

# CARACTERIZACIÓN Y MODELACIÓN DE LA CURVA DE LACTANCIA DE VACAS HOLSTEIN COMPLEMENTADAS CON NOPAL (*Opuntia ficus-indica*) DURANTE LA ÉPOCA SECA

## Characterization and Modeling Lactation Curve of Holstein Cows Supplemented With Cactus (*Opuntia ficus-indica*) During the Dry Season

Roberto Alejandro García-Guzmán<sup>1</sup>, Rafael María Román-Bravo<sup>2</sup>, Daniel Val-Arreola<sup>1</sup>, Rosa Elena Pérez-Sánchez<sup>3\*</sup> y Ruy Ortiz-Rodríguez<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales-Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Km 9,5 Carretera Morelia-Zinapécuaro. Tarímbaro Michoacán, México; <sup>2</sup>Facultad de Ciencias Veterinarias. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela; <sup>3</sup>Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez"-UMSNH. Paseo Lázaro Cárdenas esquina Berlín. S/N Col. Viveros. Uruapan Michoacán, México; <sup>4</sup>Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia-UMSNH. Km 9,5 Carretera Morelia-Zinapécuaro. Tarímbaro Michoacán, México. \*rosa\_elenap@yahoo.com

### RESUMEN

Se analizó la producción láctea (PL) de vacas Holstein (n=16) de un sistema de producción ubicado en Uruapan, Michoacán, México. El monitoreo de PL/vaca fue de 12 meses. Se formaron dos grupos: Grupo 1 (n=8), éste recibió una dieta convencional -sin alterar la forma implementada en el sistema; Grupo 2 (n=8), alimentado durante la época de lluvias al igual que el Grupo 1, pero en la época seca (ES) la dieta se complementó con *Opuntia ficus-indica*, 12 kgd<sup>1</sup>/vaca. La PL/vaca se midió cada siete días (d). La modelación de la curva de lactación (CL) por grupo se realizó con el modelo de Ali y Schaeffer y se comparó con el modelo de regresión cuadrático. Para caracterizar la CL se utilizó el enfoque de la teoría general de sistemas. Los estimadores de la regresión determinaron que la CL del Grupo 2 se sobre estima, mientras que la CL ajustada a 305 d determinó que, el Grupo 2 se diferenció del Grupo 1 en el inicio, máximo y final de la lactación. El incremento de PL del Grupo 2 fue entre los d 50 al 135 de lactación (9,635 a 11,100 L, respectivamente). Esto sugiere que, la complementación con nopal en la dieta de vacas durante la ES mejora la PL, reflejándose en la CL, por lo que, la introducción de nopal como parte de las dietas de los bovinos productores de leche durante la ES, en las zonas rurales del país es una alternativa para incrementar la PL, a pesar de la naturaleza aleatoria de la mayor parte de los factores del contexto de estos sistemas.

**Palabras clave:** Bovinos, producción láctea, curva de lactación, *Opuntia ficus-indica*.

### ABSTRACT

Milk yield (MY) of Holstein cows (n=16) from a production system located in Uruapan, Michoacán State, Mexico was analyzed. Monitoring of MY/cow was for a period of twelve months. There were two groups of cows each: Group 1, which was fed a conventional diet, without changing the management practices implemented for the production system; Group 2, was fed the same as the Group 1 during the rainy season, but, in the dry season (DS), it was added to the diet cactus (*Opuntia ficus-indica*); 12 kg d<sup>1</sup>/cow. MY/cow was measured every 7 days (d). In order to model the lactation curve (LC) in each group, the regression model proposed by Ali and Schaeffer was used, which was compared to a quadratic model. In order to characterize the LC, the general system theory approach was used. Regression estimates showed that LC for the Group 2 was over estimated, whereas the adjusted LC at 305 d showed that it was different from the Group 1, at start, maximum, and end of the lactation. MY increased for the Group 2 was between 50 to 135 d of lactation (9,635 to 11,100 L, respectively). This suggest that adding cactus to the diet of milking cows during the dry season improves MY, showing its effects on the LC. Therefore, the introduction of cactus as part of the diets of the milk cattle during the DS, in the rural areas of the country is an alternative to increase the MY spite of the random nature of most of the factor of the context of these systems.

**Key words:** Bovine, milk yield, lactation curve, *Opuntia ficus-indica*.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas fundamentales que impiden el desarrollo de la industria ganadera en las zonas rurales de México es la escasez de forraje de calidad. Esta escasez está determinada por la cantidad y duración de la precipitación pluvial en las diferentes regiones agroecológicas del país, acentuándose en zonas con época seca (ES) prolongada [13]. Por otro lado, se ha determinado que la ES y su consecuente insuficiencia de forraje –tanto de cantidad como de calidad- no solo incide en el comportamiento productivo de los hatos explotados en dichas zonas, sino que además, éstas condiciones agroecológicas han provocado la utilización de forrajes autóctonos en la alimentación del ganado; tal es el caso del nopal (*Opuntia* spp), debido a su capacidad de adaptación a condiciones adversas de humedad y características nutritivas [5, 23].

