

Modelación de curvas de lactancia para producción de leche, grasa y proteína, y evaluación de factores que las afectan en ganado Holstein en México



Luis Enrique Trejo-Díaz ^a

Felipe De Jesús Ruiz-López ^b

Hugo Oswaldo Toledo-Alvarado ^a

Marina Durán-Aguilar ^c

Adriana García-Ruiz ^b

^a Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Ciencias de la Producción y de la Salud Animal. Circuito de Posgrados, Edificio B, 1^{er} Piso, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán. 04510, Ciudad de México, México.

^b Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Fisiología y Mejoramiento Animal. Querétaro, México.

^c Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ciencias Naturales, Querétaro, México.

*Autor de correspondencia: garcia.adriana@inifap.gob.mx

Resumen:

El conocimiento y modelación de curvas de lactación hacen posible identificar factores que ayuden a explicar las variaciones ambientales y genéticas, que permitan implementar un programa de selección. El objetivo de este trabajo fue evaluar diferentes modelos para las curvas de producción de leche, grasa y proteína en ganado Holstein en México, así como evaluar algunos factores que las afectan. Se usó información de 125,982 lactaciones pertenecientes a 68,804 animales nacidos del año 2000 al 2020. Se evaluó el efecto del número de parto, época del año y hato. Con la paquetería Lactcurves de R, se ajustaron los 38 modelos que incluye, de los cuales se eligieron los cuatro mejores (Wood, Wilmink, Ali & Schaeffer y Pollot modificado) que posteriormente se usaron para modelar las curvas

individuales a través de un modelo de regresión no lineal. Los parámetros calculados para cada modelo fueron estadísticamente diferentes entre el número de lactación ($P<0.05$), así como el número de parto, época de parto y hato ($P<0.01$). Las curvas modeladas tienen formas similares a las reportadas en otros estudios, a excepción de las obtenidas para proteína en el tercer y cuarto o más partos con el modelo de Pollot modificado. La ecuación propuesta por Wilmink fue la que presentó mejor ajuste para la población de estudio según los diferentes criterios de evaluación. El emplear el modelo que mejor se adapte a los datos dará predicciones más cercanas a la realidad, y poder aplicarlo a distintos ámbitos como el mejoramiento genético.

Palabras clave: Curvas de lactación, Producción de leche, Grasa, Proteína, Holstein.

Recibido: 11/07/2023

Aceptado: 13/05/2024

Introducción

La curva de lactación, definida como la representación gráfica de la producción de leche en el transcurso del ciclo productivo, puede ser descrita por medio de funciones matemáticas que explican un proceso biológico de producción, sujeto a influencias, tanto genéticas como ambientales^(1,2). La modelación adecuada de las curvas de lactación permite realizar un buen pronóstico de la producción total a partir de muestras parciales, una planificación del hato a partir de la predicción confiable de la producción, y la selección de animales mediante el conocimiento de las diferentes partes de la curva. Por lo anterior, es importante encontrar en cada medio de producción la función matemática que mejor describa la curva de lactación de los animales^(2,3).

Generalmente, la curva de lactación se analiza a través de cuatro secciones consecutivas: a) Producción inicial, estimada por la media de producción durante los días 4 a 6 después del periodo calostrado, b) Fase ascendente o de incremento de la producción, que es la tasa de ascenso, hasta alcanzar el máximo nivel de producción, c) Punto máximo o pico de producción, determinado por el nivel más alto de producción que la vaca alcanza dentro de los primeros 90 días de lactación, y d) Descendente o reducción de la producción, también denominada persistencia, que refiere a la disminución en la secreción de leche a partir del pico de producción⁽⁴⁾.

El uso de modelos matemáticos ha permitido conocer las curvas de lactación en diferentes sistemas de producción lechera. Sin embargo, no todas las poblaciones y sistemas de producción se ajustan a una curva de lactación típica, con sus diferentes parámetros y fases

de la curva como inicio, fase ascendente, pico y decremento. Los parámetros de un modelo que se adecuan a la curva de lactación deben reflejar diversos factores, como pueden ser: genéticos, fisiológicos, productivos, ambientales, y las interacciones entre los mismos^(2,3). Por lo tanto, es posible generar tantas curvas como lactaciones y fuentes de variación existan. De ahí se desprende la importancia de conocer niveles estándar de producción de leche por grupo de animales, con características similares, como misma etapa de lactación, época de parto, nivel productivo, o número de lactación⁽⁵⁾.

Los modelos no lineales para representar las curvas de lactación fueron propuestos inicialmente por Wood y se han usado en bovinos, ovinos, cabras, búfalos y camélidos sudamericanos⁽²⁾. Los diferentes modelos matemáticos propuestos, han presentado ventajas en la modelación específica de secciones de la curva de lactación, o se ajustan de manera correcta a diversos sistemas de producción. Por ejemplo, el modelo de Wood se ajusta bien a los datos de producción de leche, predice mejor los datos reales durante la lactación temprana y tardía, y predice con menor precisión los datos durante la lactación media que otros modelos no lineales^(2,6). El modelo de Wilmlink también es muy usado para describir las curvas de lactación en ganado lechero, especialmente empleado para detectar los efectos ambientales, aunque se ha reportado que en algunas poblaciones este modelo tiende a subestimar la parte media de la curva y a sobreestimar la parte final. El modelo Ali-Schaeffer se ajusta bien para lactaciones que comienzan con una producción baja y alcanzan el pico más pronto de lo normal⁽⁷⁾.

Uno de los principales problemas que han tenido los modelos empíricos es que ha sido difícil dar un significado fisiológico a los parámetros derivados de estos. Se han realizado diversas modificaciones a algunos modelos con la finalidad de tener una interpretación más cercana a los aspectos fisiológicos de la curva de lactación, como las propuestas por Pollot⁽⁸⁾, en donde los parámetros resultantes tienen una interpretación biológica, basados en los cambios en el número de células en la glándula mamaria durante la gestación, lactación e involución, y sus efectos en la producción de leche⁽⁹⁾.

El objetivo de este trabajo fue evaluar diferentes modelos matemáticos, así como algunos factores que afectan las curvas de lactación de producción de leche y sus componentes (grasa y proteína) en una población de bovinos de la raza Holstein de México.

