



Modelo de predicción para la extensión de la vida productiva en registros censurados de ganado Holstein de México



Sandra Giovanna Núñez-Soto ^{a,c}

Adriana García-Ruiz ^b

Hugo Oswaldo Toledo Alvarado ^c

Felipe de Jesús Ruiz-López ^{b*}

^a Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias de la Producción y de la Salud Animal. Unidad de Posgrado, Edificio "B" Primer Piso Circuito del Posgrado, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 México D.F. México.

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

^c Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Departamento de Genética y Bioestadística, Ciudad de México, México.

* Autor de correspondencia: ruiz.felipe@inifap.gob.mx

Resumen:

El objetivo de este estudio fue predecir los meses en producción a los 84 meses de edad (MEP84) para incluir información de animales aún vivos en la evaluación genética de longevidad a partir de información productiva y reproductiva para establecer la longevidad completa como MEP84. Los registros se obtuvieron de animales nacidos entre 1986 y 2020 de la asociación Holstein de México. Para predecir MEP84, se ajustó un modelo de regresión lineal para el 1er parto, al 2do, al 3º, al 4º y al 5º parto antes de 84 meses de edad. El modelo incluyó información de las vacas con longevidades completas como la producción de leche en kilogramos ajustada a 305 días EM (PE) en el parto actual, los meses en producción

acumulados previos al parto actual (MACL), los meses en producción en el parto actual (MLPA), el índice de gestación en el parto actual (IDG), el índice del estado de la lactación en el parto actual (EDL) y la edad al primer parto en meses (EPP) en su efecto lineal y cuadrático (EPP²). El modelo explicó del 44 al 98 % de la variación observada en MEP84. La mayoría de los coeficientes de regresión para expandir las longevidades fueron significativos y positivos ($P < 0.01$). La media del coeficiente para IDG fue negativo en todos los partos (-0.7159 ± 0.0171 y -2.0632 ± 0.0732). El modelo propuesto permitió incluir a vacas que aún no terminan su vida productiva, siendo de interés en las evaluaciones genéticas de longevidad.

Palabras clave: Modelo de predicción, Longevidad, Vacas Holstein.

Recibido: 31/01/2024

Aceptado: 17/07/2024

Introducción

La longevidad en el ganado productor de leche es una característica económica importante que presenta variabilidad genética, por lo general baja, pero suficiente para que haya progreso genético en las generaciones posteriores^(1,2). Los países que evalúan longevidad en ganado productor de leche la han medido como la vida de hato⁽³⁾, vida productiva^(3,4), longevidad funcional^(5,6), longevidad verdadera^(5,6), duración de la vida productiva⁽⁷⁾, longevidad a los 84 meses de edad⁽⁸⁾, longevidad antes del desecho o censura⁽⁹⁾, permanencia⁽¹⁰⁾, esperanza de vida^(11,12) y vida de ordeño⁽¹³⁾. Las bajas estimaciones de las heredabilidades (0.02 a 0.11)⁽¹⁴⁾ son el resultado de una variabilidad residual relativamente alta, lo que puede explicarse por la complejidad del rasgo y la influencia considerable de factores ambientales como el manejo. La vida productiva de las vacas lecheras es difícil de mejorar genéticamente debido, entre otros factores, a que los datos completos están disponibles demasiado tarde para los animales de interés, por lo que una selección temprana de la longevidad, que sería lo adecuado, se imposibilita. Diferentes autores han mencionado que mejorar la longevidad identificando tempranamente a los animales superiores es posible utilizando rasgos correlacionados, como es el caso de Maugan *et al*⁽¹⁵⁾ que incluyeron en su modelo características correlacionadas entre ellas y con la longevidad funcional como la composición de la ubre, fertilidad, índice de células somáticas e incidencia de mastitis para poder incluir a animales jóvenes en la evaluación genética de longevidad de manera temprana en ganado Holstein; por otro lado, se han estudiado en vacas Montbeliarde italianas 13 características de tipo que estuvieron correlacionadas con la supervivencia, permitiendo su predicción temprana⁽¹⁶⁾; otros investigadores utilizaron correlaciones de 15 características de tipo con la vida de hato a los