La *Opuntia ficus-indica* se caracteriza por presentar una elevada concentración de carbohidratos no estructurales y calcio, digestibilidad *in situ* de 68% a las 48 horas, 47% de fibra detergente neutra (FDN) y 16% de fibra detergente ácida (FDA) [13]. Además, las investigaciones referentes a la utilización del nopal en la dieta de vacas (*Bos taurus*) productoras de leche sugieren la posibilidad de que esta planta incrementa la producción láctea (PL) [12, 19]. Pérez y col. [19] determinaron que, la PL se incrementó de 7,084 a 10,864 L d<sup>-1</sup> en vacas cuya dieta fue complementada con nopal. Así mismo, la investigación sugiere que la complementación del nopal en la alimentación del ganado es una alternativa, no solo para incrementar la PL en ES, sino que mejora la calidad de la misma [17].

Por otra parte se ha establecido que, la modelación de la curva de lactancia (CL) en vacas es la herramienta que permite determinar: el comportamiento fisiológico de la lactación, el potencial productivo del hato y valorar las estrategias de alimentación en función de cada etapa propia de la CL [10]. Ante estos elementos, el enfoque sistémico permite establecer que, el resultado final de todo sistema (cuantitativo o cualitativo) es producto de las interacciones entre los componentes del propio sistema [11]. Así, la PL puede evaluarse a través del resultado de la interacción entre los componentes vaca-alimentación. Por ello, el objetivo de esta investigación fue modelar y caracterizar la CL de vacas Hols-

tein, alimentadas con una dieta complementada con nopal durante la ES. Sin embargo, dentro del componente vaca se encuentra el subsistema rumen y para el caso particular de este trabajo, el control de los eventos biológicos dentro del rumen no se llevó a cabo. Por lo tanto, la CL 305 días (d) de vacas alimentadas con una dieta complementada con nopal durante la ES fue caracterizada bajo un enfoque documental, tomando en cuenta la información fisiológica sobre la interacción entre las bacterias del rumen y las dietas complementadas con *Opuntia ficus-indica*.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en el Rancho Experimental de la Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez" de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. El sistema de producción de bovinos productores de leche perteneciente a la Facultad de Agrobiología se ubica en la zona rural de Uruapan, Michoacán, México. Esta zona cuenta con climas cálido sub-húmedo, semi-cálido y templado húmedo, con temperaturas de 18,8 –23,4°C y una precipitación pluvial anual de 1622 mm [19, 22]. El sistema de producción poseía un inventario de 20 vacas Holstein en producción, mismas que tenían registro de número de lactancia y PL semanal. El hato se mantuvo bajo confinamiento total durante la mayor parte del año, puesto que en época de lluvias, el ganado pastorea en las praderas nativas -pasto Ballico (*Lolium perenne*)- cercanas al establo. De las 20 vacas se seleccionaron al azar 16 animales, con un peso vivo (PV) promedio de 400,275 ± 50,796 kg, con los cuales se formaron dos grupos: Grupo 1 (n=8), cuyo número promedio de lactancias fue de 2,9 ± 1,5; con un promedio de d de lactación de 158,5 ± 69,3 y el Grupo 2 (n=8), con un número promedio de lactancias de 3,3 ± 1,6 y un promedio d de lactación de 161,8 ± 86,4.

El Grupo 1 recibió una dieta convencional -sin alterar la forma implementada en el sistema- durante las dos épocas del año (TABLAS I y II): en la época de lluvias (junio-septiembre) la dieta se basó en pastoreo (pasto nativo) y suplementación con concentrado para vacas en lactación; 5,52 kg d<sup>-1</sup>/vaca. En la ES (octubre-mayo), la alimentación se basó en rastrojo de maíz (*Zea mays*); al 3% del PV de la vaca y suplementado con concentrado para vacas en lactación (5,52 kg d<sup>-1</sup>/vaca).

TABLA I  
DIETA OFRECIDA A LAS VACAS HOLSTEIN DURANTE LA EPOCA LLUVIOSA (JUN-SEP)

| Ingrediente                            | MS (kg)           | MS (%) | Fresco (kg) |
|--|-------------------|--------|-------------|
| Salvado                                | 2,6               | 89     | 2,92        |
| Harina de pluma                        | 1,3               | 93     | 1,40        |
| Melaza                                 | 0,9               | 75     | 1,20        |
| Pasto nativo ( <i>Lolium perenne</i> ) | <i>ad libitum</i> |        |             |
| Total kg d <sup>-1</sup>               | 4,8*              |        | 5,52        |

\*Equivalente al 18% de proteína cruda.

**TABLA II**  
**DIETA OFRECIDA A LAS VACAS HOLSTEIN DURANTE LA EPOCA SECA (OCT-MAY)**

| Ingrediente                          | MS (kg) | MS (%) | Fresco (kg) |
|--------------------------------------|---------|--------|-------------|
| Salvado                              | 2,6     | 89     | 2,92        |
| Harina de pluma                      | 1,3     | 93     | 1,40        |
| Melaza                               | 0,9     | 75     | 1,20        |
| Rastrojo de maíz ( <i>Zea mays</i> ) | 5,0     | 85     |             |
| Total kg d <sup>-1</sup>             | 9,8*    |        | 22,76       |

\*Equivalente al 18% de proteína cruda.

