

Tendencias de progreso genético del Hato Holstein Guerrero Noble del Valle de Vítor, Arequipa. Evaluación del valor genético para producción de leche (2019-2025)

Aguilar-Bravo, Herbert Mishaelf¹

Correo: haguilar@ucsm.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2161-5560>

Candia-Salas, Katiuska Dina²

Correo: katiuska.candia@estudiante.ucsm.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-5810-7332>

Flores-Calvo, Jessira Norma³

Correo: Jessira.flores@ucsm.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-0716-6385>

Huarca-Ccapatinta, María Magdalena⁴

Correo: maria.huarcacc@estudiante.ucsm.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-1060-338X>

Universidad Católica de Santa María: Arequipa, Arequipa, Perú.

Resumen

El progreso genético en bovinos lecheros es fundamental para mejorar la eficiencia productiva y la sostenibilidad en sistemas intensivos. El objetivo de este estudio fue evaluar los cambios en el valor genético para producción de leche (PTH: Prueba de Transmisión de Habilidad), repetibilidad, variabilidad genética y su distribución según curvas de Gauss de sementales utilizados en un hato Holstein del distrito de Vítor, Arequipa, Perú, durante 2019-2025. Se analizaron 311 animales en producción y recría, empleando registros de PTH y valores genéticos de sementales seleccionados para inseminación artificial. Los resultados indican un progreso genético positivo hacia 2025, con incremento en promedio de PTH (de 844 en 2019 a 1078 en 2025), disminución en variabilidad genética y mayor proporción de toros con valores superiores al promedio del hato. El análisis de distribución normal permitió identificar sementales en categorías de bajo, medio y alto valor genético por año. Se concluye que una selección genética bien dirigida,

¹ Docente en Universidad Católica de Santa María: Arequipa, Arequipa, Perú.

² Investigador nobel en Universidad Católica de Santa María: Arequipa, Arequipa, Perú

³ Investigador nobel en Universidad Católica de Santa María: Arequipa, Arequipa, Perú.

⁴ Investigador nobel en Universidad Católica de Santa María: Arequipa, Arequipa, Perú.

Tendencias de progreso genético del Hato Holstein Guerrero Noble del Valle de Vítor, Arequipa. Evaluación del valor genético para producción de leche (2019-2025)

Aguilar Bravo, Herbert Mishael; Candia Salas, Katiushka Dina; Flores Calvo, Jessira Norma y Huarca Ccapatinta, María Magdalena

apoyada en registros confiables y evaluación anual, representa una herramienta clave para mejorar la productividad del hato Holstein en condiciones agroecológicas específicas del valle de Vítor.

Palabras clave: mejoramiento genético, valor genético, variabilidad genética, producción de leche.

Genetic progress trends of the Holstein Herd Guerrero Noble of the Vítor Valley, Arequipa. Evaluation of genetic value for milk production (2019-2025)

Abstract

Genetic progress in dairy cattle is essential for improving productivity and sustainability in intensive production systems. This study aimed to assess changes in estimated breeding values for milk production (PTH), repeatability, genetic variability, and Gaussian distribution of sires used in a Holstein herd located in Vítor, Arequipa, Peru, from 2019 to 2025. Records from 311 animals in production and rearing, along with sire genetic merits from artificial insemination, were analyzed. Results show a positive genetic trend toward 2025, with increased average PTH (from 844 in 2019 to 1078 in 2025), reduced genetic variation, and a higher proportion of sires above the herd mean. Distribution analyses allowed identification of sires categorized as low, medium, and high genetic merit annually. We conclude that well-directed genetic selection supported by reliable records and annual evaluation is a key tool to improve the productivity of a Holstein herd under specific agroecological conditions in the Vítor valley.

Keywords: genetic improvement, genetic value, genetic variability, milk production.

Introducción

El progreso genético en bovinos lecheros constituye un aspecto fundamental para mejorar la eficiencia productiva y la sostenibilidad en sistemas de producción intensivos. La búsqueda de mayores volúmenes de producción lechera, de mejor calidad nutricional y de menor costo de producción, ha impulsado el desarrollo de estrategias de selección genética dirigidas y sostenidas a través del tiempo. Las

Tendencias de progreso genético del Hato Holstein Guerrero Noble del Valle de Vitor, Arequipa. Evaluación del valor genético para producción de leche (2019-2025)

Aguilar Bravo, Herbert Mishael; Candia Salas, Katiushka Dina; Flores Calvo, Jessira Norma y Huarca Ccapatinta, María Magdalena

actualizaciones genéticas de 2025 revelan que el progreso genético en bovinos Holstein ha sido extraordinario, con cambios de base de +89 kg en producción de leche, +5.7 kg en grasa y +4.7 kg en proteína, lo que demuestra que la selección genética bien dirigida genera mejoras sustanciales en la productividad de los hatos (Lactanet, 2025).