48 meses de edad en ganado Guernsey⁽¹⁷⁾. La selección temprana también se puede lograr con la evaluación no lineal de datos censurados⁽¹⁸⁾ o utilizando longevidades predichas para vacas vivas además de los datos de longevidad completa^(8,12). Esta última metodología se utiliza en Estados Unidos de Norteamérica⁽⁸⁾ para evaluar longevidad de ganado lechero medida como meses en producción a los 84 meses de edad (MEP84) porque permite el uso de registros incompletos provenientes de vacas que aún siguen vivas al momento de la evaluación, comúnmente llamados registros censurados. El proceso se basa en la predicción fenotípica de los MEP84 de los animales aún no desechados, a partir de regresores poblacionales para extender la duración de vida productiva y su posterior ajuste para homologar varianzas, proceso similar al aplicado a la extensión de las lactaciones incompletas para la característica de producción de leche⁽¹⁹⁾. Adicionalmente, al ser MEP84 una variable continua, representa mejor la vida útil de una vaca y hace que la distribución de la variable se aproxime a la distribución normal, permitiendo disponer tanto de datos completos hasta el desecho de vacas de edades muy avanzadas como de datos censurados de vacas más jóvenes⁽⁸⁾. En México, la evaluación de longevidad en ganado Holstein se hace solo para machos utilizando un modelo de supervivencia⁽²⁰⁾, esto es una limitante porque se necesitan indicadores de vida temprana para ayudar a los ganaderos en la selección de animales que tienen más probabilidades de alcanzar su máximo potencial, por lo tanto la utilización de MEP84 y un modelo lineal, no solo permitirá realizar la evaluación de hembras directamente, también permitirá incluir información genómica en un futuro cercano. Un primer paso para implementar la evaluación de MEP84 en la población Holstein de México es la predicción de la variable en animales que aún estén activos o aquellos que por cualquier razón se desconozca su longevidad verdadera, por lo que el objetivo de este estudio fue predecir los meses en producción a los 84 meses de edad a partir de información productiva y reproductiva complementaria en registros de vacas Holstein de México, utilizando el modelo de regresión lineal simple desarrollado por VanRaden y Klaaskate⁽⁸⁾ y evaluar el ajuste de este modelo.

Material y métodos

Se usó información del sistema de control de producción de la Asociación Holstein de México. Se incluyó información de vida productiva observada de un total de 70,314 vacas con 1 a 5 partos porque no hubo vacas que iniciaran su sexta lactancia antes de los 84 meses. La variable dependiente se estableció como los meses en producción a los 84 meses de edad estableciendo un máximo de 10 meses en producción por cada lactación para no favorecer indirectamente a vacas con lactaciones extendidas⁽⁸⁾. Para poder predecir MEP84, se utilizaron las variables independientes incluidas en el modelo estadístico de Van Raden y Klaaskate⁽⁸⁾ y disponibles al terminar cada parto del 1 al 5, la cual consistió en los meses en producción acumulados (MACL), meses en producción en el último parto (MLPA), el estado de la lactación al momento de la eliminación o finalización de la lactación (EDL), el índice

de gestación al momento de la eliminación o finalización de la lactación (IDG), la interacción del hato-año y estación de primer parto y la edad al primer parto y la producción de leche medida en kilos ajustada a 305 días equivalente maduro (PE). Aunque este modelo⁽⁸⁾ incluyó la variable días secos, estos no se incluyeron en el modelo por mostrar variaciones no explicadas importantes (análisis no presentado en este estudio). El IDG fue igual a 1 si la vaca se encontraba gestante; se consideró gestante a la vaca si tenía más de 70 días de haber sido inseminada artificialmente o tenía diagnóstico de gestación o contó con parto subsiguiente al analizado o cero en cualquier otro caso. El índice del estado de la lactación (EDL) se codificó como cero cuando la vaca estaba seca o en ordeño de más de 305 días y como uno si la vaca se encontraba en ordeño dentro de los 305 días. También se consideró la edad al primer parto en meses en sus efectos lineal y cuadrático.

