.1700 |
| Grossman ⁵ | 0.85 | 0.1000 |

¹ $\log y = a + b \log t - ct$; ² $y = at^b e^{-ct}$; ³ $\log y = a + bt^c + ct + d/t$; ⁴ $y = a e^{(t+ct^2+d/t)}$; ⁵ $y = a_1 b_1 \frac{1}{1 + \tanh^2 \left[\frac{t}{b_1} (c_1 - t) \right]} + a_2 b_2 \frac{1}{1 + \tanh^2 \left[\frac{t}{b_2} (c_2 - t) \right]}$.

Prueba de Durbin – Watson

La prueba estadística de Durbin – Watson es una prueba diseñada para detectar el grado de autocorrelación (Faro y Albuquerque, 2002; Quinn *et al.*, 2006) de primer orden de los residuos en series $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, y es particularmente útil cuando c_i es una observación en tiempo t (Champion *et al.*, 1998). Esta prueba considera que un valor cercano a 2 indica una autocorrelación de cero (De Boer *et al.*, 1989; Ruiz *et al.*, 2000). El uso de esta prueba nos permite reducir la probabilidad de cometer errores de Tipo I y II (Kenkel, 1976).

Los valores para Durbin – Watson en la función trifásica, aplicada en cabras, varían de 0.99 (autocorrelación de 0.34) a 2.64 (autocorrelación de - 0.33) (De Boer *et al.*, 1989), mientras que para la función difásica, la autocorrelación varía de 0.35 a 0.26 presentando cerca del 80% de los valores en el rango de -0.16 a 0.16 (Gipson y Grossman, 1989), y en vacas, los valores de DW están entre 1.9 y 3.2 (Grossman y Koops, 2003), lo que indica falta de autocorrelación entre los residuos. Ramírez *et al.* (2004) mencionan que la

incidencia de autocorrelación positiva disminuye a medida que disminuye el número de muestreos.

Cuadrado medio del error

En el caso de los modelos no lineales, dentro de los que caen la mayoría de las funciones utilizadas para la descripción de la curva de lactancia, el cuadrado medio del error (CME) es de los criterios más apropiados para la comparación de modelos para la determinación del mejor ajuste (García y Holmes, 2001; Basdagianni *et al.*, 2005; Quinn *et al.*, 2006). Sin embargo, hay que recordar que el uso del CME en casos en los que las unidades de medición de los modelos sean diferentes, no es factible (Ruiz *et al.*, 2000). El CME es un parámetro de gran exactitud también definido como la proporción de la variación de la producción láctea real sobre la suma de la variación de la producción real y la diferencia absoluta de la producción estimada. Los modelos con valores menores de CME estarán asociados con un adecuado ajuste predecir un conjunto particular de datos (Basdagianni *et al.*, 2005; García y Holmes, 2001). El CME puede ser expresado como la suma de tres términos independientes: la tendencia media o central, la tendencia alrededor de la línea de regresión y la perturbación aleatoria (García y Holmes, 2001).

Estimadores de máxima verosimilitud

Otra medida de buen ajuste y comparación de modelos es mediante la máxima verosimilitud (Lindsey, 1974). La idea básica de ésta es encontrar parámetros para que los datos observados sean más probables de ocurrir. El uso de estimadores de máxima verosimilitud como criterio de ajuste se prefiere ante el cuadrado medio del error, debido a

que la máxima verosimilitud se basa en consideraciones de cómo se elevan los errores aleatorios y de cómo están distribuidos (Wang y Liu, 2006). Dentro los estimadores de máxima verosimilitud, el criterio de información de Akaike (AIC) y el criterio de información Bayesiano (BIC), son los más utilizados (Juneja *et al.*, 2006). En la modelación de la curva de lactancia, existen modelos derivados de otros [ejemplo: la gamma incompleta o función de Wood, se deriva de la exponencial general; y otras funciones, a su vez son derivadas de la función de Wood (Pedraza *et al.*, 2002; Ramírez *et al.*, 2004)]. En teoría, al seleccionar un “mejor modelo”, si uno de los modelos en comparación es derivado de otro, llamado sub-modelo o anidado, la comparación estadística se hace mediante una prueba de F , pero también se puede realizar mediante una prueba de verosimilitud, utilizando AIC o BIC, cuando se especifica una distribución de probabilidad del error. El mejor modelo, en la prueba de F , en caso que no haya diferencia entre el modelo original (modelo complejo) y el sub-modelo (modelo simplificado), será aquel que tenga menos parámetros (modelo simplificado); mientras que al utilizar AIC o BIC, el modelo seleccionado, va a ser el que obtenga el menor valor de AIC o BIC (Wang y Liu, 2006).

Criterio de información de Akaike (AIC). La comparación mediante AIC nos permite seleccionar el modelo más conveniente porque el modelo que mejor ajusta, es el que mejor simula los datos. Sin embargo, AIC se considera como un criterio conservador ya que aún el modelo con más parámetros puede ser seleccionado (Wang y Liu, 2006). El AIC puede calcularse con:

$$AIC = -2 \ln(\text{máxima verosimilitud}) - 2m \quad [1]$$

$$AIC = n \ln \left(\frac{SCE}{n} \right) + 2p \quad [2]$$

Donde m , en la ecuación [1] (Wang y Liu, 2006), es el número de parámetros estimados. Y en la ecuación [2] (Juneja *et al.*, 2006), n se define como el número de observaciones, SCE como la suma de cuadrados del error, y p como el número de parámetros en el modelo.

Criterio de información Bayesiano (BIC). Es también un buen criterio de selección del mejor modelo generado por los datos. Sin embargo, a diferencia de AIC, penaliza la introducción de algún parámetro adicional al modelo añadiendo otro término de cálculo, por lo que es más estricto en la selección del mejor modelo (Wang y Liu, 2006). El cálculo de BIC puede ser mediante las siguientes dos ecuaciones:

$$BIC = -2 \ln(\text{máxima verosimilitud}) - m \ln(\hat{\sigma}^2) \quad [3]$$

$$BIC = n \ln \left(\frac{SCE}{n} \right) + 2(p+2)q - 2q^2 \quad [4]$$

Donde m , en la ecuación [3] (Wang y Liu, 2006), es el número de parámetros y n es el número de observaciones. Y en la ecuación [2] (Juneja *et al.*, 2006), n se define como el número de observaciones, SCE como la suma de cuadrados del error, p como el número de parámetros en el modelo y $q = n\hat{\sigma}^2/SCE$ donde $\hat{\sigma}^2$ es el error de varianza estimado del modelo ajustado.

MODELACIÓN DE CURVAS DE PRODUCCIÓN Y COMPOSICIÓN DE LECHE DE CABRAS EN EL ALTIPLANO POTOSINO

Resumen

La producción de leche de cabra constituye una fuente muy importante de ingresos para los productores en las zonas áridas y semiáridas de México. Sin embargo, hay información limitada en México sobre caracterización de las curvas de producción de la leche y de sus componentes, por lo que se realizó el presente estudio con objeto de caracterizar las curvas de lactancia y de sus componentes en cabras F₁ (Alpina x Nubia) del Altiplano Potosino, utilizando tres modelos matemáticos. Se evaluaron los modelos monofásico, difásico y gamma incompleta, considerando como criterios el cuadrado medio del error, pseudo R², criterio de información de Akaike, criterio de información Bayesiano y -2 log likelihood. El modelo difásico fue el más consistente en todos los criterios de ajuste, por lo que resultó más útil que los modelos monofásico y gamma incompleta para la caracterización de la curva de producción de leche. Para los componentes de la leche, el modelo gamma incompleta fue mejor que el monofásico y difásico.

Palabras clave: funciones matemáticas, curvas de lactancia, cabras, modelo multifásico, gamma incompleta.

Abstract

Goat milk production is an important income source for producers in arid and semiarid zones in México. However, there is limited information on characterization of milk and constituent production curves. In this study, monophasic, diphasic and incomplete gamma

models were evaluated in order to characterize milk and constituent production curves in F₁ (Alpine x Nubian) goats of the Potosino Highland. Measures of goodness-of-fit as mean square error, pseudo R², -2 log likelihood, Akaike's and Bayesian information criteria were used to compare models. Based on these criteria, diphasic model was the best to characterize milk production curve. For milk constituents, incomplete gamma model was the best.

