

## **Modelación de la curva de lactancia para los principales tipos raciales de cabras lecheras de Antioquia utilizando modelos no lineales**

**Y A Blandón<sup>1</sup>, K T Henao<sup>1</sup>, L G González Herrera<sup>2</sup>, H Cardona Cadavid,  
J D Corrales<sup>3</sup> y S J Calvo**

*Grupo de genética, mejoramiento y modelación animal - GaMMA, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Antioquia, Calle 70 N° 52 - 21, Medellín, Colombia.*  
[samirjulian@gmail.com](mailto:samirjulian@gmail.com)

<sup>1</sup> *Grupo de investigación en agronomía y zootecnia - GIAZ, Facultad de ciencias agropecuarias, Universidad Católica de Oriente, Sector 3 Cr 46 # 40B-50, Rionegro, Colombia.*

<sup>2</sup> *Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Grupo de Investigación en Biodiversidad y Genética Molecular*

<sup>3</sup> *Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de la Salle, Cr 7 172-85, Bogotá D.C. (Colombia)*

### **Resumen**

El objetivo de este estudio fue modelar la curva de lactancia para los principales tipos raciales de cabras lecheras en Antioquia, Colombia. Se utilizaron 4160 registros de leche pertenecientes al programa de control lechero realizado por la Universidad de Antioquia y ASOCABRA en 14 apriscos de Antioquia, entre los años 2007 y 2011; se incluyeron en los análisis hembras con componentes raciales Alpina, Saanen y Mestizas, y con más de tres controles lecheros tomados en intervalo de 210 días de lactación. Se compararon 10 modelos no lineales y los análisis fueron realizados utilizando la librería nls2 del programa estadístico R-Project (3.1.3).

Los mejores modelos fueron los que presentaron menores valores para los criterios de información AIC (criterio de información de Akaike) y BIC (criterio de información Bayesiana). El modelo de Nelder fue el que mejor ajustó los datos de las cabras Alpinas y Mestizas y el modelo Wood al igual que el de Dhanoa fueron los que mejor caracterizaron las curvas de lactancia del tipo racial Saanen; sin embargo, se eligió el modelo de Wood por ser más parsimonioso. Los modelos no lineales utilizados describen de forma eficiente el comportamiento de la curva de lactancia, encontrando diferencias marcadas entre las curvas de los diferentes componentes raciales de cabras lecheras de Antioquia-Colombia.

*Palabras clave: producción de leche, control lechero, modelos matemáticos, leche de cabra*

## **Modeling of the lactation curve for the main breed types of dairy goats using non-linear models**

### **Abstract**

The aim of this study was to model the lactation curve for the main breeds of goats in Antioquia, Colombia. A total of 4160 tests of milk records were used, belonging to the Milk Control Program, conducted by Universidad de Antioquia and ASOCABRA in 14 sheepfolds of Antioquia from 2007 to 2011. Females with racial components belonging to Alpina, Saanen and crossbred breeds and with four or more dairy tests during 210 intervals were used. Ten non-linear models were compared using the nls2 library of the statistical program R-Project (3.1.3). The best models were those with the lowest scores for the information criteria AIC (Akaike Information Criterion) and BIC (Bayesian Information Criterion). The Nelder model was the one that fitted the best with the data of the alpine and crossbred goats. The Wood and Dhanoa models characterized the best the lactation curves from the Saanen breed; however, the Wood model was chosen for being more parsimonious. The non-linear models used describe the behavior of the lactation curve efficiently, finding highlighted differences among the curves of different breed types of dairy goats in Antioquia-Colombia.

*Keywords: milk production, dairy test, mathematical models, dairy goats*

### **Introducción**

Gran parte de las poblaciones caprinas presentes en Colombia son descendientes de las cabras traídas al país en la época de la conquista, y aunque se dice que en Colombia existen razas introducidas como la Saanen, Alpina, Toggenburg, además de las consideradas como criollas o autóctonas, todavía no se tiene certeza de la diversidad, parentesco o pureza de los animales que conforman el inventario caprino del país (Ménendez-Buxade et al 2008; Cadena Productiva Ovino-caprina 2013).