**TABLA III**  
**DIETA SUPLEMENTADA CON NOPAL OFRECIDA A LAS VACAS HOLSTEIN DURANTE LA EPOCA SECA (OCT-MAY)**

| Ingrediente                           | MS (kg) | MS (%) | Fresco (kg) |
|---------------------------------------|---------|--------|-------------|
| Salvado                               | 2,6     | 89     | 2,92        |
| Harina de pluma                       | 1,3     | 93     | 1,40        |
| Melaza                                | 0,9     | 75     | 1,20        |
| Rastrojo de maíz ( <i>Zea mays</i> )  | 3,23    | 85     | 11,14       |
| Nopal ( <i>Opuntia ficus-indica</i> ) | 1,77    | 14,9   | 11,90       |
| Total kg d <sup>-1</sup>              | 9,8*    |        | 28,56       |

\*Equivalente al 18% de proteína cruda.

El Grupo 2 fue alimentado durante la época de lluvias al igual que el Grupo 1, pero en el último tercio de la ES (80 d) a la dieta de cada vaca se le incluyó 12 kg d<sup>-1</sup> de *Opuntia ficus-indica* (TABLA III). La complementación del nopal durante el último tercio de la ES se realizó en base a las observaciones en campo, las mismas que determinaron que la parte crítica para la alimentación del ganado se presenta en el último tercio de la ES, debido a que los recursos de la cosecha (principalmente granos) se han agotado y en consecuencia se intensifica el uso de rastrojo de maíz y el sobre pastoreo.

Se midió la PL/vaca cada siete d en ambos grupos. La información recabada (PL por grupo y vaca) fue obtenida entre los años 2010-2011, periodo en el cual se analizaron la ES y de lluvias. Con la información se modeló la CL a través de dos modelos: a) El modelo polinomial,  $\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 * t + \beta_2 * t^2$ : donde t= d de producción, y b) El modelo de regresión múltiple propuesto por Ali y Schaeffer [1]:

$$y(t) = a + b \cdot \frac{t}{305} - c \cdot \left(\frac{t}{305}\right)^2 + e \cdot \ln \frac{305}{t} - i \left(\ln \frac{305}{t}\right)^2$$

Donde:

y (t)= producción de leche.

T= d correspondiente al pesaje.

a, b= parámetros a estimar como es el ascenso (fase inicial (a), y ascendente (b) de la lactación).

c= punto de máxima producción láctea y su estabilidad.

e, i= fase decreciente (e) y finalización (i) de la lactación.

ln= logaritmo natural.

Estas ecuaciones fueron estimadas con la versión 9,0 del Sistema para Análisis Estadístico SAS [25].

En relación a la caracterización, se utilizó un enfoque de la teoría general de sistemas partiendo de lo señalado por Molina y col. [15], quienes considerando modelos de organización: el primero toma un enfoque “suave” de *caja negra*, en donde se obtienen los factores que pueden condicionar el funcionamiento del sistema y su efecto en PL. En el segundo modelo, se consideró un enfoque con mayor formalidad utilizando la integración de la información recabada considerando; i) homogeneidad interna con respecto a una propiedad del sistema; ii) interdependencia relativa de los componentes del sistema; iii) disciplinas afines como base para descomponer el sistema y iv) división de los sistemas en función de la evaluación a través de una hipótesis previamente establecida [8, 27]. Además, la “modelación” esquemática y/o matemática posibilita desarrollar una representación del sistema con cierto grado de precisión, pero sin pretender una réplica exacta de la realidad [27].

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Bajo el contexto de los sistemas de producción de leche en la zona rural de Uruapan, Michoacán, México -específicamente durante el último tercio de la ES-, la complementación de la dieta de bovinos productores de leche con *Opuntia ficus-indica* (12 kg d<sup>-1</sup>/vaca) mejoró la PL (P <0,01) en el Grupo 2 (9,168 ± 1,919 L d<sup>-1</sup>), ello en comparación con la PL proveniente del Grupo 1

(8,308 ± 1,855 L d<sup>-1</sup>), El mismo que no recibió complementación de nopal en la dieta durante la ES (FIG. 1).

La teoría general de sistemas establece que, la conceptualización del sistema mediante el esquema de *caja negra* (FIG. 1) permite la visualización (aunque no de manera directa) de las principales interrelaciones entre los componentes del sistema que, para fines de este estudio fueron: contexto, animal, complementación de la dieta con nopal y PL. Pero haciendo énfasis en la entrada (nopal) y salida del sistema (PL) [15]. Sin embargo, se evidenció que, los mecanismos del sistema ruminal de las vacas Holstein al interactuar con la dieta complementada con nopal implicó el análisis de un sistema de mayor complejidad y bajo la óptica del análisis de los sistemas complejos, la conceptualización de “caja negra” dificulta predecir el comportamiento de las interacción [11] que, para el caso concreto del presente trabajo fue vaca:nopal:PL. Es por ello que se reformuló la FIG. 1 con la finalidad de constituir una esquematización más cercana a la realidad, utilizando para ello la complejidad del sistema-dieta complementada con nopal:rumen:PL- como base en la explicación del fenómeno analizado (FIG. 2).

La reformulación de la FIG. 1 permitió observar que, el contexto de la ES se caracteriza no solo por poseer temperaturas más altas (37,6°C) -que en otras regiones de Michoacán, México (23,4°C)- sino que además, es más prolongada [15, 22]. Bajo este contexto, la complementación con 12 kg d<sup>-1</sup> de nopal (Grupo 2) permitió una mejora en la PL (P <0,01) debido a que el nopal es rico en carbohidratos no estructurales (61,79%) [2, 26]; lo que hace que esta planta suministre un mayor aporte de energía si se compara con el rastrojo de maíz *Zea mays* (2,25 vs 1,69 Mcal/kg, respectivamente) [19]. Además, con el consumo de nopal se incrementa la salivación -d-

urante el proceso de la rumia- en respuesta a los altos niveles de sales minerales y al mucílago contenidos en esta planta. La modificación en el volumen de producción de saliva, debido al consumo de nopal, permite el equilibrio del pH ruminal (6,6 a 7,13) y por lo tanto, se incrementa la actividad microbiana del rumen [16, 24] (FIG. 2).