Key words: mathematic functions, lactation curves, goats, multiphasic model, incomplete gamma.

Introducción

En México, la producción de leche caprina constituye una de las principales fuentes de ingreso en las zonas áridas, la mayor parte de la leche producida (70%), proviene de sistemas extensivos en esta zona (Mellado *et al.*, 2004). La representación grafica de la producción de leche a través del tiempo, es una curva de lactancia (Sherchand *et al.*, 1995). El comportamiento común de la curva, es que la producción incremente al inicio hasta llegar a un máximo (pico de producción), mantenga este pico, y disminuya hasta el final de la lactancia (Chang *et al.*, 2001). El objetivo principal de esta curva es predecir la producción diaria con el mínimo error, en presencia de diversos factores (Lombaard, 2006). El conocimiento de una curva de lactancia es una herramienta valiosa, ya que puede ser utilizada para diferentes aspectos de manejo (Gipson *et al.*, 1990), como alimentación (Sherchand *et al.*, 1995) y genética (Weigel *et al.*, 1992). Esta curva ha sido modelada con diversas ecuaciones matemáticas que, a pesar de la diferencia en la formulación, todas generan una gráfica similar (Tozer y Huffaker, 1999). La utilidad de cada una de éstas,

depende de que tan bien describan o imiten el proceso biológico de la lactancia (Olori *et al.*, 1999), evaluándolas mediante ciertos criterios de ajuste como son: Cuadrado Medio del Error, Pseudo-R² (Schabenberger, 2008), Criterio de información de Akaike, Criterio de información Bayesiano y -2 Log likelihood (Juneja *et al.*, 2006). Los parámetros de las ecuaciones, en la medida de lo posible, deben tener significado biológico (Chang *et al.*, 2001). Existen pocos estudios de curvas de lactancia en cabras, en relación a los de vacas (Masselin *et al.*, 1987). Dentro de las funciones más utilizadas, están: gamma incompleta, polinomio inverso, polinomio segmentado, y multifásica. Esta última, divide la curva en diferentes fases proporcionando información útil de las características de la curva, incluyendo escala (producción inicial y máxima) y forma (tiempo de la máxima producción y persistencia) (Gipson y Grossman, 1990), ajusta mejor que la comúnmente utilizada función gamma incompleta (Grossman y Koops, 1988a) y permite desarrollar factores de ajuste para corregir efectos ambientales (De Boer *et al.*, 1989). De los factores que afectan la curva, la raza afecta la escala; la estación de parto y el nivel de producción afectan la forma, en particular, la persistencia; y el parto, modifica ambas características (García y Holmes, 2001; Grossman y Koops, 2003). Además de la curva para producción, es importante ajustar curvas para componentes lácteos, ya que el establecimiento del precio depende de éstos (Lombaard, 2006). Los porcentajes de grasa y proteína son funciones convexas; mientras que el contenido de lactosa sigue una tendencia opuesta. Con base en esto, el contenido de grasa y proteína pueden ser modelados con la misma función que la producción láctea; pero el contenido de lactosa, requiere una función que tenga la habilidad de modelar su continua disminución a través de la lactancia (Lennox *et al.*, 1993). A pesar de que la producción caprina constituye una fuente importante de ingresos en zonas áridas y

semiáridas de México, no se ha caracterizado una curva para producción o componentes lácteos, por lo que se realizó el presente estudio con el objetivo de determinar las curvas de lactancia y componentes lácteos de cabras F₁ (Alpina x Nubia) del altiplano potosino.

Materiales y Métodos

El estudio se realizó en la Unidad Caprina del Departamento de Producción Pecuaria, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), coordenadas 22°14'10" latitud Norte y 100°53'10" longitud Oeste, altitud de 1833 m y precipitación media anual de 335mm. El clima es seco estepario frío, con temperatura media anual de 18°C (7.5°C mínima y 35°C máxima) (García, 1973). Se utilizaron datos de la producción láctea de 18 cabras F₁ (Alpina x Nubia) de segundo parto. Las cabras permanecieron en estabulación en corrales provistos de comederos y bebederos. Las cabras fueron alimentadas durante el último tercio de gestación y el periodo de muestreo con 2 kg de materia seca, aportada por 3.7 kg de alfalfa verde y 1 kg en base fresca de concentrado comercial con 16% proteína cruda y 2.4 Mcal; el concentrado se proporcionó en partes iguales en la mañana y en la tarde; mientras que el forraje se proporcionó únicamente en la mañana. Las cabras se ordeñaron una vez al día durante la mañana. Se obtuvieron los datos de producción y composición láctea (sólidos totales, grasa y proteína). La medición de la producción láctea se efectuó una vez por semana, por la mañana, durante 14 semanas. Se recolectaron muestras de leche en frascos de vidrio el mismo día que se midió la producción, las muestras se analizaron quincenalmente para determinar su composición (sólidos totales, grasa y proteína); el análisis de las muestras se realizó con el equipo Milko Scan Mino 6 en la Facultad de Agronomía de la UASLP.

Análisis Estadístico

Análisis descriptivo. Se obtuvieron las medias, desviación estándar, coeficiente de variación (CV), producción máxima y producción mínima para cada una de las variables en estudio; por semana para producción láctea, y por quincena para contenido de sólidos totales, proteína y grasa en leche.

Modelos. Se evaluaron las funciones monofásica (Sherchand *et al.*, 1995), difásica (Gipson y Grossman, 1989) y gamma incompleta (Tozer y Huffaker, 1999). Para ello se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\text{Función monofásica: } Y_t = a_i b_i \left[1 - \tanh^2 \left(\frac{t - c_i}{b_i} \right) \right]$$

$$\text{Función difásica: } Y_t = \sum_{i=1}^2 a_i b_i \left[1 - \tanh^2 \left(\frac{t - c_i}{b_i} \right) \right]$$

Donde: Y_t = producción de leche en un tiempo t ; a_i = promedio del total de producción por fase (kg); b_i = tasa de producción de a_i (por día) por cada fase i ; c_i = tiempo del pico de producción (días) por cada fase i ; t = tiempo (días); \tanh = función hiperbólica de la tangente.

$$\text{Función gamma incompleta: } Y_t = a t^b e^{-ct}$$

Donde el parámetro a determina la producción inicial y el nivel máximo de producción, mientras que los parámetros b y c determinan la forma de la curva, y cómo cambia a través de la lactancia.

Estimación de parámetros y comparación de modelos. La estimación de los parámetros y criterios de ajuste se obtuvieron mediante PROC NLMIXED (SAS, 2002). Para la

comparación de los modelos se consideraron: Cuadrado Medio del Error (CME), Pseudo – R^2 , Criterio de información de Akaike (AIC), Criterio de información Bayesiano (BIC) y -2 Log likelihood. El valor menor de estos estadísticos, exceptuando Pseudo – R^2 , se considera como el de mejor ajuste. Se seleccionó como mejor modelo aquel que fuera más consistente en éstos.

- AIC (Juneja *et al.*, 2006): $AIC = n \ln \left(\frac{SSE}{n} \right) + 2p$
- BIC (Juneja *et al.*, 2006): $BIC = n \ln \left(\frac{SSE}{n} \right) + 2p + 2\ln n - 2q^2$

Donde n es el número de observaciones; SSE es la suma de cuadrados en el modelo; p el número de parámetros en el modelo; $q = n\hat{\sigma}^2 / SSE$ y $\hat{\sigma}^2$ es el error de varianza estimado del modelo ajustado.

- Pseudo- R^2 (Schabenberger, 2008) definido por:

$$Pseudo - R^2 = 1 - \frac{SC_{Residual}}{SC_{Total\ Corregido}}$$

Curvas y características de la lactancia. Se determinaron con el modelo que resultó tener mejor ajuste. Las características se calcularon mediante a/b_i , c_i y $2/b_i$ para las funciones monofásica y difásica (Gipson y Grossman, 1990); y con $a(b/c)^b e^{-b}$, b/c y $-(b+1)/\ln(c)$ para la función gamma incompleta (Rekik y Ben, 2004); para producción al pico, tiempo en que ocurre el pico, y “persistencia”; respectivamente.