Material y métodos

Edición y descripción de los datos

El estudio incluyó información de producción de leche en kilogramos, porcentajes de grasa y de proteína de 68,804 vacas Holstein nacidas del año 2000 al 2020, pertenecientes a 198

datos del sistema de producción intensiva. Los datos provienen de 17 estados del país: Aguascalientes, Baja California, Coahuila, Chihuahua, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Nayarit, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas, donde suelen predominar climas templado (zona centro) y semidesértico (zona norte). Querétaro, Guanajuato, Chihuahua y el Estado de México concentran la mayor proporción de información. Dichos datos fueron proporcionados por la Asociación Holstein de México. En la base de datos, se excluyeron lactaciones que no tuvieron pesaje de producción en los primeros 30 días, al igual que las que fueron mayores a 500 días; así como lactaciones que presentaban doble o triple pico de producción, ya que no corresponde a una curva de producción estándar. Cada lactación contó con información de 4 a 12 pesajes y se eliminaron lactaciones que tenían menos de cuatro pesajes útiles.

Los días en leche de cada pesaje se ajustaron a valores mínimos y máximos de 5 a 305 días, cuando el registro estaba fuera de este rango el pesaje no se incluyó en el análisis. La producción de leche en kilos, grasa y proteína en porcentaje se ajustaron a la media ± 3 desviaciones estándar. Cuando no se contó con información de grasa o proteína, se eliminó la información de ambos componentes. Para definir la variable época de parto, se agruparon a los animales en tres categorías según el mes en el que parieron, los cuales corresponden a épocas de frío, calor y lluvia respectivamente. El primer grupo abarca los meses de noviembre a febrero; el segundo de marzo a junio; el tercero de julio a octubre.

Después de la edición, el estudio incluyó información de 68,804 vacas Holstein, con información de 125,982 lactaciones (72,979 pertenecientes a la primera lactación, 31,371 a la segunda, 11,922 a la tercera y 9,710 a 4 o más lactaciones), y en total se contó con 1'319,810 de pesajes.

Se utilizó RStudio⁽¹⁰⁾ para evaluar diferentes modelos matemáticos para describir la representación de curvas de lactación. Se ajustaron 38 modelos incluidos en la paquetería Lactcurves de R⁽¹¹⁾, y se eligieron los cuatro mejores según los siguientes criterios de selección (Cuadro 1): error estándar del residual (RSE), coeficiente de determinación (R^2), coeficiente de determinación ajustado (R^2 adjus), logaritmo de verosimilitud (LogL), criterio de información de Akaike (AIC), criterio de información corregida de Akaike (AICC), criterio de información bayesiano (BIC) y coeficiente de Durbin Watson (DW).

Los mejores modelos, se ajustaron a las lactaciones por animal, utilizando un modelo de regresión no lineal (NLIN), mediante el programa Statistic Analysis System⁽¹²⁾. Se obtuvo de cada curva los parámetros que la describen, así como la persistencia, días al pico y rendimiento al pico.

Además, mediante el proceso de modelos lineales generalizados (PROC GLM) en SAS⁽¹²⁾, se evaluó si en cada modelo el número de parto, el hato y la época de parto eran estadísticamente importantes en la producción láctea, esto con la intención de evaluar

parámetros que pudieran incorporarse en el modelo de predicción. Con la paquetería ggplot en R, se graficaron las curvas por lactación.

El modelo de Wood⁽²⁾ usado fue el siguiente:

$$y_t = at^b \exp(-ct)$$

Donde: y_t = rendimiento lechero a los t días en kg, a = rendimiento inicial, b =fase de incremento en la curva, c = fase de descenso en la curva y t = días

A partir de los parámetros calculados se pueden estimar días al pico ($\frac{b}{c}$), rendimiento máximo al pico ($a(b/c)^b \exp(-b)$) y persistencia: $((1/c)^{b+1})$.

El modelo de Wilink⁽¹³⁾ se describe como:

$$y_1 = a + be^{-kt} + ct$$

Donde: y_t = rendimiento lechero a los t días en kg, a = rendimiento inicial, b =fase de incremento en la curva, c = fase de descenso en la curva, k =parámetro asociado a los días al pico y t = días en producción.

A partir de los parámetros calculados se pueden estimar persistencia ($\frac{c*305}{a*100}$), días al pico ($\frac{1}{k} \log\left(\frac{c}{kb}\right)$) y rendimiento al pico ($a + ck(1 + \log(bkc))$)⁽¹⁴⁾.

El modelo de Ali-Schaeffer⁽¹⁵⁾ es:

$$y_t = a + b\left(\frac{t}{340}\right) + c\left(\frac{t}{340}\right)^2 + d \log\left(\frac{t}{340}\right) + f\left(\frac{t}{340}\right)^2$$

Donde: t = días en leche, a = relacionado al pico de producción, b y c = relacionado con la disminución de la producción, d y f = relacionado con el incremento de producción.

El modelo de Pollot modificado⁽⁸⁾ se describe como:

$$y_t = \left(a / 1 + b * e(-c * t)\right)^* (2 - e^{(-d*t)})$$

Donde: y_t = producción de leche al día t , t = días en leche, a = máximo potencial de secreción de la lactación, b = relacionado con el potencial de producción de leche, c = tasa de proliferación relativa del número de células secretoras durante la lactación temprana y d = disminución relativa en el número de células a medida que avanza la lactación.

Resultados

Los modelos mejor evaluados, de acuerdo con los criterios de selección, fueron Wood, Wilmink, Ali-Schaeffer y Pollot modificado. En el Cuadro 1 se muestran los resultados de los cuatro modelos y los valores de los criterios de selección para estimar las curvas de producción láctea para el ganado Holstein en México en el sistema de producción intensiva. En la mayoría de los criterios el modelo de Wilmink es el que presenta mejores resultados.

Cuadro 1: Parámetros de selección de los modelos Wood, Wilmink, Ali- Schaeffer y Pollot modificado en ganado Holstein en México

Modelos	R ²	R ² adj	RSE	LogL	AIC	AICC	BIC	DW
Wood	0.1378	0.138	8.911	-4998010	9996029	9996025	9996078	0.555
Wilmink	0.1381	0.138	8.910	-4997858	9995726	9995721	9995786	0.555
Ali-Schaeffer	0.1380	0.138	8.911	-4997941	9995894	9995888	9995967	0.555
Pollot modificado	0.1381	0.138	8.910	-4997874	9995758	9995753	9995819	0.555

R²= coeficiente de determinación, R²adj= coeficiente de determinación ajustado, RSE= error estándar del residual, LogL= logaritmo de verosimilitud, AIC= criterio de información de Akaike, AICC= criterio de información corregida de Akaike, BIC= criterio de información bayesiano, DW= coeficiente de Durbin Watson.

