

Capítulo XXII

Uso de las curvas de lactancia como herramienta para el manejo y mejoramiento de la producción de leche

Decio González-Villalobos
Armando Quintero-Moreno

En las regiones tropicales, la interacción *Bos taurus*-*Bos indicus* dentro de los sistemas de producción doble propósito juega un papel muy importante en el desarrollo socio-económico, y por lo tanto, estos animales y sus cruces, son los que contribuyen con una significativa porción de la producción de leche y carne en estas regiones. Debido a su diversidad genética, estos animales mestizos escapan a los patrones establecidos para las razas originarias, resultando imposible realizar selección y mejoramiento basándose en modelos de razas puras (García-Muñiz *et al.*, 2008). Se hace necesario entonces crear bases de datos de parámetros productivos, tanto en crecimiento como en producción de leche, con las cuales puedan construirse patrones de comparación para este ganado mestizo que permita a los investigadores y ganaderos un fundamento para obtener animales mestizos de máxima producción de carne y leche.

Una de las herramientas empleadas para generar este tipo de patrones es la denominada “curva de lactancia”, que consiste en una representación gráfica de la producción de leche de las vacas en función del tiempo, que se construye mediante funciones algebraicas de complejidad variable y que muestra la tendencia de la producción de leche a medida que transcurre la lactancia de las vacas hasta el secado. Estas funciones algebraicas se vienen desarrollando desde finales del siglo XIX (Gaines, 1926) y han obtenido una cuantiosa atención con el transcurso de los años dentro del campo de la bioestadística (Grossman *et al.*, 1986). Existen numerosas experiencias en el trópico americano tratando de identificar las curvas de lactancia en animales puros y mestizos (Ossa *et al.*, 1997; Faro & Albuquerque, 2002; Oliveira *et al.*, 2007; Quintero *et al.*, 2007; García-Muñiz, 2008; Freitas *et al.*, 2010), sin embargo, aunque en Venezuela han habido intentos para caracterizar las lactancias de los animales doble propósito, son escasos los reportes en diseño de curvas de lactancia (Bodisco & Carnevali, 1970; Colmenares & Cermeño, 1997; Vaccaro *et al.*, 1999). En este Capítulo se describirá todo lo relacionado con la utilidad de las curvas de lactación dentro de los sistemas de doble propósito tropicales desde el punto de vista del manejo y el mejoramiento genético.

FUNDAMENTOS DE LA CURVA DE LACTANCIA

La producción de leche durante la lactancia es el resultado de los procesos de síntesis y secreción de compuestos orgánicos e inorgánicos y de la filtración pasiva y activa de sangre por parte de células especializadas en la glándula mamaria (Akers, 2002). Al final de la gestación se inicia una fase de rápida activación celular que se continúa después del parto con una prolongada fase de síntesis que se combina con la regresión celular progresiva hasta que culmina con la lactancia en el momento del secado (Hurley, 1989). Todos estos mecanismos fisiológicos dan como resultado un típico patrón de secreción de leche durante toda la lactancia que está caracterizada por una fase de incremento progresivo de la producción que alcanza un máximo (pico de lactancia) a partir del cual se inicia una declinación de la producción de velocidad variable que culmina con el secado (Figura 1; Macciotta *et al.*, 2008).

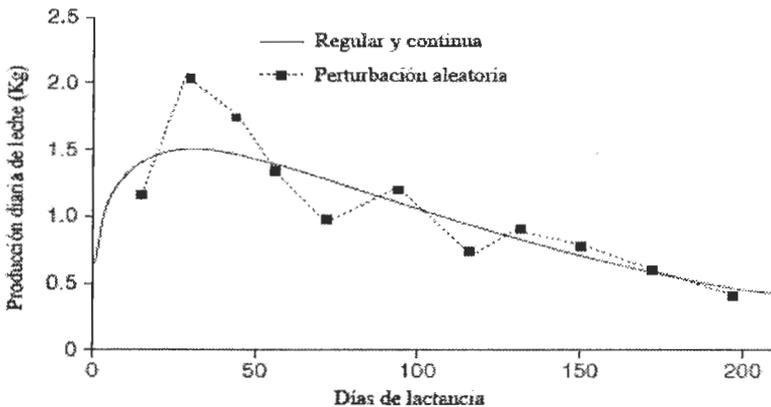


Figura 1. Componentes de la curva de lactación: patrón regular y continuo, y perturbación aleatoria. Modificado de Macciotta *et al.*, 2008.

