

Caracterización de los sistemas ganaderos bovinos y factores determinantes de la productividad lechera en la provincia de Vélez, Santander (Colombia)

Characterization of cattle farming systems and determinants of milk productivity in the province of Vélez, Santander (Colombia)

Vargas Díaz, Ruy Edeymar^{1*}


*Lesmes Suarez, Juan Carlos*²

*Zuñiga López, Aldemar*³


*Ahumada Beltrán, Diego Germán*⁴

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia, Bogotá, Colombia

¹rvargas@agrosavia.co 

²jlesmes@agrosavia.co 

³azuniga@agrosavia.co 

⁴dahumada@agrosavia.co 

Recibido/received:19/11/2025 Corregido/revised:11/02/2026 Aceptado/accepted: 03/06/2026

Resumen: Los sistemas de producción bovina en la provincia de Vélez Santander de Colombia son esenciales para la seguridad alimentaria, el empleo rural y la estabilidad territorial. Sin embargo, enfrentan limitaciones asociadas con la baja productividad, la degradación del suelo y la escasa asistencia técnica, lo que restringe el avance hacia sistemas sostenibles y la participación en programas de mejoramiento. Ante este panorama, se realizó una caracterización integral orientada a identificar la estructura productiva, técnica y socioeconómica de los sistemas ganaderos y de los factores que determinan la productividad lechera, como base para procesos de transición hacia modelos sostenibles. Se aplicó una encuesta semiestructurada a 146 productores de los municipios de Bolívar, Chipatá, Cimitarra, Guavatá, El Peñón, Landázuri, La Paz, Puente Nacional y Vélez. Se recolectó información relacionada con los componentes socioeconómico, técnico productivo y biofísico de las unidades productivas. Los datos se analizaron mediante análisis multivariado usando Análisis de Redundancia. Los resultados evidenciaron que la productividad lechera está determinada por la integración entre factores estructurales, de manejo y humanos, donde la escala productiva y la tecnificación del ordeño influyen directamente en la eficiencia del sistema. Los sistemas más tecnificados alcanzan mayores rendimientos, resaltando la necesidad de fortalecer la planificación forrajera y la gestión del recurso humano.

Palabras clave: Análisis multivariado; sistemas ganaderos; producción lechera; tecnificación ordeño

* Autor de correspondencia
Correo: rvargas@agrosavia.co



Abstract: Cattle production systems in the province of Vélez (Santander) are essential for food security, rural employment and territorial stability. However, they face constraints associated with low productivity, soil degradation and poor technical assistance, which restricts progress towards sustainable systems and participation in breeding programmes. Against this backdrop, a comprehensive characterization was carried out aimed at identifying the productive, technical and socioeconomic structure of livestock systems and the factors that determine dairy productivity, as a basis for transition processes towards sustainable models. A semi-structured survey was applied to 146 producers in the municipalities of Bolívar, Chipatá, Cimitarra, Guavatá, El Peñón, Landázuri, La Paz, Puente Nacional and Vélez. Information related to the socioeconomic, technical, productive and biophysical components of the productive units was collected. Data was analyzed using multivariate analysis using Redundancy Analysis. The analysis showed that milk productivity is determined by the integration between structural, management and human factors, where the productive scale and the technification of milking directly influence the efficiency of the system. More technical systems achieve higher yields, highlighting the need to strengthen forage planning and human resource management.

Keywords: Multivariate analysis; livestock systems; dairy production; modernization of milking practices

Introducción

En términos económicos, el sector agropecuario representa un componente fundamental dentro de los sistemas productivos en Colombia, al ser uno de los mayores contribuyentes al Producto Interno Bruto (PIB) nacional. Este sector aporta aproximadamente el 9.30% del PIB total, dentro del cual los sistemas de producción bovina contribuyen con el 20% del PIB agropecuario y el 46% del PIB pecuario, evidenciando su relevancia estratégica en la economía nacional (DANE, 2025). En tal sentido, la ganadería bovina se constituye como uno de los principales ejes del desarrollo rural colombiano, aportando de manera significativa a la seguridad alimentaria, el empleo y la economía nacional.

Sin embargo, los sistemas de producción en las regiones andinas se caracterizan por su alta heterogeneidad en aspectos estructurales, tecnológicos, humanos y ambientales, lo cual repercute en amplias brechas de productividad y sostenibilidad (Cruz et al., 2023a; Mavisoy et al., 2025). En el caso del departamento de Santander, es importante destacar que ocupa la quinta posición a nivel nacional entre las regiones con mayor número de predios pecuarios dedicados a la ganadería, con un 7.09% del total nacional, equivalente a 44638 predios. En particular, la provincia de Vélez concentra 10977 predios y una población aproximada de 580390 animales (ICA, 2025).

Bajo este contexto productivo cabe señalar, que la producción lechera desempeña un papel esencial en la seguridad alimentaria nacional, al proveer un alimento de alta densidad nutricional rico en proteínas de alto valor biológico, calcio y micronutrientes que contribuye significativamente a la alimentación básica de la población rural (Durana et al., 2023). De esta forma, la producción láctea cumple con una función clave a nivel socioeconómico, al sustentar buena parte de los ingresos rurales, especialmente en zonas de montaña de la región andina colombiana, donde la producción se desarrolla

bajo sistemas familiares de pequeña escala (Enciso et al, 2021). En este contexto, es posible evidenciar el papel estratégico y fundamental de la ganadería en la economía local, constituyéndose en una de las principales fuentes de sustento y desarrollo para esta provincia.

Desde el punto de vista ambiental, la provincia de Vélez, se caracteriza por una notable diversidad agroecológica, al integrar zonas de trópico alto, medio y bajo, cada una con condiciones diferenciadas de altitud, temperatura, precipitación y tipos de suelos. Esta heterogeneidad influye directamente en la disponibilidad y calidad de los recursos forrajeros, así como en las estrategias de manejo empleadas por los productores. Las variaciones en la topografía condicionan la accesibilidad, el uso del suelo y las prácticas de conservación, mientras que los distintos grados de tecnificación y adopción de prácticas sostenibles determinan la eficiencia productiva y la rentabilidad de los sistemas. Por ello, comprender la dinámica productiva en esta provincia requiere un enfoque integral y multidimensional, que considere tanto los factores biofísicos y climáticos como los aspectos socioeconómicos y tecnológicos que inciden en la productividad y sostenibilidad de la actividad ganadera.

