



Cuantificación y caracterización de residuos generados durante el ordeño de ganado Jersey*

Quantification and characterization of waste generated during milking of Jersey cattle

Carlos A. Sánchez-Romero¹, Saúl Brenes-Gamboa¹

* Recepción: 16 de octubre, 2025. Aceptación: 20 de abril, 2026. Este trabajo formó parte del proyecto 510-C2-092, inscrito en la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

¹ Universidad de Costa Rica, Sede del Atlántico, Turrialba, Costa Rica. carlos.sanchezromero@ucr.ac.cr (autor para correspondencia; <https://orcid.org/0000-0003-4286-6585>); saul.brenes@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0002-6923-1371>).

Resumen

Introducción. El manejo inadecuado y la disposición incorrecta de los residuos de la ganadería lechera pueden provocar problemas ambientales y sanitarios; por ello, resulta necesario obtener información sobre la cantidad y la composición de los desechos sólidos y líquidos producidos en el ordeño. **Objetivo.** Determinar la cantidad y las características de los residuos generados por el ganado Jersey durante las actividades de ordeño. **Materiales y métodos.** El estudio se realizó en la lechería de la Sede del Atlántico de la Universidad de Costa Rica, con una carga animal de 6 UA/ha y vacas Jersey con un peso promedio de 396,6 kg cada una. Entre mayo de 2022 y mayo de 2023 se efectuaron 39 muestreos para cuantificar la producción de estiércol y el volumen de aguas de lavado producido en la sala de espera tras cada ordeño. En el estiércol se analizaron la humedad, el pH y la conductividad eléctrica, y en las aguas de lavado, la demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos suspendidos totales (SST) y los coliformes fecales. Los datos se analizaron mediante estadística descriptiva y correlación de Pearson. **Resultados.** Se registró una generación promedio de 2,7 kg de estiércol por animal y un consumo hídrico de 686,5 L por día. El efluente presentó una alta carga contaminante, con niveles de DQO (1931,7 mg/L) y SST (6951,6 mg/L) que superaron en más de cuatro y treinta veces, respectivamente, los límites máximos permitidos por la legislación vigente. La carga microbiológica ($1,7 \times 10^8$ UFC/100 mL) evidenció un riesgo sanitario crítico. **Conclusiones.** Las actividades de ordeño produjeron residuos con elevado potencial contaminante. Esto limita el reúso directo de las aguas de lavado y evidencia la necesidad de implementar estrategias de manejo y tratamiento que reduzcan el riesgo ambiental y favorezcan la valorización de los residuos.

Palabras clave: estiércol bovino, efluentes agropecuarios, manejo de residuos, aguas de lavado de lechería.

Abstract

Introduction. Inadequate management and improper disposal of residues generated in dairy farming can cause environmental and sanitary problems. Therefore, it is necessary to obtain information on the quantity and composition of the solid and liquid residues produced during milking. **Objective.** To determine the quantity and characteristics of



residues generated by Jersey cattle during milking activities. **Materials and methods.** The study was conducted at the dairy unit of the Atlantic Campus of the University of Costa Rica, with a stocking rate of 6 AU/ha and Jersey cows with an average live weight of 396.6 kg per animal. Between May 2022 and May 2023, 39 samplings were carried out to quantify manure generation and the volume of wash water produced in the waiting area after each milking. Moisture, pH, and electrical conductivity were analyzed in manure, while chemical oxygen demand (COD), total suspended solids (TSS), and fecal coliforms were determined in wash water. Data were analyzed using descriptive statistics and Pearson correlation analysis. **Results.** Average manure production was 2.7 kg per animal, and water consumption reached 686.5 L per day. The effluent showed a high pollutant load, with COD (1931.7 mg/L) and TSS (6951.6 mg/L) levels exceeding the maximum permissible discharge limits by more than fourfold and thirtyfold, respectively. The microbiological load (1.7×10^8 CFU/100 mL) indicated a critical sanitary risk. **Conclusions.** Milking activities generated residues with high pollutant potential, which limits the direct reuse of wash water and highlights the need to implement management and treatment strategies to reduce environmental risk and promote residue valorization.

Keywords: cattle manure, agricultural effluents, waste management, dairy wash water.

Introducción

La producción lechera es una actividad que origina gran cantidad de residuos, principalmente durante las labores de ordeño en sistemas semiestabulados (Lombo et al., 2015). Entre los principales desechos generados se encuentran el estiércol y las aguas de lavado de lechería, las cuales contienen una mezcla de excretas, orina y material orgánico arrastrado durante la limpieza de las instalaciones (Cassasola Coto & Villanueva, 2015). Además, se estima que la producción diaria de estiércol de una vaca de ordeño se encuentra entre el 7 y el 10 % de su peso vivo, dependiendo de la raza y del tipo de dieta implementada (Salazar-Sperberg, 2012).

En Costa Rica, una proporción importante de las fincas lecheras no cuenta con sistemas formales de tratamiento de residuos, lo que favorece prácticas como la aspersión directa de aguas de lavado sobre suelos y pasturas (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2020; Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2007). El manejo inadecuado de estos desechos puede desencadenar impactos ambientales y sanitarios asociados a la acumulación de nutrientes, la contaminación microbiológica de cuerpos de agua y la degradación de los suelos (Steinfeld et al., 2009). En este contexto, la adecuada gestión del estiércol y de las aguas de lavado constituye un desafío relevante para la sostenibilidad de los sistemas lecheros.

Diversas estrategias de manejo, como el compostaje y la digestión anaerobia, han sido propuestas para reducir los impactos ambientales y promover la valorización de los residuos (Hristov et al., 2013; Ruiz-Bastidas, 2017; Zinola, 2016). Sin embargo, su implementación requiere información precisa sobre la cantidad generada y la composición fisicoquímica de los efluentes (Velez et al., 2008). A escala internacional, la caracterización de las aguas residuales de las salas de ordeño se ha abordado principalmente en sistemas confinados con ganado Holstein en climas templados, con amplios rangos en DBO_5 y sólidos totales según manejo e infraestructura (Stasinakis et al., 2022). Asimismo, se han reportado coeficientes de excreción para ganado Jersey bajo condiciones de estabulación intensiva (Knowlton et al., 2010), sin considerar sistemas pastoriles tropicales (Hristov et al., 2013).

Aunque la raza Jersey se emplea ampliamente en Costa Rica por su desempeño productivo (Conejo-Morales & WingChing-Jones, 2019), existe escasa información sobre los residuos generados durante su manejo en sala de ordeño y sobre la composición de aguas de lavado. En este contexto, resulta necesario obtener datos cuantitativos sobre la generación y composición de estos desechos que permitan establecer una línea base para su monitoreo

y gestión. Por lo tanto, esta investigación tuvo como objetivo determinar la cantidad y las características de los residuos generados por el ganado Jersey durante las actividades de ordeño.

Materiales y métodos

La investigación se llevó a cabo en la Lechería de la Sede del Atlántico de la Universidad de Costa Rica, en el cantón de Turrialba, Cartago (9°54'12.80"N; 83°40'09.33"O), a una altitud de 630 m s. n. m. La zona se clasifica como bosque muy húmedo tropical (BMH-bh-T) según el sistema de zonas de vida de Holdridge (1982). La precipitación anual es de 3000 mm bien distribuidos; la temperatura ambiental oscila entre 18 °C y 27 °C, y la humedad relativa es superior al 80 % (Slon Campos, 2013).

La lechería cuenta con una extensión de 5 ha, divididas entre áreas de pasturas, principalmente de estrella africana, caminos e instalaciones para el ordeño. La sala de espera para esta actividad cuenta con 108 m² y piso de concreto. La alimentación del ganado se basa en el consumo diario de 3 a 5 kg de alimento a base de maíz (con 16 % de proteína), 45 kg de pasto fresco (20 % de materia seca y 12 % de proteína) y sal mineral en pequeñas porciones (S. Brenes, comunicación personal, 2 de abril de 2021).