La interacción a nivel ruminal entre el aumento de la actividad microbiana y los carbohidratos no estructurales del nopal incrementa la fermentación ruminal y mejora el aprovechamiento del alimento ingerido puesto que permite; a) una mayor digestibilidad de materia seca (72,8%) y de materia orgánica (88,1%) y b) mayor aprovechamiento de los nutrientes para el desarrollo microbiano [2]. La relación positiva entre digestibilidad del alimento y desarrollo microbiano provoca un incremento en la formación de ácidos grasos volátiles [9] (FIG. 2). Medina y col. [13] encontraron que, el aumento de ácidos grasos volátiles por efecto de la dieta complementada con nopal favoreció la formación de propionato (12,02 nM), el cual proporciona entre el 25 y 55 % de la síntesis de glucosa. Esto es de importancia porque la producción de lactosa sintetizada en ubre, esta determina por la cantidad de glucosa y la lactosa determina la PL d<sup>-1</sup> [7]; lo que explicaría el incremento de la PL en el Grupo 2 (FIG. 2).

En síntesis, la posible explicación del efecto de la dieta complementada con nopal sobre la PL en la ES (FIG. 2), a través de la esquematización, solo ofreció una representación estática. Sin embargo, el análisis debe ir más allá de lo estático. Esto implicó pasar a la predicción de la funcionalidad del sistema a través de la modelación matemática de las CL de ambos grupos. Pero antes de esta modelación, primero se analizó la variabilidad del comportamiento de la PL del Grupo 1 y 2 utilizando las medias de mínimos cuadrados por d (57 al 320) de PL (FIG. 3).

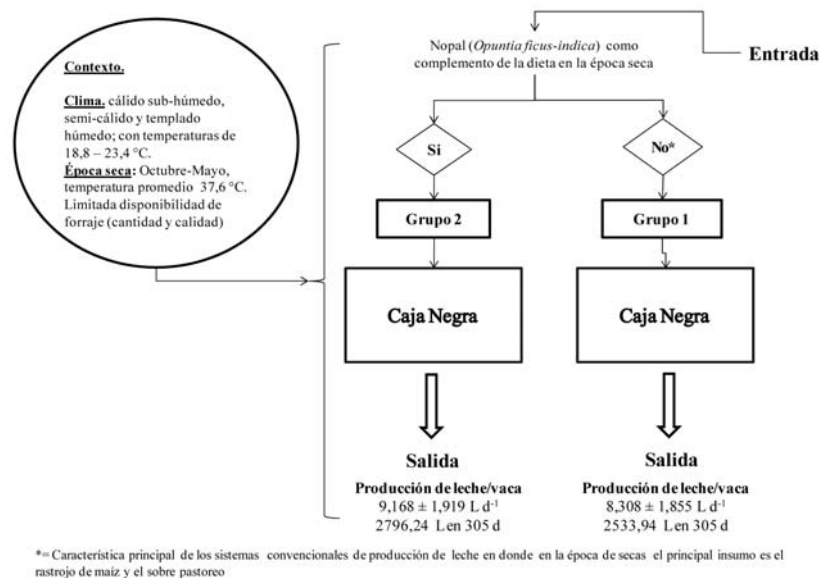


FIGURA 1. CONCEPTUALIZACIÓN DEL EFECTO DEL NOPAL (*Opuntia ficus-indica*) COMO COMPLEMENTO DE LA DIETA DE VACAS HOLSTEIN DURANTE LA ÉPOCA SECA.