El análisis de esta diversidad requiere la aplicación de herramientas estadísticas multivariadas que permitan identificar los principales gradientes de variación entre unidades productivas y cuantificar la influencia relativa de variables estructurales, humanas y ambientales sobre la producción de leche. A diferencia de los enfoques univariados tradicionales, los métodos multivariados como el análisis de correlación, la selección progresiva de variables (forward stepwise) y el Análisis de Redundancia (ADR) facilitan la interpretación conjunta de múltiples factores interdependientes, reduciendo el riesgo de multicolinealidad y permitiendo una evaluación más precisa de la complejidad de los sistemas agropecuarios (Warton, 2022).

Estos métodos son especialmente útiles en estudios de caracterización productiva, donde la respuesta depende simultáneamente de variables estructurales (tamaño y subdivisión del terreno), biológicas (composición del hato), humanas (mano de obra y especialización laboral) y tecnológicas (tipo y frecuencia de ordeño). Investigaciones recientes en Colombia han demostrado que el uso de enfoques multivariados permite distinguir patrones de intensificación productiva y asociarlos con factores de manejo y tecnificación en sistemas lecheros de trópico alto (Mavisoy et al., 2025; Salas et al., 2024). En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo caracterizar los sistemas ganaderos de la provincia de Vélez mediante la recopilación de información socioeconómica, técnica y biofísica de 146 unidades productivas, y aplicar análisis multivariados para identificar los factores que explican las diferencias en la producción lechera. Este enfoque permite establecer relaciones cuantitativas entre las dimensiones estructurales y de manejo, y constituye una herramienta de apoyo para orientar políticas de desarrollo rural y estrategias de sostenibilidad en la ganadería colombiana.

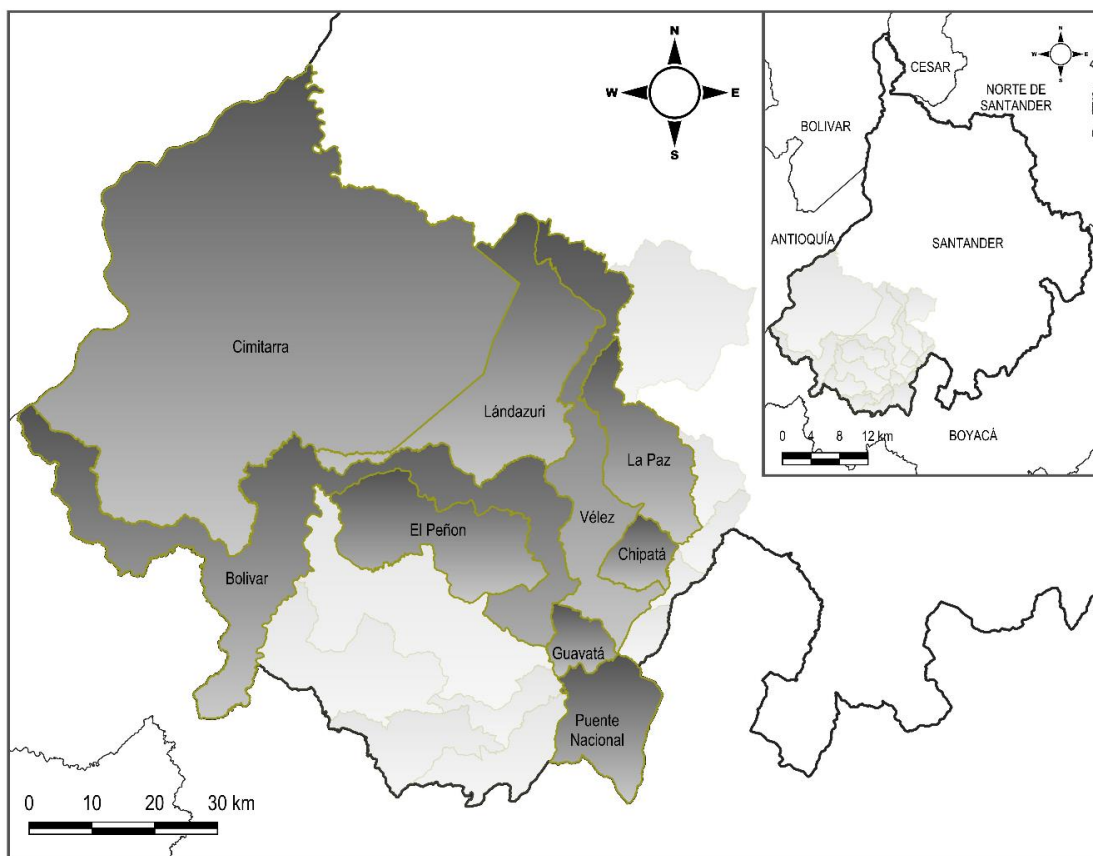
Material y Métodos

En el área de estudio, se seleccionaron nueve de los diecinueve municipios que conforman la provincia de Vélez (Figura 1), con base en su relevancia en la producción bovina y en la variabilidad de las condiciones ambientales que presentan. Los municipios seleccionados se ubican en un rango

altitudinal que va desde los 120 hasta los 3200 metros sobre el nivel del mar, presentando temperaturas medias entre 16 y 28 °C y precipitaciones anuales que oscilan entre 1300 y 2100 mm (MADS, 2015). Esta variabilidad en los factores climáticos y fisiográficos permitió representar adecuadamente los distintos contextos productivos existentes en la provincia, constituyendo una base sólida para la caracterización de los sistemas de producción bovina desarrollados por pequeños y medianos productores.

Figura 1

Municipios caracterizados en la provincia de Vélez



Selección de productores y tamaño de muestra

Se utilizó un muestreo no probabilístico por conveniencia, dado que no se dispone de un marco muestral actualizado de productores bovinos en la región. La caracterización de los sistemas de producción se realizó mediante el desarrollo de tres talleres rurales participativos, en los que se aplicó una encuesta semiestructurada a 146 productores de los municipios priorizados de la provincia de Vélez (Tabla 1). Los criterios de inclusión fueron: (i) desarrollar actividad comercial en sistemas de producción de leche o doble propósito en ambientes del trópico alto, medio y bajo de la región andina colombiana, (ii) aceptar participar voluntariamente mediante consentimiento informado, y (iii) completar la totalidad de la encuesta. Tras la depuración de datos incompletos, la muestra final analizada fue de 109 unidades productivas (UP).