Se realizan dos ordeños diarios mediante un sistema mecánico con capacidad para dos animales simultáneamente. Durante cada uno se generan residuos sólidos y líquidos, principalmente estiércol y orina. Para mantener las condiciones higiénicas, el estiércol se recoge diariamente y se coloca en camas para su secado, la sala de espera se lava dos veces al día y las aguas de lavado se almacenan en una fosa (Wingching Jones, 2016).

Cuantificación de residuos sólidos y líquidos generados en los ordeños

Para cuantificar los residuos sólidos producidos, se recolectó la totalidad del estiércol al finalizar cada ordeño. Posteriormente, se depositó en un recipiente de plástico de 20 L y se pesó con una romana electrónica. Estas mediciones se realizaron tres veces al mes desde mayo de 2022 hasta mayo de 2023 ($n = 39$ muestreos), lo que cubrió un ciclo anual completo. Los días específicos de recolección variaron según la disponibilidad operativa; sin embargo, se mantuvo la frecuencia constante de tres campañas mensuales, lo que permitió capturar la variabilidad temporal asociada a las condiciones climáticas de la región.

La cantidad de agua utilizada para lavar la sala de ordeño se determinó estimando el caudal de la manguera por medio del llenado de un recipiente con volumen conocido en un tiempo establecido. Después, se midió el tiempo de lavado y, con esto, se calculó el volumen utilizado en cada ocasión (ecuación 1).

$$\text{Volumen de agua} = \text{caudal} \left(\frac{L}{\text{min}} \right) \times \text{tiempo (min)} \quad (1)$$

El volumen de agua por metro cuadrado se estimó considerando el área total de la sala de espera (108 m²), mientras que el volumen por animal se calculó con base en el número promedio de vacas por jornada (18 animales) y los dos ordeños diarios.

Muestreo de estiércol y aguas de lavado

En cada día de muestreo se recogió 1 kg de estiércol, el cual se almacenó en bolsas plásticas. Las aguas de lavado se recolectaron de forma compuesta en botellas oscuras de polietileno de alta densidad de 2 L, tomadas del efluente antes de ingresar a la fosa de almacenamiento. Las muestras se transportaron en neveras portátiles hasta el

Laboratorio de Ambiente de la Sede del Atlántico de la Universidad de Costa Rica, donde se conservaron a 4 °C hasta su análisis.

Caracterización de residuos sólidos y líquidos generados en los ordeños

El contenido de humedad del estiércol se midió mediante el secado de las muestras a 105 °C durante 24 h. El pH y la conductividad eléctrica (CE) del estiércol se calcularon mediante la preparación de una solución de estiércol:agua 1:2 (v/v), utilizando un equipo multiparamétrico digital. Las variables fisicoquímicas de las aguas de lavado se determinaron a partir de los métodos estándar para la examinación de agua residual de la American Public Health Association (2017). El pH y la conductividad eléctrica se midieron *in situ*.

Análisis de helmintos y análisis químico completo de las aguas de lavado

Se realizaron análisis químicos para determinar nutrientes y elementos presentes en las aguas de lavado. El nitrógeno total se estableció mediante digestión húmeda con H₂SO₄ y lectura colorimétrica en un analizador de inyección de flujo. Los elementos P, Ca, Mg, K, Cu, Fe, Zn, Mn, B y S se analizaron a través de digestión con HNO₃ y por espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), de acuerdo con el método 922.02 de Official Methods of Analysis (AOAC International, 2000).

Los elementos As, Cd, Co, Cr, Ni y Mo se establecieron mediante digestión con HNO₃ y cuantificación por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), basado en el método AOAC 2006.03 (AOAC International, 2000). La presencia de huevos de helmintos se analizó en el Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica.

Indicadores derivados calculados en este estudio

Con base en las variables medidas en cada día de muestreo, se calcularon indicadores derivados asociados a la generación de estiércol, el uso de agua y la carga contaminante del sistema de ordeño (Cuadro 1). Para ello, los datos obtenidos en los 39 muestreos se extrapolaron a escala anual, considerando un periodo operativo de 365 días. Los cálculos se realizaron según las ecuaciones descritas en el Cuadro 1.

Análisis de la información obtenida

Se aplicó estadística descriptiva (media, desviación estándar y coeficiente de variación) a las variables asociadas con la cuantificación y caracterización de los residuos generados en las labores de ordeño en la lechería. Asimismo, se realizaron análisis de correlación de Pearson con un nivel de significancia de $p \leq 0,05$.

Para la mayoría de las variables, el número de observaciones correspondió a $n = 39$, distribuidas a lo largo del periodo de estudio. En el caso de los metales pesados, nutrientes y huevos de helmintos, el número de muestras fue $n = 2$, debido a limitaciones instrumentales y económicas asociadas a este tipo de determinaciones. Estos análisis se realizaron con carácter exploratorio y sus resultados se interpretaron en ese contexto. Todos los análisis estadísticos se ejecutaron utilizando el *software* InfoStat versión profesional 2020. Las muestras correspondieron a residuos generados durante la operación normal de la lechería, sin manipulación directa de los animales y en cumplimiento de las normas institucionales.

Cuadro 1. Indicadores derivados calculados a partir de las variables medidas en el sistema de ordeño. Universidad de Costa Rica, Turrialba, Costa Rica. Mayo 2022-mayo 2023.

Table 1. Derived indicators calculated based on variables measured in the milking system. University of Costa Rica, Turrialba, Costa Rica. May 2022-May 2023.

Indicador	Fórmula	Unidad
Producción de estiércol fresco por animal por año	$EF_{animal-año} = \frac{E \times N_o \times 365}{N_v}$	kg/animal/año
Producción total de estiércol fresco del sistema por año	$EF_{sistema-año} = E \times N_o \times 365$	kg/año
Producción total de materia seca del sistema por año	$MS_{año} = EF_{sistema-año} \times \frac{\%MS}{100}$	kg/año
Gasto de agua por animal por año	$A_{animal-año} = \frac{V \times N_l \times 365}{1000 \times N_v}$	m³/animal/año
Gasto de agua por metro cuadrado por año	$A_{m^2-año} = \frac{V \times N_l \times 365}{1000 \times A}$	m³/m²/año
Carga de DQO por día	$DQO_{día} = \frac{C_{DQO} \times V \times N_l}{10^6}$	kg/día
Carga de DQO por animal por año	$DQO_{animal-año} = \frac{C_{DQO} \times V \times N_l \times 365}{10^6 \times N_v}$	kg DQO/animal/año
Carga de SST por animal por año	$SST_{animal-año} = \frac{C_{SST} \times V \times N_l \times 365}{10^6 \times N_v}$	kg SST/animal/año

Número de muestras = 39. **EF**: Estiércol fresco. **E**: Estiércol recolectado por ordeño (kg). **N_o**: Número de ordeños por día. **N_l**: Número de lavados por día. **N_v**: Número de vacas en ordeño. **V**: Volumen de agua utilizado por lavado (L). **A**: Área de la sala de espera (m²). **DQO**: Demanda química de oxígeno. **C_{DQO}**: Concentración de DQO (mg/L). **SST**: Sólidos suspendidos totales. **C_{SST}**: Concentración de SST (mg/L). **%MS**: Porcentaje de materia seca del estiércol. / **Number of samples** = 39. **EF**: Fresh manure. **E**: Manure collected per milking event (kg). **N_o**: Number of milkings per day. **N_l**: Number of washings per day. **N_v**: Number of cows in milk. **V**: Volume of water used per washing event (L). **A**: Waiting area surface (m²). **DQO**: Chemical oxygen demand. **C_{DQO}**: Chemical oxygen demand concentration (mg/L). **SST**: Total suspended solids. **C_{SST}**: Total suspended solids concentration (mg/L). **%MS**: Manure dry matter percentage.

Resultados

Con una población media de 18 vacas en ordeño y un tiempo de ocupación de la sala de espera de 3,5 h, se registró una producción promedio diaria de 48,0 kg de estiércol. La cantidad generada por animal fue de $2,7 \pm 1,2$ kg/animal, con valores mínimos y máximos de 1,2 y 7,2 kg/animal, respectivamente (Cuadro 2).