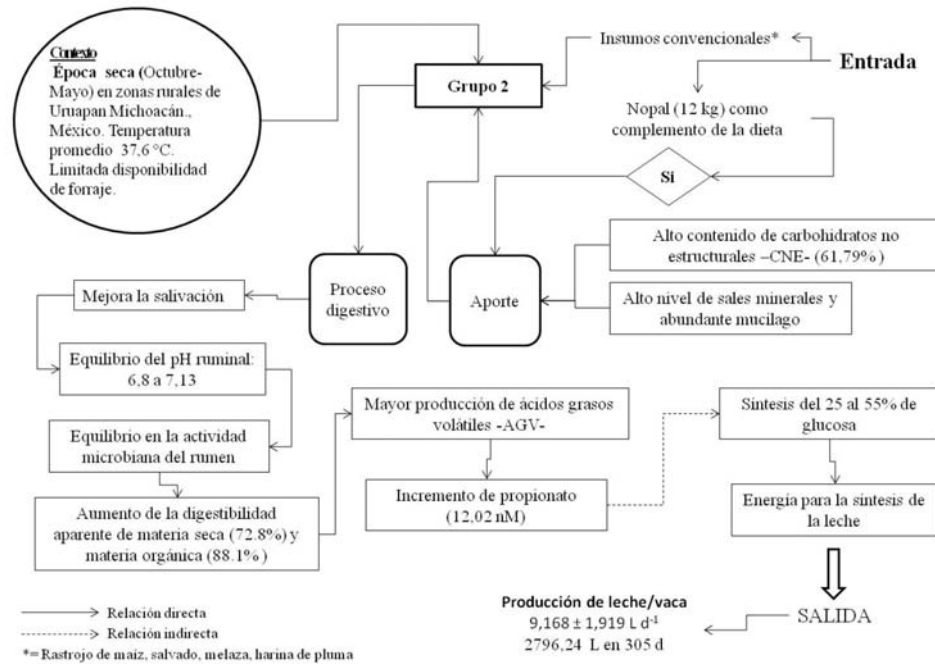


FIGURA 2. REFORMULACIÓN DE LA CONCEPTUALIZACIÓN DEL EFECTO DEL NOPAL (*Opuntia ficus-indica*) COMO COMPLEMENTO DE LA DIETA DE VACAS HOLSTEIN DURANTE LA ÉPOCA SECA.

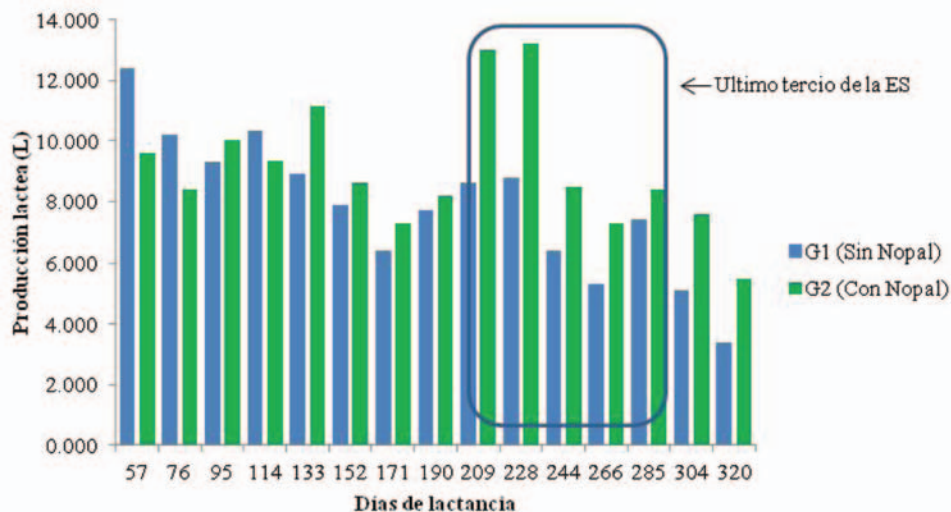


FIGURA 3. PRODUCCIÓN DE LECHE PROMEDIO/d POR GRUPO DURANTE LAS DOS ÉPOCAS DEL AÑO (LLUVIOSA Y SECA) EN EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE LA FACULTAD DE AGROBIOLOGIA-UMSNH. URUAPAN, MICHOACÁN, MÉXICO.

De manera general y de acuerdo a la PL/d durante el periodo de lactación analizado: 57 a 320 d de lactancia (FIG. 3), se observó que el Grupo 1, la PL en el d 57 y 114 fue de 12,400 y 10,350 L, respectivamente, mientras que en el Grupo 2, fue menor (9,600 y 9,367 L). Entre los d 152 al 190 de PL, la productividad de ambos grupos sufrió un descenso: Grupo 1; 7,333 L y en el Grupo 2; 8,033 L. El Descenso posiblemente se debió al efecto de la ES sobre los potreros. En contraste, en los d 209 al 228 de lactancia se observó que, la producción del Grupo 2 se incrementó: 13,000 y 13,200 L, respectivamen-

te, en comparación con la productividad del Grupo 1: 8,600 y 8,800 L. Este incremento de la PL del Grupo 2 coincidió con el inicio de la complementación de la dieta con nopal en el último tercio de la ES. Sin embargo, al final del último tercio de la ES (entre los d 266 y 285 de PL) la producción láctea sufrió un descenso en ambos grupos: 5,300 y 7,300 L, para el Grupo 1 y 2, respectivamente, en el d 266. Hacia el final de la fase de lactación (d 304) la PL del Grupo 2 fue de 7,600 L vs 5,100 L del Grupo 1. Ante los resultados del Grupo 2, durante la ES,

es de esperar un efecto positivo en los estimadores matemáticos para la modelación de la CL ajustada a 305 d.

Hernández y Ponce [10] establecieron que, la modelación de la CL es una herramienta que permite valorar las estrategias de alimentación en función de cada etapa propia de la CL. Pero además, la modelación también puede fungir como predicción de la funcionalidad del sistema en el momento que se analizan y se comparan las CL ajustadas a 305 d de ambos grupos, aspecto que se aborda a continuación.

Los resultados determinaron que los valores de las fases de PL, tales como: inicio (a), punto de máxima producción (c) y final (i) de la lactación, fueron superiores en el Grupo 2 en comparación con los valores del Grupo 1 (TABLA IV). Sin embargo, los valores en las fases de ascenso (b), punto de máxima producción (c) y fase final (i) de la lactación del Grupo 2 fueron menores al reportado para vacas Holstein bajo confinamiento total [6, 18]. No obstante, el valor promedio del punto de máxima producción (c) de PL del Grupo 2 (10,332 L d<sup>-1</sup>; P<0,001) concuerda con el valor de máxima producción de vacas Holstein explotadas en condiciones de pastoreo y con limitados suplementos adicionales [4, 14]; aún así, el valor de 10,332 L d<sup>-1</sup> del punto de máxima producción (c) fue inferior al valor del potencial biológico de la raza Holstein (c =19,60 L d<sup>-1</sup>) [3].