En el Cuadro 2 se observan los resultados de la prueba de ANOVA y Tukey para los parámetros de los cuatro modelos seleccionados, diferenciando por el número de lactación, y la media de todos los animales. En el modelo de Wood, se observa que los estimadores *a*, *b* y *c* son estadísticamente diferentes entre los diferentes números de lactación, a excepción del estimador *c* para las lactaciones 3 y 4 o más. Además, se presentan los valores de persistencia, pico de producción y días al pico para cada una de las lactaciones.

En lo que respecta al modelo de Wilmink, el parámetro *a* de la lactación 1 resultó distinto en las lactaciones 2 y 3, que a su vez se diferenciaron del obtenido para 4 o más lactaciones. En cuanto al parámetro *b* y *k*, no hubo diferencias significativas entre los grupos, mientras que en el parámetro *c*, las lactaciones 2 y 4 son iguales entre ellas, pero distintas al resto. En el modelo de Ali & Schaeffer se observa que los parámetros *a*, *b*, *c*, *d* y *f* en las lactaciones 1 y 4 son estadísticamente diferentes a los de las lactaciones 2 y 3.

Para el modelo de Pollot modificado se observa que el parámetro *a* es distinto entre la primera, cuarta y segunda-tercera lactación; en cuanto al parámetro *c*, el de la primera lactación es distinto al de todas las demás; en lo que respecta a los parámetros *b* y *d* son diferentes entre cada una de las lactaciones.

En el cuadro 2 también se observan los valores estimados de persistencia, producción al pico en kilogramos y días al pico por lactación para Wood, Wilmink, Ali-Schaeffer y Pollot modificado por número de parto, así como la media de todos los animales. En la Figura 1 se presentan las curvas de lactación para cada uno de los modelos.

En la evaluación de factores que afectan la curva de lactación presentados en el Cuadro 2, se encontró que el número de parto, época de parto y hato son significativos ($P < 0.05$) en los modelos usados, a excepción de hato en el de Ali Schaeffer. En el Cuadro 3 se observan los parámetros para grasa y proteína con los diferentes modelos empleados, donde se puede observar que todos los parámetros son distintos entre los números de parto ($P < 0.05$). En el Cuadro 4 se observan las estimaciones para los componentes de la curva con los diferentes modelos; mientras que en las Figuras 2 y 3 se muestran las curvas calculadas para grasa y proteína, respectivamente. En el modelo de Pollot modificado para proteína, en las lactaciones 3 y 4 o más, los parámetros no modelaron una curva, por lo que no fue posible obtener los días al pico, producción al pico y persistencia.

Figura 1: Curvas de lactación para producción de leche por número de lactación con los modelos de Wood, Wilmink, Ali & Schaeffer y Pollot modificado

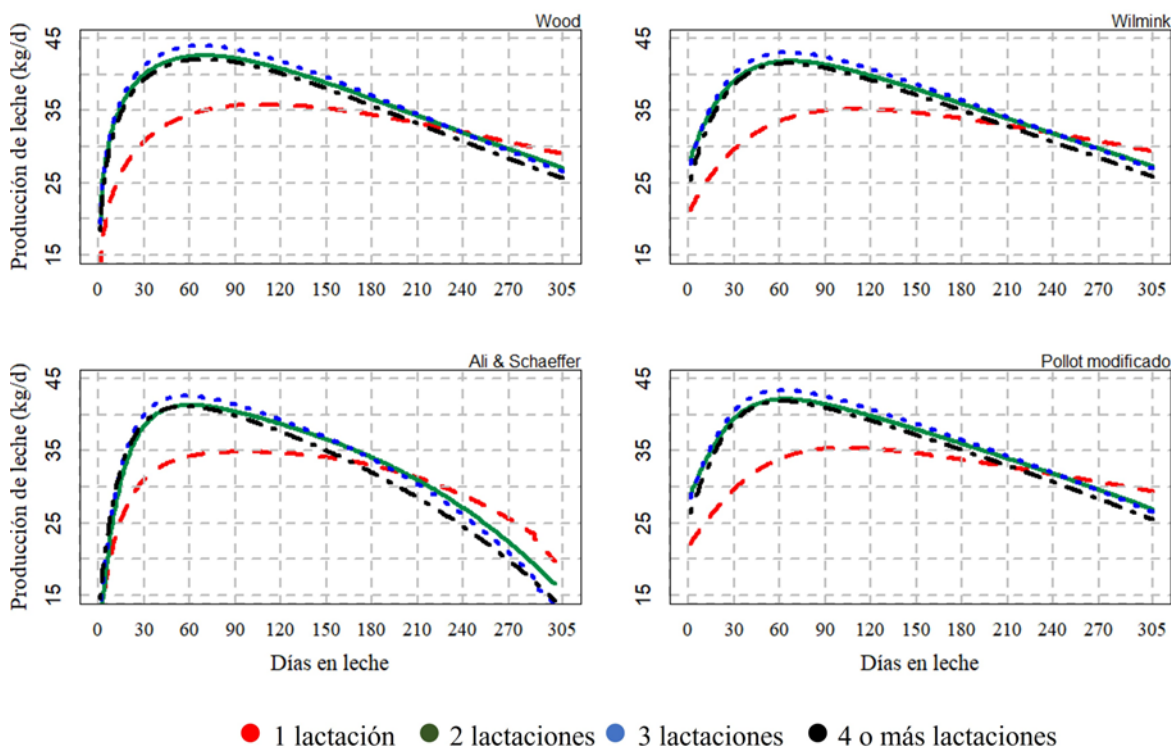


Figura 2: Curvas de lactación para porcentaje de grasa en leche por número de lactación con los modelos de Wood, Wilmink, Ali & Schaeffer y Pollot modificado