Tabla 1
Distribución de productores encuestados por municipio

Municipio	Número de encuestados	Porcentaje (%)
Bolívar	3	2.05
Chipatá	3	2.05
Cimitarra	54	36.99
Guavatá	3	2.05
El Peñón	3	2.05
Landázuri	12	8.22
La Paz	12	8.22
Puente Nacional	11	7.53
Vélez	45	30.82
Total	146	100.00%

Instrumento de recolección de datos y variables

La encuesta semiestructurada fue validada mediante juicio de tres expertos en producción bovina y metodologías participativas, obteniendo un índice de validez de contenido (IVC) de 0.86. Posteriormente, se realizó una prueba piloto con 10 productores de un municipio no incluido en el estudio (Barbosa), lo que permitió ajustar la redacción de preguntas ambiguas. Se recopiló información de los componentes socioeconómico, técnico-productivo y biofísicos asociados a las UP. Para la caracterización de los sistemas ganaderos se emplearon 31 variables explicativas, organizadas en siete categorías funcionales, integrando dimensiones estructurales, productivas, humanas y ambientales del sistema (Tabla 2). Este enfoque multidimensional ha sido ampliamente utilizado en estudios recientes de caracterización de sistemas de producción bovina en Colombia, al permitir identificar tipologías productivas, niveles de sostenibilidad y brechas tecnológicas mediante el análisis conjunto de variables sociales, técnicas y ambientales (González et al., 2020; Cruz et al., 2023a; Cruz et al., 2024b). Las siete categorías funcionales fueron:

Estructura de finca (n = 3): incluye el área ganadera (hectáreas), el número de potreros destinados a la actividad bovina y la tipología del terreno (plano, ondulado o quebrado).

Composición del hato (n = 5): número de vacas en producción y no producción, terneros, novillas y novillos.

Recursos humanos (n = 7): número total de trabajadores, diferenciando personal permanente, temporal, hombres, mujeres y operarios de ordeño.

Infraestructura y manejo del ordeño (n = 4): número de potreros con sombra, número de bebederos por potrero, tipo de ordeño (manual, mecánico o mixto) y frecuencia de ordeños diarios.

Características del productor (n = 3): género, años de experiencia en la actividad ganadera y nivel educativo.

Sistema productivo (n = 2): tipo de producción (leche o doble propósito) y vinculación con la producción (propietario, administrador, arrendatario u otro).

Condiciones ambientales y de infraestructura (n = 7): topografía, tipo de sombra (natural, artificial o mixta), tipo de cerca, fuente de agua, condiciones del corral y establo, y tipo de vía de acceso.

Tabla 2

Variables incluidas en el análisis organizadas por categoría funcional

Categoría funcional	Tipo de variable	Variable	Unidad / Niveles
Producción de leche (Y)	Cuantitativa (respuesta)	Total litros de leche por día	Litros/día
	Cuantitativa (respuesta)	Litros de leche vaca por día	Litros/vaca/día
Estructura de la finca	Cuantitativa	Número de hectáreas ganaderas	ha
	Cuantitativa	Número de potreros en ganadería	Unidad
	Catógica	Tamaño de la finca	Menos 5 ha; Entre 5 y 10 ha; Más de 10 ha; Entre 10 y 20 ha; Más de 20 ha
Composición del hato	Cuantitativa	Total de vacas en producción	Cabezas
	Cuantitativa	Total de vacas no productivas	Cabezas
	Cuantitativa	Total de terneros	Cabezas
	Cuantitativa	Total de novillas	Cabezas
	Cuantitativa	Total de novillos	Cabezas
Recursos humanos	Cuantitativa	Número de trabajadores	Personas
	Cuantitativa	Trabajadores permanentes	Personas
	Cuantitativa	Trabajadores temporales	Personas
	Cuantitativa	Trabajadores hombres	Personas
	Cuantitativa	Trabajadores mujeres	Personas
	Cuantitativa	Número de hombres en el ordeño	Personas
	Cuantitativa	Número de mujeres en el ordeño	Personas

Categoría funcional	Tipo de variable	Variable	Unidad / Niveles
Infraestructura	Cuantitativa	Número de potreros con sombra	Número
	Catagórica	Número de bebederos en el potrero	Uno; Dos; Más de dos
Manejo de ordeño	Catagórica	Tipo de ordeño	Manual; Mecánico fijo; No ordeña
	Catagórica	Número de ordeños	Uno; Dos
Características del productor	Catagórica	Género	Masculino; Femenino
	Catagórica	Años en producción pecuaria	Menos de un año; Entre 1 y 3 años; Más de tres años y menos de 5; Más de 5 años y menos de 10; Más de 10 años
	Catagórica	Nivel educativo	Primaria; Secundaria; Técnica; Universitaria
	Catagórica	Tipo de producción	Leche; Carne; Doble propósito
Sistema productivo	Catagórica	Tipo de vinculación con la propiedad	Propietario; Administrador; Arrendatario; Otro
	Catagórica	Topografía	Plana; Ondulada; Plana/Ondulada; Quebrada
Condiciones ambientales y de infraestructura	Catagórica	Tipo de sombra	Natural; Artificial; Natural–Artificial; Ninguna
	Catagórica	Tipo de cerca	Púa; Eléctrica; Mixta (Púa y eléctrica); Viva
Condiciones ambientales y de infraestructura	Catagórica	Tipo de fuente de agua	Natural; Artificial; Natural, Artificial; Combinada
	Catagórica	Condición del corral	No hay; Buena; Regular; Mala; Deficiente
	Catagórica	Condición del establo	No hay; Buena; Regular; Malo; Deficiente
	Catagórica	Estado vía de acceso	Pavimentada; Destapada; Mixta

Tratamiento de datos faltantes

Se identificó el porcentaje de valores perdidos por variable. Ninguna variable superó el umbral del 30% de datos faltantes (el máximo fue 16.10% en Número de mujeres en el ordeño). Posteriormente, se eliminaron las UP con datos incompletos en alguna de las variables incluidas en el análisis, resultando en una muestra final de 109 UP (pérdida del 26.80% respecto a los 146 productores iniciales). No se realizó imputación de datos faltantes.