Resultados y Discusión

Análisis Descriptivo de los Datos.

Producción láctea. La producción láctea presentó un comportamiento atípico, presentando dos picos de producción (Figura 3.1), uno en la semana 2 (1133.89 ± 236.47 ml) y otro en la semana 12 (1152.22 ± 232.54 ml). Este comportamiento se atribuye a un periodo corto en el que hubo problemas de disponibilidad de alimento concentrado. El periodo más crítico ocurrió en la semana 8 (845.22 ± 172.86 ml).

Composición láctea. El contenido de sólidos totales promedio fue de 12.12%, idéntico al reportado por Díaz *et al.* (2004b), menor al obtenido por Ayala–Oseguera y Armendáriz (2003) y Sanz *et al.* (2006); y mayor al reportado por Iaschi *et al.* (2003), quienes utilizaron otras razas en sus estudios. El contenido de sólidos totales en la primera quincena fue superior al encontrado por Díaz *et al.* (2004b) (13.46% *vs* 12.5%), pero en la tercera quincena, los promedios fueron idénticos (11.7%). El contenido promedio de proteína fue de 3.29%, similares a los reportados por Vega *et al.* (2004b) en cabras Alpinas, pero menores a los reportados por Díaz *et al.* (2004b) en cabras del mismo genotipo y a los reportados por Iaschi *et al.* (2003) en cabras Australianas. El mayor porcentaje de proteína se observó en la primera semana (3.51 ± 0.32), y los menores porcentajes, en las semanas tres y cuatro (3.13 ± 0.51 y 3.12 ± 0.29 , respectivamente). El contenido de grasa promedio fue de 3.40%, similar al reportado por Díaz *et al.* (2004b) (3.42%); pero inferior al reportado por Ayala–Oseguera y Armendáriz (2003) y Sanz *et al.* (2006), (4.25%). El porcentaje de grasa en la primera quincena fue el más alto (4.08%), y mayor al reportado por Díaz *et al.* (2004b) (3.43%); sin embargo, en la tercera quincena fue menor (3.22% *vs* 3.52%). El

menor contenido de grasa se obtuvo en la cuarta quincena (2.74 ± 0.81 %). Las diferencias en cuanto a los resultados puede deberse a la raza, principal factor determinante para el nivel de producción de leche (Pletcher y Jaffrézic, 2002) y su composición (Kala y Prakash, 1990), especialmente, para el contenido de grasa y proteína (Valencia *et al.*, 2005), debido al nivel de polimorfismo en los genes α_{S1} -caseína y α_{S2} -caseína (Marletta *et al.*, 2003; Moiola *et al.*, 2006).

Estimación de parámetros, comparación de modelos y curvas.

Producción láctea. Los parámetros estimados y curvas de producción para los diferentes modelos se muestran en el Cuadro 3.1 y en la Figura 3.1; respectivamente. En la Figura 3.1, se percibe una curva atípica; como reportan Tozer y Huffaker (1999), Gipson y Grossman (1989); y Faro y Albuquerque (1999), la función gamma incompleta sobrestima la producción al inicio de la lactancia.

De acuerdo con los criterios de ajuste considerados, el modelo que mejor ajustó (Cuadro 3.2), fue el difásico; diseñado para modelar múltiples picos (Weigel *et al.*, 1992), y al dividir la curva de lactancia en dos fases [fase 1 y fase 2 (Fig. 3.2)], proporciona mejor idea del manejo alimenticio para mantener la máxima producción por el mayor tiempo posible. Además, como mencionan Rekaya *et al.* (2001) y Faro y Albuquerque (2002), en caso de una curva atípica, la gamma incompleta no se ajusta a los datos. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Scott *et al.* (1996) y Sherchand *et al.* (1995), reconociendo al modelo difásico como el mejor simulador de la lactancia en comparación con modelos como: gamma incompleta, polinomio inverso, y monofásico; sin embargo, con base en los criterios de ajuste, no se coincide en que el modelo monofásico sea superior al gamma

incompleta, y que sea igual al difásico. Estos resultados confirman lo encontrado por Gipson y Grossman (1990), Macedo *et al.* (2001) y Gonçalves *et al.* (2002).

Cuadro 3.1. Parámetros estimados para la curva de producción de leche de cabras F₁ (Alpina x Nubia).

| Modelo | Parámetro | | | Probabilidad | | |
|-------------------------------|-----------|----------|----------|--------------|----------|----------|
| | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>C</i> |
| Monofásica ¹ | 165593.00 | 0.006 | 42.791 | <0.0001 | <0.0001 | 0.2963 |
| Difásica ² | | | | | | |
| Fase 1 | 4947.00 | 0.208 | 2.666 | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 |
| Fase 2 | 5628.00 | 0.192 | 12.683 | 0.0002 | <0.0001 | <0.0001 |
| Gamma incompleta ³ | 1033.45 | -0.074 | -0.017 | <0.0001 | 0.2037 | 0.1212 |

$$^1 Y_t = a_1 b_1 \left[1 - \tanh^2 \left(c_1 \left(t - \frac{1}{c_1} \right) \right) \right]; \quad ^2 Y_t = \sum_{i=1}^2 a_i b_i \left[1 - \tanh^2 \left(c_i \left(t - \frac{1}{c_i} \right) \right) \right]; \quad ^3 Y_t = a t^b e^{-ct}$$

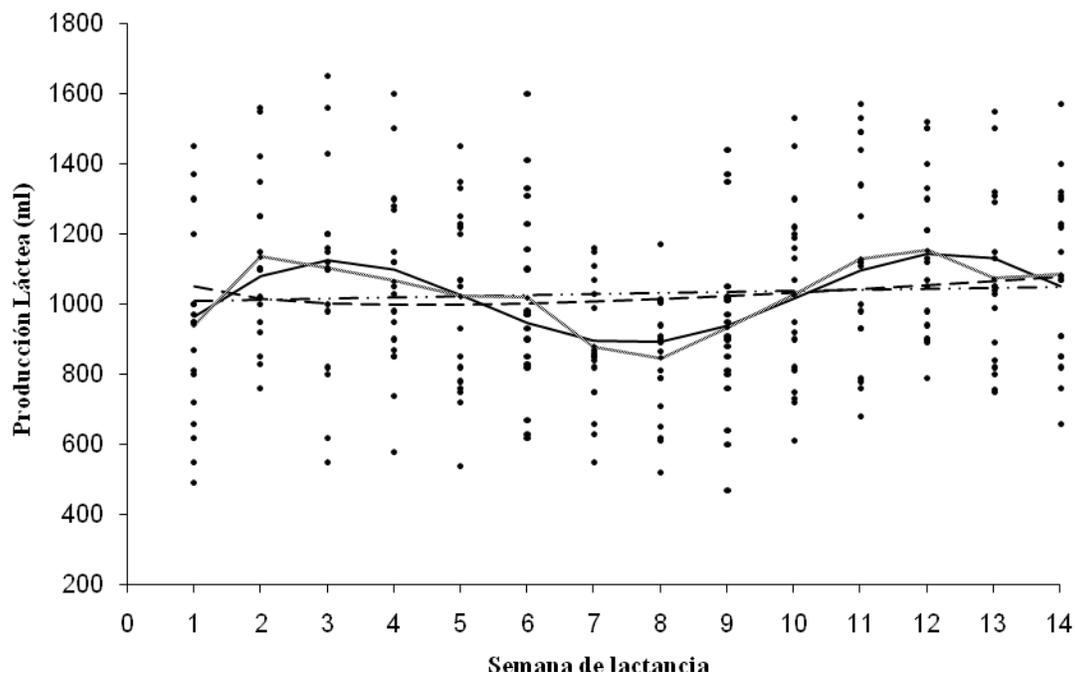


Figura 3.1. Producción de leche observada (•), promedio (.....) y predicha mediante las funciones difásica (—), monofásica (---) y gamma incompleta (-·-) para cabras F₁ (Alpina x Nubia).