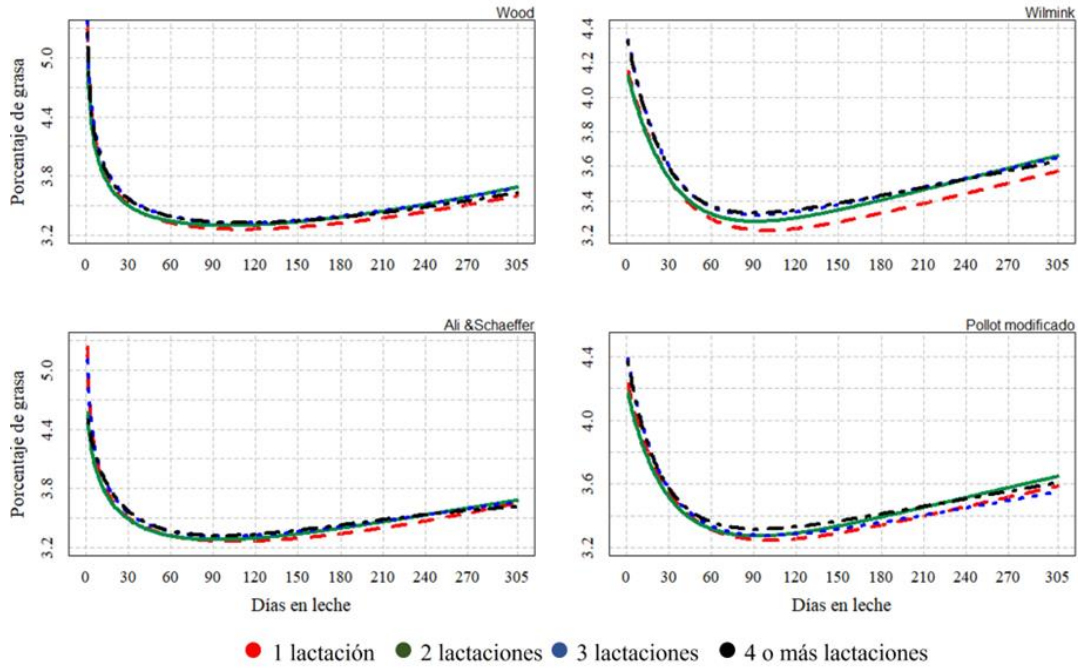
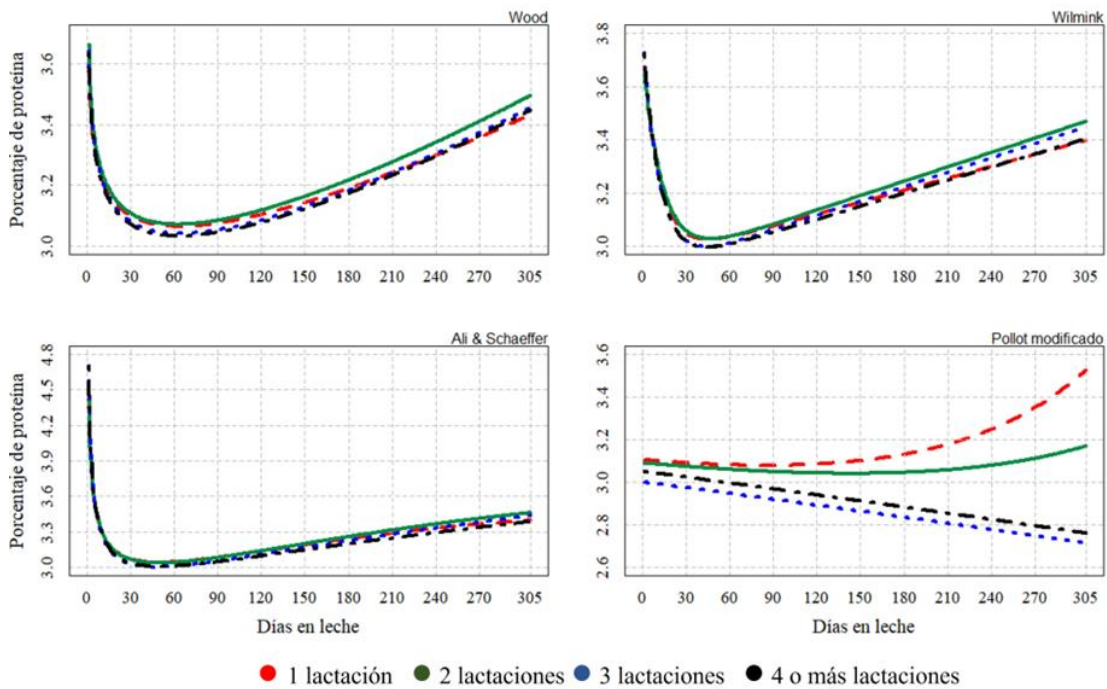


Figura 3: Curvas de lactación para porcentaje de proteína en leche por número de lactación con los modelos de Wood, Wilmink, Ali & Schaeffer y Pollot modificado



Discusión

El error cuadrático de la media fue similar entre los diversos modelos, siendo ligeramente menor en la primera lactación. Lo mismo sucede con los demás criterios de selección del modelo, siendo ligeramente mejor el modelo de Wilmink.

Los parámetros obtenidos mediante el modelo propuesto por Wood son diferentes en los números de lactación, resultados que distan de los encontrados por Duque *et al.*⁽¹⁶⁾ con el modelo de Wood en el trópico colombiano con ganado Holstein en pastoreo. Duque *et al.* (2018) estimaron una media del parámetro b (0.12) y producción al pico (26.5 kg) menores a lo encontrado en el presente estudio, lo mismo sucede con los días en llegar a la máxima producción entre los diferentes números de lactaciones (entre 28 a 32 días). Es sabido que la producción láctea en trópico suele ser menor debido a diversos factores que limitan la producción, como la temperatura, donde las vacas Holstein no se adaptan de manera adecuada en climas cálidos, aunado a esto, al estar en un sistema extensivo, la alimentación en pastoreo suele variar en las distintas épocas del año. En cuanto a la persistencia, tuvieron valores más altos (66 al 82 %) en comparación a lo que se reporta en este estudio, que va del 15 al 19 %. Esto puede deberse a que están sometidos a un menor estrés de producción, además de la variación en la alimentación dependiente de la época del año y el estrés calórico.

En un estudio realizado por Vázquez *et al.*⁽¹⁷⁾, donde evaluaron vacas en su mayoría de la raza Holstein bajo un sistema intensivo en Lima Perú, los valores de los parámetros a y c del modelo de Wood entre las diferentes lactaciones (16.41 a 18.11, y 0.0023 a 0.004, respectivamente), así como la producción al pico (31.13 a 43.91 kg) son similares a lo encontrado en la población Holstein de México. En ambos estudios los animales estuvieron sometidos a sistemas de producción intensivos, y las condiciones climáticas son similares, corresponden a un clima subtropical desértico. Para el parámetro b y los días al pico de producción, Vázquez *et al.*⁽¹⁷⁾ muestran valores más bajos (0.1880 a 0.3043 y 66 a 82 días, respectivamente). Esta diferencia podría atribuirse al hecho de que las vacas en el estudio de Perú se ordeñaron 3 veces al día, por lo que la cantidad leche producida en la primera etapa de la curva aumenta en comparación de las vacas que se ordeñan 2 veces al día, como es el caso, de la mayoría de la población mexicana.