El tiempo promedio de lavado fue de $8,1 \pm 1,1$ min, con valores entre 6,0 y 11,0 min, mientras que el volumen de agua diario para el lavado de la sala de espera de las vacas fue de $686,5 \pm 94,4$ L en promedio por día, con un rango entre 507,6 y 930,6 L por día. Se estimó un gasto de 38,0 L por animal y de 16,0 L por kilogramo de estiércol generado. Esta última variable exhibió la mayor variabilidad (CV = 29,9 %), mientras que el agua utilizada para lavar 1,0 m² de la lechería osciló entre 4,7 y 58,6 L, con un promedio de $6,4 \pm 0,9$ L (Cuadro 3).

El estiércol presentó un contenido de humedad de 86,0 % (80,0 y 88,6 %), y una materia seca de 14 % (11,4 y 20,0 %). El pH se mantuvo cercano a la neutralidad (de 6,9 hasta 8,5), mientras que la conductividad eléctrica promedió 2144,8 μ S/cm, con valores entre 1705,7 y 2775,0 μ S/cm (Cuadro 4).

Cuadro 2. Cantidad de estiércol generada en el estudio. Universidad de Costa Rica, Turrialba, Costa Rica. Mayo 2022-mayo 2023.

Table 2. Amount of manure generated in the study. University of Costa Rica, Turrialba, Costa Rica. May 2022-May 2023.

Variable	Promedio $\pm$ DE	CV	Mín.	Máx.
Cantidad de estiércol (kg)	48,0 $\pm$ 21,8	45,4	22,1	129,7
Cantidad de estiércol por animal (kg/animal)	2,7 $\pm$ 1,2	45,7	1,2	7,2
Animales por ordeño	18,0 $\pm$ 0,9	4,8	16	20

Número de muestras = 39. **$\pm$ DE:** Desviación estándar. **CV:** Coeficiente de variación. **Mín.:** Valor Mínimo. **Máx.:** Valor máximo. / **Number of samples** = 39. **$\pm$ DE:** Standard deviation. **CV:** Coefficient of variation. **Mín.:** Minimum value. **Máx.:** Maximum value.

Cuadro 3. Indicadores de consumo de agua y eficiencia en el lavado de la lechería. Universidad de Costa Rica, Turrialba, Costa Rica. Mayo 2022-mayo 2023.

Table 3. Water consumption indicators and cleaning efficiency in the dairy facility. University of Costa Rica, Turrialba, Costa Rica. May 2022-May 2023.

Variable	Promedio $\pm$ DE	CV	Mín.	Máx.
Tiempo de lavado (min)	8,1 $\pm$ 1,1	13,9	6,0	11,0
Volumen de agua para lavado (L/día)	686,5 $\pm$ 95,4	13,9	507,6	930,6
Volumen de agua por animal (L/animal)	38,0 $\pm$ 6,0	15,7	26,7	52,9
Volumen de agua por kilogramo de estiércol (L/kg)	16,0 $\pm$ 4,8	29,9	5,5	29,9
Volumen de agua por metro cuadrado (L/m ²)	6,4 $\pm$ 0,9	13,7	4,7	58,6

Número de muestras = 39. **$\pm$ DE:** Desviación estándar. **CV:** Coeficiente de variación. **Mín.:** Valor mínimo. **Máx.:** Valor máximo. / **Number of samples** = 39. **$\pm$ DE:** Standard deviation. **CV:** Coefficient of variation. **Mín.:** Minimum value. **Máx.:** Maximum value.

Cuadro 4. Caracterización fisicoquímica del estiércol. Universidad de Costa Rica, Turrialba, Costa Rica. Mayo 2022-mayo 2023.

Table 4. Manure physicochemical characterization. University of Costa Rica, Turrialba, Costa Rica. May 2022-May 2023.

Variable	Promedio $\pm$ DE	CV	Mín.	Máx.
% Humedad	86,0 $\pm$ 2,1	2,4	80,0	88,6
% Materia seca	14,0 $\pm$ 2,1	15,1	11,4	20,0
pH	7,3 $\pm$ 0,3	4,4	6,9	8,5
CE (μ S/cm)	2144,8 $\pm$ 288,2	13,4	1705,7	2775,0

Número de muestras = 39. **pH:** Potencial de hidrógeno. **CE:** Conductividad eléctrica. **$\pm$ DE:** Desviación estándar. **CV:** Coeficiente de variación. **Mín.:** Valor mínimo. **Máx.:** Valor máximo. / **Number of samples** = 39. **pH:** Hydrogen potential. **CE:** Electrical conductivity. **$\pm$ DE:** Standard deviation. **CV:** Coefficient of variation. **Mín.:** Minimum value. **Máx.:** Maximum value.

La caracterización fisicoquímica de las aguas de lavado mostró una alta carga orgánica (Cuadro 5). La demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) alcanzó un promedio de 1361,9 mg/L, con un rango entre 699,0 y 1941,0 mg/L. Por su parte, la demanda química de oxígeno (DQO) registró un promedio de 1931,7 mg/L y varió entre 1400,0 y 2260,0 mg/L. Para los sólidos suspendidos totales (SST), el valor fue de 6951,56 mg/L, con concentraciones entre 3292,8 y 15 433,3 mg/L, mientras que los sólidos totales (ST) presentaron 12 674,3 mg/L y oscilaron entre 4829,0 y 35 444,0 mg/L. Los ST y SST mostraron alta variabilidad, con CV de 57,8 % y 47,1 %, respectivamente.

Cuadro 5. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de las aguas de lavado. Universidad de Costa Rica, Turrialba, Costa Rica. Mayo 2022-mayo 2023.

Table 5. Physicochemical and microbiological characterization of wash water. University of Costa Rica, Turrialba, Costa Rica. May 2022-May 2023.

Variable	Promedio $\pm$ DE	CV	Mín.	Máx.
DBO ₅ (mg/L)	1361,9 $\pm$ 265,0	19,5	699,0	1941,0
DQO (mg/L)	1931,7 $\pm$ 166,7	8,6	1400,0	2260,0
SST (mg/L)	6951,6 $\pm$ 3270,8	47,1	3292,8	15 433,3
ST (mg/L)	12 674,3 $\pm$ 7323,6	57,8	4829,0	35 444,0
pH	8,4 $\pm$ 0,5	5,7	6,4	8,9
CE (μ S/cm)	2683,1 $\pm$ 645,6	24,1	1460,0	3846,2
Coliformes fecales (UFC/100 mL)	1,7 $\times 10^8 \pm 1,9 \times 10^8$	110,1	3,0 $\times 10^7$	1,0 $\times 10^9$
*Huevos helmintos (helmintos/mL)	40,0	-	0,0	80,0

Número de muestras = 39. * Análisis exploratorio realizado en dos muestras ($n = 2$). En una muestra no se detectaron huevos de helmintos y en la otra se registraron 80 helmintos/4 mL. El promedio incluye el valor 0 correspondiente a la muestra negativa. **$\pm$ DE:** Desviación estándar **DBO₅:** Demanda bioquímica de oxígeno. **DQO:** Demanda química de oxígeno. **SST:** Sólidos suspendidos totales. **ST:** Sólidos totales. **pH:** Potencial de hidrógeno. **CE:** Conductividad eléctrica. **CV:** Coeficiente de variación. **Mín.:** Valor mínimo. **Máx.:** Valor máximo. / **Number of samples** = 39. * Exploratory analysis performed on two samples ($n = 2$). No helminth eggs were detected in one sample, whereas 80 helminth eggs/4 mL were recorded in the other. The mean includes the value 0 corresponding to the negative sample. **$\pm$ DE:** Standard deviation. **DBO₅:** Biochemical oxygen demand (5 days). **DQO:** Chemical oxygen demand. **SST:** Total suspended solids. **ST:** Total solids. **pH:** Hydrogen potential. **CE:** Electrical conductivity. **CV:** Coefficient of variation. **Mín.:** Minimum value. **Máx.:** Maximum value.