Para los cálculos se consideraron cinco escenarios, que representaron la cantidad de información con la que contaba la vaca para su predicción y dependieron del número de lactaciones completas con las que contaba. Es decir, si había terminado su primera lactación o su segunda lactación y así consecutivamente hasta su quinta lactación. El número de vacas que presentaron un parto completo fue de 26,704, dos partos completos 18,351, tres partos completos 10,496, cuatro partos completos 5,115 y hasta cinco partos completos 3,065. Lo dicho diferencia la MEP84 calculada en este estudio a la obtenida en la población de los Estados Unidos de Norteamérica, en donde la información que consideraron la obtuvieron a partir de diferentes grupos de edad⁽⁸⁾. En otras palabras, se ajustaron modelos separados para los animales eliminados durante su segunda, tercera, cuarta o quinta lactación, utilizando la información generada hasta el parto anterior. Se consideró como parto actual, la lactación durante la cual fue eliminada la vaca.

El modelo estadístico usado para la predicción de los MEP84 fue el siguiente:

$$MEP84_{ijklmnopq} = \mu + h_{ypp_i} + \beta_1 m_{acl_j} + \beta_2 m_{lpa_k} + \beta_3 idg_l + \beta_4 edl_m + \beta_5 pe_n + \beta_6 epp_o + \beta_7 epp^2_p + \varepsilon_{ijklmnopq}$$

Donde,

hypp es el hato-año de primer parto,

macl los meses en producción acumulados hasta el parto previo,

mlpa meses en producción en el parto actual,

idg índice de gestación en el parto actual,

edl estado de la lactación en el parto actual,

pe producción de leche estandarizada a 305 días EM en el parto actual,

epp edad al primer parto,

epp² el efecto cuadrático de la edad al primer parto,

$\varepsilon_{ijklmnopq}$ es el error aleatorio.

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$ y β_7 son los coeficientes de las regresiones lineales para las variables descritas. Para realizar los análisis, se usó el procedimiento GLM del software estadístico SAS⁽²¹⁾.

Resultados y discusión

En el Cuadro 1 se muestran los coeficientes de regresión y su valor de probabilidad, así como los coeficientes de determinación obtenidos del modelo para predecir la MEP84 a partir de información del primero, segundo, tercer, cuarto y quinto parto. El modelo explicó el 98, 96, 92, 79 y 44 % de la variación proveniente por los efectos incluidos para MEP84 para el primer hasta el quinto parto respectivamente.

Cuadro 1: Coeficientes de determinación, coeficientes de regresión y *P*-valor de las variables utilizadas en el modelo de predicción para MEP84 en los primeros cinco partos

Variable	MEP84				
	Primer parto	Segundo parto	Tercer parto	Cuarto parto	Quinto parto
	Coefficiente de regresión				
MACL, m	0.8951***	0.8188***	0.6669***	0.4123***	0.1414***
MLPA, m	0.0034 ^{NS}	0.0265***	0.0714***	0.1329***	0.1348***
EDL (0,1)	-0.0579**	0.0166 ^{NS}	0.1330 ^{NS}	0.1801 ^{NS}	0.1781 ^{NS}
IDG (0,1)	-0.7159***	-1.1221***	-1.7292***	-2.0632***	-1.4743***
PE, kg	0.0001***	0.0001***	0.0001***	0.0002***	0.0002**
R ² , %	98	96	92	79	44

MACL= meses en producción acumulados hasta el parto actual, MLPA= meses en producción en el parto actual, EDL= índice del estado de la lactación (0= en ordeño, 1= seca), IDG= índice de gestación (0= vacía, 1= gestante), PE= producción de leche en kg ajustada a 305 días EM en el parto actual, R²= coeficiente de determinación.