En la Figura 1, también pueden discriminarse dos patrones de curvas de lactancia: la primera, que es regular y continua, corresponde a la expresión pura y aislada de los mecanismos fisiológicos que fundamentan la producción de leche, mientras que en la segunda, representada por una línea quebrada que se desvía del patrón regular, resulta de la sumatoria de la expresión de los mecanismos fisiológicos con el efecto de diferentes factores de variación ambiental, tales como, el estado nutricional y sanitario ó cambios climáticos (Macciotta *et al.*, 2008). Se puede afirmar entonces que la expresión de los mecanismos de producción de leche se ve afectada por diversos factores que limitan esta expresión; es posible mediante modelos matemáticos sortear esta variabilidad y construir patrones que permitan una más justa comparación y evaluación. El conocimiento sobre el comportamiento de la producción de leche durante la lactancia y no solo de la producción total a determinados días, representa un gran apoyo para los investigadores y productores de ganadería de doble propósito en función de las decisiones de mejoramiento y manejo.

Desde este punto de vista, el ajuste matemático que predice el comportamiento de la curva de lactación de las vacas a partir de datos recopilados de la propia finca, de la región, o de un mestizaje específico, ofrece varios beneficios: a) poder estimar la producción de leche de un animal en función de unas pocas mediciones al inicio de su lactancia, de esta manera identificar precozmente los animales de alta producción y poder calcular sus requerimientos nutricionales o hacer comparaciones con el objetivo de hacer selección; b) de la misma manera, se pueden identificar los animales que deben ser descartados debido a su baja productividad desde el inicio de su lactancia, c) permite identificar animales cuya producción es anormalmente baja lo que nos indicaría algún trastorno grave de la síntesis de la leche, como es el caso de alguna enfermedad incipiente, y d) permite calcular un ingreso bruto que se obtendrá de un animal o lote de animales (Gipson & Grossman, 1989).

CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS DE LACTANCIA

Una de las aplicaciones más importantes de los modelos matemáticos en el campo de la producción animal desde principios del siglo XX, es la descripción de la evolución temporal de la producción de leche en los rumiantes domésticos (Gaines, 1926; Grossman, *et al.*, 1986). El avance más importante en idear una ecuación algebraica para ajustar la producción de leche la realizó Wood (1967), quien describió una curva basada en una transformación logarítmica de una ecuación matemática de números complejos (Cuadro 1). En la actualidad, pueden encontrarse en la literatura numerosas ecuaciones creadas para ajustar la curva de lactancia, las cuales pueden ser clasificadas según sus parámetros en: funciones lineales, intrínsecamente lineales y no lineales. Las funciones lineales son las que se utilizan actualmente, ya que las regresiones lineales con que se calculan tienen una interpretación biológica y estadística más fácil, sin embargo, la función de Wood es la más usada con mayor frecuencia en la literatura y corresponde al tipo no lineal (función gamma incompleta) (Faro & Albuquerque, 2002).

Cuadro 1

**Ecuaciones matemáticas que se utilizan para ajustar las curvas de lactación.
Tomado de Macciotta *et al.*, 2008.**

Nombre de la ecuación	Diseño de la ecuación
Nelder (1966)	$y(t) = (t/a) + bt + ct^2$
Wood (1967)	$y(t) = at^b e^{-ct}$
Cobby & Le Du (1978)	$y(t) = a - bt - ae^{-ct}$
Dhanoa (1981)	$y(t) = at^{bc} e^{-ct}$
Wilmink (1987)	$y(t) = a + be^{-kt} + ct$
Morant & Gnanasakthy (1989)	$y(t) = ae^{[b(1+1/2)t] + 1} + c(t')^2 - (1.01/t)$
Cappio-Borlino (1995)	$y(t) = at^{bc(-ct)}$

y = producción diaria de leche medida en un momento determinado; t = días en lactancia; t' = (t - 150)/100; a, b, c, k = coeficientes de la función.