El pH promedio de las aguas de lavado fue de 8,4, con un rango de variación entre 6,4 y 8,9. La conductividad eléctrica presentó un promedio de 2683,1 μ S/cm (Cuadro 5), con valores entre 1460,0 y 3846,2 μ S/cm. Los coliformes fecales registraron 1,7 $\times 10^8$ UFC/100 mL y su rango fue de 3,0 $\times 10^7$ a 1,0 $\times 10^9$ UFC/100 mL. El análisis exploratorio de huevos de helmintos ($n = 2$) mostró ausencia de detección en una muestra y 80 huevos/4 mL en la otra, por lo que el promedio registrado fue de 40 huevos/4 mL, incluyendo la muestra negativa.

La DQO mostró una oscilación mensual relativamente moderada durante el periodo de estudio, mientras que los SST exhibieron una mayor amplitud de variación entre meses. Los mayores valores de SST se registraron hacia el final del periodo evaluado; por su parte, la DQO se mantuvo dentro de un rango más estrecho. Estos resultados reflejan una variación temporal en la calidad del efluente, sin evidenciar una estacionalidad marcada (Figura 1).

La producción estimada de estiércol fresco fue de 967,9 $\pm$ 442,4 kg por animal y año, con un coeficiente de variación de 46 % y valores entre 449,0 y 2629,0 kg. A escala del sistema, la producción total de esta variable se estimó en 17 525,1 $\pm$ 7948,1 kg por año, mientras que la producción de materia seca alcanzó 2434,9 $\pm$ 1099,0 kg (Cuadro 6).

El consumo de agua asociado a las labores de limpieza se estimó en 13,9 $\pm$ 2,2 m³ por animal y año (9,8 y 19,3 m³). La carga contaminante generada en las aguas de lavado fue en promedio de 1,3 $\pm$ 0,3 kg DQO al día, equivalente a 26,8 $\pm$ 5,2 kg DQO por animal al año (14,8 y 39,9 kg). Por su parte, la carga de SST fue de 96,9 $\pm$ 50,2 kg SST por animal por año, con un coeficiente de variación de 52 %.

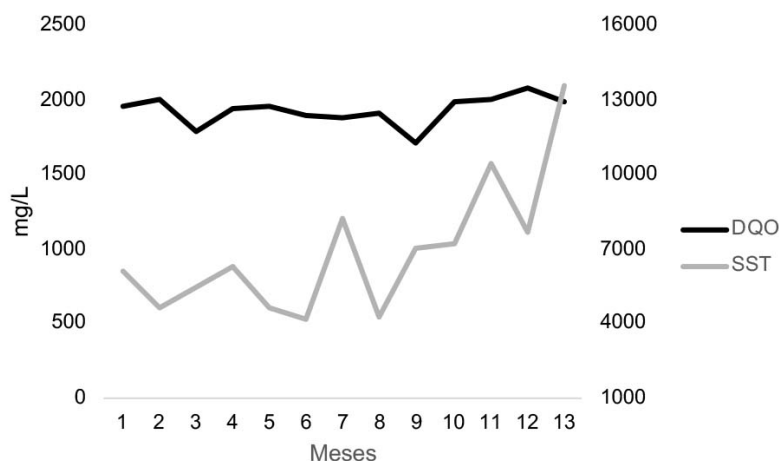


Figura 1. Variación mensual de la demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos suspendidos totales (SST) en las aguas de lavado. Universidad de Costa Rica, Turrialba, Costa Rica. Mayo 2022-mayo 2023.

Figure 1. Monthly variation in chemical oxygen demand (COD) and total suspended solids (TSS) in wash water. University of Costa Rica, Turrialba, Costa Rica. May 2022-May 2023.

Cuadro 6. Indicadores derivados del sistema de ordeño relacionados con la generación de estiércol, el uso de agua para limpieza y la carga contaminante. Universidad de Costa Rica, Turrialba, Costa Rica. Mayo 2022-mayo 2023.

Table 6. Derived indicators of the milking system associated with manure generation, water use for cleaning, and pollutant loads. University of Costa Rica, Turrialba, Costa Rica. May 2022-May 2023.

Indicador	Promedio $\pm$ DE	CV	Mín.	Máx.
Producción de estiércol fresco al año (kg/animal/año)	967,9 $\pm$ 442,4	46 %	449,0	2629,0
Producción total de estiércol fresco del sistema (kg/año)	17 525,1 $\pm$ 7948,1	45 %	8081,1	47 322,3
Producción total de materia seca del sistema (kg/año)	2434,9 $\pm$ 1099,0	45 %	1022,3	6274,9
Gasto de agua por animal (m ³ /animal/año)	13,9 $\pm$ 2,2	16 %	9,8	19,3
Gasto de agua por metro cuadrado (m ³ /m ² /año)	2,3 $\pm$ 0,3	14 %	1,7	3,1
Carga de DQO por día (kg/día)	1,3 $\pm$ 0,2	18 %	0,8	2,1
Carga de DQO por animal por año (kg DQO/animal/año)	26,8 $\pm$ 5,2	19 %	14,8	39,9
Carga de SST por animal por año (kg SST/animal/año)	96,9 $\pm$ 50,2	52 %	39,0	232,5

Número de muestras = 39. **$\pm$ DE:** Desviación estándar. **CV:** Coeficiente de variación. **Mín.:** Valor mínimo. **Máx.:** Valor máximo. Los indicadores derivados se calcularon para cada evento de muestreo a partir de las variables medidas durante el periodo de estudio. / **Number of samples** = 39. **$\pm$ DE:** Standard deviation. **CV:** Coefficient of variation. **Mín.:** Minimum value. **Máx.:** Maximum value. Derived indicators were calculated for each sampling event based on the measured variables during the study period.

En cuanto a la concentración de elementos en las aguas de lavado, la más alta fue la de Cl (148,3 mg/kg), seguida de Fe (20,0 mg/kg), B (9,5 mg/kg) y Zn y Mn (2,5 mg/kg cada uno). Además, se obtuvieron concentraciones de 0,03 %, 0,01 %, 0,01 %, 0,05 % y 0,01 % para N, P, Ca, K y S, respectivamente. Las de As, Cd y Co fueron inferiores a 0,03 mg/kg, y las de Cr, Ni, Pb y Mo fueron menores de 0,5 mg/kg (Cuadro 7).

Cuadro 7. Concentración de elementos presentes en las aguas de lavado. Universidad de Costa Rica, Turrialba, Costa Rica. Mayo 2022-mayo 2023.

Table 7. Concentration of elements present in wash water. University of Costa Rica, Turrialba, Costa Rica. May 2022-May 2023.

Elemento	Promedio $\pm$ DE
N %	0,03 $\pm$ 0,01
P %	0,01 $\pm$ 0,01
Ca %	0,01 $\pm$ 0,00
Mg %	ND
K %	0,05 $\pm$ 0,02
S %	0,01 $\pm$ 0,01
Fe (mg/kg)	20,0 $\pm$ 9,90
Cu (mg/kg)	1,0 $\pm$ 0,7
Zn (mg/kg)	2,5 $\pm$ 0,7
Mn (mg/kg)	2,5 $\pm$ 0,7
B (mg/kg)	9,5 $\pm$ 6,3
Cl (mg/kg)	148,3 $\pm$ 85,9
As (mg/kg)	<0,03
Cd (mg/kg)	<0,03
Co (mg/kg)	<0,03
Cr (mg/kg)	<0,5
Ni (mg/kg)	<0,5
Pb (mg/kg)	<0,5
Mo (mg/kg)	<0,5

Número de muestras = 2. **$\pm$ DE:** desviación estándar. **ND:** No disponible. Expresado como % masa: N %, P %, Ca %, Mg %, K % y S %. Densidad de las aguas de lavado: 1 g/mL. / **Number of samples** = 2. **$\pm$ DE:** Standard deviation. **ND:** Not available. Expressed as mass percentage: N %, P %, Ca %, Mg %, K %, and S %. Wash water density: 1 g/mL.