En un estudio realizado por Boujenane & Btissam⁽¹⁸⁾ en hatos de producción semi intensiva en Marruecos con animales Holstein, los resultados presentan algunas diferencias con respecto a este trabajo. Los valores por lactación que reportan en Marruecos para el parámetro a en los tres primeros partos (15.9, 16.9 y 17.2, respectivamente), presentan un mayor valor, especialmente para los animales de primer parto. La media del parámetro b (0.1039) es la que presenta la mayor diferencia, lo cual se ve reflejado en los resultados de

cada una de las lactaciones, donde también son mayores (0.073, 0.091 y 0.096 para la primera, segunda y tercera lactación). En el mismo estudio el parámetro c es ligeramente mayor en cada una de las lactaciones.

En lo que respecta a los componentes de la lactación, se muestran diferencias en ambos estudios. Los tres componentes mostrados por Boujenane & Btissam⁽¹⁸⁾ (41.4 para días al pico, 23.6 para producción al pico y 6.56 para persistencia) son menores a lo encontrado en el presente trabajo (Cuadro 2), especialmente en los días y rendimiento al pico. Lo anterior posiblemente causado por el sistema de producción semi-intensivo y las altas temperaturas que presenta el país africano. De forma general, la producción en los animales del estudio marroquí es menor.

En lo que respecta al porcentaje de grasa, Gołębiewski *et al*⁽¹⁹⁾ realizaron un estudio en ganado Holstein en Polonia, reportan valores para los parámetros con el modelo de Wood a , b y c de 3.05, -0.07 y 0.04, respectivamente; y para porcentaje de proteína, reportan para los parámetros a , b y c un valor de 4.59, -0.19 y 0.04, valores similares a lo encontrado en la población Holstein de México (Cuadro 3). Tanto los animales Holstein polacos y mexicanos en ambos estudios estuvieron bajo un sistema intensivo, por lo que las condiciones ambientales son similares.

En lo que respecta al modelo de Wilmink, los resultados presentados por Bouallegue *et al*⁽²⁰⁾ en vacas Holstein en Túnez, el valor de los parámetros difiere a lo obtenido en la población Holstein Mexicana. Los autores muestran valores cercanos a 28 y -7 para los parámetros a y b ; el parámetro c fue similar (-0.3), mientras que el valor de k fue fijado a 0.05. Los valores calculados en el presente estudio para pico de producción y días al pico (Cuadro 4) fueron mayores a los presentados por los autores (26 kg y 48 días). En cuanto a la persistencia, ellos reportan valores alrededor del 94 %. El número de animales que usaron en el estudio fue reducido (5,649), donde los autores mencionan que se sugiere una mayor cantidad de datos, la principal diferencia de las vacas en el estudio de Túnez con el de la población mexicana fue temperatura. Las primeras estuvieron sometidas a estrés calórico debido al clima en Túnez, lo cual puede mermar la producción en bovinos Holstein, ya que los animales de esta raza suelen no adaptarse bien a este tipo de condiciones climáticas.

En cuanto a la paridad, los resultados encontrados en este estudio son similares a los reportados por Bouallegue *et al*⁽²⁰⁾, con lo que se reitera que el número de lactación es una fuente significativa de variación, mostrando diferencias en animales con 1, 2 y 3 o más partos, debido a que animales de primer parto no han completado el proceso de maduración de la glándula mamaria, por lo que su producción suele ser menor a posteriores lactaciones. Además, Bouallegue *et al*⁽²⁰⁾ recomiendan que se use la edad al parto como fuente de variación. En cuanto el hato como factor que afecta las curvas de lactación, los

mencionados autores encontraron que es significativo, atribuyéndole un 30 % de la variación en la producción láctea. Esto resalta la importancia de las condiciones ambientales en la modelación de la curva de producción, las cuales son distintas entre los hatos.

Los parámetros de porcentaje de proteína presentan poca similitud con respecto a lo reportado en el presente trabajo (Cuadro 4). Ejemplo de ello son los resultados de pico y días al pico mostrados de los animales de Túnez (2.84 % y 53.4 días, respectivamente) que son menores con respecto a la población mexicana. Para porcentaje de grasa, las mayores diferencias con respecto a este estudio se observan en el parámetro b (1.19) donde los autores presentan valores ligeramente mayores; mientras que los días al pico (50.63) que presentan son mucho menores a lo encontrado en este estudio (Cuadro 4). Las diferencias en algunos resultados para proteína y grasa pueden deberse a altas temperaturas del Mediterráneo a la que estuvieron expuestos los animales; aunque el porcentaje de grasa tiende a variar menos por las condiciones ambientales y durante la lactación que el porcentaje de proteína.

Torshizi *et al*⁽⁷⁾ encontraron que en vacas Holstein de primer parto en sistemas de producción intensiva en Irán, que el hato y la época de parto son fuentes de variación significativas usando el modelo de Wilmlink para modelar curvas de lactación, similar a lo encontrado en la población de México. Además, usaron 4 valores fijos para el parámetro k en sus análisis (0.05, 0.065, 0.61, 0.10), siendo el primero el que arrojó una correlación entre los valores de producción observados y los predichos más altos.

En lo que respecta a los demás parámetros, también distan en gran magnitud, siendo más evidente en los parámetros b y c (-20.227 y -0.036). El día al pico y producción al pico (66 días y 32 kg, respectivamente) son menores en las vacas iraníes. Estas diferencias pueden deberse a la longitud de las lactaciones, pues en el estudio de Torshizi *et al*⁽⁷⁾ se incluyeron animales con ciclos productivos ajustados a 200 días, contrario a lo usual en México, que es ajustar a 305 días, y producciones mínimas de 3 kg de leche. Esto debido a la variación en la producción que tienen por cuestiones climáticas. Los autores mencionan que el mejor modelo para animales de primer parto es el de Wood.