La Inseminación Artificial (IA) ha demostrado ampliamente su gran aporte para el mejoramiento genético en la ganadería lechera contemporánea, permitiendo la difusión masiva de genes de reproductores genéticamente superiores. Esta tecnología, en conjunto con programas de evaluación genética precisa y pruebas genómicas, ha hecho posible acelerar marcadamente el progreso genético. Específicamente, desde 2018, la introducción de pruebas genómicas ha permitido estimar el valor genético con el doble de confiabilidad, utilizando muestras de sangre o pelo, lo que ha acelerado enormemente el avance genético de las poblaciones (Lactanet, 2025).

El mejoramiento genético de las poblaciones de bovinas lecheras se fundamenta en parámetros genéticos específicos que permiten estimar el potencial hereditario de los individuos. La heredabilidad de la producción de leche en bovinos Holstein oscila entre 0.25 y 0.38, indicando que aproximadamente 25 a 38% de la variación fenotípica en esta característica se debe a diferencias genéticas aditivas (Guerra Rojas, 2024; Condori y Gonzáles (2025). Aunque la heredabilidad es moderada, esto implica que existe una base genética suficiente para ejercer una selección efectiva sobre esta característica productiva.

La evaluación genética de animales en sistemas contemporáneos se realiza mediante metodologías estadísticas robustas como el modelo BLUP (Best Linear Unbiased Prediction) y el Modelo Animal, que permiten predecir valores

genéticos estimados (VGE) considerando tanto la información propia del animal como la de sus parientes. Los valores genéticos estimados representan la superioridad o inferioridad genética de un animal en relación a una población de referencia, expresándose generalmente en unidades fenotípicas. La confiabilidad de estas evaluaciones, expresada mediante el índice de repetibilidad (R%), es un indicador fundamental que valida la solidez de los datos recolectados y la certeza de las predicciones realizadas.

En estudios recientes, Vásquez et al. (2021) reportaron valores genéticos estimados para producción de leche de 200.9 kg en vacas Holstein vivas, con más del 70% de valores positivos, indicando la presencia de animales genéticamente superiores disponibles para selección. Además, las evaluaciones genéticas de abril de 2025 incluyen por primera vez estimaciones de respuestas genéticas esperadas a cinco años, proyectando ganancias de +534 kg de leche, +42 kg de grasa y +28 kg de proteína para poblaciones bajo selección intensiva (Lactanet, 2025).

La variabilidad genética presente en una población constituye el recurso fundamental sobre el cual actúa la selección natural o artificial. La existencia de una amplia variación genética en características productivas, como la producción de leche, permite que los criadores ejerzan presión de selección diferencial sobre los individuos. La distribución de los valores genéticos en una población tiende a seguir una distribución normal o de Gauss, lo que permite clasificar a los individuos en categorías de mérito genético basadas en desviaciones estándar respecto a la media poblacional.

Esta clasificación es particularmente útil en programas de selección contemporáneos, ya que permite identificar animales con genética de élite (superiores a +2 desviaciones estándar), animales de calidad intermedia (entre ± 1

Tendencias de progreso genético del Hato Holstein Guerrero Noble del Valle de Vitor, Arequipa. Evaluación del valor genético para producción de leche (2019-2025)

Aguilar Bravo, Herbert Mishael; Candia Salas, Katiushka Dina; Flores Calvo, Jessira Norma y Huarca Ccapatinta, María Magdalena

desviación estándar) y animales de bajo mérito genético (inferiores a -2 desviaciones estándar). Estudios recientes indican que los animales jóvenes disponibles para selección presentan porcentajes crecientes de valores genéticos positivos, lo que sugiere una acumulación efectiva de genes favorables en las poblaciones bajo manejo selectivo (Vásquez et al., 2021).

El éxito de cualquier programa de mejoramiento genético depende principalmente de la disponibilidad de registros productivos, reproductivos y genéticos meticulosamente documentados. Los registros confiables permiten a los productores evaluar el rendimiento de su ganado, identificar áreas de mejora y tomar decisiones fundamentadas para optimizar la productividad y rentabilidad. En particular, los registros de producción de leche, valores genéticos estimados de sementales, parámetros de reproducción y datos de inseminación artificial constituyen herramientas esenciales para monitorear el progreso genético a lo largo del tiempo.

La evaluación sistemática de cambios en el valor genético promedio del hato, comparada contra estándares internacionales de referencia que se actualizan regularmente, proporciona información valiosa sobre la efectividad de las estrategias de selección implementadas. En 2025, la base genética internacional fue actualizada para reflejar el progreso alcanzado, pasando la población de referencia de vacas nacidas en 2015 a vacas nacidas en 2020, lo que evidencia el dinamismo del mejoramiento genético contemporáneo (Lactanet, 2025). Esta evaluación periódica permite ajustar oportunamente los criterios de selección de semillas, intensificar la presión de selección cuando sea necesario o modificar estrategias según los resultados observados.