Se realizó un análisis de correlación de 12 variables (Cuadro 8), en el que se obtuvieron 17 correlaciones significativas ($p \leq 0,05$). La cantidad de estiércol se correlacionó con el pH ($r = 0,41$) y la CE ($r = 0,32$) del estiércol, así como con el volumen de agua de lavado ($r = 0,42$). La correlación fue negativa entre el porcentaje de humedad del estiércol y la conductividad eléctrica del purín ($r = -0,56$), ST ($r = -0,73$) y SST ($r = -0,61$).

El pH del estiércol se correlacionó con su conductividad eléctrica ($r = 0,51$), con el pH del purín ($r = 0,36$) y con el volumen de agua de lavado ($r = 0,40$), y la CE del estiércol, con la conductividad eléctrica del purín ($r = 0,39$). Esta última fue positiva con la DBO₅ ($r = 0,43$), ST ($r = 0,60$) y SST ($r = 0,49$). La DBO₅ se correlacionó con la DQO ($r = 0,38$) y ST ($r = 0,34$).

Cuadro 8. Análisis de correlación de Pearson de las variables estudiadas. Universidad de Costa Rica, Turrialba, Costa Rica. Mayo 2022-mayo 2023.

Table 8. Pearson correlation analysis of the studied variables. University of Costa Rica, Turrialba, Costa Rica, May 2022-May 2023.

	kg-B	%H-B	pH-B	CE-B	pH-P	CE-P	DBO ₅	DQO	CF	ST	SST	V-A
kg-B	1											
%H-B	0,07	1										
pH-B	0,41	0,11	1									
CE-B	0,32	-0,18	0,51	1								
pH-P	-0,28	-0,03	0,36	0,18	1							
CE-P	0,05	-0,56	0,24	0,39	0,03	1						
DBO ₅	-0,17	-0,31	0,09	0,19	-0,03	0,43	1					
DQO	0,19	-0,26	-0,04	0,08	-0,16	0,27	0,38	1				
CF	0,17	0,14	0,16	-0,05	0,01	-0,02	-0,12	-0,37	1			
ST	-0,07	-0,73	-0,03	0,13	0,01	0,60	0,34	0,11	0,02	1		
SST	-0,06	-0,61	0,07	0,01	0,02	0,49	0,27	0,09	0,05	0,8	1	
V-A	0,42	-0,09	0,40	0,21	0,06	0,23	0,14	0,24	-0,03	0,18	0,18	1

Coefficientes de correlación de Pearson significativos ($p \leq 0,05$) están en negrita. **Número de muestras** = 39. **kg-B**: Cantidad de estiércol (kg). **%H-B**: % de humedad estiércol. **pH-B**: pH estiércol. **CE-B**: Conductividad eléctrica estiércol ($\mu\text{S}/\text{cm}$). **pH-P**: pH purín. **CE-P**: Conductividad eléctrica purín ($\mu\text{S}/\text{cm}$). **DBO₅**: Demanda bioquímica de oxígeno. **DQO**: Demanda química de oxígeno. **CF**: Coliformes fecales (UFC/100 mL). **SST**: Sólidos suspendidos totales. **ST**: Sólidos totales. **V-A**: Volumen de agua (L). / Significant Pearson correlation coefficients ($p \leq 0.05$) are shown in bold. **Number of samples** = 39. **kg-B**: Manure quantity (kg). **%H-B**: Manure moisture content (%). **pH-B**: Manure pH. **CE-B**: Manure electrical conductivity ($\mu\text{S cm}^{-1}$). **pH-S**: Slurry pH. **EC-S**: Slurry electrical conductivity ($\mu\text{S cm}^{-1}$). **DBO₅**: Biochemical oxygen demand. **DQO**: Chemical oxygen demand. **CF**: Fecal coliforms (CFU/100 mL). **SST**: Total suspended solids. **ST**: Total solids. **V-A**: Water volume (L). Significant Pearson correlation coefficients ($p \leq 0.05$) are shown in bold.

Discusión

Se obtuvo una alta variación en la cantidad de estiércol generada por ordeño ($48,0 \pm 21,8$ kg; CV = 45,4 %) y por animal ($2,7 \pm 1,4$ kg/animal; CV = 45,7 %), a pesar de que el número de vacas en producción se mantuvo relativamente estable (18 vacas; CV = 4,8 %). Esta variabilidad podría asociarse a diferencias individuales entre animales, al tiempo de permanencia en la sala de espera, al consumo de agua o a las condiciones ambientales (Salazar-Sperberg, 2012).

El peso vivo promedio fue de $396,6 \pm 54,8$ kg y el tiempo de ocupación correspondió a 3,5 h por día, distribuidas en dos ordeños, ya que el manejo posterior al procedimiento no fue uniforme entre operarios: mientras uno permitía la salida inmediata de las vacas al potrero, otro las mantenía temporalmente en el corral. Esto equivale a una producción aproximada de 0,0068 kg de estiércol por kg de peso vivo y 0,77 kg/animal/h. En comparación, Elizondo-Salazar y Marín-Hernández (2019) reportaron $11,9 \pm 1,4$ kg/animal para animales de $446,0 \pm 52$ kg y 8 h de ocupación, lo que equivale a 0,0267 kg/kg de peso vivo y 1,49 kg/animal/h. Asimismo, registraron $2,7 \pm 0,7$ kg/animal para animales de $412,0 \pm 107,0$ kg y 2 h de ocupación, equivalente a 0,0066 kg/kg de peso vivo y 1,35 kg/animal/h.

La cantidad de agua utilizada para mantener la higiene de las instalaciones fue considerable, con registros diarios entre 507,6 y 930,6 L. En el presente estudio, el lavado se realizó con manguera y con remoción previa del estiércol, condiciones que probablemente influyeron en el volumen empleado. Castro Calderón et al. (2021) señalan que el método de acarreo del agua, el tipo de piso, la remoción previa de excretas y la persona encargada de la limpieza

influyen significativamente en el consumo hídrico. En dicho estudio se estimó un promedio de 2560 L para remover 258 kg de estiércol en un sistema con 38 animales en ordeño. Estas cifras evidencian que las rutinas de limpieza en lecherías requieren altos volúmenes de agua.

La remoción previa del estiércol fue la principal práctica implementada para reducir el consumo de agua. Sin embargo, el valor registrado (16,0 L/kg de estiércol) superó tanto la referencia propuesta por el Ministerio de Ambiente y Energía (2021) (4 L/kg) como los resultados reportados por Castro Calderón et al. (2021) de 10,5 L/kg (82,8 L/animal) de estiércol sin retiro previo y 6,7 L/kg (45,5 L/animal) con extracción. En el presente estudio se obtuvieron 38,0 L/animal y 16,0 L/kg de estiércol, lo que sugiere que, aunque el consumo por vaca fue menor, la eficiencia del lavado por unidad de material removida resultó más baja. Este resultado pudo estar influenciado por el caudal de la manguera (1,4 L/s) y por diferencias operativas entre los encargados de la limpieza. En este contexto, la estandarización de los protocolos y el uso de boquillas de menor caudal podrían contribuir a mejorar la eficiencia del uso del agua durante este proceso.

El contenido de humedad del estiércol fue elevado y con baja variabilidad ($CV = 2,4 \%$), característica propia de este tipo de residuos debido al aporte de orina y agua de limpieza. Valores similares fueron reportados por Hubbard y Lowrance (1998) y Pertiwinigrum et al. (2019), lo que confirma que la humedad alta es una condición intrínseca del estiércol bovino fresco. El pH se mantuvo cercano a la neutralidad, con una ligera tendencia alcalina (6,9-8,5), en concordancia con lo informado por Huijsmans et al. (2001) (7,4), Irshad et al. (2013) (8,5) y Uribe-Lorío et al. (2023) (8,5). Esta condición favorece procesos biológicos de tratamiento. Por su parte, la conductividad eléctrica fue menor que la reportada por Moreno-Caselles et al. (2002) (3940 $\mu S/cm$) e Irshad et al. (2013) (9600 $\mu S/cm$), situación que podría deberse a diferencias en la dieta o en la recolección.