Se estima que el inventario caprino mundial es de aproximadamente 808.903.601 animales, destinados a la producción de carne con 4.359.201 toneladas por año,

así como a la producción de leche con 14,8 millones de litros de leche por año (Castellano et al 2010; Cadena Productiva Ovino-caprina 2013). En América, la población de cabras se estima en 39 millones de cabezas, de las cuales, el 57 % se encuentran en Latinoamérica. En Colombia, la especie caprina registra 1.124.508 animales, población concentrada en el departamento de La Guajira donde se contabiliza el 80.31% de la población censada, seguido por Santander con 5.49%. El departamento de Antioquia registra 7.716 animales (FAO 2010; ICA 2016).

La mejor forma de caracterizar la producción de leche es por medio de la modelación de curvas de lactancia; además el conocimiento de la trayectoria de la lactancia es importante porque permite predecir, el pico de producción, el tiempo en alcanzar el pico de producción, la persistencia de la producción y el desempeño futuro de los animales (Yépez et al 2010). La curva de lactancia está caracterizada por una fase de ascenso y un periodo de producción máxima seguido por una fase de descenso continuo en la producción. Estos fenómenos fisiológicos son la consecuencia de la expresión genética y de la influencia ambiental a lo largo de la lactancia y pueden ser descritos por funciones matemáticas y modelos estadísticos específicos (Ochoa y Restrepo 1986; Quintero et al 2007; Gonzales-Peña et al 2012).

Los modelos más utilizados para caracterizar la curva de lactancia son los polinomiales y los modelos no lineales; entre los no lineales se encuentran, la función gamma incompleta propuesta por Wood, el modelo de Wiltmink, Papajcsik y Bordero, entre otros (Quintero et al 2007). Con respecto a lo anterior, se han realizado diferentes estudios donde se modela la curva de lactancia y los parámetros que la conforman en diferentes especies de interés zootécnico (Cardona et al 2015; Cañas et al 2011); los cuales han arrojado diferentes resultados de acuerdo a los modelos que mejor ajustan las producciones de leche en el día de control. En la actualidad estos estudios que utilizan modelos no lineales en los parámetros para hacer inferencias e interpretaciones biológicas se han incrementado notablemente (Meyer et al 2012).

En los centros de producción de leche de cabra no se utilizan parámetros productivos; como el pico de producción y la persistencia de la lactancia. El desconocimiento del comportamiento en la producción de leche a lo largo de la lactancia y la vida productiva de un animal genera implicaciones al momento de tomar decisiones en cuanto a la nutrición de la cabra en producción, la reproducción de las hembras caprinas y la vida productiva o longevidad de los animales en los apriscos; por esto las prácticas en el manejo reproductivo, nutricional, de mejoramiento genético y fenotípico de las cabras no son lo suficientemente rentables y sostenibles.

Para alcanzar la mayor eficiencia posible en la explotación, es de gran importancia conocer la trayectoria de la curva de lactancia; esto permite, por ejemplo; realizar ensayos nutricionales más eficientes, las diferencias en tratamientos son más fáciles de detectar cuando los animales son agrupados de acuerdo a la curva de lactancia esperada, por esto son necesarios los estudios que utilizan modelos no lineales en los parámetros para hacer interpretaciones biológicas (Quintero et al 2007; Yépez et al 2010; Cardona et al 2015).

Por lo anterior el objetivo de este estudio fue modelar la curva de lactancia para los principales tipos raciales de cabras lecheras en Antioquia, Colombia.