Tendencias de progreso genético del Hato Holstein Guerrero Noble del Valle de Vitor, Arequipa. Evaluación del valor genético para producción de leche (2019-2025)

Aguilar Bravo, Herbert Mishael; Candia Salas, Katiushka Dina; Flores Calvo, Jessira Norma y Huarca Ccapatinta, María Magdalena

En años recientes (2023-2025), la sostenibilidad se ha convertido en un componente integral de los programas de mejoramiento genético en ganadería lechera. Las razas más productivas y eficientes permiten obtener más leche por selección, lo que reduce la huella ambiental por litro de producto. Más aún, la genómica ha permitido mejorar características de salud y longevidad; estudios de 2025 muestran que la raza Holstein ha logrado reducciones en recuentos de células somáticas a 216 células/mL, el nivel más bajo registrado históricamente, indicando avances sustanciales en resistencia a enfermedades como la mastitis (Lactanet, 2025).

En el contexto peruano, la región de Arequipa representa un centro importante de producción lechera, contribuyendo con el 15.3% de la producción nacional de leche en 2024. Sin embargo, esta región ha enfrentado desafíos significativos relacionados con factores ambientales adversos; en 2023, la sequía se redujo en más del 50% el número de proveedores de leche, disminuyendo de 3.500 proveedores en 2020 a 1.500 en 2023, lo que subraya la importancia crítica de seleccionar animales resilientes y eficientes en condiciones agroecológicas desafiantes (Portalechero, 2024; Midagri, 2024).

La ganadería lechera en Perú ha mostrado una recuperación positiva en 2024, con la producción nacional alcanzando 2.208.481 toneladas, en un contexto de márgenes positivos de rentabilidad para sistemas intensivos. Los principales desafíos enfrentados durante 2023, incluyendo la sequía y el fenómeno de El Niño 2023-2024, han puesto de manifiesto la necesidad de implementar programas de mejoramiento genético que prioricen no solo la productividad, sino también la adaptabilidad y la resiliencia de los animales a condiciones ambientales variables (Portalechero, 2024; Midagri, 2024).

En este contexto, los sistemas lecheros ubicados en condiciones específicas como el valle de Vítor en Arequipa requieren estrategias de selección genética que consideren la expresión óptima del potencial genético bajo las particularidades agroecológicas locales. Una genética bien dirigida, apoyada en registros confiables, evaluación anual sistemática, selección y herramientas modernas de evaluación como la genómica, representa una herramienta clave para mejorar la productividad y la sostenibilidad del hato bajo estas condiciones específicas.

El presente estudio se propone evaluar los cambios en el valor genético para producción de leche (PTH: Prueba de Transmisión de Habilidad), la repetibilidad de las evaluaciones, la variabilidad genética y su distribución según curvas de Gauss en sementales utilizados en un hato Holstein durante el período 2019-2025. Este análisis longitudinal permitirá determinar si las estrategias de selección genética implementadas han resultado en un progreso genético consistente y si la población ha logrado aproximarse o superar los estándares internacionales de referencia. Los resultados de esta investigación contribuirán a la comprensión de los patrones de mejoramiento genético en bovinos lecheros bajo condiciones agroecológicas específicas del valle de Vítor, proporcionando información valiosa para productores y técnicos del sector ganadero peruano.

1. Materiales y métodos

1.1. Área de estudio y población animal

El estudio se desarrolló en el establo Guerrero Noble, ubicado en la localidad del valle de Vítor, provincia y departamento de Arequipa, Perú, a una altitud aproximada de 2,400 msnm. La población objeto de estudio comprendió un total de 320 animales Holstein, de los cuales se analizaron 311 animales (vacas en producción, vacas secas, vaquillas y vaquillonas en recría). Los datos provienen

de registros productivos, reproductivos y genéticos meticulosamente documentados por el propietario del hato durante el período 2019-2025.

1.2. Área de estudio y población animal

La alimentación del hato consistió en una dieta balanceada con aproximadamente 40% de concentrado (mezcla de harina de maíz, torta de soya, polvillo de arroz, orujo de aceituna, harina de pescado, minerales y aditivos promotores de crecimiento) y 60% de forraje (ensilado de chala principalmente, complementado con heno de avena), con el fin de cubrir satisfactoriamente los requerimientos nutricionales de los animales y permitir la expresión óptima del potencial genético lechero.

El sistema de manejo fue semi-intensivo, con ordeño mecánico realizado dos veces al día. Los animales fueron manejados bajo protocolos estándar de sanidad, reproducción y bienestar animal, cumpliendo con los requerimientos de temperatura, ventilación e higiene del establo.

1.3. Recopilación de datos y variables analizadas

Se recopilaban sistemáticamente los siguientes datos para cada año del período 2019-2025:

- Valor genético estimado para producción de leche (PTH): Promedio anual del hato, máximo, mínimo y distribución.
- Valores genéticos de sementales: Identificación, código de registro, PTH y R% (repetibilidad o confiabilidad) de cada toro utilizado en inseminación artificial.
- Índices de repetibilidad (R%): Indicador de la confiabilidad del valor genético estimado para cada semental.
- Parámetros de variabilidad genética: Rango, desviación estándar, varianza, y distribución porcentual de toros según categorías de mérito.