La materia prima para la construcción de la curva de lactancia son los registros de producción de leche diarios de la unidad de producción, registros lecheros de asociaciones de ganaderos ó de programas lecheros de organismos oficiales, por lo cual, para lograr un adecuado análisis de las curvas de lactancia se debe partir de hecho de tener un sistema de registros confiable y duradero de donde obtener una data pertinente. También pueden emplearse datos sobre composición de la leche, tales como concentración de grasa o proteína y contejo de células somáticas. Una de las complicaciones que se presenta al diseñar ecuaciones que describan la curva de lactancia lo constituye la propia forma de la curva. La tendencia más común es utilizar ecuaciones en función del tiempo que se puedan ajustar a modelar medidas tomadas sobre el mismo animal en diferentes momentos, lo que corresponde a un caso de modelo de medidas repetidas (Macciotta *et al.*, 2008).

Independientemente de la ecuación que se emplee, los rasgos básicos que se consideran para diseñar la curva de lactancia son: a) días desde el parto hasta que ocurre el pico de lactancia, b) producción de leche durante el pico de lactancia, c) tasa de descenso progresivo de la producción diaria después del pico, la cual mide la habilidad del animal de mantener relativamente constante la producción durante la lactancia y que al calcularle el inverso resulta lo que comúnmente se conoce como persistencia, y d) estimar la posible producción total de leche en esa lactancia, la cual puede ser calculada por el área bajo la curva de lactancia (Grossman & Koops, 2003; Macciotta *et al.*, 2008). La mayoría de las ecuaciones del Cuadro 1, están conformadas por parámetros individuales representados por letras, que tienen significados específicos en términos de la forma de la curva de lactancia.

En el caso de la popular ecuación de Wood (1967), el parámetro denominado con la letra “a” es un factor de escala que regula el nivel general de la curva, el parámetro “b” controla la curvatura de la función, y “c” regula la disminución gradual de la producción de leche diaria después del pico de lactación. Esta ecuación no solo sirve para describir la curva característica de las vacas de acuerdo a una raza o a otra condición específica, sino que, a partir de los parámetros calculados en la ecuación se pueden a su vez calcular las características básicas que se desprenden del área ocupada por la curva de lactación nombradas anteriormente: días de lactancia en que se alcanza el pico de producción (t_m), producción de leche en el momento del pico de producción (y_m) y la persistencia de la lactación (p) (Macciotta *et al.*, 2008):

$$t_m = -\frac{b}{c}; y_m = \frac{a}{\left(\frac{c}{b}\right)^b e^b}; p = -(b+1)\ln c$$

En el Cuadro 2, puede observarse el cálculo para t_m , y_m y p , para vacas lecheras mestizas de doble propósito.

Cuadro 2

Coefficientes calculados mediante la ecuación de Wood en vacas mestizas de doble propósito distribuidas según el número de partos. Tomado de Ossa *et al.*, 1997.

Categoría	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>t_m</i>	<i>y_m</i>	<i>P</i>
Primer parto	3,439	0,0777	0,0121	64	4,4 Kg	7,234
Segundo parto	3,696	0,1429	0,0031	46	5,5 Kg	6,599
Tres o más partos	4,449	0,0768	0,0020	38	5,5 Kg	6,855

a, *b*, *c* = parámetros de la función; *t_m* = días de lactancia al pico de producción; *y_m* = producción de leche diaria al pico de producción; *p* = persistencia.

ANÁLISIS DE LA CURVA DE LACTANCIA

A partir de aquí es importante considerar que gracias a la construcción de las curvas de lactancia, es posible evidenciar que el periodo de producción de leche no transcurre idénticamente en todas las vacas, es decir, que producciones totales equivalentes por lactancia pueden haberse obtenido con diferentes formas de curvas de lactancia, y esta forma puede mostrar como la vaca ejecuta los mecanismos fisiológicos que representa la producción de leche (Grossman *et al.*, 1986). Los coeficientes de las ecuaciones matemáticas expresan la forma de la curva de lactancia, que como se dijo anteriormente, consiste en una elevación inicial o pico y una disminución gradual que obedece a una determinada tasa de descenso. Esta forma posee un efecto sobre la producción de leche global y sobre los parámetros económicos, y como probablemente están controlados genéticamente puede existir una base para la selección de formas de curvas más deseables.