Finalmente, la producción promedio en el final de la lactación (i) fue menor en el Grupo 1 (1,462 L d<sup>-1</sup>; P<0,05) en comparación con el Grupo 2 (6,710 L d<sup>-1</sup>; P<0,001), lo que de-

terminó, junto con el punto de máxima producción (c), las características de las CL de cada grupo analizado.

Un aspecto importante a considerar dentro de la modelación de las CL ajustadas a 305 d en ambos grupos fue el contexto: elevada temperatura y una limitada disponibilidad de forraje durante la ES, factores que restringió la expresión del potencial genético de las vacas Holstein analizadas. No obstante, la CL del Grupo 2 puso de manifiesto el efecto positivo de la complementación de la dieta con nopal sobre la PL durante la ES (FIG. 4).

Para corroborar el comportamiento de la CL ajustada a 305 d en cada grupo se analizaron los estimadores de la regresión del modelo cuadrático y se observó que, la predicción de la PL (TABLA V; FIG. 4) en el Grupo 2 fue sobre estimada en el d 50 (12,950 L) y durante los d 209 y 228 –al inicio de la complementación del nopal– donde la estimación de la PL fue de 15,156 y 15,006 L, respectivamente. Para el Grupo 1 se estimó en 7,715 (d 50); 9,142 (d 209) y 8,779 L (d 228).

Aunque si bien, el modelo cuadrático sobre estima la CL a 305 d, éste concuerda con el modelo de regresión múltiple [1] en lo relacionado a la mejoría de CL de vacas Holstein alimentadas con una dieta complementada con nopal durante el último tercio de la ES. Mientras que la CL ajustada a 305 d del Grupo 1 concuerda con las estimadas por Ponce y Bell [20], quienes determinaron que las vacas en pastoreo muestran una CL lineal, puesto que presentan un punto de máxima producción (c) poco pronunciado o ausente (FIG. 4).

TABLA IV  
PARAMETROS ESTIMADOS PARA LA CURVA DE LACTACIÓN POR GRUPO

| Parámetros                        | Grupo 2 (Con Nopal) | Grupo 1 (Sin Nopal) |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|
| a (Inicio de la PL)               | 13,781**            | 10,763*             |
| b (Ascenso de la PL)              | 0,265**             | -0,054*             |
| c (Punto de máxima producción PL) | 10,332**            | 7,040*              |
| e (Decenso de la PL)              | 0,189**             | 0,208NS             |
| i (Final de la PL)                | 6,710               | 1,462*              |

\*\*= Altamente significativo (P<0,001)

\*= Significativo (P<0,05)

NS= No significativo (P>0,05)

PL= Producción láctea.

TABLA V  
ECUACIONES PARA EL AJUSTE DE LAS CURVAS DE PRODUCCIÓN PARA CADA GRUPO ESTUDIADO

| Grupos | Ecuaciones  | R <sup>2</sup> |
|--------|---|----------------|
| G1     | $\hat{Y} = 5,6153 + 0,0499 * t - 0,000158 * t^2$  | 0,09           |
| G2     | $\hat{Y} = 11,3701 + 0,0416 * t - 0,00020 * t^2$  | 0,34           |
| G1     | $y(t) = 10,763 - 0,054 \frac{t}{305} - 7,040 \left( \frac{t}{305} \right)^2 + 0,208 \ln \frac{305}{t} - 1,462 \left( \ln \frac{305}{t} \right)^2$   | 0,92           |
| G2     | $y(t) = 13,781 - 0,0265 \frac{t}{305} - 10,332 \left( \frac{t}{305} \right)^2 + 0,189 \ln \frac{305}{t} - 6,710 \left( \ln \frac{305}{t} \right)^2$ | 0,92           |

Grupo 1= Vacas alimentadas convencionalmente durante las dos épocas del año.

Grupo 2= Vacas alimentadas con dieta complementada con *Opuntia ficus-indica* durante la época seca.

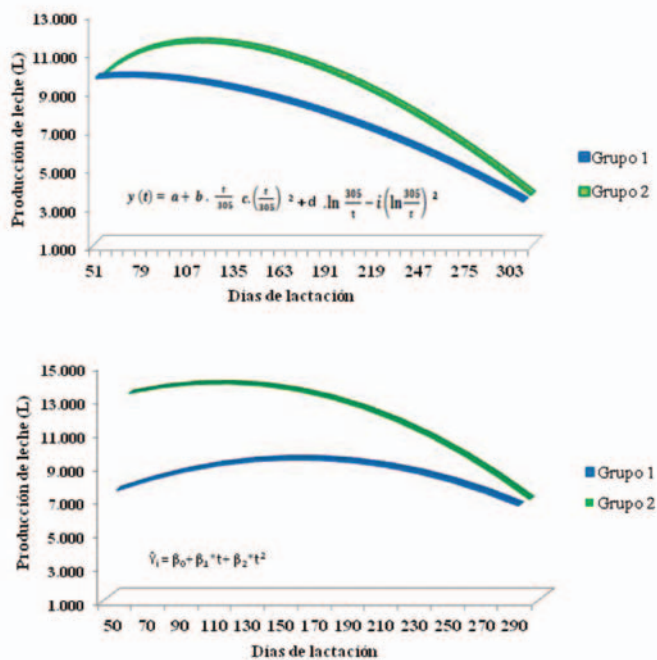


FIGURA 4. CURVAS DE LACTANCIA USANDO MODELOS DE REGRESIÓN.