Las aguas de lavado generadas durante las labores de limpieza son consideradas como aguas residuales de tipo especial y se caracterizan por una alta carga orgánica y microbiológica. Los valores promedio de demanda bioquímica de oxígeno (1361,9 mg/L), demanda química de oxígeno (1931,7 mg/L) y sólidos suspendidos totales (6951,6 mg/L) exceden los límites permitidos para vertido a cuerpos receptores establecidos por la legislación costarricense (200 mg/L de DBO₅, 500 mg/L de DQO y 200 mg/L de SST) (Presidencia de la República et al., 2007). Por lo tanto, estas aguas requieren algún tipo de tratamiento previo.

La composición fisicoquímica de las aguas de lavado fue heterogénea, evidenciada por la alta variabilidad en los SST ($CV = 47,1 \%$). Durante la limpieza, además del estiércol, pueden arrastrarse restos de alimento, suelo y otros sedimentos del corral. La variación mensual mostró una DQO relativamente estable y una mayor fluctuación en los SST, sin una estacionalidad claramente definida, lo que sugiere una influencia más significativa de factores operativos que de condiciones climáticas.

El elevado contenido de sólidos limita las posibilidades de reutilización, especialmente en sistemas de aspersión, donde puede provocar taponamiento de boquillas, emisores y filtros debido a la acumulación de sedimentos (Boschini-Figueroa & Vargas-Rodríguez, 2020). Estudios señalan que concentraciones de SST superiores a 100 mg/L incrementan el riesgo de obstrucción física en los componentes hidráulicos de los sistemas de riego (Ayers & Westcot, 1985). Por lo tanto, esta circunstancia debe considerarse al plantear el aprovechamiento de estas aguas, en especial cuando requieran mecanismos de distribución presurizada.

Algunos autores reportan concentraciones variables de DQO, SST y ST en aguas de lavado de bovinos. Por ejemplo, Lansing et al. (2008) reportaron una demanda química de oxígeno de 5720 mg/L, 967 mg/L de sólidos suspendidos totales y 4570 mg/L de sólidos totales, mientras que Lisboa y Lansing (2013) registraron una DQO de 3070 mg/L y 3970 mg/L de ST. En la presente investigación se obtuvieron valores de DQO menores (1400-2260 mg/L), pero concentraciones de sólidos más altas (6951,6 mg/L para SST y 12 674,3 mg/L para ST). Estas diferencias reflejan la naturaleza heterogénea de estas aguas, influenciadas no solo por el estiércol, la orina y los restos de leche, sino también por el uso de detergentes y desinfectantes que aumentan la carga orgánica. Este aspecto merece mayor atención en futuros estudios.

Al comparar las concentraciones de DBO₅, DQO, SST y coliformes fecales con los límites establecidos en el Decreto n.º 33601 para reúso agrícola (Presidencia de la República et al., 2007), se evidencia que estas aguas superan ampliamente los valores permitidos para el riego tipo 5. Esto indica que, en su estado actual, su uso directo en pastos de piso y forrajes implicaría riesgos sanitarios y ambientales, especialmente por la alta carga microbiana. Por consiguiente, resulta necesario implementar tratamientos previos y establecer protocolos de monitoreo periódico para asegurar el cumplimiento de los estándares y minimizar riesgos potenciales.

En Costa Rica, el Decreto Ejecutivo n.º 37017 (Presidencia de la República & Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2012) autoriza la aspersión de aguas de lavado en potreros sin requerir tratamientos previos, siempre que se respeten las restricciones asociadas al tipo de terreno y a la distancia a fuentes de agua. Esto representa una oportunidad para su aprovechamiento directo como fuente de nutrientes. Sin embargo, los resultados obtenidos evidenciaron concentraciones elevadas de sólidos y materia orgánica que, sin un manejo adecuado, podrían favorecer la contaminación de aguas superficiales y la acumulación de patógenos. Por ello, aunque la normativa permite su aplicación, es necesario considerar las propiedades específicas de estas aguas al momento de planificar su aprovechamiento en sistemas lecheros.

Los valores de pH del efluente tendieron a ser alcalinos (8,4) y con baja variación (CV = 5,7 %), similares a los del estiércol y dentro del rango para el tratamiento biológico. No obstante, estas cifras son superiores a lo reportado en aguas de lavado de bovinos por Elizondo-Salazar y Espinoza-Fonseca (2021) con 4,4, Rojas-Molina y Elizondo-Salazar (2020) con 6,81, Lansing et al. (2008) con 6,24 y Lisboa y Lansing (2013) con 7,24. Asimismo, la máxima conductividad eléctrica (3849,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$) superó el umbral recomendado para riego agrícola (>3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (Ayers & Westcot, 1985), lo que evidencia una alta carga de sales disueltas y posibles limitaciones para el reúso.

Los análisis mostraron presencia de parásitos, lo que indica que, aunque estas aguas se destinen al mejoramiento de los suelos, su uso directo sin tratamiento podría representar un riesgo para la salud humana y animal. La literatura señala que los subproductos de la producción animal son frecuentemente utilizados como insumo agrícola por su disponibilidad y aporte de materia orgánica y nutrientes. Sin embargo, su aplicación sin manejo adecuado puede favorecer la transmisión de patógenos y la contaminación ambiental, por lo que se recomienda considerar estrategias de valorización que permitan su aprovechamiento seguro (Kılıç & Sönmez, 2024).

La producción anual estimada de estiércol fresco (17,5 t/año) indica que, aun con solo 3,5 h diarias de permanencia en la sala de espera, el sistema genera una cantidad relevante de residuo que requiere un manejo planificado. Asimismo, las 2,4 t/año de materia seca confirman la presencia de una fracción sólida con potencial de valorización, útil para dimensionar áreas de acondicionamiento. En ausencia de una gestión apropiada, esta acumulación podría favorecer la generación de lixiviados y emisiones de metano y óxido nitroso (Feng et al., 2023; Varga et al., 2024). En este contexto, incluso en un sistema Jersey con 18 vacas en ordeño, la magnitud del residuo justifica evaluar alternativas como compostaje o co-compostaje.

Los indicadores de uso de agua y carga contaminante muestran que el impacto del sistema depende también del volumen de agua utilizado y de la carga orgánica transportada en el efluente. El consumo estimado de 13,9 m³/animal/año y la carga de 26,8 kg DQO/animal/año reflejan que las aguas de lavado constituyen un flujo residual que requiere manejo específico. La relación DBO₅/DQO de 0,71 sugiere una fracción orgánica altamente biodegradable, lo que respalda la viabilidad de procesos anaerobios, particularmente la digestión anaerobia, así como el aprovechamiento agronómico posterior del digestato (Martín-Sanz-Garrido et al., 2025; Nikolaidou et al., 2025). En comparación, Lansing et al. (2008) reportaron 12,6 kg DQO/día en un sistema Brahman-Holstein, mientras que en este estudio la carga máxima estimada fue de 2,1 kg DQO/día. Aunque inferior, esta carga continúa siendo suficiente para considerar procesos de biodigestión, especialmente si se integra el tratamiento del estiércol y las aguas de lavado.

Los contenidos de N, P, Ca, Mg, K y S fueron inferiores a 0,05 %, de forma similar a lo reportado por Elizondo-Salazar y Espinoza-Fonseca (2021). De igual manera, la presencia de microelementos (B, Fe, Zn, Cu, Mn) fue menor que los valores registrados por Barrantes Chavarría y Barrantes Vargas (2021). La remoción previa de excretas antes del lavado pudo haber contribuido a reducir la cantidad de nutrientes transportados, mientras que la dilución por agua de lluvia durante el almacenamiento podría haber influido en las concentraciones finales (Rojas-Molina & Elizondo-Salazar, 2020). Los metales pesados (As, Cd, Co, Cr, Ni, Pb, Mo) estuvieron por debajo de los límites de detección; sin embargo, su monitoreo es relevante debido a la posible acumulación en suelos fertilizados con estas aguas (Nookabkaew et al., 2016; Yang et al., 2017).