- Distribución normal de valores genéticos: Análisis mediante curvas de Gauss (distribución normal) con clasificación de toros según desviaciones estándar (DE) respecto al promedio del hato.

1.4. Análisis estadístico e interpretación

Se adoptó una clasificación de toros basada en desviaciones estándar respecto al promedio del hato:

- Muy negativos o poco aptos: Valores < -2 DE
- Negativos/bajos: Valores entre -2 y -1 DE
- Bajo a mediocres: Valores entre -1 y 0 DE
- Mediocres: Valores entre 0 y $+1$ DE
- Buenos: Valores entre $+1$ y $+2$ DE
- Superiores: Valores $> +2$ DE

Esta metodología permite diferenciar el mérito genético individual de cada semental y estimar la contribución genética acumulada del hato frente a un estándar de referencia establecido internacionalmente.

Los resultados se analizaron a la luz de literatura científica reciente sobre mejoramiento genético, heredabilidad, variabilidad genética, selección genómica y estrategias de mejora continua en bovinos lecheros.

2. Resultados

2.1. Tendencia general del valor genético (PTH) 2019-2025

El análisis de la serie temporal del valor genético promedio del hato reveló la siguiente trayectoria:

Tabla 1. Evolución del valor genético (PTH) y parámetros genéticos del hato 2019-2025

Valor genético para producción de leche						Diferenciación con el promedio de la raza Holstein internacional PTH (B)
Año	Animales	Evaluados		PTH (LB)	R%	
	Presentados	N.º	%	Promedio	Promedio	
2019	15	15	100	844	98%	-595
2020	22	22	100	1145	91%	-153
2021	34	34	100	1258	90%	-77
2022	61	61	100	1045	87%	-313
2023	78	78	100	778	93%	-550
2024	89	89	100	1018	95%	-272
2025	12	12	100	1366	85%	288

2.1.1 Hito histórico en 2025: superación del estándar internacional

El resultado más destacado se observa en el año 2025, en el cual el promedio del establo (1366 LB) supera por primera vez al promedio internacional (1078 LB).

- *Diferencia positiva:* Se logra una diferenciación de +288, invirtiendo la tendencia histórica de estar por debajo del promedio.
- *Interpretación:* Esto sugiere que el grupo de animales evaluados en 2025 posee una genética de élite, superior a la referencia internacional utilizada en la tabla.

2.1.2 Tendencia de "Mejora - Caída - Recuperación"

La evolución genética no ha sido lineal, mostrando tres fases claras:

Tendencias de progreso genético del Hato Holstein Guerrero Noble del Valle de Vitor, Arequipa. Evaluación del valor genético para producción de leche (2019-2025)

Aguilar Bravo, Herbert Mishael; Candia Salas, Katiushka Dina; Flores Calvo, Jessira Norma y Huarca Ccapatinta, María Magdalena

- *Fase de mejora (2019-2021)*: El valor genético subió constantemente (de 844 a 1258), cerrando la brecha con el internacional casi por completo en 2021 (-77).
- *Fase de descenso (2022-2023)*: Hubo una caída notable en el valor genético promedio, tocando fondo en 2023 con un PTH de 778 y la brecha negativa más amplia desde el inicio (-550). Esto coincide con un aumento en la cantidad de animales evaluados, lo que podría indicar que, al ampliar el hato, se incluyen animales de menor valor genético.
- *Fase de recuperación y despegue (2024-2025)*: Se observa una recuperación en 2024 (1018) y el salto definitivo en 2025.

2.1.3 Relación entre cantidad de animales y calidad genética

Existe una recomendación interesante entre el número de animales evaluados y el promedio obtenido:

- *Expansión Masiva (2019-2024)*: El número de animales evaluados creció año tras año, pasando de 15 (2019) a un pico de 89 (2024). Durante los años de mayor expansión (2022-2023), el promedio genético cayó, lo cual es natural al diluir la genética de élite con más animales.
- *Selección Estricta (2025)*: En 2025, el número de animales baja restringido a 12 (de 89 el año anterior), pero el puntaje se dispara. Esto sugiere una selección muy rigurosa o que solo se presentaron/evaluaron los mejores ejemplares del establo para ese período.

2.1.4 Confiabilidad (R%) sostenida

A lo largo de los 7 años, el porcentaje de confiabilidad (R%) se ha mantenido alto y estable, oscilando entre 85% y 98%. Esto valida la solidez de los datos recolectados; las evaluaciones son técnicamente robustas y creíbles.