*** = menor de 0.001, ** = entre 0.001 y 0.01, * = entre 0.011 y 0.05, NS = arriba de 0.05

Para explicar el efecto de las variables independientes utilizadas en el modelo para predecir la MEP84 a través de los cinco partos se muestran las figuras 1 a la 5. Los resultados mostraron que los MACL fueron significativos en todos los partos y con valores altos en los primeros tres partos, indicando que cuando se incrementa un mes de MACL, se incrementa 0.66 meses de MEP84 relación que va disminuyendo conforme aumenta el número de parto (Figura 1). Este resultado se debe a que MACL aporta directamente a MEP84 ya que son meses en producción ya realizados y esto se refleja en un incremento del pronóstico de MEP84. Se reportaron aumentos de un mes para la misma variable⁽⁸⁾. Los MLPA fueron significativos a partir del segundo parto hasta el quinto, e indican que al aumentar un mes en

leche en el parto actual los MEP84 se incrementan en 0.026 para el segundo parto, en 0.071 para el tercer parto, en 0.133 para el cuarto parto y en 0.135 para el quinto, lo anterior puede deberse a dos factores: uno es la relación entre días en producción y producción total de leche, ya que a mayor producción de leche menor probabilidad de desecho; y el otro es que una vaca con más meses en producción en la última lactación está más cerca de llegar al final de la misma y se incrementa la posibilidad de iniciar una nueva lactación y con esto se eleva la esperanza de una mayor MEP84, además de que en general estas vacas presentan una menor probabilidad de tener problemas de locomoción o de salud, quedan gestantes con mayor facilidad y tienen mayores producciones de leche, lo que concuerda con lo dicho por Dallago *et al*⁽²²⁾.

Figura 1: Efecto de los meses en producción acumulados hasta el parto actual (MACL) sobre la MEP84

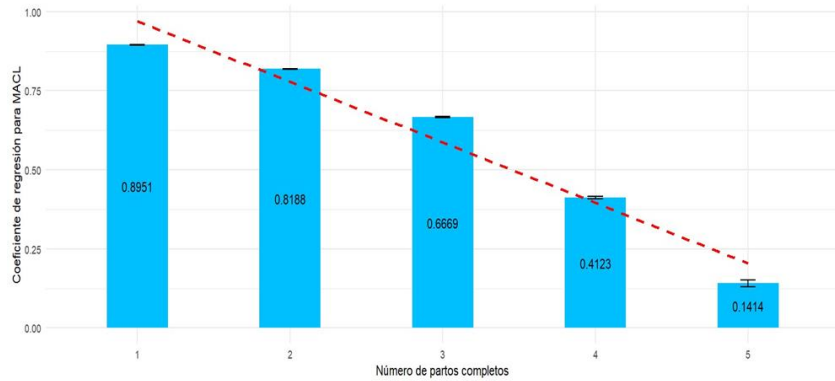
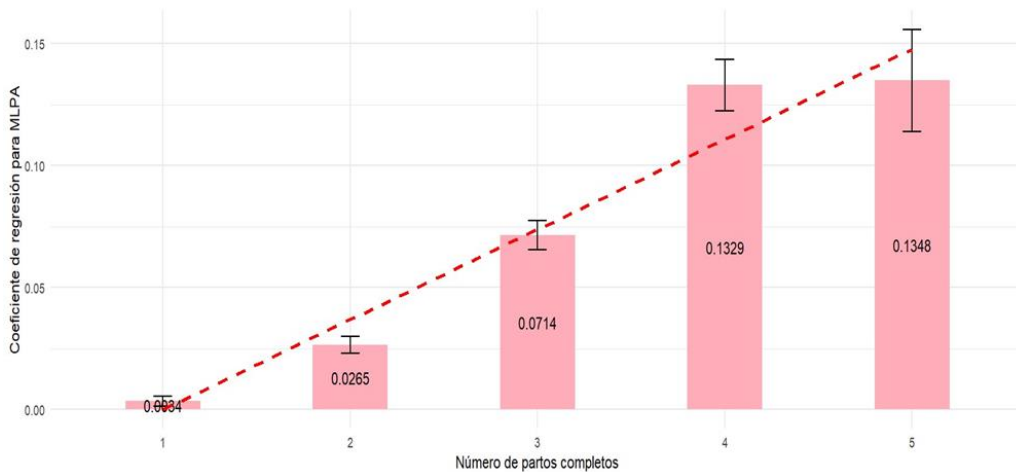