Es importante destacar que las propiedades del estiércol y de las aguas de lavado dependen de varios factores, como la digestibilidad, el contenido de proteínas y fibra del alimento, la edad, la raza, las condiciones climáticas y la productividad (Hubbard & Lowrance, 1998). Estas propiedades son parámetros clave cuando se pretende utilizar estos residuos como mejoradores de suelo, ya que pueden afectar la acidez y la salinidad (Moreno-Caselles et al., 2002).

La cantidad de estiércol se correlacionó positivamente con su pH y conductividad eléctrica; esto evidencia que el aporte de iones de este material favorece la alcalinidad y la concentración de sales. El pH del estiércol también se correlacionó positivamente con el pH y la CE del purín. Al disminuir la humedad del material, aumenta su conductividad eléctrica, lo que incrementa la concentración de sólidos del purín. Esto indica que, pese a realizar remoción previa, quedan remanentes que luego son arrastrados en el lavado. Además, una mayor cantidad de estiércol implica un mayor consumo de agua para el lavado (Castro Calderón et al., 2021). Finalmente, la CE del purín tuvo correlaciones positivas con DBO₅, SST y ST, lo que la posiciona como un buen indicador de la carga orgánica.

Las características fisicoquímicas analizadas sugieren la necesidad de esquemas de tratamiento por etapas. La elevada concentración de sólidos suspendidos respalda la incorporación de fases iniciales de separación sólido-líquido, mientras que la carga orgánica y el rango de pH resultan compatibles con procesos biológicos, como la digestión anaerobia. En este sentido, los biodigestores mesofílicos representan una alternativa viable para la valorización energética del estiércol bovino, al tiempo que los sólidos separados podrían destinarse al compostaje y la fracción líquida, previa estabilización, al fertirriego o a tratamientos complementarios, como lagunas anaerobias o humedales construidos (Giraldo et al., 2019; Hjorth et al., 2010). Desde una perspectiva de economía circular, estas alternativas permitirían transformar los residuos en biogás y biofertilizantes, con potencial para reducir las emisiones asociadas al almacenamiento abierto y cerrar ciclos de nutrientes en el sistema lechero (Gerber et al., 2013; Martín-Sanz-Garrido et al., 2025; Rittl et al., 2023).

El estudio presentó algunas limitaciones que deben considerarse al interpretar sus resultados. La evaluación se realizó en un único sistema lechero con vacas Jersey bajo condiciones tropicales, lo que restringe la extrapolación de los resultados a lecherías con diferente manejo, infraestructura o clima. Algunos parámetros, como nutrientes, metales pesados y huevos de helmintos, se determinaron con un número reducido de muestras, por lo que su lectura es exploratoria y requiere ser validada mediante una mayor replicación. No obstante, esta investigación establece una línea base cuantitativa sobre la generación y caracterización del estiércol y las aguas de lavado en sistemas Jersey tropicales, y ofrece criterios técnicos para la selección de tecnologías de tratamiento y el diseño de estrategias de gestión adaptadas a este contexto.

Conclusiones

Los residuos sólidos y líquidos generados durante las actividades de ordeño presentaron una composición que combina una fracción sólida con potencial de valorización y un efluente líquido con una alta carga orgánica, sólidos suspendidos y contaminación microbiológica. Estas características limitan el reúso directo de las aguas de lavado y evidencian la necesidad de implementar estrategias de manejo y tratamiento.

La gestión de los residuos debe abordarse mediante esquemas de tratamiento por etapas que incluyan la separación sólido-líquido y procesos biológicos acordes con la composición del efluente y las condiciones operativas del sistema. Asimismo, la valorización del estiércol y de las aguas de lavado representa una oportunidad para integrar enfoques de sostenibilidad y economía circular en lecherías tropicales.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica por el financiamiento del proyecto 510-C2-092.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

- American Public Health Association. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.).
- AOAC International. (2000). *Official methods of analysis of AOAC International* (17th ed., Vol. 1).
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev. 1). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/t0234e/t0234e00.htm>
- Barrantes Chavarría, A. G., & Barrantes Vargas, G. C. (2021). *Sistema de conducción para el manejo y aplicación de purines en pastos de piso, utilizando desechos provenientes de la lechería, mitigando su efecto contaminante y aprovechando su aporte nutricional, finca Dominicas, Lepanto, Puntarenas, 2021* [Tesis de licenciatura, Universidad Técnica Nacional]. Repositorio de la Universidad Técnica Nacional. <https://repositorio.utn.ac.cr/items/65a6a636-d356-42fd-ad71-f1150b17c0e2>
- Boschini-Figueroa, C., & Vargas-Rodríguez, C. F. (2020). Purines discharge capacity of a liquid manure spreading tank. *Agronomía Mesoamericana*, 31(1), 251-258. <https://doi.org/10.15517/AM.V31I1.33544>
- Cassasola Coto, F., & Villanueva, C. (2015). *Buenas prácticas para la mitigación al cambio climático de los sistemas de producción de leche en Costa Rica*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Castro Calderón, M. V., Elizondo Salazar, J. A., Martínez Reina, A. M., García Peña, J. A., Tamara Morelo, R. E., & Pérez Cantero, S. P. (2021). Establecimiento de tres indicadores de eficiencia en el uso de agua para lavado en instalaciones lecheras en Zarcero, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 45(1), 153-163. <https://doi.org/10.15517/rac.v45i1.45745>
- Conejo-Morales, J. F., & WingChing-Jones, R. (2019). Climatic conditions and Jersey cattle dairy production on two altitudinal levels. *Agronomía Mesoamericana*, 31(1), 157-176. <https://doi.org/10.15517/am.v31i1.34739>
- Elizondo-Salazar, J. A., & Espinoza-Fonseca, H. (2021). Evaluación de los purines como una alternativa de fertilización orgánica en pasto estrella africana. *Nutrición Animal Tropical*, 15(2), 25-41. <https://doi.org/10.15517/nat.v15i2.48001>
- Elizondo-Salazar, J. A., & Marín-Hernández, D. E. (2019). Uso de agua para limpieza en una lechería del Valle Central de Costa Rica. *Nutrición Animal Tropical*, 13(2), 43-57. <https://doi.org/10.15517/nat.v13i2.39731>