2.2. Valor genético para la producción de leche por índice de variabilidad

Se desarrolló un análisis completo de los valores genéticos enfocados en la producción de leche en relación con el índice de variabilidad obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 2: valor genético para producción de leche por índice de variabilidad

Año	Padres diferentes n	Máximo (Lb)	Mínimo (Lb)	Rango (Lb)	Superior al promedio de la raza %
2019	2	879	792	87	0
2020	3	1549	1090	459	33
2021	3	1549	1049	500	33
2022	9	2189	-391	2580	22
2023	12	2189	-122	2311	8
2024	12	1463	-486	1949	25
2025	3	1478	1054	424	67

2.2.1. Análisis general de la tendencia

La tabla 2 presenta una evolución compleja del valor genético (PTH) del hato Holstein Guerrero Noble durante siete años, reflejando tres fases claramente

Tendencias de progreso genético del Hato Holstein Guerrero Noble del Valle de Vitor, Arequipa. Evaluación del valor genético para producción de leche (2019-2025)

Aguilar Bravo, Herbert Mishael; Candia Salas, Katiushka Dina; Flores Calvo, Jessira Norma y Huarca Ccapatinta, María Magdalena

diferenciadas: expansión inicial, expansión masiva con diversidad genética y consolidación selectiva con progreso notable.

Fase 1: Línea base restringida (2019)

En 2019, el hato operaba con apenas 2 padres diferentes, lo que resultó en:

- *PTH promedio bajo*: 844 LB (la cifra más baja del período).
- *Rango genético limitado*: 87 LB (diferencia entre máximo y mínimo).
- 0% de animales superiores al promedio internacional (1439 LB).
- *Diferencia con el estándar*: -595 LB

Esta situación refleja una población genéticamente homogénea con muy poca variabilidad, limitando las opciones de selección y dejando al hato significativamente por debajo de los estándares internacionales de referencia.

Fase 2: Expansión rápida y aumento de variabilidad (2020-2021)

Durante 2020 y 2021, se observa una estrategia de diversificación genética con el incremento de padres diferentes:

2020:

- Padres: 3 (+50% respecto a 2019).
- PTH promedio: 1145 LB (incremento de +301 LB o +35.7% respecto a 2019).
- Rango: 459 LB (5.3 veces mayor que 2019).
- 33% de padres superiores al promedio internacional.
- Diferencia con estándar: -153 LB (mejora de +442 LB)..

2021:

- Padres: 3 (se mantiene)
- PTH promedio: 1258 LB (máximo histórico hasta ese momento, +113 LB respecto a 2020).

Tendencias de progreso genético del Hato Holstein Guerrero Noble del Valle de Vitor, Arequipa. Evaluación del valor genético para producción de leche (2019-2025)

Aguilar Bravo, Herbert Mishael; Candia Salas, Katiushka Dina; Flores Calvo, Jessira Norma y Huarca Ccapatinta, María Magdalena

- Rango: 500 LB (el mayor hasta 2023)
- 33% de padres superiores al promedio internacional.
- Diferencia con estándar: -77 LB (casi alcanza la paridad internacional).

Esta fase demuestra que la introducción selectiva de nuevos sementales de mayor valor genético genera mejoras sustanciales, cerrando casi completamente la brecha con el estándar internacional en solo dos años.

Fase 3: Expansión masiva con dilución genética (2022-2023)

El crecimiento acelerado del hato se acompañó de una estrategia de expansión numérica, pero con consecuencias en el valor genético promedio:

2022:

- Padres: 9 (+200% respecto a 2021)
- PTH promedio: 1045 LB (caída de -213 LB o -16,9% respecto a 2021).
- Rango: 2580 LB (extremadamente amplio, 5,2 veces mayor que 2021).
- Mínimo: -391 LB (valor negativo que indica sementales definitivamente inferiores).
- 22% de padres superiores al promedio internacional.
- Diferencia con estándar: -313 LB (retroceso de -236 LB respecto a 2021).

2023:

- Padres: 12 (el máximo del período).
- PTH promedio: 778 LB (la caída más profunda: -267 LB o -25,6% respecto a 2022).
- Rango: 2311 LB (casi tan amplio como 2022).
- Mínimo: -122 LB (sementales de valor genético profundamente negativo).
- 8% de padres superiores al promedio internacional (porcentaje más bajo).

Tendencias de progreso genético del Hato Holstein Guerrero Noble del Valle de Vitor, Arequipa. Evaluación del valor genético para producción de leche (2019-2025)

Aguilar Bravo, Herbert Mishael; Candia Salas, Katiushka Dina; Flores Calvo, Jessira Norma y Huarca Ccapatinta, María Magdalena

- Diferencia con estándar: -550 LB (la brecha más negativa del período).

Interpretación: La incorporación de 12 padres diferentes, muchos de ellos con valores genéticos mediocres o negativos, diluyó significativamente el valor promedio del hato. Esta decisión de priorizar la expansión numérica sobre la calidad genética resultó en un retroceso de 480 LB entre 2021 y 2023.

Fase 4: Recuperación y despegue selectivo (2024-2025)

A partir de 2024, se implementó una estrategia de selección rigurosa, priorizando la calidad sobre la cantidad:

2024:

- Padres: 12 (se mantiene el número de 2023).
- PTH promedio: 1018 LB (recuperación de +240 LB o +30,9% respecto a 2023).
- Rango: 1949 LB (reducción respecto a 2023).
- 25% de padres superiores al promedio internacional.
- Diferencia con estándar: -272 LB (mejora notable de -278 LB respecto a 2023).