## Materiales y métodos

Para modelar la curva media de lactancia para los principales componentes raciales de cabras lecheras en Antioquia, Colombia, fueron utilizados 4160 controles lecheros, pertenecientes a 467 lactancias de cabras. Los registros de producción de leche fueron obtenidos del programa de control lechero oficial realizado por la Universidad de Antioquia y ASOCABRA en 14 apriscos de Antioquia, entre los años 2007 y 2011. Los datos se recolectaron según los protocolos recomendados por la ICAR (International Committee for Animal Recording). Fueron considerados los siguientes criterios para la incorporación de registros y su respectivo análisis: Cabras con más de tres controles en un intervalo de 210 días de lactancia, el primer control realizado antes de los 60 días de lactación, producción de leche mayor a 0,2 Kg y menor a 8,0 Kg. Al realizar la debida depuración de los datos, fueron seleccionados 8 apriscos pertenecientes al programa de control lechero oficial.

Para modelar la trayectoria de la curva de lactancia se utilizaron 10 modelos matemáticos (Tabla 1); y se calcularon el tiempo al pico de producción (TP), producción al pico (PP), y persistencia (PER).

**Tabla 1.** Modelos utilizados en el ajuste de la curva de lactancia de cabras lecheras de diferentes tipos raciales en el departamento de Antioquia, Colombia.

Modelo	Representación <sup>(1)</sup>	Autor
1	$Y = a + b t + c e^{-0.05t}$	Wilmink (1987)
2	$Y = a t^b e^{-ct}$	Wood (1967)
3	$Y = a t e^{-ct}$	Papajcsik & Boderó (1988)
4	$Y = a e^{bt} - a e^{-ct}$	Brody et al. (1924)
5	$Y = a - (bt) - a e^{-ct}$	Cobby & Le Du (1978)
6	$Y = a t^{bc} e^{-ct}$	Dhanao (1981)
7	$Y = a t^{be-ct}$	Cappio-Borlino et al. (1995)
8	$Y = a e^{bt-ct^2}$	Sikka (1950)
9	$Y = t / (a + bt + ct^2)$	Nelder (1966)
10	$Y = \text{Ln}(a) + b \text{Ln}(t) - ct$	Wood (1967) <sup>(1)</sup>

---

<sup>(1)</sup> Linealizado;  $Y$  = producción de leche;  $t$  = Días en lactancia;  $a$ ,  $b$  y  $c$  = parámetros del modelo.

Para la selección del modelo que mejor ajustaba los datos de producción de leche, se obtuvieron los criterios de información de Akaike (AIC) y el criterio de información Bayesiana (BIC) para cada uno de los modelos. Las fórmulas para obtener dichos criterios fueron:

$$AIC = -2\ln L + 2K \text{ (Akaike, 1974)}$$

$$BIC = -2\ln L + 2K \ln(N) \text{ (Schwarz, 1978)}$$

Donde  $K$  es el número de parámetros estimados,  $-2\ln L$  es el valor máximo de la función de verosimilitud y  $N$  es el tamaño de la muestra. Los modelos que mejor ajustaron los datos son los que presentaron los menores valores para los criterios de información AIC y BIC. Adicionalmente, para una mejor interpretación de la verosimilitud de un modelo, se utilizaron los valores de “Akaike ponderado =  $w_i(AIC)$ ” y de “BIC ponderado =  $w_i(BIC)$ ” que pueden ser interpretados como la probabilidad del modelo  $i$  sea el mejor modelo entre los modelos candidatos.

Donde

correspondiente a la diferencia entre el valor de AIC del  $i$ -ésimo modelo y el AIC del mejor modelo. De forma similar para  $\Delta_i(BIC)$  o  $BIC_i - \min BIC$ .

Una vez seleccionado el mejor modelo para cada carácter, se obtuvo la primera derivada de la función igualada a cero y se despejó el tiempo para obtener el tiempo al pico  $TP = \sqrt{a/c}$ ; posteriormente, se reemplazó en la fórmula inicial del modelo el  $TP$  y a partir de este se obtuvo la producción al pico (PP). La persistencia se calculó con la fórmula propuesta por Montaldo et al (1997):  $PER = 100$  (producción media/PP).