Por último, las características de las CL (FIG. 4; TABLA IV) permiten establecer que, la complementación de nopal en la dieta de vacas Holstein durante la ES mejoran la CL, posiblemente por el efecto del nopal a nivel ruminal. Efecto que en investigaciones previas sugieren que está determinado por los altos aportes de azúcares solubles de esta planta, mismos que al combinarse con los nutrientes del resto de los insumos de la dieta mejora la fermentación ruminal, incrementa la proporción de ácidos grasos volátiles y de energía, elementos que en conjunto mejoran la síntesis de la leche (FIG. 2) [13, 21].

## CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES GENERALES

La esquematización reformulada (vaca:nopal:PL) de la *caja negra* del sistema de producción de leche en la zona rural de Uruapan, Michoacán, México bajo el contexto de la ES solo ofrece una representación estática, que permite visualizar que las altas temperaturas (37,6°C) y la poca disponibilidad de forrajes de calidad limitan el potencial productivo de las vacas Holstein pero que, bajo ese mismo contexto (ES) la complementación de la dieta de los bovinos con 12 kg d<sup>-1</sup> de nopal permite mejorar la productividad en este tipo de vacas (Grupo 2). Por el contrario, los resultados de la CL ajustada a 305 d de vacas con dietas complementadas con nopal muestran el dinamismo de la PL al determinar que el punto de máxima producción permitió una CL más persistente, lo que evita que se presente el descenso acentuado (fase final) de PL de las vacas que no reciben complemento de nopal durante la ES. Por lo que, la introducción de nopal como parte de las dietas de los

bovinos productores de leche, durante la ES, en las zonas rurales del país es una alternativa para incrementar la PL a pesar de la naturaleza aleatoria de la mayor parte de los factores del contexto de estos sistemas.

## AGRADECIMIENTO

Se agradece el financiamiento para la investigación a la Coordinación de la Investigación Científica (CIC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALI, T.E.; SCHAEFFER, L.R. Accounting for covariances among test day milk yields in dairy cows. **Can. J. Anim. Sci.** 67: 637-642. 1987.
- [2] BEZERRA, A.D.K.; de ANDRADE, F.; SHERLANEA, C.V.A.; LIMA, W.W.; EVANDRO, S.L. Digestibilidade e Absorção Aparentes em Vacas da Raça Holandesa Alimentadas com Palma Forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill) em Substituição à Silagem de Sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **R. Bras. Zoot.** 31:2088-2097. 2002.
- [3] CERVANTES, P.; FERNANDEZ, L.; PONCE, P. Caracterización de las curvas de lactancia en producción y componentes mayores de la leche en diferentes razas y cruza en las condiciones del trópico mexicano. **Rev. Salud Anim.** 28:90-95. 2006.
- [4] FERNANDEZ, L.; TONHATI, H.; ALBURQUEQUE, L.G.; ASPICUETA-BORQUIS, R.R.; MENENDEZ, A. Modelos de regresiones aleatorias para la estimación de parámetros genéticos y estudios de curvas de lactancia del Holstein en Cuba. **Rev. Cub. Cien. Agr.** 45:1-6. 2011.
- [5] FLORES, V.C.A. Los nopales y la lucha contra la desertificación. En: Esparza-Frausto, G., Valdez-Cepeda y Méndez-Gallegos, S. (Eds). **El nopal: tópicos de actualidad**. Pp 167-182. 2004.
- [6] GARCIA, M.J.G.; MARISCAL, A.D.V.; CALDERA, N.N.A.; RAMIREZ, V.R.; ESTRELLA, Q.H.; NUÑEZ, D.R. Variables relacionadas con la producción de leche de ganado Holstein en agroempresas familiares con diferente nivel tecnológico. **Rev. Cien. Tec. América.** 32:842-846. 2007.
- [7] GIRALDO, A.L.; GUTIERREZ, A.L.; RUA, C. Comparison between *in vitro* and *in situ* protocols for estimating true digestibility of several tropical forages. **Rev. Col. Cien. Pec.** 20:269-279. 2007.
- [8] GOODALL, W.D. The hierarchical approach of model building M 10-21. In: Arnold G W y De Wit C T. (Eds) **Waneningen Centre for Agricultural Publishing and Documentation**. 107 pp. 1976.