2025:

- Padres: 3 (reducción drástica del 75% respecto a 2024).
- PTH promedio: 1366 LB (el más alto registrado, +348 LB o +34,2% respecto a 2024).
- Rango: 424 LB (el más bajo desde 2019, reflejando homogeneidad selectiva).
- 67% de padres superiores al promedio internacional (el porcentaje más alto).
- Mínimo: 1054 LB (todos los sementales están significativamente por encima del promedio).
- Diferencia con estándar: +288 LB (la primera vez que el hato SUPERA el estándar internacional, invirtiendo un déficit de 7 años).

2.2.2. Cambios en variabilidad genética

Tabla 3: Paradoja de la Variabilidad

Periodo	Padres	Rango (LB)	Significado
2019-2021	2-3	87-500	Aumento selectivo de variabilidad genética.
2022-2023	9-12	2311-2580	Máxima variabilidad por inclusión masiva de sementales heterogéneos
2024-2025	12-3	1949-424	Reducción de variabilidad por selección rigurosa de élite

El análisis revela una relación inversa entre variabilidad genética y progreso genético:

- 2022-2023: Mayor variabilidad (rango >2300) coincidió con el peor promedio genético (-550 LB respecto al estándar).
- 2025: Menor variabilidad (rango 424) coincidió con el mejor promedio genético (+288 LB respecto al estándar).

Esto demuestra que la variabilidad no es inherentemente beneficiosa: una población con amplia variabilidad que incluye muchos animales de bajo mérito genético genera efectos diluidos que reducen el progreso genético promedio. Por el contrario, una variabilidad controlada y selectiva, donde todos los sementales están dentro de rangos aceptables, es más efectiva para lograr progreso genético sostenido.

Implicaciones para la gestión del Hato

-2019-2021: Fase correcta de mejora gradual mediante introducción selectiva de sementales superiores.

Tendencias de progreso genético del Hato Holstein Guerrero Noble del Valle de Vitor, Arequipa. Evaluación del valor genético para producción de leche (2019-2025)

Aguilar Bravo, Herbert Mishael; Candia Salas, Katiushka Dina; Flores Calvo, Jessira Norma y Huarca Ccapatinta, María Magdalena

- 2022-2023: Fase problemática de expansión descontrolada, donde el crecimiento numérico comprometió la calidad genética.
- 2024-2025: Fase de corrección estratégica mediante selección rigurosa, demostrando que es posible revertir años de dilución genética en 12-24 meses mediante decisiones selectivas firmes.

3. Discusión

3.1. Tendencia general del valor genético (PTH) 2019-2025

Los resultados de este estudio revelan una trayectoria compleja del progreso genético en el hato Holstein Guerrero Noble durante el período 2019-2025, caracterizada por tres fases claramente diferenciadas. El valor genético estimado para producción de leche (PTH) experimentó una evolución dinámica que refleja tanto las fortalezas como los desafíos de la implementación de programas de selección genética en sistemas intensivos de producción lechera bajo condiciones agroecológicas específicas.

El incremento observado desde 844 LB en 2019 hasta 1366 LB en 2025 representa un avance del 61.8% en siete años, lo que sugiere un progreso genético sustancial impulsado principalmente por la selección diferencial de sementales. Sin embargo, la trayectoria no ha sido lineal. El período 2021-2023 caracterizado por una caída de 480 LB (de 1258 a 778) demuestra que la expansión numérica sin criterios genéticos rigurosos puede resultar en una dilución significativa del promedio genético del hato. Esta observación es consistente con la literatura contemporánea que señala que el progreso genético depende no solo del aumento en el número de animales, sino principalmente de la presión de selección ejercida sobre características económicamente relevantes.

3.2. Paradoja de la variabilidad genética

Uno de los hallazgos más relevantes de este trabajo es la demostración de una relación inversa entre variabilidad genética y progreso genético. Durante 2022-2023, cuando la variabilidad alcanzó su máximo (rango de 2311-2580 LB), el valor genético promedio fue el más bajo del período. Inversamente, en 2025, cuando se redujo la variabilidad (rango de 424 LB) mediante selección rigurosa, el hato alcanzó su máximo valor genético histórico (+288 LB sobre el promedio internacional).

Este patrón contraviene la percepción común de que mayor variabilidad genética siempre es deseable. La explicación radica en que una población con amplia variabilidad que incluye sementales de bajo mérito genético (valores negativos de hasta -486 LB en 2024) genera un efecto diluyente que compensa y supera los beneficios de los animales de élite. Las evaluaciones genéticas de 2025 de Lactanet evidencian este fenómeno a nivel global, demostrando que poblaciones genéticamente uniformes, pero de alta calidad generan mayor progreso que poblaciones heterogéneas que incluyen especímenes genéticamente mediocres.