Los análisis se realizaron utilizando la librería nls2 del programa estadístico R-Project versión 3.1.0 (<http://www.r-project.org>).

## Resultados

Los 5 modelos que mejor ajustaron la producción de leche para cada tipo racial se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Valores para los parámetros (*a*, *b*, *c*), AIC y BIC para los modelos que mejor ajustaron la curva de producción de leche para los diferentes tipos raciales.

Modelos no lineales	Producción de leche			Criterios de comparación			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	AIC	BIC		
<b>Tipo racial Saanen</b>							
Wood (1967)	1,16	0,092	0,0046	2206,92	2226,24	0,375	0,375
Dhanoa (1981)	1,66	0,201	0,0046	2206,92	2226,24	0,375	0,375
Cappio-Borlino et al. (1995)	1,12	0,275	0,0138	2209,73	2229,05	0,092	0,092
Nelder (1966)	0,381	0,423	0,0021	2209,81	2229,14	0,088	0,088
Wilmink (1987)	2,19	-0,0057	-0,353	2210,28	2229,61	0,070	0,070
<b>Tipo racial Alpina</b>							
Nelder (1966)	0,05	0,4087	0,0017	2526,72	2547,08	0,495	0,495
Wood (1967)	2,32	-0,0111	0,0028	2528,93	2549,29	0,164	0,164
Dhanoa (1981)	2,32	-4,02	0,0028	2528,93	2549,29	0,164	0,164
Brody et al. (1924)	2,25	2,25	8,31	2529,24	2549,6	0,141	0,141
Wood (1967) <sup>(1)</sup>	0,025	-0,169	0,0038	2531,96	2552,32	0,036	0,036
<b>Tipo racial Mestiza</b>							
Nelder (1966)	0,103	0,564	0,001	3716,68	3738,8	0,311	0,311
Cappio-Borlino et al. (1995)	1,33	0,126	0,017	3717,79	3739,9	0,179	0,179
Wood (1967)	1,64	0,0206	0,0018	3717,82	3739,93	0,176	0,176
Dhanoa (1981)	1,64	0,118	0,0018	3717,82	3739,93	0,176	0,176
Brody et al. (1924)	1,73	0,00145	2,32	3718,04	3740,16	0,157	0,157

Basados en el menor valor de AIC, BIC,  $w_i$  (AIC) y  $w_i$  (BIC) los modelos de Wood (1967) y Dhanoa (1981) fueron los que mejor caracterizaron las curvas de lactancia del tipo racial Saanen, con una probabilidad de 37.5% cada uno. Sin embargo, en este estudio se considera como el mejor modelo el de Wood (1967) debido a que es más parsimonioso comparado con el de Dhanoa (1981). Para los tipos raciales de las cabras Alpinas y Mestizas, el modelo de Nelder (1966) fue el mejor con una probabilidad de 49.5% y 31.1%, respectivamente, al compararse los 5 mejores modelos. Como se puede observar en la Tabla 2, los valores de  $w_i$  (AIC) y  $w_i$  (BIC) fueron iguales para cada uno de los modelos.

El TP para el tipo racial Alpina se alcanzó a los 3,4 días de lactación, con un PP de 2,66 Kg y con la menor persistencia (63,1 %). Para el tipo racial Saanen el TP se alcanzó a los 20 días después del parto, con un PP de 1,95 Kg y una PER de 78,2 %. El tipo racial Mestizo alcanzó su TP a los 10 días de lactancia,

obteniendo los menores valores para PP de 1,71 kg. Este tipo racial tuvo el mayor porcentaje de PER en su máxima producción, con un valor de 87 % (Tabla 3).

**Tabla 3.** Valores promedio para el tiempo al pico, producción al pico, y persistencia para diferentes tipos raciales de cabras lecheras en Antioquia, Colombia.