Existen diferentes opiniones sobre cuál debería ser la forma de la curva más adecuada, sin embargo, no debe dejarse de tomar en cuenta que eso también dependerá del peso específico de los factores que afectan la curva de lactancia, los cuales se describirán posteriormente. En rebaños donde no ha habido selección en función de la forma de la curva de lactancia, es posible encontrar una gran variabilidad en las formas, la cual puede ser explicada bien sea por diferencias biológicas entre las vacas, como por la interacción entre la estructura de la data analizada y las propiedades matemáticas del modelo utilizado (Olori *et al.*, 1999, Landete-Castillejos & Gallego, 2000).

Al hacer una interpretación más detallada de la forma de la curva de lactancia deben considerarse los coeficientes que expresan el comportamiento del pico de lactancia, es decir lo que se refiere su inicio, el nivel máximo y la duración del pico. El momento en que ocurre el pico de lactancia es altamente variable (Macciotta *et al.*, 2008). En vacas lecheras tiene un rango de ocurrencia de 30 a 70 días posparto y estas diferencias mayormente se deben a la variabilidad racial, por ejemplo, las vacas altas productoras de leche tardan más en alcanzar el pico de producción que las vacas de más baja producción (Foley *et al.*, 1972; Chase, 2005). Madalena *et al.* (1979) revisaron trabajos dentro de las regiones tropicales, observando que se han descrito formas de curvas de lactación con tendencias lineales, es decir, con ausencia completa de picos o con picos muy discretos, y esto es así para rebaños de razas puras europeas, nativas o mestizos criados en estas zonas. Macciotta *et al.* (2008) atribuye este tipo de curvas "atípicas" a un pico que ocurre muy cercano al parto, y por lo tanto no puede ser reco-

nocido por la función matemática utilizada. La producción de leche durante el pico de lactancia puede reflejar diferencias en potencialidad de producción de leche. Es importante destacar que el nivel máximo que se alcanza al pico de lactancia y su duración puede afectar el grado de estrés durante el inicio de la lactación, ya que las vacas lecheras con un pico de lactancia más alto y de mayor duración tienen una incidencia mayor de desórdenes metabólicos y reproductivos (Tekerli *et al.*, 2000).

El coeficiente que expresa la disminución progresiva de la producción de leche después del pico de producción o persistencia es otro aspecto importante de considerar. La altura del pico de lactancia contribuye a la determinación del nivel de persistencia ya que existe una fuerte tendencia de que las vacas que alcanzan un pico de lactancia muy alto tengan una menor persistencia. La persistencia es más sensible de ser afectado por otros factores diferentes a la genética del animal. Durante estadios tempranos de la lactancia, el estímulo para la producción de leche puede sobrepasar las deficiencias ambientales o de manejo (ej. desnutrición) pero a medida que progresa la lactancia cualquier adversidad reduce la producción de leche con una mayor extensión que al principio de la lactancia. Una vaca con una tasa baja de disminución de leche durante la lactancia normalmente es referida como más persistente (Lin & Togashi, 2005). Una producción de leche estable, con un pico moderado y una alta persistencia, es decir poca diferencia entre el pico y el secado, permite presupuestar consistentemente el flujo de recursos necesarios para la producción de leche (ej. la alimentación), se es más eficiente en el uso de estos recursos, el desgaste metabólico es mucho menor, hay mayor resistencia a enfermedades y por lo tanto, acarrea mayores beneficios económicos para el productor y mayor rentabilidad (Grossman & Koops, 2003; Lin & Togashi, 2005; Oliveira *et al.*, 2007; Freitas *et al.*, 2010).

Se ha reconocido que parte de la variabilidad entre los coeficientes de la curva se explican por un componente genético. Por ejemplo, se ha observado que las diferencias que existen en la forma entre las curvas de lactación es mayor entre vacas que entre lactancias de la misma vaca, también se ha podido detectar correlaciones entre consanguíneos en la forma de la curva de lactancia y que hay diferencias en la forma de la curva de lactancia entre diferentes razas (Grossman *et al.*, 1986). Más aún, los modelos que construyen las curvas de lactancia pueden predecir coeficientes de regresión que representan el valor genético de cada animal en función del tiempo, diferenciándose de aquellos modelos que lo calculan en un momento determinado, por lo que, los valores genéticos estimados en función de la forma de la curva, permite hacer selección hacia animales más persistentes y por lo tanto genotipos más rentables para el productor (Oliveira *et al.*, 2007; Freitas *et al.*, 2010).