3.3. Repetibilidad y confiabilidad de evaluaciones

La confiabilidad de las evaluaciones genéticas, expresada mediante el índice de repetibilidad (R%), se mantuvo alta y estable entre 85% y 98% a lo largo de los siete años evaluados. Este resultado valida la solidez de los registros productivos, reproductivos y genéticos documentados por el productor del Hato Guerrero Noble. La estabilidad de este parámetro es particularmente importante, ya que indica que las variaciones observadas en los valores genéticos no se debieron a

problemas en la calidad de los datos, sino a cambios reales en la composición genética de la población de sementales utilizados.

Las evaluaciones genéticas contemporáneas, en 2025, han revolucionado la estimación de confiabilidad mediante la implementación de métodos de un solo paso (Single-Step), que procesan simultáneamente información genealógica y genómica, resultando en evaluaciones más precisas y estables. Aunque el Hato Guerrero Noble no aparente estar utilizando estas metodologías de vanguardia, la alta consistencia de su R% sugiere que los protocolos de registro implementados son técnicamente robustos y comparables con estándares internacionales.

3.4. Contexto de sostenibilidad y adaptación

En el contexto peruano actual (2023-2025), los hatos lecheros enfrentan desafíos ambientales significativos. La sequía de 2023 en Arequipa redujo el número de proveedores de leche en más del 50%, de 3.500 en 2020 a 1.500 en 2023. Sin embargo, la recuperación en 2024 con márgenes positivos de rentabilidad ha demostrado que sistemas lecheros con genética de buena calidad y manejo adecuado pueden ser resilientes ante variabilidades climáticas.

El Hato Guerrero Noble, ubicado a 2.400 msnm en el valle de Vítor, opera bajo condiciones agroecológicas desafiantes. El manejo semi-intensivo, con alimentación balanceada (40% concentrada, 60% forraje) y ordeño mecánico dos veces al día, proporciona un ambiente relativamente favorable para la expresión del potencial genético. Sin embargo, las variaciones en la disponibilidad de forraje y las fluctuaciones de temperatura pueden afectar diferencialmente a animales de diferentes méritos genéticos.

Estudios recientes demuestran que la interacción entre genotipo y ambiente es crítica en sistemas intensivos. Animales genéticamente superiores para

producción de leche pueden presentar correlaciones genéticas negativas con características reproductivas, requiriendo un equilibrio en los criterios de selección. La persistencia de problemas reproductivos en ganado de alto mérito productivo ha motivado que evaluaciones genéticas contemporáneas, en 2025, incluyan caracteres de salud, longevidad y eficiencia proteica, no solo volumen de leche.

3.5. Evaluación del progreso relativo a estándares internacionales

Un hallazgo particularmente relevante es que el hato alcanzó por primera vez en 2025 un valor genético (+288 LB) superior al promedio internacional de referencia (1078 LB). Este logro revierte una tendencia de 7 años de déficit genético, indicando que las decisiones de selección implementadas en 2024-2025 han sido efectivas. Sin embargo, debe considerarse que el número de animales evaluados en 2025 (solo 12 individuos) es sustancialmente menor que en años anteriores, sugiriendo que este resultado podría representar una selección particularmente rigurosa de élite para evaluación, más que un reflejo del promedio de la población total del hato (320 animales).

Las evaluaciones genéticas internacionales de 2025 indican que el progreso genético global en Holstein ha sido extraordinario, con cambios de base que representan +89 kg en producción de leche desde la actualización anterior. Esto sugiere que los estándares internacionales se actualizan continuamente para avances genéticos de poblaciones bajo selección intensiva. El Hato Guerrero Noble, al aproximarse ahora a estos estándares en 2025, está alineado con tendencias genéticas globales.

3.6. Desafíos de endogamia y diversidad genética

Un aspecto crítico no limpiamente analizado en los datos, pero relevante para interpretación futura es el riesgo de endogamia. Las evaluaciones genéticas de 2025 revelan que las poblaciones Holstein globales han experimentado un aumento del 28% en tasas de endogamia desde 2015. Con solo 3 padres diferentes en 2025, el hato Guerrero Noble podría estar exponiéndose a riesgos de endogamia acelerada si estos sementales tienen ancestría común.

La endogamia reduce la variabilidad genética y puede generar depresión endogámica que afecta caracteres de importancia económica como fertilidad, resistencia a enfermedades y longevidad. Cada aumento del 1% en el coeficiente de endogamia esperado (EFI) está asociado con reducciones aproximadas de 64 libras en producción de leche. Por lo tanto, aunque la reducción a 3 padres ha mejorado el promedio genético para la producción de leche, es crítico que estos sementales sean genéticamente distantes para evitar la depresión endogámica futura.

4. Limitaciones y perspectivas futuras

Este estudio, aunque proporciona análisis valiosos del progreso genético en un hato específico, presenta limitaciones inherentes. Primero, el análisis se restringe a un hato individual, limitando la generalización de hallazgos a otros sistemas lecheros. Segundo, no se incluyeron análisis de características reproductivas, sanitarias o de longevidad, que son importantes componentes de aptitud genética integral. Tercero, aunque el análisis de variabilidad genética es novedoso, no se estimaron formal y estadísticamente los componentes de varianza de los valores genéticos.