<b>TIPO RACIAL</b>	<b>Tiempo al pico (Días)</b>	<b>Producción al pico (kg)</b>	<b>Promedio de producción (kg)</b>	<b>Persistencia (%)</b>
<b>ALPINA</b>	5,63	2,34	1,68	63,1
<b>SAANEN</b>	20	1,95	1,52	78,2
<b>MESTIZA</b>	10,02	1,71	1,49	87,3

Las curvas medias de lactancia por raza utilizando el mejor modelo seleccionado se muestra en la Figura 1.

**Figura 1.** Curvas de lactancia en cabras lecheras (Alpina, Mestiza y Saanen) del trópico utilizando los mejores modelos para cada raza.

## **Discusión**

En este estudio, el modelo propuesto por Nelder (1966) fue el mejor describió las curvas de leche de las cabras Alpinas y mestizas. Para el tipo racial Alpina estos resultados son congruentes con lo reportado en cabras Alpinas en Brasil (Guimarães et al 2006) y en Colombia (Cardona et al 2015). Para PL, el modelo Wood (1967) fue el que mejor caracterizó la curva de lactancia de las cabras Saanen. Sin embargo, otros autores como Nogera et al (2011) observaron una menor capacidad de ajuste de este modelo, en cuanto a su capacidad para describir las curvas de lactancia de cabras Saanen y Alpina. Según Rojo-Rubio et al (2016) y Cañas et al (2011), el modelo de Wood (1967) es el modelo matemático más comúnmente empleado en bovinos y cabras.

Para el tipo racial mestizo, Marín et al (2009) evaluaron los modelos matemáticos de Wood (1967), Brody (1924), Wiltmink (1987), y Papajcsik y Bordero (1988) en cabras de diferentes cruces; encontrado que el modelo que mejor ajustó las curvas de lactancia fue el de Papajcsik y Bordero con menores valores para los criterios AIC y BIC. Las diferencias entre estudios pueden explicarse a partir de las distintas condiciones agroecológicas y de manejo e inclusión de tipos raciales al caracterizar la curva de lactancia. Es posible que el tipo racial mestizo al obtener las producciones más bajas pueda ser compensado por una mayor persistencia, lo que aumentaría la vida productiva de los animales en los apriscos. Esto es importante, ya que dependiendo del método de estimación de curvas de lactancia por medio de modelos matemáticos, se dará la

validez de los resultados obtenidos en extensiones de lactancia (Quintero et al 2007).

## Conclusiones

- El modelo de Nelder fue el que mejor ajustó los datos de las cabras Alpinas y Mestizas y los modelos de Wood y Dhanoa (1981) fueron los que mejor caracterizaron las curvas de lactancia de las cabras Saanen; sin embargo, se recomienda el modelo de Wood por ser más parsimonioso.
- El tipo racial Mestizo tuvo un valor mayor de PER, comparado con el tipo racial Saanen y Alpina que alcanzaron el mayor PP. Es importante conocer la curva de lactancia y los factores que la afectan, para realizar la selección de los mejores animales.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al grupo GECCO-GAMMA de la Universidad de Antioquia, ASOCABRA, al Comité para el desarrollo de la investigación de la Universidad de Antioquia-CODI (Estrategia para la Sostenibilidad 2016 grupo de Investigación GAMMA) y al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural como entidades financiadoras de esta investigación.