Cuadro 3.2. Criterios de ajuste para la curva de producción de leche.

| Modelo | Criterio | | | | |
|-------------------------------|----------|-------------------------|--------|--------|-------------------|
| | CME | Pseudo - R ² | AIC | BIC | -2 Log likelihood |
| Monofásica ¹ | 12003.6 | 0.991 | 3529.1 | 3539.6 | 3523.1 |
| Difásica ² | 2241.6 | 0.998 | 3505.6 | 3526.8 | 3493.6 |
| Gamma incompleta ³ | 11579.9 | 0.991 | 3527.2 | 3537.8 | 3521.2 |

¹ $Y_t = a_i b_i \left[-\tanh^2 \left(\frac{t - c_i}{\sigma} \right) \right]$; ² $Y_t = \sum_{i=1}^2 a_i b_i \left[-\tanh^2 \left(\frac{t - c_i}{\sigma} \right) \right]$; ³ $Y_t = a t^b e^{-ct}$

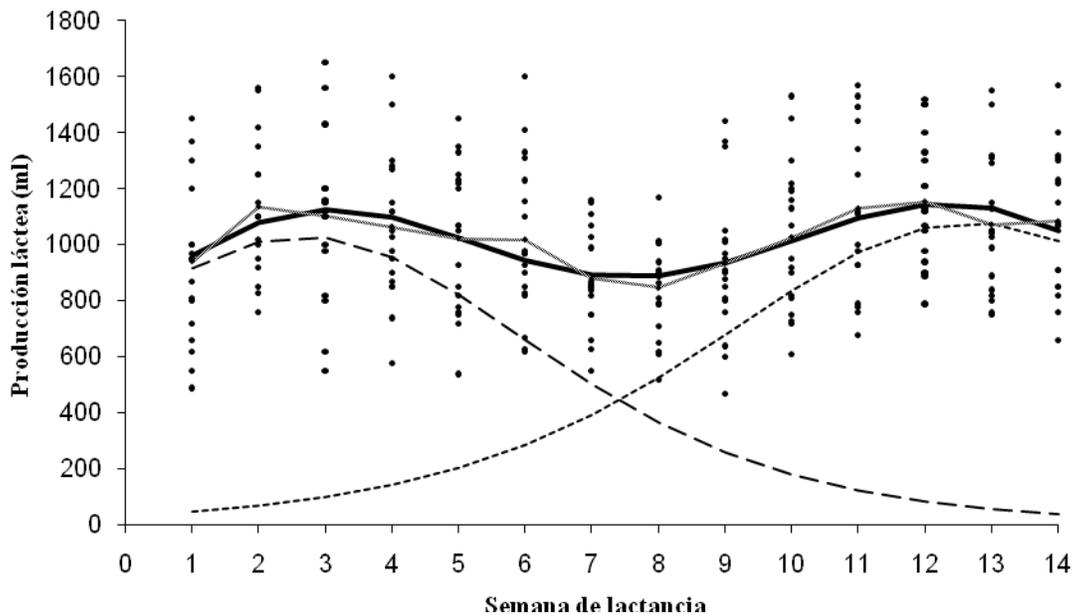


Figura 3.2. Producción láctea observada (•), promedio (.....) y predicha mediante la función difásica [general (—), fase 1 (— —) y fase 2 (- ·-)] para cabras F_1 (Alpina x Nubia).

Composición láctea. El modelo que mejor describió el contenido de sólidos totales, proteína y grasa en la leche, de acuerdo con los criterios de ajuste, fue el modelo gamma incompleta (Cuadro 3.3).

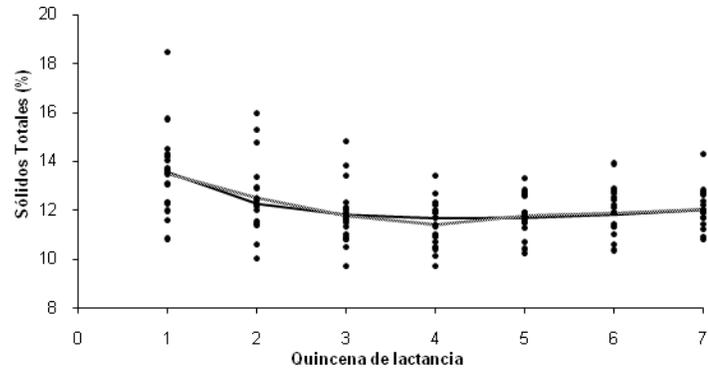
El contenido de sólidos totales al inicio de la lactancia fue alto y siguió una tendencia de caída durante el resto de la lactancia (Figura 3.3a), comportamiento que concuerda con lo reportado por Díaz *et al.* (2004b) y Greyling *et al.* (2004). El contenido de proteína, no muestra la tendencia típica descrita por Lennox *et al.* (1993) y Lombaard (2006); en la 1^a quincena se observó alto porcentaje, en la 2^a quincena desciende y alcanza el mínimo en la 3^a y 4^a quincena; en la 6^a quincena, nuevamente alto porcentaje; y contrario a la típica

tendencia, vuelve a descender en la 7ª quincena (Figura 3.3b). El contenido de grasa tuvo una tendencia típica (Figura 3.3c).

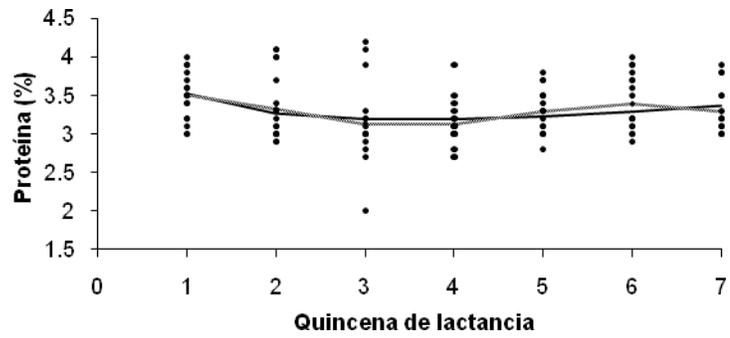
Cuadro 3.3. Criterios de ajuste para la curva de los componentes lácteos de cabras F₁ (Alpina x Nubia).

| Modelo | Criterio | | | | |
|-------------------------------|----------|-------------------------|-------|-------|-------------------|
| | CME | Pseudo – R ² | AIC | BIC | -2 Log likelihood |
| <i>Sólidos totales</i> | | | | | |
| Monofásica ¹ | 0.4101 | 0.986 | 426.3 | 434.8 | 420.3 |
| Difásica ² | 0.4101 | 0.998 | 445.6 | 462.6 | 433.6 |
| Gamma incompleta ³ | 0.0330 | 0.999 | 402.0 | 410.5 | 396.0 |
| <i>Proteína</i> | | | | | |
| Monofásica ¹ | 0.1484 | 0.848 | 121.1 | 129.6 | 115.1 |
| Difásica ² | 0.1484 | 0.848 | 111.8 | 128.8 | 99.8 |
| Gamma incompleta ³ | 0.1372 | 0.860 | 110.3 | 118.9 | 104.3 |
| <i>Grasa</i> | | | | | |
| Monofásica ¹ | 1.1153 | 0.886 | 394.0 | 402.5 | 388.0 |
| Difásica ² | 1.1152 | 0.886 | 399.5 | 416.5 | 387.5 |
| Gamma incompleta ³ | 1.0033 | 0.897 | 386.6 | 395.1 | 380.6 |

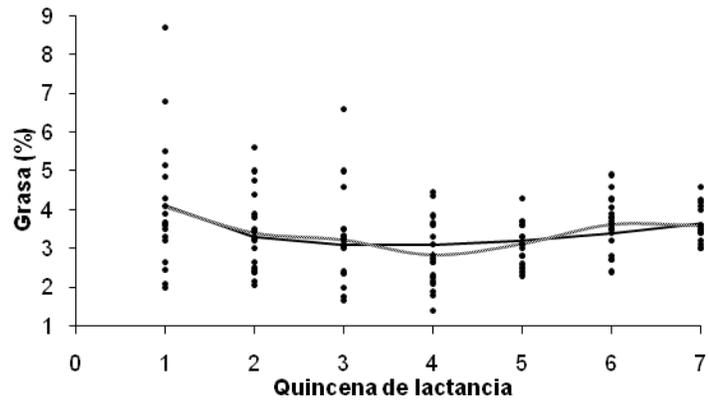
¹ $Y_t = a_j b_j \left[-\tanh^2 \left(\frac{t - c_j}{a_j} \right) \right]$; ² $Y_t = \sum_{j=1}^2 a_j b_j \left[-\tanh^2 \left(\frac{t - c_j}{a_j} \right) \right]$; ³ $Y_t = a t^b e^{-ct}$



(a)



(b)



(c)

Figura 3.3. Contenido observado (•), promedio (⋯) y predicho mediante la función gamma incompleta (—) de los componentes lácteos [sólidos totales (a), proteína (b) y grasa (c)].