Análisis estadístico

Para las variables cuantitativas se verificó la multicolinealidad mediante el Factor de Inflación de Varianza (VIF), obteniendo valores en un rango de 1.58 a 3.51, todos por debajo del umbral crítico de 10. Se aplicó un Análisis de Redundancia (RDA) para evaluar la relación entre las variables de manejo y la producción lechera (variables respuesta: Total de litros por día y Litros de leche vaca por día). Las variables categóricas fueron transformadas mediante codificación dummy. La selección de variables se realizó mediante el método forward stepwise con pruebas de permutación (999 permutaciones, $\alpha = 0.05$), siguiendo enfoques recientes en los que se utiliza RDA con selección de variables y test por permutación para identificar relaciones significativas entre variables explicativas y de respuesta (Capblancq y Forester, 2021). La significancia del modelo se evaluó mediante análisis de varianza basado en permutaciones. Los análisis se realizaron en el software estadístico R (R Core Team, 2025), utilizando la librería *vegan* (Oksanen et al., 2026).

Resultados y discusión

Análisis de correlación entre las variables cuantitativas

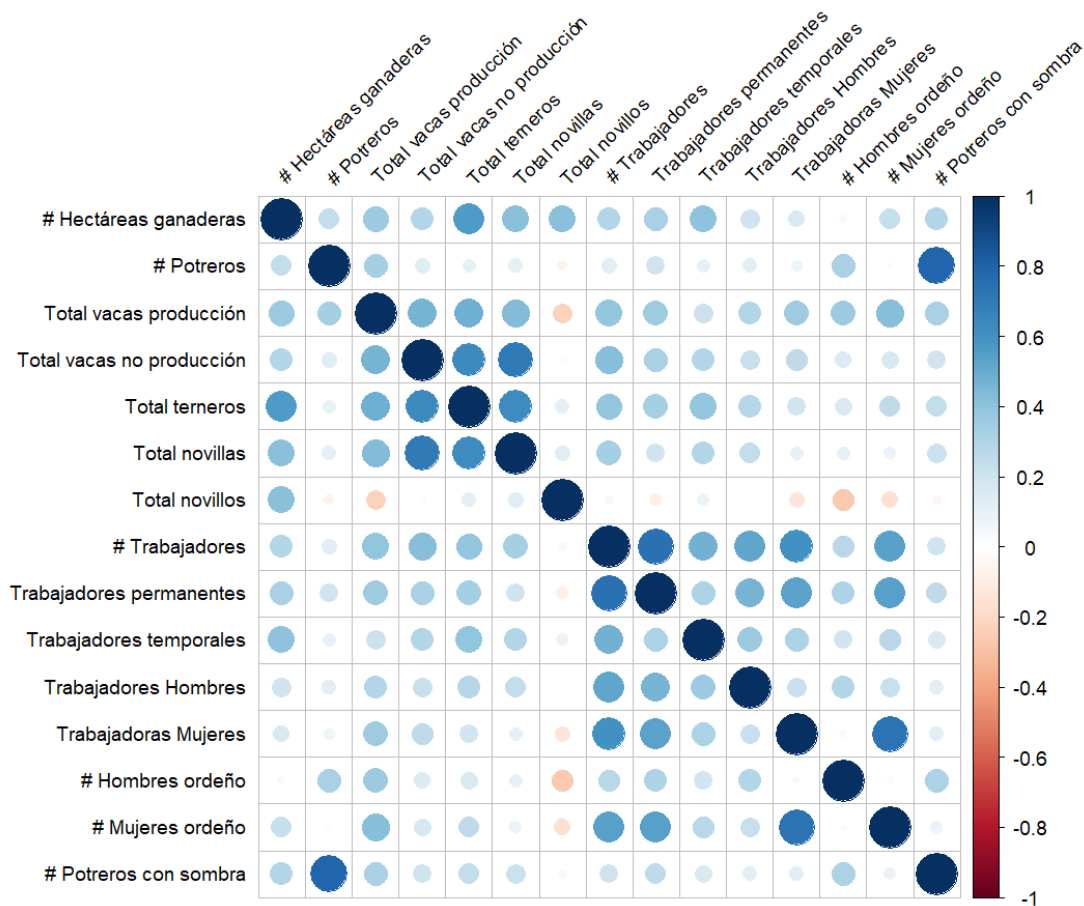
Previo al análisis de redundancia, se evaluó la multicolinealidad entre las variables cuantitativas mediante el Factor de Inflación de Varianza (VIF). Los valores de VIF oscilaron entre 1.58 y 3.51 (media = 2.45), todos por debajo del umbral crítico de 10, confirmando la ausencia de multicolinealidad problemática. En la Figura 2, se observa que las variables de estructura de finca y composición del hato presentan correlaciones altas y positivas ($r > 0.7$). En particular, el número de potreros ganaderos se asocia fuertemente con el número de hectáreas ganaderas ($r \approx 0.9$), indicando coherencia estructural entre el tamaño físico y la subdivisión del terreno. Las variables de inventario animal muestran correlaciones significativas: total de vacas en producción con total de terneros ($r \approx 0.8$) y total de novillas ($r \approx 0.8$), reflejando un patrón de crecimiento paralelo entre categorías etarias. Estas asociaciones son esperadas en sistemas donde el tamaño del hato determina proporcionalmente el número de animales en cada grupo (Rivera et al., 2024).

En cuanto a las variables de recursos humanos, se evidencia una correlación moderada a alta ($r = 0.6$ – 0.9) entre el número total de trabajadores, los trabajadores permanentes y los trabajadores hombres. Estas relaciones sugieren que la mano de obra estable, de carácter familiar o contratada, constituye el principal soporte operativo de las unidades productivas, con una participación temporal limitada, lo que coincide con la estructura laboral predominante en sistemas campesinos de doble propósito

descrita en estudios donde la mano de obra familiar es el componente principal de la fuerza de trabajo en explotaciones ganaderas duales (Rangel et al., 2020; González et al., 2020). De manera consistente, investigaciones más recientes en sistemas ganaderos de Colombia y otras regiones de América Latina han confirmado que la estabilidad de la mano de obra se asocia positivamente con el desempeño productivo, la continuidad de las prácticas de manejo y la sostenibilidad social de las explotaciones, mientras que la participación de trabajadores temporales suele estar vinculada a procesos de intensificación o a dinámicas estacionales del sistema productivo (Pérez y Velásquez, 2025; Solís et al., 2023).