Resultados presentados por Gök *et al*⁽²¹⁾ con vacas Holstein de primer parto en la provincia turca de Konya, donde usaron el modelo de Ali-Schaeffer, muestran valores similares a los encontrados en el presente estudio para el parámetro b (138). En cuanto a los parámetros a y f , estos autores muestran valores mayores (-51.92 y -3.62), mientras que las estimaciones para los parámetros c y d (-648.66 y 32.68) son menores en comparación con lo encontrado en la población Holstein Mexicana (Cuadro 4). De la misma forma, los días al pico y la producción al pico son menores en los animales de Konya. La principal diferencia con este estudio fue el sistema de producción. Los animales turcos estaban bajo un sistema de pastoreo, y donde el clima suele ser extremo en las diversas estaciones del año.

Koçak & Ekiz⁽¹⁵⁾ en su estudio realizado en ganado Holstein de Turquía, en donde clasificaron los animales por el número de lactación (de la 1 a la 3), usando el modelo de Ali-Schaeffer, reportaron valores para el parámetro b de (165.3, 259.3 y 280.9) y c (-101.3, -121.1 y -127.0, respectivamente) similares a los encontrados en este estudio (Cuadro 2). Mientras que el resto de los parámetros fueron mayores en el estudio realizado en Turquía (-49.0, -55.7 y -50.7 para a ; 103.36, 126.97 y 41.58 para c ; -0.10, -6.91 y -14.71 para f). Estas diferencias en los parámetros se reflejan en los días al pico, donde las vacas turcas tienen su máxima producción (74.94, 47.62 y 39.62 para la primera, segunda y tercera lactación, respectivamente) antes que las vacas mexicanas, a pesar de que las producciones en esta etapa son similares. Los animales en el estudio de Koçak & Ekiz⁽¹⁵⁾ pertenecían a sistemas de producción semi-intensivo y eran ordeñadas tres veces al día, donde a pesar de las altas temperaturas ambientales, los alojamientos contaban con sistemas de regulación de la temperatura, a diferencia de lo ocurrido en México, donde no se suelen controlar las condiciones del ambiente en los animales.

Por otra parte, Nanda *et al*⁽²²⁾ en su estudio realizado en un hato estabulado en Indonesia, donde modelaron las curvas usando el modelo de Ali & Schaeffer por número de parto (del 1 al 4). Los parámetros a , c y f en cada una de las lactaciones de las vacas en Java resultaron más altos que los parámetros calculados en el presente estudio (-40.79, -16.19, -20.86 y -26.89 para a ; -16.50, -7.06, -14.74 y -25.00 para c ; -6.83, -4.59, -4.52 y -4.59 para f) en lo que respecta a los parámetros b y d ellos reportan menores valores (68.32, 32.87, 44.25 y 59.15 para b ; 38.85, 24.43, 25.52 y 26.83 para d). Estos valores pueden representar que las curvas de los animales del estudio en Indonesia presenten el pico de producción en menor tiempo y con menor rendimiento que la población mexicana. El clima cálido y húmedo propio de la isla de Java puede ser un factor importante que explique las diferencias en las curvas, pues estos animales no estaban alojados en sitios donde se tuviera control de la temperatura.

Adediran *et al*⁽²³⁾ en vacas Holstein en Australia bajo un sistema de pastoreo en un clima cálido, usaron el modelo modificado de Pollot, y encontraron que el parámetro a (13.36) fue menor al obtenido en el presente trabajo, mientras que el parámetro b fue mayor (1.23). Los parámetros c y d (2.80 y 0.0012) resultaron similares en ambos estudios. La principal diferencia con la población mexicana es el tipo de sistema de producción. En el estudio en Australia, al estar los animales en pastoreo, se tiene menor control de las condiciones ambientales, aunado al calor intenso que reportan los autores, lo que puede limitar la producción láctea, a diferencia de la población de este estudio que estaba en un sistema estabulado.

La información de los parámetros de las curvas de producción de grasa y proteína con los distintos modelos es escasa, especialmente para Ali-Schaeffer y Pollot modificado, por lo que los resultados se compararon con otros modelos, pero cabe señalar que los resultados

presentados en este estudio servirán de referencia para estas características en sistemas de producción intensiva.

Conclusiones e implicaciones

De los modelos evaluados en el presente trabajo, el propuesto por Wilmink fue el que mejor se ajustó a los datos de la población Holstein de México. La importancia de elegir un modelo que mejor se adapte a la información radica en obtener predicciones más precisas que se traduce en valores más cercanos a la realidad. Además, en el estudio se evaluaron factores ambientales como número de parto, época de parto y hato fueron significativos para la modelación de las curvas de lactación, por lo que es indispensable contemplarlos como una fuente de variación en las predicciones realizadas con los distintos modelos. En futuras investigaciones se podría indagar sobre otros factores ambientales que puedan afectar las curvas. La aplicación práctica de la modelación de las curvas de lactación es basta, incluido el mejoramiento genético, por lo que tener identificadas fuentes ambientales de variación y elegir el modelo más adecuado permitirá seleccionar a los animales con un mayor valor genético.

Cuadro 2: Parámetros de los modelos de lactación días al pico (Dpico), pico de producción (Pico) y persistencia de la curva (Persistencia) para Wood, Wilmink, Ali-Schaeffer y Pollot modificado por número de lactación