El comportamiento desigual del contenido de proteína, pudo deberse a baja nutrición, factor modificador de la composición láctea (Min *et al.*, 2005); sin embargo, el contenido de sólidos totales y grasa no se vieron modificados por efecto de la nutrición.

Características de la lactancia

La producción láctea al pico fue de 1029.97 y 1080.57 ml para la primera y segunda fase; respectivamente. Presentándose esta máxima producción a los 27 y a los 127 días para la primera y segunda fase, respectivamente (Cuadro 3.4); valores inferiores a los encontrados por Gipson y Grossman (1989) (fase 1= día 37 y fase 2= día 113) y Montaldo *et al.* (1997) (día 56 de lactancia); pero similar al encontrado por Ruvuna *et al.* (1995) (día 28 de lactancia). Es necesario enfatizar que el genotipo aquí estudiado es una cruce Alpina x Nubia de segundo parto, y los valores varían debido a que, el genotipo (Gonçalves *et al.*, 2002) y el número de parto (Epaphras *et al.*, 2004; Miranda y Schnitkey, 1995), son factores que modifican la forma y características de la curva de lactancia. La duración de cada fase fue de 9.61 y 10.42 días (fase 1 y 2; respectivamente), y existe una considerable diferencia con los reportados por Gipson y Grossman (1989) (raza Nubia= 274 y 952 d; raza Alpina= 179 y 606 d para las fases 1 y 2; respectivamente). Esta disparidad puede deberse a que incluyeron lactancias de 305 días, lo cual no sucedió en el presente estudio.

Existen pocos reportes en la literatura con respecto a curvas de componentes de la leche para ganado caprino, por que solo se reportan los valores obtenidos mediante la función gamma incompleta. Para sólidos totales, la producción al pico fue de 11.67%, y ocurrió a los 30.10 días de la lactancia con persistencia de 16.37 días. La máxima producción de

proteína fue de 3.18% ocurriendo en el día 24.69 de la lactancia, esta máxima producción duró 16.98 días.

Cuadro 3.4. Características de la lactancia de cabras F₁ (Alpina x Nubia).

| Modelo | Característica | | |
|-------------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|
| | Producción al pico* (ml) | Tiempo al pico** (días) | Persistencia*** (días) |
| <i>Producción láctea</i> | | | |
| Difásica ¹ | | | |
| Fase 1 | 1029.97 | 27 | 9.61 |
| Fase 2 | 1080.57 | 127 | 10.42 |
| <i>Sólidos totales</i> | | | |
| Gamma incompleta ² | 11.67 | 30.10 | 16.37 |
| <i>Proteína</i> | | | |
| Gamma incompleta ² | 3.18 | 24.69 | 16.98 |
| <i>Grasa</i> | | | |
| Gamma incompleta ² | 3.08 | 24.38 | 5.95 |

$$^1 Y_i = \sum_{j=1}^2 a_j b_j \left[-\tanh^2 \left(\frac{t - c_j}{b_j} \right) \right] \left(a_j b_j, **c, ***2/b_j \right);$$

$$^2 Y_i = at^b e^{-ct} \left(a(c/c)^b e^{-b}, **b/c, *** \left[(c+1) \ln(c) \right] \right)$$

Para contenido de grasa, la producción al pico se observó al día 24.38 con 3.08% y una duración de 5.95 días (Cuadro 3.4). Estas predicciones para los componentes lácteos son

ligeramente inferiores a los reportados por Díaz *et al.* (2004) (3.42, 3.57 y 12.12% para grasa, proteína y sólidos totales; respectivamente) en animales del mismo genotipo.

Conclusiones

El modelo difásico es superior, en términos de menores valores de CME, AIC, BIC y $-2 \text{ Log likelihood}$, así como por el mayor valor de Pseudo $- R^2$; que la función gamma incompleta y que el modelo monofásico, por lo que la caracterización de la curva de lactancia de cabras F_1 (Alpina x Nubia) es mejor modelada por el modelo difásico, al resultar ser el más consistente en todos los criterios de ajuste considerados. El modelo difásico es útil en la descripción de lactancias atípicas como la aquí estudiada.

La función gamma incompleta resultó ser la que mejor describe el comportamiento del contenido de sólidos totales, proteína y grasa a través de la lactancia, en comparación con el modelo difásico y monofásico.

LITERATURA CITADA

- Aganga A., A., O. Amarteifio J. and N. Nkile. 2002. Effect of stage of lactation on nutrient composition of Tswana sheep and goat's milk. *J. of Food Composition and Analysis* 15 (5): 533-543.
- Aharoni, Y., A. Brosh and E. Ezra. 2000. Short communication: prepartum photoperiod effect on milk yield and composition in dairy cows. *J Dairy Sci.* 83 (12): 2779-2781.
- Akingbade, A., I. Nsahlai and C. Morris. 2004. Reproductive performance, colostrum and milk constituents of mimosine-adapted South African Nguni goats on *Leucaena leucocephala*-grass or natural pastures. *Small Rumin Res.* 52: 253-260.
- Ayala-Oseguera, J. y J. Armendáriz M. 2003. Uso de grasas y aminoácidos en la producción y composición de la leche de cabras. XVIII Reunión Nacional sobre Caprinocultura. AMPCA. pp. 224-248.
- Barash, H., N. Silanikove and J. I. Weller. 1996. Effect of season of birth on milk, fat, and protein production of Israeli Holsteins. *J Dairy Sci.* 79(6):1016-1020.
- Barba, C., J. De la Nuez, M. Fernández, J. Rodríguez y F. Pariacote. 2001. Estimación de la producción de leche en la Agrupación Caprina Canaria. Caso de una explotación modelo en régimen intensivo. *Zootecnia Tropical* 19 (3): 289-296.
- Basdagianni, Z., G. Banos, Z. Abas, G. Arsenos, E. Valergakis G., D. Zygoiannis. 2005. Estimation of daily and total lactation milk yield of Chios ewes from single morning or evening records. *Livest. Prod. Sci.* 92: 59-68.
- Boyazoglu, J., I. Hatziminaoglou and Morand-Fehr. 2005. The role of the goat in society: Past, present and perspectives for the future. *Small Rumin. Res.* 60: 13-23.

- Cappio-Borlino, A., B. Portolano, M. Todaro, P. Macciotta N., P. Giaccone and G. Pulina. 1997. Lactation curves of Valle del Belice dairy ewes for yields of milk, fat, and protein estimated with test day models. *J Dairy Sci.* 80 (11): 3023-3029.
- Champion, R., T. Lenard C., and M. Mills T. 1998. Demonstrating the Durbin-Watson Statistic. *The Statistician* 47 (4): 643-644.
- Chang Y., M, R. Rekaya, D. Gianola, and L. Thomas D. 2001. Genetic variation of lactation curves in dairy sheep: a Bayesian analysis of Wood's function. *Livest. Prod. Sci.* 71: 241-251.
- Chang Y., M., R. Rekaya, D. Gianola, and L. Thomas D. 2002. Genetic variation of lactation curves in dairy sheep: quadratic function versus Wood's model. *Livest. Prod. Sci.* 77: 147-153.
- Chilliard, Y. 1993. Dietary fat and adipose tissue metabolism in ruminants, pigs and rodents: A review. *J. Dairy Sci.* 76: 3897-3931.
- Chilliard, Y., C. Delouis, M. C. Smith, D. Sauvant D., and P. Morand-Fehr. 1986. Mammary metabolism in the goat during normal or hormonally-induced lactation. *Reprod. Nutr. Dev.* 26: 607-615.
- Chilliard, Y., A. Ferlay, J. Rouel, and G. Lamberet. 2003. A Review of Nutritional and Physiological Factors Affecting Goat Milk Lipid Synthesis and Lipolysis. *J. Dairy Sci.* 86: 1751-1770.
- Chilliard, Y., J. Rouel, and C. Leroux. 2006. Goat's alpha-s1 casein genotype influences its milk fatty acid composition and delta-9 desaturation ratios. *A. Feed Sci.* 131: 474-487.