Figura 2

Análisis de correlación de variables cuantitativas



Las variables de ordeño (número de hombres y mujeres en ordeño) presentan correlaciones moderadas ($r \approx 0.50$ y 0.70) con el total de trabajadores, indicando que el personal dedicado al ordeño constituye una fracción relevante de la fuerza laboral. Sin embargo, se observa una correlación negativa débil ($r \approx -0.30$) entre el total de novillos y las variables de ordeño, lo que sugiere una diferenciación funcional: las fincas con mayor proporción de novillos tienden a orientarse hacia sistemas de carne o cría-engorde, donde la labor de ordeño es limitada. Este tipo de diferenciación

funcional entre orientaciones productivas, que influye en la asignación de la mano de obra y en la estructura del hato, ha sido documentado tanto en estudios sobre organización del trabajo y sistemas ganaderos como en análisis de tipologías productivas, especialmente en contextos de intensificación tecnológica y cambios productivos (Hassall et al., 2023; Fariña et al., 2024). Estudios recientes indican que la incorporación de tecnologías, como sistemas de ordeño automatizados, puede modificar las prácticas de trabajo asociadas al ordeño y la organización del personal, redistribuyendo tareas e implicando cambios en las habilidades laborales requeridas (Núñez et al., 2024).

Por último, no se aprecian correlaciones significativas ($r \approx 0$) entre número de potreros con sombra y las variables de mano de obra. Esta independencia indica que la presencia de infraestructura silvopastoril no depende directamente de la disponibilidad de personal, sino de factores como la decisión del productor o el acceso a asistencia técnica. Investigaciones recientes en sistemas silvopastoriles tropicales han evidenciado que la adopción de estas prácticas está influenciada por el acceso a programas de fomento, el conocimiento técnico y la percepción de beneficios productivos y ambientales, más que por la estructura laboral de las unidades productivas (Alvarado et al., 2023). Investigaciones recientes en sistemas silvopastoriles tropicales y latinoamericanos han evidenciado que la adopción de prácticas con árboles y sombra en potreros está influenciada por acceso a programas de fomento, conocimiento técnico y percepción de beneficios productivos y ambientales, que por la estructura laboral de las unidades productivas (Chará et al., 2019; Chará y Shibu., 2023).

Selección Stepwise de variables y evaluación modelo ADR

El procedimiento de selección progresiva (forward) con pruebas de permutación (999 permutaciones, criterio de parada $\alpha = 0.05$) permitió identificar siete variables explicativas significativamente asociadas con la respuesta multivariada (Y) (Tabla 3). El modelo nulo inicial no incluía variables predictoras, mientras que el modelo completo consideraba 63 variables (tanto cuantitativas como categóricas convertidas a variables dummy). El R^2 ajustado máximo teórico del modelo completo fue 0.792, indicando la varianza total que podría explicarse si todas las variables fueran incluidas. El proceso forward redujo drásticamente el conjunto de predictores, pasando de 63 a 7 variables, lo que representa una reducción cercana al 90% en el número de predictores, reteniendo al mismo tiempo el 94.9% de la capacidad explicativa del modelo saturado.

El modelo RDA final con las siete variables seleccionadas resultó globalmente significativo ($F = 57.85$, $gl = 7$, $gl_error = 101$, $p = 0.001$, basado en 999 permutaciones), con un R^2 ajustado de 0.78, lo que indica que el modelo explica el 78.70% de la variabilidad total de los datos. La prueba de significancia por ejes canónicos mostró que el primer eje (RDA1) fue significativo ($F = 400.81$, $p = 0.001$) y explicó el 79.20% de la varianza total de los datos. El segundo eje (RDA2) también fue significativo ($F = 4.39$, $p = 0.028$), aunque explicó el 0.80% adicional de la varianza total. En conjunto, los dos primeros ejes explicaron el 80.0% de la varianza total acumulada. Considerando exclusivamente la varianza canónica (explicada por los ejes restringidos del RDA), el primer eje explicó el 98.98% y el segundo eje el 1.02% restante, lo que indica que el gradiente de intensificación productiva capturado por el RDA1 es dominante.

El orden de incorporación de variables en el procedimiento stepwise forward revela una jerarquía funcional coherente con el modelo conceptual de los sistemas ganaderos tropicales, en los cuales la producción lechera resulta de la interacción entre factores estructurales del hato, condiciones de manejo e intensidad tecnológica (Durana et al., 2023).

La entrada del total de vacas en producción como primera variable ($\Delta R^2_{adj} = 0.53$) (Tabla 3) evidencia la fuerte dependencia del volumen de leche respecto al tamaño efectivo del hato lactante. Este resultado no sólo expresa la relación aritmética entre número de vacas y litros totales, sino también la heterogeneidad entre fincas en cuanto a la proporción del hato en ordeño frente a categorías improductivas (vacas secas, novillas o recría). Dicha variabilidad es indicativa de la coexistencia de sistemas especializados en leche y sistemas de doble propósito, los cuales se diferencian por su estructura productiva y composición del hato (Zaldivar et al., 2025).

La incorporación temprana de variables asociadas a la estructura de la finca del sistema (número de potreros (paso 2) y hectáreas ganaderas (paso 4)), subraya la importancia del manejo de praderas como segundo determinante de productividad. El número de potreros es un indicador indirecto del grado de rotación del pastoreo: sistemas con más divisiones tienden a mantener mejor equilibrio entre carga animal, oferta forrajera y capacidad de rebrote, reduciendo la degradación del pasto y mejorando la eficiencia de conversión forraje-leche (Ramírez, 2019).

La selección de la variable “ordeño mecánico fijo” (paso 3; $\Delta R^2_{adj} = 0.07$) demuestra la relevancia de la tecnificación del proceso de ordeño como factor de eficiencia independiente de la escala productiva. La mecanización permite reducir tiempos de ordeño y pérdidas de leche, y puede mejorar la inocuidad y la calidad composicional (Ramírez, 2019). La entrada de la variable “número de hombres en ordeño” (paso 5; $\Delta R^2_{adj} = 0.02$) resalta la relevancia de la especialización laboral en los sistemas familiares. En el contexto colombiano, la participación de trabajadores permanentes y capacitados en ordeño ha sido vinculada a la mejora productiva y eficiencia (Durana et al., 2023).

Finalmente, las últimas variables incorporadas (frecuencia de ordeño y tipo “no ordeña”) completan el gradiente funcional del sistema. La práctica de un solo ordeño diario caracteriza sistemas de doble propósito donde parte de la leche se destina al amamantamiento del ternero, reduciendo el volumen comercializado, mientras que la categoría “no ordeña” identifica fincas sin vacas en lactancia o centradas en cría-levante.