Figura 2. Efecto de los meses en producción en el parto actual (MLPA) sobre la MEP84



Los MLPA no fueron significativos al primer parto probablemente por la distancia en tiempo entre los MLPA de la primera lactación y la fecha de desecho de la vaca. Conforme se acerca la vaca al final de su vida productiva, los MLPA tienden a ser importantes en la predicción de MEP84 porque al tener mayores meses en producción en la lactación anterior predeciría que la vaca se mantuvo más tiempo en el hato productivo, debido a que tenía una alta producción o tenía mayor fertilidad o mejor salud; al contrario, cuando se tiene una vaca con una lactación previa corta en principio debería tener menor MEP84, esto podría deberse a que las condiciones productivas o reproductivas dentro del hato no fueron las mejores para ella y le ocasionaran tener menores meses en producción con una mayor probabilidad de que se deseche en la siguiente lactación. Aunque los coeficientes de regresión del estado de la lactación (EDL) fueron en magnitud similares a los de otras características como MLPA para los partos 2 a 5, solo fueron significativos para el primer parto. En el caso del primer parto, cuando la vaca está en ordeño, la predicción de MEP84 disminuye 0.06 meses con respecto a que si la vaca esté en periodo seco (Figura 3). Esto se podría deber a que cuando la vaca es primípara y termina su lactación sin reportar un secado, se encuentra en desventaja contra las vacas que terminan su ciclo con un secado por estar menos preparadas para iniciar un nuevo ciclo productivo y con ello disminuyen su esperanza de MEP84. Contradictoriamente, cuando la vaca terminó su tercera lactación sin un registro de secado, la predicción de MEP84 aumentó 0.13 meses ($P < 0.05$) debido, probablemente, a que la vaca ya está cerca de alcanzar su medición real de MEP84, y el que no cuente con información de la fecha de secado en este momento no es tan crítico en la predicción de MEP84. Por otra parte, cuando la vaca no estaba gestante (IDG) al finalizar la lactación previa, la predicción de MEP84 fue negativa en los cinco partos ($P < 0.0001$) con una tendencia que indica que va disminuyendo conforme aumenta el número de parto hasta disminuir 2.06 meses en el cuarto parto (Figura 4), lo que indica que el que la vaca no tenga asegurado un próximo parto al momento de la predicción, disminuye drásticamente el MEP84 predicho, lo que concuerda con lo reportado por varios autores^(1,23,24). Finalmente, el efecto de la PE sobre MEP84 fue significativo en los cinco partos indicando que al aumentar un kilo la producción de leche, los MEP84 predichos tiene un aumento de 0.0001 meses para los primeros tres partos y de 0.0002 meses para el cuarto y quinto parto (Figura 5). Esto puede reflejar el hecho de que cuando las vacas tienen una mayor producción de leche, los ganaderos tienden a darles más oportunidades de quedarse en el establo, incrementando sus MEP84⁽²⁰⁾. Sin embargo, la gran variación que existe en esta variable hace que el efecto sea pequeño comparado con los de las otras variables en el estudio. La edad al primer parto en su efecto lineal y cuadrático no fueron significativas en ningún parto.