- Feng, X., Smith, W., & VanderZaag, A. C. (2023). Dairy manure nutrient recovery reduces greenhouse gas emissions and transportation cost in a modeling study. *Frontiers in Animal Science*, 4, Artículo 1134817. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1134817>
- Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., & Tempio, G. (2013). *Enfrentando el cambio climático a través de la ganadería: una evaluación global de las emisiones y oportunidades de mitigación*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/4/i3437s/i3437s.pdf>
- Giraldo, Y. D., Lache, A., Ortíz, M. A., & Páez, A. I. (2019). Codigestión de estiércol de bovino y residuo de poda para la producción de biogás mediante digestión anaerobia con agitación a escala laboratorio. *Gestión y Ambiente*, 22(2), 257-265. <https://doi.org/10.15446/ga.v22n2.75759>
- Hjorth, M., Christensen, K. V., Christensen, M. L., & Sommer, S. G. (2010). Solid-liquid separation of animal slurry in theory and practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(1), 153-180. <https://doi.org/10.1051/agro/2009010>
- Holdridge, L. R. (1982). *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Hristov, A. N., Oh, J., Lee, C., Meinen, R., Montes, F., Ott, T., Firkins, J., Rotz, A., Dell, C., Adesogan, A., Yang, W., Tricarico, J., Kebreab, E., Waghorn, G., Dijkstra, J., & Oosting, S. (2013). *Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera: una revisión de las opciones técnicas para la reducción de las emisiones de gases diferentes al CO₂*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Hubbard, R. K., & Lowrance, R. R. (1998). Management of dairy cattle manure. En R. J. Wright, W. D. Kemper, P. D. Millner, J. F. Power, & R. F. Korcak (Eds.), *Agricultural uses of municipal, animal and industrial byproducts* (Conservation Research Report n.º 44, pp. 91-102). U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Huijsmans, J. F. M., Hol, J. M. G., & Hendriks, M. M. W. B. (2001). Effect of application technique, manure characteristics, weather and field conditions on ammonia volatilization from manure applied to grassland. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 49(4), 323-342. [https://doi.org/10.1016/S1573-5214\(01\)80021-X](https://doi.org/10.1016/S1573-5214(01)80021-X)
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2020). *Encuesta Nacional Agropecuaria 2019. Resultados generales de la actividad ganadera vacuna y porcina*. https://admin.inec.cr/sites/default/files/media/reagropecuaria2019-01_2.pdf
- Irshad, M., Eneji, A. E., Hussain, Z., & Ashraf, M. (2013). Chemical characterization of fresh and composted livestock manures. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13(1), 115-121. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162013005000011>
- Kılıç, F. N., & Sönmez, O. (2024). Pollutant effects and management of animal manure. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 12(8), 1467-1475. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v12i8.1467-1475.6780>
- Knowlton, K. F., Wilkerson, V. A., Casper, D. P., & Mertens, D. R. (2010). Manure nutrient excretion by Jersey and Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 93(1), 407-412. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2617>
- Lansing, S., Viquez, J., Martínez, H., Botero, R., & Martin, J. (2008). Quantifying electricity generation and waste transformations in a low-cost, plug-flow anaerobic digestion system. *Ecological Engineering*, 34(4), 332-348. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.09.002>
- Lisboa, M. S., & Lansing, S. (2013). Characterizing food waste substrates for co-digestion through biochemical methane potential (BMP) experiments. *Waste Management*, 33(12), 2664-2669. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.004>
- Lombo, D., Villanueva, C., & Cassasola, F. (2015). Manejo integral del estiércol en fincas productoras de leche en Costa Rica. En F. Cassasola, & C. Villanueva (Eds.), *Buenas prácticas para la mitigación al cambio climático de los sistemas*

- de producción de leche en Costa Rica* (Serie Técnica, Manual Técnico, pp. 33-80). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Martín-Sanz-Garrido, C., Revuelta-Aramburu, M., Santos-Montes, A. M., & Morales-Polo, C. (2025). A review on anaerobic digestate as a biofertilizer: Characteristics, production, and environmental impacts from a life cycle assessment perspective. *Applied Sciences*, 15(15), Artículo 8635. <https://doi.org/10.3390/app15158635>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2007). *Agro cadena de la leche*. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/E70-10453.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Energía. (2021). Resolución R-0327-2021: Manual técnico de dotaciones de agua. La Gaceta n.º 204.
- Moreno-Caselles, J., Moral, R., Pérez-Murcia, M., Pérez-Espinosa, A., & Rufete, B. (2002). Nutrient value of animal manures in front of environmental hazards. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(15-18), 3023-3032. <https://doi.org/10.1081/CSS-120014499>
- Nikolaidou, C., Mola, M., Papakostas, S., Aschonitis, V. G., Monokrousos, N., & Kougias, P. G. (2025). The effect of anaerobic digestate as an organic soil fertilizer on the diversity and structure of the indigenous soil microbial and nematode communities. *Environmental Science and Pollution Research*, 32, 27683-27698. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32850-9>
- Nookabkaew, S., Rangkadilok, N., Prachoom, N., & Satayavivad, J. (2016). Concentrations of trace elements in organic fertilizers and animal manures and feeds and cadmium contamination in herbal tea (*Gynostemma pentaphyllum* Makino). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(16), 3119-3126. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b06160>
- Pertiwinigrum, A., Wuri, M. A., Setiyana, D., Budiarto, R., Koranto, C. A. D., & Gozan, M. (2019). Improving nutrients in cattle manure by converting it into biogas sludge and compost. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 398(1), Artículo 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/398/1/012003>
- Presidencia de la República & Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2012, 7 de marzo). Decreto n.º 37017: Autorizar el uso de purines del ganado bovino como mejorador de las características físicas, químicas y microbiológicas del suelo. *La Gaceta n.º 48*.
- Presidencia de la República, Ministerio de Ambiente y Energía, & Ministerio de Salud. (2007, 19 de marzo). Decreto n.º 33601: Reglamento de vertido y uso de aguas residuales. *La Gaceta n.º 131*.
- Rittl, T. F., Pommeresche, R., Johansen, A., Steinshamn, H., Riley, H., & Løes, A.-K. (2023). Anaerobic digestion of dairy cattle slurry—Long-term effects on crop yields and chemical soil characteristics. *Organic Agriculture*, 13, 547-563. <https://doi.org/10.1007/s13165-023-00447-0>
- Rojas-Molina, L., & Elizondo-Salazar, J. A. (2020). Evaluación del efecto de los purines vacunos sobre la producción de pasto Taiwán (*Pennisetum purpureum*) en un suelo Andisol. *Nutrición Animal Tropical*, 14(2), 251-268. <https://doi.org/10.15517/nat.v14i2.45172>
- Ruiz-Bastidas, R. C. (2017). *Aprovechamiento del estiércol bovino generado en el municipio de Cumbal-Nariño para obtener energía renovable mediante digestión anaerobia* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59752>
- Salazar-Sperberg, F. (2012). *Manual de manejo y utilización de purines de lechería*. Consorcio Lechero. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/38217>

- Slon Campos, D. (2013). *Contribución a la fase inicial de la planificación del desarrollo territorial del territorio clave INDER: Turrialba-Jiménez, Costa Rica* [Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. Repositorio CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/950>
- Stasinakis, A. S., Charalambous, P., & Vyrides, I. (2022). Dairy wastewater management in EU: produced amounts, existing legislation, applied treatment processes and future challenges. *Journal of Environmental Management*, 303, Artículo 114152. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114152>
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & de Haan, C. (2009). *La larga sombra del ganado: problemas ambientales y opciones*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/a0701s/a0701s00.htm>
- Uribe-Lorío, L., Brenes-Guillén, L., WingChing-Jones, R., Uribe, L., García, F., Rodríguez, C., & Aráuz, L. F. (2023). Valorization of cow manure: unraveling bacterial community changes driven by vermicomposting and their impact on vermicompost tea production. *Waste and Biomass Valorization*, 15, 2175-2190. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02276-4>
- Varga, Z. I., Shahzad, S., Ramay, M. W., Damak, M., Gulyás, M., Béres, A., Székács, A., & Aleksza, L. (2024). Ammonia and greenhouse gas emissions from organic manure composting: the effect of membrane cover. *Agronomy*, 14(7), Artículo 1471. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071471>
- Velez, C., Cuevas, G., Solís, A., Pinedo, C., Lozoya, L., & Turcott, E. (2008). Diseño de un plan de gestión para los residuos sólidos generados por el sector ganadero en el municipio de Chihuahua, Chihuahua, México. *Revista de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, 1(4), 1-19.
- Wingching Jones, R. (2016). *El módulo lechero: referentes estadísticos de su producción 2001-2014*. Universidad de Costa Rica.
- Yang, X., Li, Q., Tang, Z., Zhang, W., Yu, G., Shen, Q., & Zhao, F. J. (2017). Heavy metal concentrations and arsenic speciation in animal manure composts in China. *Waste Management*, 64, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.015>
- Zinola, G. (2016). *Valorization of wastes from dairy farms using low-cost wastewater treatment technologies* [Tesis de maestría, UNESCO-IHE Institute for Water Education]. Repositorio IHE Delft Institute for Water Education. <https://ihedelftrepository.contentdm.oclc.org/digital/collection/masters1/id/243575/>