Lactación		Parámetros						Componentes de la curva de lactación			ECM (kg)
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>k</i>	<i>f</i>	Dpico	Pico	Persistencia	
Wood	Media	14.600	0.380	0.004	-	-	-	85.020	41.140	16.990	
	1	11.920 ^a	0.370 ^a	0.003 ^a	-	-	-	102.970	36.780	15.970	7.27
	2	16.120 ^b	0.380 ^b	0.004 ^b	-	-	-	76.620	43.400	17.730	8.27
	3	15.770 ^c	0.400 ^c	0.005 ^c	-	-	-	74.870	44.370	19.260	9.29
	4 o más	16.290 ^d	0.370 ^d	0.005 ^c	-	-	-	72.760	42.990	15.560	9.64
Wilmink	Media	258.040	-316.000	-0.337	-	0.027	-	85.940	42.100	-47.440	
	1	282.120 ^a	-192.180 ^a	-0.320 ^a	-	0.017 ^a	-	107.340	37.340	-36.0050	7.27
	2	250.040 ^b	-432.310 ^a	-0.340 ^b	-	0.033 ^a	-	75.010	44.560	-54.240	8.87
	3	243.320 ^b	-453.410 ^a	-0.350 ^c	-	0.038 ^a	-	72.250	46.110	-53.510	9.29
	4 o más	227.920 ^c	-317.580 ^a	-0.330 ^b	-	0.041 ^a	-	69.480	44.260	-55.730	9.64
Ali & Schaeffer	Media	-91.640	184.090	-77.400	93.570	-	-20.680	87.250	39.990	9.270	
	1	-69.020 ^a	159.520 ^a	-72.310 ^a	70.810 ^a	-	-15.530 ^a	116	34.870	5.930	7.27
	2	-127.120 ^b	233.080 ^b	-93.630 ^b	120.330 ^b	-	-26.300 ^b	79	41.330	9.690	8.87
	3	-138.560 ^b	247.320 ^b	-98.880 ^b	130.450 ^b	-	-28.620 ^b	79	42.610	10.930	9.29
	4 o más	-74.110 ^a	151.350 ^a	-67.760 ^a	86.210 ^a	-	-19.600 ^a	75	41.160	10.540	9.64
Pollot modificado	Media	99.250	-31.930	2.95 ^c	-0.001	-	-	72.250	40.710	5.720	
	1	105.300 ^a	-37.620 ^a	1.850 ^a	-0.000 ^a	-	-	103	35.420	2.980	7.27
	2	97.800 ^b	-50.650 ^b	3.740 ^b	-0.001 ^b	-	-	63	42.150	6.280	8.87
	3	94.170 ^b	-64.980 ^c	3.940 ^b	-0.001 ^c	-	-	62	43.420	6.940	9.29
	4 o más	89.350 ^c	-35.810 ^d	3.370 ^b	-0.001 ^d	-	-	61	41.860	6.700	9.64

Dpico= días al pico, Pico= producción al pico, ECM= error cuadrático medio.

^{abcd} Diferencias significativas a $P < 0.05$.

Cuadro 3: Parámetros de los modelos de lactación para porcentaje de proteína y grasa con los modelos de Wood, Wilmink, Ali Schaeffer y Pollot modificado por lactación para los modelos con mejor bondad de ajuste

		Proteína								Grasa					
		Parámetros						ECM (kg)	Parámetros						ECM (kg)
Lactaciones		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>k</i>	<i>f</i>		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>k</i>	<i>f</i>	
Wood	Media	3.630	-0.055	0.0009	-	-	-		5.250	-0.126	0.001	-	-	-	
	1	3.600 ^a	-0.051 ^a	0.0008 ^a	-	-	-	0.24	5.310 ^a	-0.132 ^a	0.001 ^a	-	-	-	0.62
	2	3.660 ^b	-0.056 ^b	0.0009 ^b	-	-	-	0.26	5.080 ^b	-0.120 ^b	0.001 ^b	-	-	-	0.65
	3	3.640 ^c	-0.057 ^c	0.0009 ^c	-	-	-	0.26	5.370 ^c	-0.130 ^c	0.001 ^c	-	-	-	0.66
	4 o más	3.630 ^d	-0.057 ^d	0.0009 ^d	-	-	-	0.27	5.250 ^d	-0.123 ^d	0.001 ^d	-	-	-	0.67
Wilmink	Media	2.920	0.832	0.001	-	0.082	-		3.040	1.201	0.001	-	0.032	-	
	1	2.940 ^a	0.798 ^a	0.001 ^a	-	0.084 ^a	-	0.24	2.960 ^a	1.221 ^a	0.002 ^a	-	0.029 ^a	-	0.62
	2	2.920 ^b	0.799 ^b	0.001 ^b	-	0.075 ^b	-	0.26	3.020 ^b	1.138 ^b	0.002 ^b	-	0.031 ^b	-	0.65
	3	2.900 ^c	0.90 ^c	0.001 ^c	-	0.087 ^c	-	0.26	3.100 ^c	1.276 ^c	0.001 ^c	-	0.035 ^c	-	0.66
	4 o más	2.900 ^d	0.89 ^d	0.001 ^d	-	0.087 ^d	-	0.27	3.140 ^d	1.230 ^d	0.001 ^d	-	0.037 ^d	-	0.67
Ali & Schaeffer	Media	3.090	0.657	-0.284	-0.230	-	0.083		1.980	2.151	-0.400	0.59	-	-0.01	
	1	2.950 ^a	0.913 ^a	-0.441 ^a	-0.150 ^a	-	0.06 ^a	0.24	2.650 ^a	0.864 ^a	0.249 ^a	0.23 ^a	-	0.03 ^a	0.62
	2	2.940 ^b	0.917 ^b	-0.355 ^b	-0.150 ^b	-	0.07 ^b	0.26	1.700 ^b	2.648 ^b	-0.594 ^b	0.75 ^b	-	-0.04 ^b	0.65
	3	3.380 ^c	0.148 ^c	-0.037 ^c	-0.420 ^c	-	0.11 ^c	0.26	1.980 ^c	2.288 ^c	-0.537 ^c	0.59 ^c	-	-0.09 ^c	0.66
	4 o más	3.360 ^d	0.117 ^d	-0.045 ^d	-0.400 ^d	-	0.10 ^d	0.27	0.930 ^d	4.138 ^d	-1.439 ^d	1.18 ^d	-	-0.09 ^d	0.67
Pollot modificado	Media	2.940	-0.044	-0.004	-0.0004	-	-		2.960	-0.312	0.025	0.0008	-	-	
	1	2.860 ^a	-0.079 ^a	-0.004 ^a	-	-	-	0.25	2.890 ^a	-0.323 ^a	0.022 ^a	0.0009 ^a	-	-	0.63
	2	2.970 ^b	-0.039 ^b	-0.005 ^b	0.0006 ^a	-	-	0.27	2.940 ^b	-0.302 ^b	0.025 ^b	0.0009 ^b	-	-	0.66
	3	3.000 ^c	-0.019 ^c	-0.003 ^c	-	-	-	0.45	3.040 ^c	-0.316 ^c	0.028 ^c	0.0007 ^c	-	-	0.68
	4 o más	3.050 ^d	-0.000 ^d	-0.002 ^d	0.0002 ^b	-	-	0.44	3.090 ^d	-0.302 ^d	0.030 ^d	0.0006 ^d	-	-	0.67
				-											
				0.0004 ^c											
				-											
				0.0003 ^d											

ECM= error cuadrático de la media. ^{abcd} Diferencias significativas a $P < 0.05$.