Figura 3: Efecto del estado de la lactación (EDL) sobre la MEP84

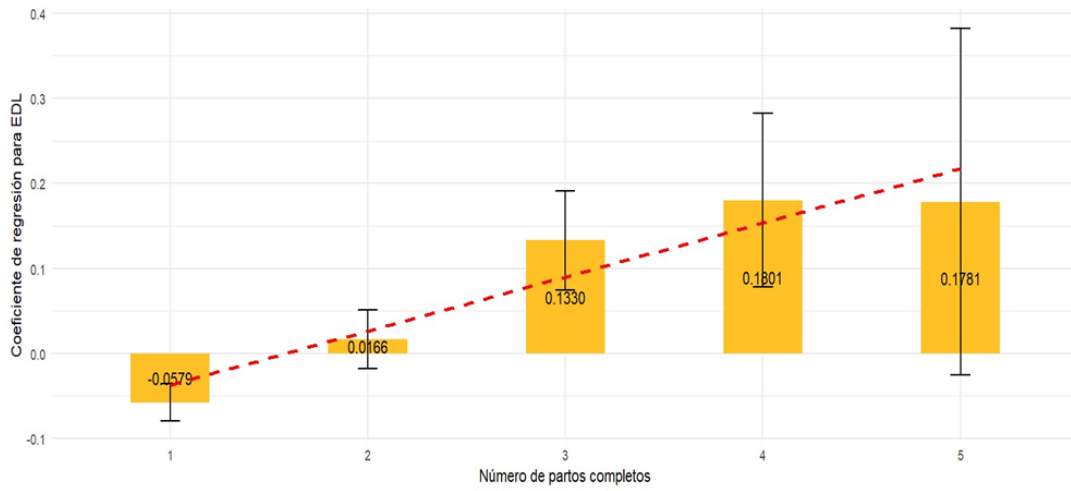


Figura 4: Efecto del índice de gestación (IDG) sobre la MEP84

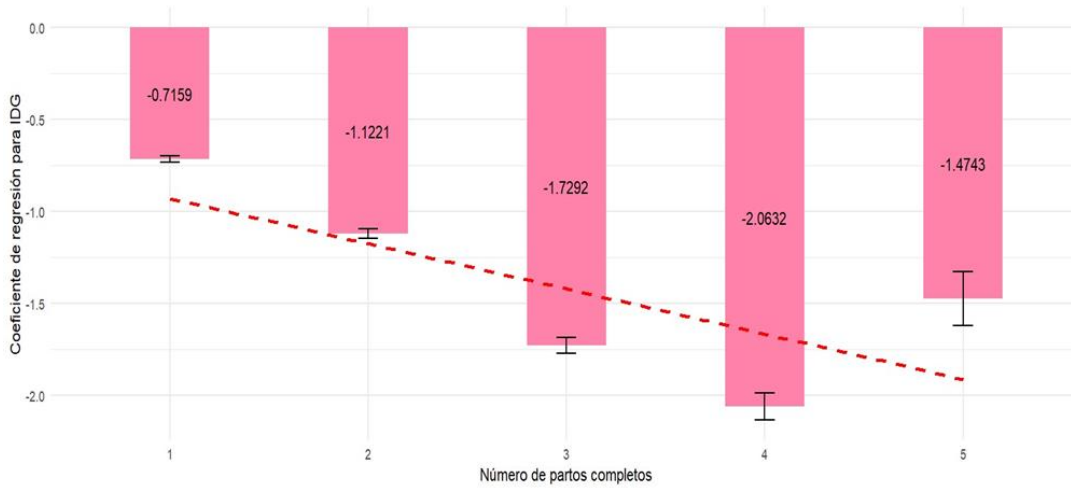
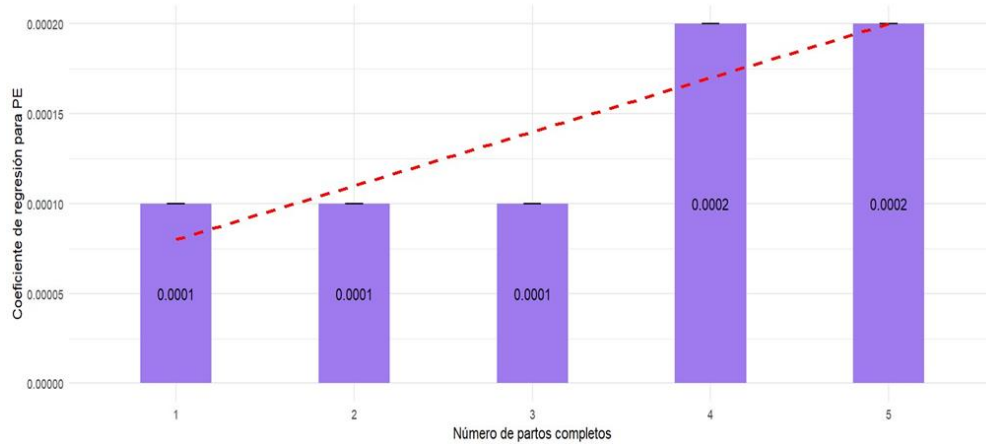