Tabla 3
Secuencia de incorporación de variables en el modelo ADR (Análisis de redundancia) mediante selección forward stepwise y estadísticos de ajuste del modelo final

Paso	Variable incorporada	R ² adj acum	F	p-valor
1	Total de vacas en producción	0.53	125.50	0.002 **
2	Número de potreros en ganadería	0.61	21.78	0.006 **
3	Tipo de ordeño: Mecánico fijo	0.68	24.54	0.002 **
4	Número de hectáreas ganaderas	0.71	12.91	0.002 **

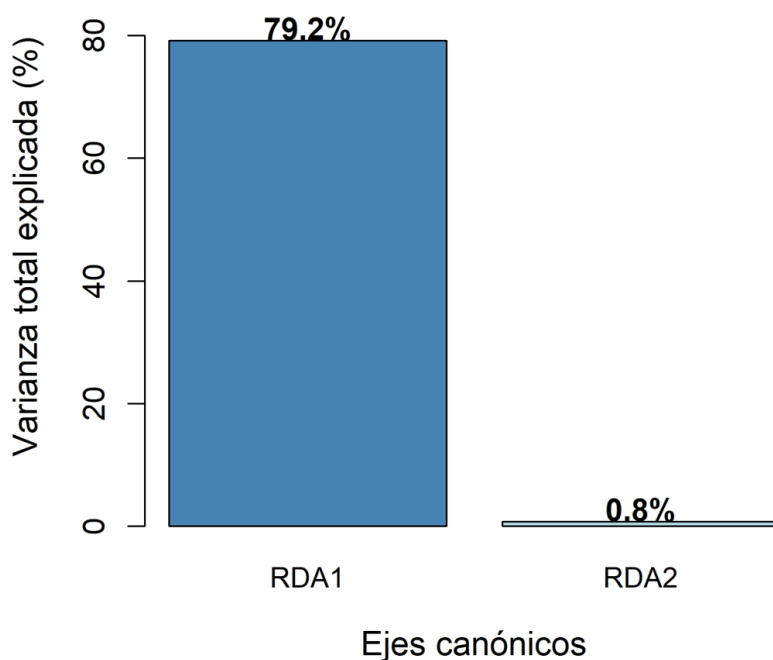
Paso	Variable incorporada	R ² adj acum	F	p-valor
5	Número de hombres en el ordeño	0.73	9.70	0.006 **
6	Número de ordeños: Uno	0.75	7.23	0.010 **
7	Tipo de ordeño: no ordeña	0.78	57.85	0.001 **

*Nota: F: valor del estadístico de Fisher asociado a cada paso del modelo. R²adj acum.: coeficiente de determinación ajustado acumulado hasta el paso correspondiente. $p < 0.05$ (**).*

En la Figura 3 se observa que el primer eje canónico (RDA1) explica el 79.20% de la varianza total, mientras que el eje RDA2 explica el 0.80%. Este resultado indica que la mayor parte de la variabilidad entre las unidades productivas puede resumirse en un único gradiente relacionado con las prácticas de manejo y los factores productivos. El predominio del primer eje (98.98% de la varianza canónica) sugiere que la heterogeneidad productiva se reduce a una dimensión principal, lo que matiza la necesidad de tipologías multivariadas complejas propuestas por otros autores (Cruz et al., 2024b; González et al., 2020).

Figura 3

Proporción de varianza explicada por los ejes canónicos del análisis de redundancia (ADR)



En la Figura 4, las variables “Total litros día” y “Tipo de ordeño: mecánico fijo” se proyectan hacia el extremo positivo del eje RDA1, lo que sugiere una asociación directa entre la mecanización del ordeño y la mayor producción total de leche. En contraste, la variable “tipo ordeño: no ordeña” se orienta hacia el extremo negativo, indicando que los sistemas con menor grado de tecnificación presentan menores rendimientos. La variable “Litros vaca día” (producción individual) se ubica en una posición intermedia, lo que indica que, aunque la productividad por vaca es relevante, el volumen total producido depende en mayor medida del número de animales y de las condiciones del sistema (número de potreros, hectáreas y trabajadores). Esto coincide con lo reportado por Mavisoy et al.

(2025), quienes evidenciaron que los sistemas silvopastoriles tecnificados en la región Andino-Amazónica de Colombia muestran mayores niveles de producción lechera y sostenibilidad ambiental.

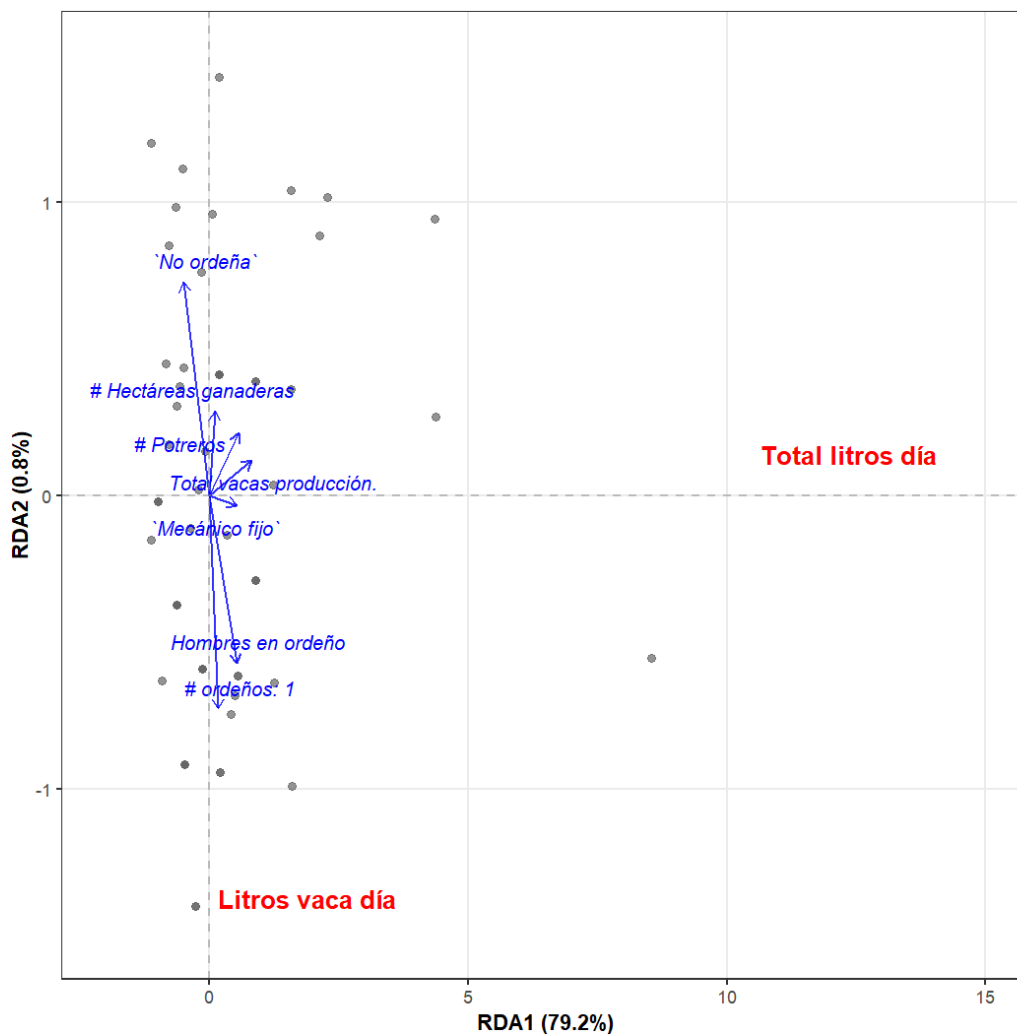
De igual manera, Taramuel et al. (2025) identificaron en comunidades indígenas del sur del país que las características tecnológicas y socioeconómicas como el tipo de ordeño y la infraestructura disponible pueden ser factores clave que explican las diferencias de productividad entre fincas. Así, el eje RDA1 puede interpretarse como un gradiente de intensificación productiva, mientras que el RDA2 refleja diferencias secundarias vinculadas al manejo del ordeño y la mano de obra. Sin embargo, la contribución marginal del RDA2 (0.80% de la varianza total) sugiere que estas diferencias secundarias, aunque estadísticamente detectables, tienen poca relevancia práctica.