- [9] HALL, M. B. Recentes avanços em carboidratos não-fibrosos na nutrição de vacas leiteiras. In: Simpósio internacional de bovino cultura de leite: Novos conceitos em nutrição, 2. Lavras. Universidade Federal de Lavras. **Anais**. Pp 149-159. 2001.
- [10] HERNANDEZ, R.; PONCE, P. Caracterización de la curva de lactancia y componentes lácteos del genotipo siboney de Cuba en una granja ganadera de la provincia de la Habana. **Rev. Científ. FCV-LUZ**. XVIII (3): 291-295. 2008.
- [11] JUAREZ, C.A.; ORTIZ, R.R.; PEREZ, S.R.E.; GUTIEREZ, V.E.; VAL, A.D. Caracterización y modelación del sistema de producción avícola familiar. 2008. **Lives. Res. for Rur. Develop**. Volumen 20 (2): *Article #25*. En Línea: <http://www.lrrd.org/lrrd20/2/juar20025.htm>. 10/02/2012.
- [12] LOPEZ, G.J.J.; FUENTES, R.J.M.; RODRIGUEZ, G.A. Producción y uso de *Opuntia* como forraje en el centro-norte de México. En: Mondragón-Jacobo C. y Pérez González S. (Eds). **El nopal (*Opuntia spp*) como forraje**. FAO. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP). N° 169. Roma. Pp 35-43. 2003.
- [13] MEDINA, M.R.; TIRADO, G.E.; MEJIA, H.I.; CAMARILLO, S.I.; CRUZ, V.C. Digestibilidad *in situ* de dietas con harina de nopal deshidratado conteniendo un preparado de enzimas fibrolíticas exógenas. **Pesq. Agróp. Bras**. 41: 1173-1177. 2006.
- [14] MICHELENA, J.B.; RUIZ, T.; MARTINEZ, R.; PADILLA, C. Producción de leche a bajo costo. 2009. Fidecomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. En línea: <http://www.fira.gob.mx:8081/sas/docs/MemoriasEventos/ForoTuxpan/Producci%C3%B3n%20de%20Carne%20Vacuna%20a%20Bajo%20Costo.pps>. 3/03/2013.
- [15] MOLINA, M.V.M.; GUTIERREZ, V.E.; HERRERA, C.J.; GOMEZ, R.B.; ORTIZ, R.R.; SANTOS, F.J. Caracterización y modelación gráfica de los sistemas de producción bovina en Tierra Caliente, Michoacán: 1. Bovinos productores de carne. 2008. **Lives. Res. for Rur. Develop**. Volume 20 (12): *Article #195*. En Línea: <http://www.lrrd.org/lrrd20/12/moli20195.htm>. 11/02/2012.
- [16] NEFZAOU, A.; SALEM, H.B. *Opuntia* forraje estratégico y herramienta eficiente para combatir la desertificación en la región Wana. En: Mondragón-Jacobo C. y Pérez González S. (Eds). **El nopal (*Opuntia spp*) como forraje**. FAO. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP). N° 169. Roma. Pp 91-111. 2003.
- [17] ORTIZ, R.R.; VALDEZ, A.J.J.; GOMEZ, R.B.; LOPEZ, M.J.; CHAVEZ, M.M.P.; GARCIA, S.P.A.; PEREZ, S.R.E. Yield and microbiological quality of raw milk and fresh cheese obtained from Holstein cows receiving a diet supplemented with nopal (*Opuntia ficus-indica*). **Afr. J. Microbiol. Res**. 6: 3409-3414. 2012.
- [18] OSORIO, A.M.M.; SEGURA, C.J.C. 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. **Téc. Pec. Mex**. 43:127-137. 2005.
- [19] PEREZ, S.R.E.; GARCIA, S.P.A.; ANGEL, P.M.E.; VALDEZ, J.J.; RAMOS, B.; ORTIZ, R.R.; RAMIREZ, G. Producción de la leche provenientes de vacas Holstein bajo una dieta complementada con nopal (*Opuntia ficus-indica*). 2010. International Business Community Related to Animal Production. México. En línea: <http://www.engormix.com/MA-ganaderiache/nutricion/articulos/produccion-leche-provenientes-vacas-t3072/141-p0.htm>. 1/03/2011.
- [20] PONCE, P.; BELL, L. Estudio de la lactancia de vacas Holstein Friesian, Cebú y sus cruces en Cuba. **Rev. Salud Anim**. 8: 73-88. 1986.
- [21] RAMIREZ, T.H.M.; REYES, A.J.A.; PINOS, R.J.M.; AGUIRRE, R.J.R. Effect of the species and maturity over the nutrient content of cactus pear cladodes. **Agrocien**. 41: 619-626. 2007.
- [22] RESENDIZ, A.S. Michoacán y sus municipios. Morelia, Michoacán. 101 pp. 1988.
- [23] REVELES, H.M.; FLORES, O.M.A. El manejo del nopal forrajero en la producción del ganado bovino. VIII Simposium-Taller Nacional y 1er Internacional "Producción y Aprovechamiento del Nopal". **Rev. Salud Pub. Nutr**. 5:130-144. 2010.
- [24] ROMERO, P.R.J.I.; RAMIREZ, L.R.G.; MAZUCA, N.R.M.; CANO, R.P. Utilización del nopal (*Opuntia megacantha*) en sustitución de alfalfa en dieta para cabras lactantes. Consumo y rumia. XVII Semana Internacional de Agronomía. Universidad de Juárez del Estado de Durango. Venecia Durango, México del 5 al 9 de septiembre Pp 342-346. 2005.
- [25] STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE. SAS/STAT® User's Guide Release 9.1. SAS, 2002.
- [26] TORRES, S.A. Composición química del nopal y sus implicaciones en la nutrición de rumiantes (experiencias de Brasil). VX Simposium-Taller Nacional y II Internacional "Producción y Aprovechamiento del Nopal y Maguey". **Rev. Salud Pub. Nutr**. 5: 143-151. 2011.
- [27] WADSWORTH, J. Análisis de sistemas de producción animal: las herramientas básicas. 1997. Estudio FAO. Producción y sanidad animal 140/2. Pp 4-10. En línea: <http://www.fao.org/docrep/w7452s/w7452s00.htm>. 24-02-2008.