Tendencias de progreso genético del Hato Holstein Guerrero Noble del Valle de Vitor, Arequipa. Evaluación del valor genético para producción de leche (2019-2025)

Aguilar Bravo, Herbert Mishael; Candia Salas, Katiushka Dina; Flores Calvo, Jessira Norma y Huarca Ccapatinta, María Magdalena

Las investigaciones futuras deben incluir: (1) análisis genómico de los sementales para estimar coeficientes de endogamia y similitud genética; (2) evaluación de características funcionales (fertilidad, mastitis, longevidad) en relación a valores genéticos para producción; (3) comparación de esta población con otros hatos lecheros del valle de Vitor y Arequipa; y (4) proyecciones de progreso genético esperado bajo diferentes escenarios de selección.

Conclusión

El análisis de tendencias de progreso genético del Hato Holstein Guerrero Noble (2019-2025) demuestra que el mejoramiento genético sostenido es factible incluso bajo condiciones agroecológicas desafiantes, pero requiere decisiones estratégicas consistentes. La paradoja observada entre variabilidad genética y progreso genético subraya que la calidad supera la cantidad en programas de selección. La superación del estándar internacional en 2025 valida las decisiones de selección rigurosas implementadas en 2024-2025, aunque futuras iniciativas deben vigilar riesgos de endogamia y equilibrio de características económicamente relevantes.

La confiabilidad sostenida de las evaluaciones genéticas (R% 85-98%) proporciona una base sólida para la toma de decisiones reproductivas. Los hallazgos de este estudio contribuyen a la comprensión de patrones de mejoramiento genético en bovinos lecheros Holstein bajo condiciones de sierra peruana, demostrando que registros confiables y evaluación anual sistemática son herramientas clave para alcanzar productividad sostenible en sistemas intensivos.

Referencias

- Guerra Rojas, M. (2024). Parámetros genéticos para características productivas en bovinos Holstein bajo diferentes condiciones climáticas. *Revista de Producción Animal*, 36(1), 1-15.
- Lactanet. (2025). Evaluaciones genéticas de abril de 2025: cambios de base y respuestas genéticas esperadas en bovinos lecheros. Recuperado de <https://www.thebullvine.com/es/tag/dairy-genetic-evaluacion-2025/>
- Midagri. (2024). El sector lechero se recupera tras casi tres años de crisis. *Informe Agrícola Peruano*. Recuperado de <https://portalechero.com/peru-sector-lechero-se-recupera-tras-casi-tres-anos-de-crisis/>
- Portalechero. (2024). Perú: Sector lechero se recupera tras casi tres años de crisis. *Portal Lechero Latinoamericano*. Recuperado de <https://portalechero.com/peru-sector-lechero-se-recupera-tras-casi-tres-anos-de-crisis/>
- Condori, J. y Gonzáles, G. (2025). Estructura poblacional y parámetros productivos y reproductivos de ganado Brown Swiss criados en Cusco, Perú. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 36(2). <https://doi.org/10.15381/rivep.v36i2.28554>
- Vásquez, N., García, J. y López, A. (2021). Tendencia genética y fenotípica de la producción de leche en vacas Holstein del valle de Huaura, Perú. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 32(1), 1-12.

Tendencias de progreso genético del Hato Holstein Guerrero Noble del Valle de Vítor, Arequipa. Evaluación del valor genético para producción de leche (2019-2025)

Aguilar Bravo, Herbert Mishaelf; Candia Salas, Katiuska Dina; Flores Calvo, Jessira Norma y Huarca Ccapatinta, María Magdalena

Declaración de conflicto de interés y originalidad

Conforme a lo estipulado en el *Código de ética y buenas prácticas* publicado en *Revista Ceres*, los autores *Aguilar Bravo, Herbert Mishaelf; Candia Salas, Katiuska Dina; Flores Calvo, Jessira Norma y Huarca Ccapatinta, María Magdalena*; declaran al Comité Editorial que no tienen situaciones que representen conflicto de interés real, potencial o evidente, de carácter académico, financiero, intelectual o con derechos de propiedad intelectual relacionados con el contenido del artículo: *Tendencias de progreso genético del Hato Holstein Guerrero Noble del Valle de Vítor, Arequipa. Evaluación del valor genético para producción de leche (2019-2025)*, en relación con su publicación. De igual manera, declaran que el trabajo es original, no ha sido publicado parcial ni totalmente en otro medio de difusión, no se utilizaron ideas, formulaciones, citas o ilustraciones diversas, extraídas de distintas fuentes, sin mencionar de forma clara y estricta su origen y sin ser referenciadas debidamente en la bibliografía correspondiente. Consienten que el Comité Editorial aplique cualquier sistema de detección de plagio para verificar su originalidad.

Los autores declaran que en la preparación de este manuscrito no utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa para la redacción de textos o interpretación de datos.