- Chiofalo, B., L. Liotta, A. Zumbo and V. Chiofalo. 2004. Administration of olive cake for ewe feeding: effect on milk yield and composition. doi:10.1016/j.smallrumres.2003.12.011.
- Choumei, Y., K. Kahi A., and H. Hirooka. 2006. Fit of Wood's function to weekly records of milk yield, total digestible nutrient intake and body weight changes in early lactation of multiparous Holstein cows in Japan. *Livest. Sci.* 104: 156-164.
- Corcy, J. 1993. *La cabra*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. pp. 123-147.
- De Boer J., A., J. I. Weller, T. A. Gipson, and M. Grossman. 1989. Multiphasic analysis of milk and fat yield curves of Israeli Holsteins. *J. Dairy Sci.* 72: 2143-2152.
- Delacroix-Buchet, A., and G. Lamberet. 2000. Sensorial properties and typicality of goat dairy products. 7th Int. Conf. on Goats, Tours, France. 15-21 May 2000. Tome 2: 559-563.
- Dewhurst R., J., K. J. Shingfield, R. F. Lee, and N. D. Scollan. 2006. Increasing the concentrations of beneficial polyunsaturated fatty acids in milk produced by dairy cows in high-forage systems. *Anim Feed Sci and Tech* 131: 168-206.
- Díaz G., M. O., F. de J. Morón C., J. Urrutia M. y K. A. Martínez A. 2004 (a). Efecto de la suplementación alimenticia sobre algunos parámetros productivos en cabras. XIX Reunión Nacional sobre Caprinocultura. AMPCA. pp. 296-299.
- Díaz G., M. O., G. Torres H., M. A. Ochoa C., P. B. Mandeville y R. González G. 2004 (b). Efecto del sexo de la cría y la etapa de lactancia en los componentes de la leche de cabras F1 Alpino x Nubia. XIX Reunión Nacional sobre Caprinocultura. AMPCA. pp. 219-223.

- Dimassi, O., S. Neidhart, R. Carle, L. Mertz, G. Migliore, A. Mané-Bielfeldt, and Z. A. Valle. 2004. Cheese production potential of milk of Dahlem Cashmere goats from a rheological point of view. doi:10.1016/j.smallrumres.2004.05.003.
- Doyon, A., G. Tremblay, D. Cinq-Mars, Y. Chouinard. 2005. Influence de l'alimentation sur la composition du lait de chèvre : revue des travaux récents. Colloque sur la chèvre. CRAAQ. pp 1-23.
- Epaphras, A., E. D. Karimuribo, and S. N. Msellem. 2004. Effect of season and parity on lactation of crossbred Ayrshire cows reared under coastal tropical climate in Tanzania. *Livestock Research for Rural Development* 16 (6) *Art. #42. Tomado de:* <http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd16/6/epap16042.htm>.
- Faro L., E. e G. Albuquerque L. 1999. Comparação dos ajustes da curva de lactação de vacas Caracu de acordo com três funções matemáticas. In: XXXIII Reuniao Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia. pp. 15-17.
- Faro L., E. e G. Albuquerque L. 2002. Comparação de alguns modelos matemáticos para o ajuste às curvas de lactação individuais de vacas da raça Caracu. *Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.* 54 (3): S0102-S0109.
- Fekadu, B., K. Soryal, S. Zeng, D. Van Hekken, B. Bah, and M. Villaquiran. 2005. Changes in goat milk composition during lactation and their effect on yield and quality of hard and semi-hard cheeses. *Small Rumin Res* 59 (1): 55-63.
- Fernández, C., P. Sánchez-Seiquer, A. Sánchez, A. Contreras, and J. de la Fuente. 2004. Influence of betaine on milk yield and composition in primiparous lactating dairy goats. *Small Rumin. Res.* 52: 37-43.

- France, J., J. Dijkstra, and M. S. Dhanoa. 1996. Growth functions and their application in animal science. *Ann Zootech.* 45: 165-174.
- Franci, O., C. Pugliese, A. Acciaioli, G. Parisi, and M. Lucifero. 1999. Application of two models to the lactation curve of Massese ewes. *Small Rumin. Res.* 31: 91-96.
- Galina M., A. 2004. Variación de la calidad del queso en relación con el sistema de manejo en caprinos estabulación o pastoreo. XIX Reunión Nacional sobre Caprinocultura. AMPCA. pp. 377-382.
- Gallego, L., A. Torres y A. Caja. 1994. Ganado ovino. Raza Manchega. Ed. Mundi-Prensa. España. p. 161.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 2ª Ed. UNAM. México, D. F. 246 p.
- García S., C. and C. W. Holmes. 2001. Lactation curves of autumn- and spring-calved cows in pasture-based dairy systems. *Livest Prod Sci* 68: 189-203.
- Gipson T., A., R. L. Fernando, and M. Grossman. 1990. Effects of smoothing data on estimation of parameters for multiphasic lactation curves of dairy goats. *Livest. Prod. Sci.* 24: 205-221.
- Gipson T., A. and M. Grossman. 1989. Diphasic analysis of lactation curves in dairy goats. *J. Dairy Sci.* 72: 1035-1044.
- Gipson T., A. and M. Grossman. 1990. Lactation curves in dairy goats: a review. *Small Rum. Res.* 3: 383-396.
- Glass R., L., H. A. Troolin, and R. Jenness. 1967. Comparative biochemical studies of milks. IV. Constituent fatty acids of milk fats. *Comp. Biochem. Physiol.* 22: 415-425.

- Gonçalves T., M., I. Gomes A., R. Fonseca F., I. Garcia P. 2002. Curvas de lactação em rebanhos da raça Holandesa no Estado de Minas Gerais. Escolha do modelo de melhor ajuste. R. Bras. Zootec. 31 (4): 1689-1694.
- Greyling J., P. C., M. Mmbengwa V., M. J. Schwalbach L., and T. Muller. 2004. Comparative milk production potential of Indigenous and Boer goats under two feeding systems in South Africa. doi:10.1016/j.smallrumres.2003.11.014.
- Grossman, M. and W. J. Koops. 1988a. Multiphasic analysis of lactation curves in dairy cattle. J. Dairy Sci. 71: 1598.
- Grossman, M. and W. J. Koops. 1988b. Multiphasic analysis of growth curves in chickens. Poultry Sci. 67: 33-42.
- Grossman, M. and W. J. Koops. 2003. Modeling extended lactation curves of dairy cattle: A biological basis for the multiphasic approach. J. Dairy Sci. 86: 988-998.
- Guo, M., Y. Park, P. Dixon, J. Gilmore, and P. Kindstedt. 2003. Relationship between the yield of cheese (Chevre) and chemical composition of goat milk. Small Rumin. Res. 52: 103-107.
- Haenlein, G. 2004. Goat milk in human nutrition. Small Rumin. Res. 51: 155-163.
- Hatungumukama, G., D. I. Sidikou, P. Leroy, J. Detilleux. 2007. Effects of non-genetic and crossbreeding factors on daily milk yield of Ayrshire × (Sahiwal×Ankole) cows in Mahwa station (Burundi). Livest Sci 110: 111-117.
- Iaschi S., P. A., J. Hui, N. Chong F., A. Strange, M. Strange, R. Bencini, and G. K. Tay. 2003. Comparison of the milk quality of the South African Boer and Australian Rangeland goats. doi:10.1016/j.smallrumres.2003.09.005.
- INEGI. 2005. El sector alimentario en México. Serie de estadística sectorial Ed. 2005.

México. pp. 74-80.

Jaubert, G. 1997. Biochemical characteristics and quality of goat milk. 6th International Conference on Goats. CIEAM- Options Mediterranees. pp. 71-74.