Aunque los resultados son robustos, deben interpretarse a la luz de varias limitaciones. El muestreo no probabilístico por conveniencia limita la generalización de los hallazgos a toda la provincia de Vélez, ya que los productores fueron auto-seleccionados al asistir a los talleres. El tamaño muestral desbalanceado por municipio (Cimitarra y Vélez representan el 67.80% de la muestra) introduce un sesgo geográfico. La pérdida del 26.80% de las observaciones por datos incompletos (de 146 a 109 UP) pudo introducir sesgo si las UP excluidas diferían sistemáticamente. El diseño transversal impide establecer relaciones causales.

A pesar de estas limitaciones, los resultados indican que la producción total diaria de leche está determinada principalmente por la escala del sistema (número de vacas y superficie ganadera) y el nivel de tecnificación, reafirmando la importancia de fomentar la mecanización, la gestión eficiente de potreros y la capacitación de mano de obra como estrategias para mejorar la productividad del sector lechero colombiano.

Figura 4

Biplot del Análisis de Redundancia (ADR) aplicado a la producción de leche en unidades ganaderas



Conclusiones

Las relaciones encontradas entre las variables estructurales de la finca (hectáreas ganaderas, número de potreros), la composición del hato (número de vacas en producción, terneros, novillas) y los recursos humanos (trabajadores permanentes, hombres) reflejan una organización interna coherente en los sistemas ganaderos evaluados. El tamaño de la finca, el número de potreros y la cantidad de vacas en producción se asocian positivamente con la disponibilidad de mano de obra permanente (correlaciones de Pearson entre 0.60 y 0.90), lo que sugiere que la escala productiva condiciona tanto la estructura física como la demanda operativa. Este patrón indica que la integración entre recursos físicos, humanos y de hato es un componente clave de la estabilidad y eficiencia del sistema productivo.

El análisis de redundancia (RDA) mostró que la productividad lechera (expresada en litros totales por día) depende principalmente de siete variables estructurales y de manejo: número de vacas en producción, número de potreros, tipo de ordeño mecánico fijo, hectáreas ganaderas, número de hombres en ordeño, frecuencia de un ordeño diario y la categoría “no ordeña”. El modelo final explicó el 78.70% de la varianza ajustada ($R^2_{\text{adj}} = 0.78$; $F = 57.85$; $p = 0.001$). Los sistemas con ordeño mecánico y mayor subdivisión de potreros presentaron los rendimientos más altos de leche total, mientras que las fincas con orientación hacia doble propósito (asociada a “no ordeña” o un solo ordeño) mostraron menores niveles de producción. El primer eje canónico (RDA1), que explicó el 79.20% de la varianza total, se interpreta como un gradiente de intensificación productiva dominado por la escala del hato y la tecnificación del ordeño.

Los resultados permiten identificar que las variables asociadas a la tecnificación (ordeño mecánico) y a la gestión del pastoreo (número de potreros) son determinantes de la productividad. Sin embargo, la varianza no explicada por el modelo (21.30%) sugiere que otros factores no incluidos (nutricionales, sanitarios, reproductivos, económicos) también influyen en el desempeño productivo.

Contribución de Autoría CRediT

Juan Lesmes, conceptualización, metodología, curación de datos, análisis, investigación, redacción borrador original, revisión y edición. Ruy Vargas, curación de datos, análisis, redacción borrador original, revisión y edición. Aldemar Zuñiga, conceptualización, metodología, análisis, investigación, revisión y edición. Diego Ahumada, conceptualización, metodología, investigación, redacción borrador original, revisión y edición.

Declaración de intereses contrapuestos

Los autores declaran que no tienen intereses financieros en conflicto ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Declaratoria de uso de inteligencia artificial

Los autores declaran que usaron la herramienta de inteligencia artificial (IA) (ChatGPT), para corregir la redacción del documento y garantizar la correcta escritura del artículo.

Disponibilidad de datos

Los conjuntos de datos generados y/o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

Agradecimientos y financiamiento

Al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia - MADR, por la financiación y a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), por la ejecución del producto “Establecimiento de un sistema silvopastoril sostenible para pequeños ganaderos con escasa productividad en la provincia de Vélez, Santander fase 2”.