Figura 5: Efecto de la producción de leche a los 305 días EM (PE) sobre la MEP84

Conclusiones e implicaciones

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, es posible predecir con alta precisión MEP84 en vacas Holstein productoras de leche, con cuando menos una lactación terminada a partir de la producción de leche en kilogramos ajustada a 305 días EM, los meses en producción acumulados, los meses en producción de la última lactación, si la vaca está en producción o seca y si se encuentra gestante o no, variables comunes en los controles de producción lecheros. Por otro lado, el MEP84 pronosticado fue mayor para las vacas que tenían más meses en producción en su última lactación completa registrada, se encontraban en producción en su último registro (excepto vacas de segunda lactación) o estaban gestantes al final de la última lactación.

La predicción de MEP84 permitirá incluir en la evaluación genética de esta población a animales que no han terminado su vida productiva, información que ayudará a los productores en el mejoramiento genético de la longevidad en sus hatos.

Agradecimientos y fuente financiera

Investigación realizada gracias al financiamiento de la beca CONACYT 47153. Agradecimientos a la Asociación Holstein de México y al CENIDFyMA-INIFAP por la información y las facilidades brindadas para realizar este trabajo.

Literatura citada:

1. Hu H, Mu T, Ma Y, Wang X, Ma Y. Analysis of longevity traits in Holstein cattle: A Review. *Front Genet* 2021;(12):1-15. doi:10.3389/fgene.2021.695543.
2. De Vries A. Economic trade-offs between genetic improvement and longevity in dairy cattle. *J Dairy Sci* 2017;100(5):4184-4192. doi:10.3168/jds.2016-11847.
3. Tsuruta S, Misztal I, Lawlor TJ. Changing definition of productive life in US Holsteins: Effect on genetic correlations. *J Dairy Sci* 2005;88(3):1156-1165. doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72782-X.
4. Costa A, Bovenhuis H, Penasa M. Changes in milk lactose content as indicators for longevity and udder health in Holstein cows. *J Dairy Sci* 2020;103(12):11574-11584. doi.org/10.3168/jds.2020-18615.
5. Vukasinovic N, Moll J, Künzi N. Analysis of productive life in Swiss Brown cattle. *J Dairy Sci* 1997;80(10):2572-2579. doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76213-1.
6. Sasaki O, Aihara M, Hagiya K, Nishiura A, Ishii K, Satoh M. Genetic evaluation of the longevity of the Holstein population in Japan using a Weibull proportional hazard model. *Anim Sci J* 2011;83(2):95–102. doi:10.1111/j.1740-0929.2011.00943.
7. Caraviello DZ, Weigel KA, Gianola D. Prediction of longevity breeding values for US Holstein sires using survival analysis methodology. *J Dairy Sci* 2004;87(10):3518–3525. doi:10.3168/jds.S0022-0302(04)73488.
8. VanRaden PM, Klaaskate EJH. Genetic evaluation of length of productive life including predicted longevity of live cows. *J Dairy Sci* 1993;(76):2758-2764.
9. Raguz N, Jovanovac S. Analysis of the relationships between type traits and longevity in Croatian Simmental cattle using survival analysis. *Agric Conspec Sci* 2011;76(3):249-253.
10. Brickell JS, Wathes DC. A descriptive study of the survival of Holstein-Friesian heifers through to third calving on English dairy farms. *J Dairy Sci* 2011;(94):1831-1838. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2010-3710>.
11. Van Pelt M, Meuwissen THE, De Jong G, Veerkamp RF. Genetic analysis of longevity in Dutch dairy cattle using random regression. *J Dairy Sci* 2015;98(6):4117-4130. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-9090>.
12. Brotherstone S, Veerkamp RF, Hill WG. Predicting breeding values for herd life of Holstein-Friesian dairy cattle from lifespan and type. *Anim Sci* 1998;(67):405–411.