Juneja V., K., M. Valenzuela M., L. Huang, V. Gumudavelli, J. Subbiah, H. Thippareddi. 2006. Modeling the effect of temperature on growth of Salmonella in chicken. doi:10.1016/j.fm.2006.08.004

Kala S., N. and B. Prakash. 1990. Genetic and phenotypic parameters of milk yield and milk composition in two Indian goat breeds. Small Rum. Res. 3: 475-484.

Kamidi R., E. 2005. A parametric measure of lactation persistency in dairy cattle. Livest Prod Sci 96: 141-148.

Kenkel J., L. 1976. Comment on the Small-Sample Power of Durbin's h-Test. J. of the Amer. Statistical Assoc. 71 (353): 96-97.

Keskin, I, A. Tozluca. 2004. Süt siğirlerinde laktasyon eğrilerinin farklı matematik modellerle belirlenmesi ve kontrol aralığının tespiti. S.Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi 18 (34): 11-19.

Khorasani G., R., P. H. Robinson, G. De Boer, and J. J. Kennelly. 1991. Influence of Canola Fat on Yield, Fat Percentage, Fatty Acid Profile, and Nitrogen Fractions in Holstein Milk. J Dairy Sci 74: 1904-1911.

Koops W., J. 1986. Multiphasic growth curve analysis. Growth 50: 169-177.

Koops W., J. and M. Grossman. 1991. Applications of a multiphasic growth function to body composition in pigs. J. Anim. Sci. 69: 3265-3273.

Lennox S., D., E. A. Goodall, and C. S. Mayne. 1992. A mathematical model of the lactation curve of the dairy cow to incorporate metabolizable energy intake. The

Statistician 41: 285-293.

Lennox S., D., E. A. Goodall, and C. S. Mayne. 1993. Mathematical Modelling of Milk Constituent Production. *The Statistician* 42: 249-260.

Lindsey J., K. 1974. Construction and comparison of statistical models. *J. of the Royal Statistical Society. Series B.* 36 (3): 418-425.

Lombaard C., S. 2006. Hierarchical bayesian modelling for the analysis of the lactation of dairy animals. Ph. D. Thesis. Faculty of Economic and Management Sciences, Department of Mathematical Statistics, University of the Free State Bloemfontein.

López B., B. 1995. Estimación de parámetros genéticos que caracterizan el modelo matemático que mejor explica la curva de lactación en vacas F1 Holstein – Cebú en zona subtropical. Tesis de Maestría. Universidad de Colima. Fac. de Medicina Veterinaria y Zootecnia. 60 p.

Macciotta N., P., C. Dimauro, G. Catillo, A. Coletta, A. Cappio-Borlino. 2006. Factors affecting individual lactation curve shape in Italian river buffaloes. *Livest. Sci.* 104: 33-37.

Macciotta N., P., P. Fresi, G. Usai, A. Cappio-Borlino. 2005. Lactation curves of Sarda breed goats estimated with test day models. *J Dairy Res.* 72(4): 470-475.

Macedo V., P., C. Damasceno J., T. dos Santos G., N. Martins E., F. A. Fonseca de M. 2001. Comportamento da curva de lactação de cabras mestiças Saanen em função da suplementação de concentrado e do sistema de produção. *Rev. Bras. Zootec.* 30 (6S): 2093-2098.

Mao I., L., K. Sloniewski, P. Madsen, J. Jensen. 2004. Changes in body condition score and in its genetic variation during lactation. *Livest Prod Sci* 89: 55-65.

- Marletta, D., S. Bordonaro, A. Guastella, P. Falagiani, N. Crimi, and G. D'Urso. 2003. Goat milk with different α_{S2} -casein content: análisis of allergenic potency by REAST-inhibition assay. *Small Rumin. Res.* 52 : 19-24.
- Masselin, S., D. Sauvant, P. Chapoutot, and D. Milan. 1987. Les modèles d'ajustement des courbes de lactation (Adjustment models for lactation curves). *Ann. Zootech.* 36: 171-206.
- Mellado, M., S. Rodríguez, R. López, A. Rodríguez y E. García J. 2004. Relación entre la producción y composición de la leche y el perfil sanguíneo de las cabras al inicio de lactancia en agostaderos. XIX Reunión Nacional sobre Caprinocultura. AMPCA. pp. 276-280.
- Min B., R., S. P. Hart, T. Sahlu, and L. D. Satter. 2005. The effect of diets on milk production and composition, and on lactation curves in pastured dairy goats. *J Dairy Sci.* 88 (7): 2604-2615.
- Minikhiem R., M. 2002. Ferum alpha tocopherol and immune function in yearling ewes supplemented with zinc and vitamin E. *J. Anim. Sci.* 80: 1329-1335.
- Miranda M., J. and G. D. Schnitkey. 1995. An Empirical Model of Asset Replacement in Dairy Production. *J. of Applied Econometrics. Special Issue: The Micro econometrics of Dynamic Decision Making.* 10: S41-S55.
- Moioli, B., M. D'Andrea, and F. Pilla. 2006. Candidate genes affecting sheep and goat milk quality. doi:10.1016/j.smallrumres.2006.09.008.
- Montaldo, H., A. Almanza, and A. Juárez. 1997. Genetic group, age and season effects on lactation curve shape in goats. *Small Rumin Res* 24: 195-202.
- Morand-Fehr, P. 2005. Recent developments in goat nutrition and application: A review.

Small Rumin. Res 60: 25-43.

Morand-Fehr, P., J. Boutonnet, C. Devendra, J. Dubeuf, G. Haenlein, P. Holst, L. Mowlem, and J. Capote. 2004. Strategy for goat farming in the 21st century. *Small Rumin. Res.* 51: 175-183.

Oishi, K., A. K. Kahi, Y. Nagura, M. Fujita, and H. Hirooka. 2007. Effect of culling age of does on milk and meat production in Japanese-Saanen goats. *Livest. Sci.* doi:10.1016/j.livsci.2007.05.003.

Olori V., E., S. Brotherstone, W. G. Hill and B. J. McGuirk. 1999. Fit of standard models of the lactation curve to weekly records of milk production of cows in a single herd. *Livest. Prod. Sci.* 58: 55-63.

Oravcová, M., E. Groeneveld, M. Kovač, D. Peškovičová, and M. Margetín. 2004. Estimation of genetic and environmental parameters of milk production traits in Slovak purebred sheep using test-day model. doi:10.1016/j.smallrumres.2004.03.002.

Osorio A., M. M. y J. C. Segura C. 2005. Factores que afectan la curva de lactancia de vacas *Bos taurus* x *Bos indicus* en un sistema de doble propósito en el trópico húmedo de Tabasco, México. *Tec. Pec.* 43 (1): 127-137.

Pedraza G., C., A. Mansilla M., E. Jahn B., A. Vidal V., P. Fajardo R. y H. Agüero E. 2002. Aplicación de un modelo múltiple de curva de lactancia para vacas lecheras. *Agric. Téc.* 62 (4): 509-518.

Peralta-Lailson, M., A. A. Trejo-González, P. Pedraza-Villagómez, J. M. Berruecos-Villalobos, and G. Vasquez C. 2005. Factors affecting milk yield and lactation curve fitting in the creole sheep of Chiapas-México. *Small Rumin Res* 58: 265-273.

- Pirlo, G., F. Miglior, and M. Speroni. 2000. Effect of age at first calving on production traits and on difference between milk yield returns and rearing costs in Italian Holsteins. *J Dairy Sci.* 83 (3): 603-608.
- Pletcher S., D. and F. Jaffrézic. 2002. Generalized character process models: Estimating the genetic basis of traits that cannot be observed and that change with age or environmental conditions. *Biometrics* 58 (1): 157-162.
- Pollott G., E. and E. Gootwine. 2000. Appropriate mathematical models for describing the complete lactation of dairy sheep. *J. Anim Sci.* 71:197-207.
- Pirisi, A., A. Lauret, and J. P. Dubeuf. 2006. Basic and incentive payments for goat and sheep milk in relation to quality. doi:10.1016/j.smallrumres. 2006.09.009
- Quinn, N., L. Killen, F. Buckley. 2006. Empirical algebraic modelling of live weight of Irish dairy cows over lactation. *Livest Sci.* 103: 141-147.
- Quiñones V., J. J., M. Valencia C., Y. Sánchez T., y R. Montañez. 1986. Variables que influyen sobre la producción de leche de caprinos en pastoreo de de malezas y esquilmos en la Comarca Lagunera. II Reunión Nacional sobre Caprinocultura. AMPCA. pp. 34-37.
- Ramírez V., R., J. G. Garcia-Muñiz, R. Nuñez D., A. Ruiz F., y M. R. Meraz A. 2004. Comparación de ecuaciones para estimar curvas de lactancia con diferentes estrategias de muestreo en bovinos Angus, Suizo y sus cruza. *Vet. Méx.* 35 (3): 187-201.
- Ray D., E., T. J. Halbach, and D. V. Armstrong. 1992. Season and lactation number effects on milk production and reproduction of dairy cattle in Arizona. *J Dairy Sci.* 75 (11): 2976-2983.