Cuadro 4: Días al pico, rendimiento al pico y persistencia para porcentaje de proteína y grasa en leche con los modelos de Wood, Wilmink, Ali-Schaeffer y Pollot modificado

Modelo	Número de lactación	Componentes de la curva de lactación			Componentes de la curva de lactación		
		Proteína			Grasa		
		Días al pico	Rendimiento al pico (%)	Persistencia	Días al pico	Rendimiento al pico (%)	Persistencia
Wood	Media	60.890	3.050	1.670	103.130	3.050	1.420
	1	61.020	3.030	1.690	105.290	3.030	1.410
	2	59.950	3.080	1.670	97.370	3.080	1.440
	3	60.040	3.090	1.670	105.650	3.090	1.410
	4 o más	63.340	3.050	1.660	106.120	3.050	1.430
Wilmink	Media	44.650	3.020	17.820	92.650	3.280	19.850
	1	44.370	3.030	16.480	97.270	3.250	21.110
	2	46.030	3.030	19.140	89.430	3.270	21.510
	3	43.190	3.000	19.020	91.050	3.310	17.770
	4 o más	44.320	2.990	17.180	85.5500	3.330	15.990
Ali & Schaeffer	Media	49.250	3.010	0.150	49.250	3.010	0.150
	1	50	3.040	0.140	105	3.260	0.190
	2	50	3.030	0.160	93	3.270	0.180
	3	47	3.000	0.160	97	3.310	0.160
	4 o más	50	3.000	0.140	90	3.320	0.130
Pollot modificado	Media				96.50	3.270	0.140
	1	85	3.07	0.20	101	3.24	0.16
	2	144	3.04	0.08	92	3.27	0.17
	3	-	-	-	99	3.27	0.13
	4 o más	-	-	-	93	3.31	0.13

Literatura citada:

1. Gipson TA, Grossman M. Lactation curves in dairy goats: a review. *Small Ruminant Res* 1989;(3):383-396.
2. Quintero JC, Serna JI, Hurtado NA, Rosero N, Cerón MM. Modelos matemáticos para curvas de lactancia en ganado lechero. *Rev Colomb Cienc Pecu* 2007;20(2):149–156.
3. Human P, Almeyda J, Isique J. Modelación de la curva de lactación de vacas Gir y cruces Gir por Holstein (F-1) en el trópico peruano. *Ann Cient U.N.A.* 2018;79(2):511-518.
4. Palacios EA, Domínguez VJ, Padrón QY, Rodríguez CM, Espinoza J, Avila SI. Caracterización de la curva de lactancia de bovinos Siboney con modelos no lineales mixtos. *Rev Mex Cienc Pecu* 2016;7(2):233-242.
5. Castillo M, Alpizar A, Padilla J, Keim J. Efecto de la edad a primer servicio, número y época de parto sobre el comportamiento de la curva de lactancia en vacas jersey. *Nutrición Animal Trop* 2017;11(2):1-22.
6. Centoducati P, Maggiolino A, De-Palo P, Tateo A. Application of Wood's model to lactation curve of Italian Heavy Draft horse mares. *J Dairy Sci* 2012;95(1):5770–5775.
7. Torshizi M, Aslamenejad A, Nassiri M, Farhangfar H. Comparison and evaluation of mathematical lactation curve functions of Iranian primiparus Holsteins. *S Afr J Anim Sci* 2011;41(2):104-116.
8. Pollot G. A biological approach to lactation curve analysis for milk yield. *J Dairy Sci* 2000;83:2448–2458.
9. Pollot G, Gootwine E. Appropriate mathematical models for describing the complete lactation of dairy sheep. *Anim Sci* 2000;(81):197-207.
10. RR Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2023 <https://www.R-project.org/>
11. Strucken EM. Lactcurves: Lactation Curve Parameter Estimation. R package version 1.1.0. 2021.
12. SAS Institute Inc 2013. SAS/ACCESS® 9.4 Interface to ADABAS: Reference. Cary, NC: SAS Institute Inc.
13. Elahi TM, Hosseinpour MM. Estudio de la persistencia del rendimiento de la leche utilizando las metodologías de predicción y regresión aleatoria en vacas lecheras Holstein iraníes. *Cuban J Agric Sci* 2018;52(2):2079-3480.

14. Bouallegue M, M'hamdi N, Ben M, Haddad B. Study of non-genetic factors on the shape of lactation curves for milk yield, fat and protein percents of Holstein Friesian cows under hot Mediterranean climate. *Arch Zootech* 2014;17(1):55-75.
15. Koçak O, Ekiz B. Comparison of different lactation curve models in Holstein cows raised on a farm in the south-eastern Anatolia region. *Archiv fur Tierzucht* 2008;51(4):329-337.
16. Duque N, Casellas J, Quijano J, Casals R, Such J. Ajuste de curvas de lactación en un rebaño Holstein Colombiano usando modelos no lineales. *Rev Fac Nac Agron Medellín* 2018;71(2):8459-8468.
17. Vázquez A, García E, Sessarego E, Chagray N. Modelación de la curva de lactación en vacas Holstein de un establo en el Valle de Huaura, Perú. *Rev Investig Vet Perú* 2021;32(1):1-13.
18. Boujenane I, Btissam H. Genetic and non-genetic effects for lactation curve traits in Holstein-Friesian cows. *Archiv Tierzucht* 2012;55(1):450-457.
19. Gołębiewski M, Brzozowski P, Gołębiewski L. Analysis of lactation curves, milk constituents, somatic cell count and urea in milk of cows by the mathematical model of Wood. *Acta Vet Brno* 2010;(8):73-80.
20. Bouallegue M, M'hamdi N, Ben M, Haddad B. Study of non-genetic factors on the shape of lactation curves for milk yield, fat and protein percents of Holstein Friesian cows under hot Mediterranean climate. *Arch Zootech* 2014;17(1):55-75.
21. Gök T, Mikail N, Akkol S. Analysis of the first lactation curve in Holstein cows with different mathematical models. *KSÜ Tarımve Doğa Derg* 2019;22(4):601-608.
22. Nanda E, Salman L, Indrijani H, Tasripin D, Anag A. Comparison of five different lactation curve models to estimate milk yield of Friesian Holstein cows at BBPTU HPT Baturraden. *Conf. Series: Earth Environmental Sci* 2019;334.
23. Adediran SA, Ratkowsky DA, Donaghy DJ, Malau-Aduli AEO. Comparative evaluation of a new lactation curve model for pasture-based Holstein-Friesian dairy cows. *JDS* 2012;95(9):5344-5356.