FACTORES QUE AFECTAN LA CURVA DE LACTANCIA

Los efectos no genéticos que afectan la curva de lactancia han representado un reto para los matemáticos, pues existen factores que están presentes durante toda la lactancia, pero muchos de estos factores, como son la variación en la alimentación, condiciones de clima o estado sanitario, sólo afectan parte del periodo de lactancia (Macciotta *et al.*, 2008). Sin embargo, es posible discriminar claramente algunos efectos que explican parte de la variabilidad entre las curvas de lactancia entre animales y dentro del mismo animal. El número de partos afecta notablemente la expresión de la

curva. Se ha demostrado que en vacas primerizas se encuentran los picos más bajos y con una aparición más tardía (Tekerli *et al.*, 2000; Chase, 2005). Se ha medido también el efecto de la gestación siguiente y se ha observado que las vacas que conciben temprano tienen menor producción y persistencia (Tekerli *et al.*, 2000). También se ha evidenciado que las vacas que tardan más en alcanzar el pico de lactancia posteriormente tienen una mayor persistencia (Tekerli *et al.*, 2000). El uso de hormonas también puede afectar la curva de lactación. Se ha observado que el uso de somatotropina bovina (bST), cambia el valor de persistencia de las vacas, haciendo lactancias más estables (Palacios-Espinoza *et al.*, 2010).

CONCLUSIONES

El uso de animales de razas adaptadas a las condiciones de clima y de manejo en sistemas de producción de doble propósito puede propiciar una reducción masiva de costos de producción y un aumento de la rentabilidad. Los mecanismos de selección basados en la producción total no permiten definir en forma precisa los grupos contemporáneos ni los efectos ambientales que actúan sobre cada uno. La forma de la curva de lactancia provee información valiosa sobre la eficiencia biológica y económica del animal o del rebaño, y permite incrementar la producción de leche mejorando la persistencia, en vez de incrementar el pico de lactancia posparto que representa un mayor estrés para la vaca precisamente en el momento en que tiene que concebir. Actualmente la modificación genética de la forma de la curva de lactancia, para obtener beneficios económicos, es uno de los mayores retos de los genetistas y profesionales interesados en el mejoramiento de los parámetros de producción de leche.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adediran SA, Malau-Aduli AE, Roche JR, Donaghy DJ. 2007. Using lactation curves as a tool for breeding, nutrition and health management decisions in pasture-based dairy systems. In: Bill Fulkerson (Editor). Current Topics in Dairy Production, Proc Dairy Research Foundation Symposium, The University of Sydney, Australia, 12: 74-78.
- Akers RM. 2002. Lactation and the mammary gland. Iowa State Press, Iowa U.S.A. 278 p.
- Bodisco V, Carnevali A. 1970. Nota: Estimación de Rendimientos de Vacas Lecheras en Base a Controles Periódicos de Producción. Agron Trop 20 (6):463-469.
- Chase LE. 2005. Milk yield differences. In: Pond WG, Bell AW. (eds). Encyclopedia of animal science. Marcel Dekker, New York, U.S.A. 632-634.
- Colmenares O, Cermeño H. 1997. Análisis Preliminar de Curvas de Lactancia en el Búfalo de Agua (*Bubalus bubalis*) en la Zona Sur del Estado Táchira, Venezuela. Arch Latinoam Prod Anim 5 (Supl. 1): 417-419.
- Faro LE, Albuquerque LG. 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): 295-302.
- Foley RC, Bath DL, Dickinson FN, Tucker HA. 1972. Dairy Cattle: Principles, Practices, Problems, Profits. Lea & Febiger, PHI, U.S.A. 693 p.
- Freitas LS, Silva MA, Verneque RS, Valente BD, Corrêa GS, Ferreira RF, Peixoto MG, Santos GG. 2010. Avaliação da persistência na lactação da raça Guzerá, utilizando modelos de regressão aleatória. Arq Bras Med Vet Zootec, 62 (2): 401-408.