- Raynal-Ljutovac, K., Y. W. Park, F. Gaucheron, and S. Bouhallab S. 2007. Heat stability and enzymatic modifications of goat and sheep milk. *Small Rumin Res.* 68: 207-220.
- Rekaya, R., K. A. Weigel, D. Gianola. 2001. Hierarchical nonlinear model for persistency of milk yield in the first three lactations of Holsteins. *Livest. Prod. Sci.* 68: 181-187.
- Rekik, B., and A. G. Ben. 2004. Factors affecting the occurrence of atypical lactations for Holstein–Friesian cows. *Livest. Prod. Sci.* 87: 245-250.
- Roche J., R. 2003. Effect of pregnancy on milk production and bodyweight from identical twin study. *J Dairy Sci.* 86 (3): 777-783.
- Romero-Paredes, R. J. 2004. Programa de investigación e innovación tecnológica de la cadena alimentaria de carne y leche de caprinos. *Memorias XIX Reunión Nacional sobre Caprinocultura. AMPCA.* pp. 78-89.
- Ruiz, R., M. Oregui L., and M. Herrero. 2000. Comparison of Models for Describing the Lactation Curve of Latxa Sheep and an Analysis of Factors Affecting Milk Yield. *J Dairy Sci* 83: 2709-2719.
- Ruvuna, F., J. K. Kogi, J. F. Taylor, and S. M. Mkuu. 1995. Lactation curves among crosses of Galla and East African with Toggenburg and Anglo Nubian goats. *Small Rumin. Res.* 16: 1-6.
- Sahlu, T., S. P. Hart, T. Le-Trong, Z. Jia, L. Dawson, T. Gipson, and T. H. Teh. 1995. Influence of prepartum protein and energy concentrations for dairy goats during pregnancy and early lactation. *J Dairy Sci* 78: 378-387.
- Sanz S., M. R., Y. Chilliard, Ph. Schmidely, and J. Boza. 2006. Influence of type of diet on the fat constituents of goat and sheep milk. doi:10.1016/j.smallrumres. 2006.09.017.

- SAS User's Guide: Statistics. 2002. Institute Inc. Cary, NC, USA.
- Schabenberger, O. 2008. Nonlinear Regression in SAS. University of California, Los Angeles, SAS Library. http://www.ats.ucla.edu/stat/SAS/library/SASNLin_os.htm.
- Scott T., A., B. Yandell, L. Zepeda, R. D. Shaver, and T. R. Smith. 1996. Use of lactation curves for analysis of milk production data. *J. Dairy Sci.* 79: 1885-1894.
- Serrato C., J. S. y J. I. Sánchez D. 2004. Efecto de diferentes frecuencias de suplementación sobre el comportamiento de cabras gestantes en pastoreo. XIX Reunión Nacional sobre Caprinocultura. AMPCA. pp. 300-303.
- Sevi, A., M. Albenzio, R. Marino, A. Santillo, and A. Muscio. 2003. Effects of lambing season and stage of lactation on ewe milk quality. doi:10.1016/S0921-4488(03)00196-2.
- Sherchand, L., R. W. McNew, D. W. Kellogg, and Z. B. Johnson. 1995. Selection of a mathematical model to generate lactation curves using daily milk yields of Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 78: 2507-2513.
- Silvestre A., M., F. Petim-Batista, J. Colaco. 2005. Genetic parameter estimates of portuguese dairy cows for milk, fat, and protein using a spline test-day model. *J Dairy Sci.* 88(3): 1225-1230.
- Sölkner, J., and W. Fuchs. 1987. A comparison of different measures of persistency with special respects to variation of test-day milk yields. *Livest. Prod. Sci.* 16: 305-319.
- Soryal, K., S. Zeng, B. Min, and S. Hart. 2004. Effect of feeding treatments and lactation stages on composition and organoleptic quality of goat milk Domiati Cheese. *Small Rumin. Res.* 54: 121-129.

- Stanton T., L., R. W. Blake, R. L. Quaas, and L. D. Van Vleck. 1991. Genotype by environment interaction for Holstein milk yield in Colombia, Mexico, and Puerto Rico. *J Dairy Sci* 74:1700-1714.
- Sztankóová, Z., T. Kott, V. Czerneková, G. Dudková, V. Mátlová, and J. Soldát. 2006. A new allele specific polymerase chain reaction method (AS-PCR) for detection of the goat CSN1S1⁰¹ allele. *Small Rumin. Res.* 66: 282-285.
- Tekerli, M., Z. Akinci, I. Dogan, and A. Akcan. 2000. Factors Affecting the Shape of Lactation Curves of Holstein Cows from the Balikesir Province of Turkey. *J Dairy Sci* 83: 1381-1386.
- Togashi, K., and C. Y. Lin. 2007. Improvement of lactation milk and persistency using the eigenvectors of the genetic covariance matrix between lactation stages. *Livest. Sci.* 110: 64-72.
- Togashi, K., C. Y. Lin, Y. Atagi, K. Hagiya, J. Sato, T. Nakanishi. 2007. Genetic characteristics of Japanese Holstein cows based on multiple-lactation random regression test-day animal models. *Livest. Sci.* doi:10.1016/j.livsci.2007.04.023
- Tozer P., R., and R. G. Huffaker. 1999. Mathematical equations to describe lactation curves for Holstein-Friesian cows in New South Wales. *Aust. J. Agric. Res.* 50: 431-440.
- Valencia C., C. M. 2002. Desafíos del sistema extensivo de producción caprina. XVII Reunión Nacional sobre Caprinocultura. AMPCA. pp. 102-107.
- Valencia P., M., J. Dobler L., and H. Montaldo H. 2005. Genetic trends for milk yield in a flock of Saanen goats in Mexico. *Small Rumin. Res.* 57: 281-285.
- Vega y León, S., N. Pérez F., G. Díaz G., R. Gutiérrez T., M. González L., C. González C., H. Salas J., A. Ramírez A., B. Schettino, y G. Prado F. 2004a. Composición en

ácidos grasos de grasa láctea caprina procedente de cuatro unidades productoras ubicadas en el altiplano mexicano. XIX Reunión Nacional sobre Caprinocultura. AMPCA. pp. 423-426.

Vega y León, S., R. Gutiérrez T., M. González L., A. Ramírez A., C. González C., G. Díaz G., H. Esparza C., H. Alberti, G. Muñoz, y M. Rosado. 2004b. Efecto del origen y la raza en la composición de la leche de cabra producida en el altiplano mexicano. XIX Reunión Nacional sobre Caprinocultura. AMPCA. pp. 419-422.

Wang, Y., and Q. Liu. 2006. Comparison of Akaike information criterion (AIC) and Bayesian information criterion (BIC) in selection of stock–recruitment relationships. *Fisheries Research* 77: 220-225.

Wathes D., C. , Z. Cheng, N. Bourne, V. J. Taylor, M. P. Coffey, and S. Brotherstone. 2007. Differences between primiparous and multiparous dairy cows in the inter-relationships between metabolic traits, milk yield and body condition score in the periparturient period. *Domestic Anim Endocrinol* 33: 203-225.

Weigel K., A., B. A. Craig, T. R. Bidwell, and D. M. Bates. 1992. Comparison of alternative diphasic lactation curve models under bovine somatotropin administration. *J Dairy Sci* 75: 580-589.

Weppert, M., and J. Hayes. 2004. Direct genetic and maternal genetic influences on first lactation production in four breeds of dairy goats. *Small Rumin. Res.* 52: 173-178.