## Referencias

- Cardona S J C, Álvarez J D C, Sarmento J L R, Herrera L G G y Cadavid H C 2015** Associação de SNPs nos genes para  $\kappa$ -caseína e  $\beta$ -lactoglobulina com curvas de lactação em cabras leiteiras. Pesquisa Agropecuária Brasileira 50: 224-232. <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/19952/12888>
- Cañas A, Cerón-Muñoz M y Corrales A 2011** Modelación de curvas de lactancia para producción de leche, grasa y proteína en bovinos Holstein en Antioquia. Revista MVZ Córdoba 16:2514-2520. <http://revistas.unicordoba.edu.co/revistamvz/mvz-162/V16N2A9.pdf>
- Guimarães V P, Rodrigues M T, Sarmento J L R y Rocha D D 2006** Utilização de funções matemáticas no estudo da curva de lactação em caprinos. Revista Brasileira de Zootecnia 35: 535-543. <http://www.scielo.br/pdf/rbz/v35n2/a28v35n2.pdf>
- Marín P A, Agudelo D A, Restrepo L F, Cañas J J y Cerón-Muñoz M F 2009** Curvas de lactancia en cabras mestizas usando modelos matemáticos no lineales. Revista Lasallista de Investigación 6: 43-49. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1794-44492009000100006](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-44492009000100006)
- Mendez-Buxadera A, Romero F, Gonzales O, Arrebola F y Molina A 2008** Estimación de parámetros genéticos para la producción de leche y sus componentes de la raza caprina Papoya mediante la técnica de



regresión aleatoria. Información Técnica Económica Agraria 104: 127-132. <http://citarea.cita-aragon.es/citarea/handle/10532/1263>

**Montaldo H, Almanza A y Juárez A 1997** Genetic group, age and season effects on lactation curve shape in goats. Small Ruminant Research 24:195-202. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921448896009467>

**Nelder J 1966** Inverse polynomials a useful group of multi-factor response functions. Biometrics 22:128–141.

**Noguera R R, Ortiz D R y Marin L S 2011** Comparación de modelos matemáticos para describir curvas de lactancia en cabras Sannen y Alpina. Livestock Research for Rural Development 23:9 <http://www.lrrd.org/lrrd23/9/nogu23196.htm>

**Papajcsik I A y Bodero J 1988** Modelling lactation curves of Friesian cows in a subtropical climate. Animal Production 47:201–207.

**Quintero J C, Serna J I, Hurtado N A y Cerón M F 2007** Modelos matemáticos para curvas de lactancia en ganado lechero. Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias.20,2 <https://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/rccp/article/view/324132/20781315>

**Quintero J C, Serna J I, Cerón M F, Hurtado N A y Agudelo D A 2008** Estimación de la curva de lactancia mediante modelos matemáticos lineales y no lineales en búfalas colombianas. Revista Lasallista de Investigación 5:34-44. <http://www.scielo.org.co/pdf/rlsi/v5n1/v5n1a06.pdf>

**R statistical software 2015** using an attribution like (C) R Foundation. <http://www.rproject.org>.

**Rojo Rubio R, Kholif A, Salem A, Mendoza G, Elghandour M, Armijo Vasquez J y Lee-Rangel H 2016** Lactation curves and body wight changes of Alpine, Saanen and Anglo-Nubian goats as well as pre-weaning growth of their kids. Journal of Applied Animal Research 44(1):331-337

**Torres V, Barbosa L, Meyer R, Noda A y Sarduy L 2012** Criterios de bondad de ajuste en la selección de modelos no lineales en la descripción de comportamientos biológicos. Revista Cubana de Ciencia Agrícola 46 (4). <http://www.redalyc.org/pdf/1930/193027579001.pdf>

**Wilmink J B M 1987** Comparison of different methods of predicting 305-day milk yield using means calculated from within-herd lactation curves. Livestock Production Science 17:1-17

**Wood P D P 1967** Algebraic model of the lactation curve in cattle. Nature 216:164-165. <http://www.nature.com/nature/journal/v216/n5111/abs/216164a0.html>

**Yepes H, Rúa C V, Idárraga Y, Arboleda E, Calvo S J, Montoya A, Cardona Cadavid H y Cerón Muñoz M 2011** Estimación de las curvas de lactancia y producción de leche de cabras del departamento de Antioquia, usando controles lecheros quincenales y mensuales. Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia 52: 30-35. <http://revistas.ces.edu.co/index.php/mvz/article/view/1425/2280>