- Gaines WL. 1926. Interpretation of the Lactation Curve. *J Gen Physiol* 10 (1): 27-31.
- García-Muñiz JG, Martínez-González, Núñez-Domínguez R, Ramírez-Valverde R, López-Ordaz R, Ruiz-Flores A. 2008. Comparación de Ecuaciones para Ajustar Curvas de Lactancia en Bovinos. *Revista Científica FCV-LUZ XVIII* (2): 160 – 169.
- Gipson TA, Grossman, M. 1989. Diphasic analysis of lactation curves in dairy goats. *J Dairy Sci* 72: 1035–1044.
- Grossman M, Kuck AL, Norton HW. 1986. Lactation Curves of Purebred and Crossbred Dairy Cattle. *J Dairy Sci* 69:195-203.
- Grossman M, Koops WC. 2003. Modeling Extended Lactation Curves of Dairy Cattle: A Biological Basis for the Multiphasic Approach. *J Dairy Sci* 86: 988–998.
- Hurley WL. 1989. Mammary gland function during involution. *J Dairy Sci* 72: 1637–1646.
- Landete-Castillejos T, Gallego L. 2000. Technical note: the ability of mathematical models to describe the shape of lactation curves. *J Anim Sci* 78: 3010–3013.
- Lin C, Togashi YK. 2005. Maximization of Lactation Milk Production Without Decreasing Persistency. *J Dairy Sci* 88: 2975–2980.
- Macciotta NPP, Dimauro C, Steri R, Cappio-Borlino A. 2008. Mathematical Modelling of Goat Lactation Curves. In: Cannas A, Pulina G (eds.). *Dairy Goats Feeding And Nutrition*. CAB International, Oxfordshire, UK. 31-46.
- Madalena FE Martinez, ML, Freitas AF. 1979. Lactation curves of Holsteins-Friesian and Holsteins-Friesian X Gir cows. *Anim Prod* 29: 101-107.
- Oliveira HT, Reis RB, Glória JR, Quirino CR, Pereira JC. 2007. Curvas de lactação de vacas F1 Holandês-Gir ajustadas pela função gama incompleta. *Arq Bras Med Vet Zootec* 59 (1): 233-238.
- Olori VE, Brotherstone S, Hill WG McGuirk BJ. 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.
- Ossa G, Torregroza L, Alvarado L. 1997. Determinación de la curva de lactancia en vacas mestizas de un hato de doble propósito en la región Caribe de Colombia. *Revista CorpoICA* 2 (1): 54-57.
- Palacios-Espinosa A, Espinoza-Villavicencio JL, de Luna R, Guillén L, Avila NY. 2010. Extension model of lactation curves to evaluate the effect of the recombinant bovine somatotropin on milk yield in Holstein cows. *Arq Bras Med Vet Zootec* 62 (1): 124-129.
- Pollott GE. 2000. A Biological Approach to Lactation Curve Analysis for Milk Yield. *J Dairy Sci* 83: 2448–2458.
- Quintero JC, Serna J, Hurtado NA, Rosero R, Cerón-Muñoz MF. 2007. Modelos matemáticos para curvas de lactancia en ganado lechero. *Rev Colom Cienc Pec* 20 (2): 149-156.
- Roche JR, Berry DP, Kolver ES. 2006. Holstein-Friesian Strain and Feed Effects on Milk Production Body Weight, and Body Condition Score Profiles in Grazing Dairy Cows. *J Dairy Sci* 89: 3532–3543.
- Tekerli M, Akinci Z, Dogan I, Akcan A. 2000. Factors Affecting the Shape of Lactation Curves of Holstein Cows from the Balikesir Province of Turkey. *J Dairy Sci* 83: 1381–1386.
- Vaccaro BL, Velázquez E, Pérez A, Mejías H. 1999. Lactation length in Venezuelan dual-purpose cows. *J Anim Breed Genet* 116: 509–517.
- Wood PD. 1967. Algebraic model of the lactation curve in cattle. *Nature* 216: 164–165.