Referencias

- Alvarado, C., Barnes, A., Sepúlveda, I., Garratt, M., Thompson, J., y Escobar, M. (2023). Examining factors for the adoption of silvopastoral agroforestry in the Colombian Amazon. *Scientific Reports*, 13(1), 12252. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39038-0>
- Capblancq, T. y Forester, B. (2021). Redundancy analysis (RDA): a Swiss Army knife for landscape genomics. *Methods in Ecology and Evolution*, 12(20), 2298–2309. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13722>
- Chará, J., Rivera, J., Barahona, R., Murgueitio, E., Calle, Z. y Giraldo, C. (2019). Intensive silvopastoral systems with *Leucaena leucocephala* in Latin America. *Tropical Grasslands-Forrajeros Tropicales*, 7(4), 259–266. [https://doi.org/10.17138/tgft\(7\)259-266](https://doi.org/10.17138/tgft(7)259-266)
- Chará, J., y Shibu, J. (2023). *Silvopastoral systems of Meso America and Northern South America*. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-43063-3>
- Cruz, F., Horcada, A., Castel, J. M. y Mena, Y. (2023a). Characterization of the cattle production systems in the department of Cundinamarca (Colombia), proposals for sustainability. *Sustainability*, 15(22), 16093. <https://doi.org/10.3390/su152216093>
- Cruz, F., Pardo, D., Horcada, A., & Mena, Y. (2024b). An assessment of sustainability of dual-purpose, dairy and beef cattle production systems in the Cundinamarca Department (Colombia) using the MESMIS framework. *Sustainability*, 16(16), 7054. <https://doi.org/10.3390/su16167054>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. (2025). *Producto Interno Bruto PIB principales resultados 2025*. Colombia: DANE. [chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.dane.gov.co/files/operaciones/PIB/pres-PIB-IItrim2025.pdf](https://www.dane.gov.co/files/operaciones/PIB/pres-PIB-IItrim2025.pdf)
- Durana, C., Murgueitio, E. y Murgueitio, B. (2023). Sustainability of dairy farming in Colombia's High Andean region. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1223184>
- Enciso, K., Castillo, J., Albarracín, L. O., Campuzano, L. F., Sotelo, M. y Burkart, S. (2021). Avena sativa AV25-T (Altoandina) supplementation as alternative for Colombia's high-altitude dairy systems: An economic analysis. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.758308>
- Fariña, S., Moreno, O., Candiotti, F., Villanueva, C., Sánchez, W., Moscoso, C., Cajarville, C., Charlón, V., Abaunza, L., Guacapiña, A., Chirife, S., Herrera, D. y Stirling, S. (2024). Milk

- production systems in Latin America and the Caribbean: Biophysical, socio-economic, and environmental performance. *Agricultural Systems*, 218. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.103987>
- González, R., Barahona, R., Bolívar, D., Chirinda, N., Arango, J., Pantévez, H., Correa, G. y Sánchez, M. (2020). Technical and environmental characterization of dual-purpose cattle farms and ways of improving production: A case study in Colombia. *Pastoralism* 10, 19. <https://doi.org/10.1186/s13570-020-00170-5>
- Hassall, K., Baudron, F., MacLaren, C., Cairns, J., Ndhlela, T., McGrath, S. y Haefele, S. (2023). Construction of a generalised farm typology to aid selection, targeting and scaling of on-farm research. *Computers and Electronics in Agriculture*, 212, 108074. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108074>
- Instituto Colombiano Agropecuario - ICA. (2025). *Estimaciones Poblacionales del Sector Pecuario*. Colombia: ICA. <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>
- Mavisoy, H., Castro, E., Riascos, A., Narváz, J., Rosas, L., Guerra, A., Riascos, A., Aguillon, D., Chingal, C., Almeida, A. y Fanguero, D. (2025). Carbon stocks, technological development, and milk yields of dairy cattle silvopastoral production systems in the Andean-amazon region of Colombia. *Agroforest Systems* 99, 49. <https://doi.org/10.1007/s10457-025-01151-6>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS. (2015). *Resolución 1700 de 17 de julio de 2015 "Por la cual se efectúa un Levantamiento Parcial de veda y se toman otras determinaciones"*. Colombia: MADS. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-1700-de-2015.pdf>
- Núñez, A., Boisier, G. y Klerkx, L. (2024). Sistemas de ordeña automatizados: implicancias en las prácticas laborales de trabajadores de lecherías del sur de Chile. *Mundo Agrario*, 25(59), e248. <https://doi.org/10.24215/15155994e248>
- R Core Team. (2025). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Ramírez, E., Rodríguez, J., Huerta, I., Cárdenas, A. y Juárez, J. (2019). Tropical milk production systems and milk quality: a review. *Tropical animal health and production*, 51(6), 1295-1305. <https://doi.org/10.1007/s11250-019-01922-1>
- Rangel, J., Perea, J., De-Pablos, C., Espinosa, J., Mujica, P., Feijoo, M., Barba, C. y García, A. (2020). Structural and Technological Characterization of Tropical Smallholder Farms of Dual-Purpose Cattle in Mexico. *Animals*, 10(1), 86. <https://doi.org/10.3390/ani10010086>
- Salas, R., Guarín, J., y Ríos, L. (2024). Characterization of Dairy Production Systems and Udder Health in North Antioquia, Colombia. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 27(3). <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.4791>
- Solís, O., Cruz, W., Campos, R. y Hernández, V. (2023). Caracterización socio productiva de sistemas ganaderos Bovinos en dos áreas de la Región Frailesca, Chiapas. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2), 3795-3810. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5611

- Oksanen, J., Simpson, G., Blanchet, F., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P., O'Hara, R., Solymos, P., Stevens, M., Szoecs, E., Wagner, H., Barbour, M., Bedward, M., Bengtsson, H., Bolker, B., Borcard, D., Borman, T., Carvalho, G., Chirico, M., ... Weedon, J. (2026). *vegan: Community Ecology Package (Version 2.7-5)*. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.vegan>
- Pérez, C. y Velásquez, O. (2025). Situación laboral y social de los empleados en hatos lecheros en pastoreo: El caso Donmatías y La Unión (Antioquia-Colombia). *Teuken Bidikay*, 8(11). <https://doi.org/10.33571/teuken.v8n11a8>
- Rivera, Y., Ramírez, L, y Gómez, F. (2024). Tipificación de agroecosistemas bovinos doble-propósito en Tuluá, Valle del Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*, 72(3), 292–300. <https://doi.org/10.15446/acag.v72n3.106600>
- Taramuel, J., Delgado, M., Aza, O, y Barrios, D. (2025). Technological and socioeconomic characteristics of smallholder dairy farms in Indigenous Pastos communities of Colombia. *Tropical Animal Health and Production*, 57(7), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11250-025-04576-4>
- Warton, D. I. (2022). *Eco-stats: Data analysis in ecology: From t-tests to multivariate abundances*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-88443-7>
- Zaldivar, A., Martinez, B., Suzan, G. y Rico, O. (2025). Multivariate classification of livestock production systems in Mexico. *Tropical Animal Health and Production*. 57. 140 <https://doi.org/10.1007/s11250-025-04389-5>