13. Zhang H, Liu AY, Wang H, Luo X, Yan X, Guo X, Li L, Liu, Su G. Genetic parameters and genome-wide association studies of eight longevity traits representing either full or partial lifespan in Chinese Holsteins. *Front Genet* 2021;(12):634986. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.634986>.
14. Forabosco F, Jakobsen JH, Fikse WF. International genetic evaluation for direct longevity in dairy bulls. *J Dairy Sci* 2009;(92):2338–2347.
15. Maugan LH, Rostellato R, Tribout T, Mattalia S, Ducrocq V. Combined single-step evaluation of functional longevity of dairy cows including correlated traits. *Genet Sel Evol* 2023;55(75):1-15. <https://doi.org/10.1186/s12711-023-00839-6>.
16. Kern EL, Cobuci JA, Costa CN, McManus CM, Campos GS, Almeida TP, *et al.* Genetic association between herd survival and linear type traits in Holstein cows under tropical conditions. *Ital J Anim Sci* 2014;(13):665–672.
17. Harris BL. Linear programming applied to dairy cattle selection [doctoral thesis]. Iowa, USA: University of Iowa State; 1992. <https://lib.dr.iastate.edu/rtd/9997>.
18. Mészáros G, Sölkner J, Ducrocq V. The Survival Kit: Software to analyze survival data including possibly correlated random effects. *Computer methods and programs in biomedicine* 2013;110(3):503-10. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2013.01.010>.
19. VanRaden PM, Dematawewa CM, Pearson RE, Tooker ME. Productive life including all lactations and longer lactations with diminishing credits. *J Dairy Sci* 2006;89(8):3213-3220. doi:10.3168/jds.S0022-0302(06)72596-6.
20. Abadía JR, Ruíz FJ, Vega VE, Montaldo HH. Análisis genético para vida productiva en ganado Holstein de México. *Rev Mex Cienc Pecu* 2016;7(1):1-14. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11242016000100001&lng=es.
21. SAS. SAS/STAT User's Guide (version 9.4 ed.). Cary NC, USA: SAS Inst. Inc. 2010.
22. Dallago GM, Wade KM, Cue RI, McClure JT, Lacroix R, Pellerin D, *et al.* Keeping dairy cows for longer: a critical literature review on dairy cow longevity in high milk-producing countries. *Animals* 2021;(11):808. <https://doi.org/10.3390/ani11030808>.
23. Pipino DF, Piccardi M, Lopez-Villalobos N, Hickson RE, Vázquez MI. Fertility and survival of Swedish Red and White × Holstein crossbred cows and purebred Holstein cows. *J Dairy Sci* 2023;106(4):2475-2486. doi:10.3168/jds.2022-22403.
24. Essl A. Longevity in dairy cattle breeding: A review. *Livest Sci* 1998;(57):79–89. doi.org/10.1016/S0301-6226(98)00160-2