

Artículo científico

Efecto de inoculantes comerciales de bacterias ácido-lácticas sobre la dinámica fermentativa del ensilaje de residuos de cosecha de yacón (*Smallanthus sonchifolius*)

Effect of commercial lactic acid bacteria inoculants on the fermentation dynamics of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) harvest-residue silage

María Cristina Marchetti*; Mario Emanuel Fabersani; Mirta Josefina Blanco; Ana Mariela Adelina Rodríguez Brito; José María Prado; Carmen Salinas; Javier Leonardo Mongelli; Ruben Oliszewski

Facultad de Agronomía, Zootecnia y Veterinaria. Universidad Nacional de Tucumán. Florentino Ameghino s/n. 4105. Tucumán, Argentina.

*Correo electrónico: maria.marchetti@faz.unt.edu.ar

Resumen

El yacón (*Smallanthus sonchifolius*) es una planta andina cuyos tubérculos se usan para consumo humano por su alto contenido de fructooligosacáridos. La parte aérea puede ser conservada por medio de silaje para servir como fuente de alimento en animales de producción. La medición de pH permite controlar el proceso fermentativo. Este puede ser acelerado mediante la incorporación de bacterias ácido-lácticas (BAL), que son microorganismos que producen una fermentación dirigida para bajar el pH y conservar el forraje en el tiempo. El objetivo fue determinar la dinámica fermentativa del silaje de yacón con diferentes BAL comerciales en distintas dosis tomando como parámetro el pH. Los silajes fueron elaborados con la parte aérea de la planta postcosecha con humedad de 67 %, picada de 1 cm y colocada en microsilos de PVC de (10 cm diámetro x 20 cm altura). En cada microsilo se agregó 1 kg de materia verde (MV) con compactación promedio de $640 \pm 40 \text{ kg m}^{-3}$. El diseño fue completamente aleatorizado y se realizaron 5 tratamientos con 4 repeticiones: T1: sin inoculante (control), T2: Inoculante líquido, dosis $250 \text{ g t}^{-1} \text{ MV}$; T3: Inoculante líquido, dosis $500 \text{ g t}^{-1} \text{ MV}$; T4: Inoculante sólido, dosis $250 \text{ g t}^{-1} \text{ MV}$ y T5: Inoculante sólido, dosis $500 \text{ g t}^{-1} \text{ MV}$. El pH se midió a los 0, 1, 5, 10, 20 y 40 días. Se observó descenso significativo del pH en todos los tratamientos a partir del día 5. Al día 10, T3 alcanzó el pH más bajo 4,67, con diferencias significativas respecto a T1. Al día 40, T4 y T5 presentaron los valores más bajos de pH (4,34 y 4,36 respectivamente), significativamente diferentes de T2 y T3. Todos los tratamientos alcanzaron valores de pH aceptables para conservación al día 40, variando entre ellos la velocidad de acidificación.

Palabras clave: Acidificación; Conservación de forrajes; Microorganismos; Microsilos; pH.

Abstract

Smallanthus sonchifolius (yacon) is an Andean plant whose tuberous roots are widely used for human consumption owing to their high fructooligosaccharide content. The aerial biomass generated as a post-harvest residue can be preserved as silage to serve as a feed resource for livestock. Silage pH is a reliable indicator of fermentation progress and can be used to monitor the acidification process. The addition of lactic acid bacteria (LAB) inoculants accelerates fermentation by promoting a directed microbial pathway that lowers pH and extends forage preservation. The objective of this study was to determine the fermentation dynamics of yacon harvest-residue silage prepared with different commercial LAB inoculants at varying inclusion rates, using pH as the primary fermentation indicator. Silages were prepared from post-harvest aerial plant material with 67% moisture content, chopped to 1 cm particle size and packed into PVC microsilos (10 cm diameter $\times$ 20 cm height). Each microsilo received 1 kg of fresh matter (FM), achieving a mean compaction density of $640 \pm 40 \text{ kg m}^{-3}$. A completely randomized design was used with five treatments and four replicates: T1, uninoculated control; T2, liquid inoculant at $250 \text{ g t}^{-1} \text{ FM}$; T3, liquid inoculant at $500 \text{ g t}^{-1} \text{ FM}$; T4, solid inoculant at $250 \text{ g t}^{-1} \text{ FM}$; and T5, solid inoculant at $500 \text{ g t}^{-1} \text{ FM}$. pH was measured at days 0, 1, 5, 10, 20 and 40. A significant decline in pH was observed across all treatments from day 5 onwards. By day 10, T3 reached the lowest pH value (4.67), differing significantly from T1. On day 40, T4 and T5 exhibited the lowest pH values (4.34 and 4.36, respectively), which were significantly lower than those recorded for T2 and T3. All treatments reached pH values considered acceptable for silage preservation by day 40, with treatments differing primarily in the rate of acidification rather than in the final fermentation outcome.

Keywords: Acidification; Forage conservation; Microorganisms; Microsilos; pH.

Recibido: 26/02/2026; Aceptado: 30/06/2026

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

<https://doi.org/10.70198/ranar.4601.03>

Introducción

El desarrollo intensivo de la ganadería ha incrementado las expectativas de los productores respecto a aditivos alimentarios que aceleren el crecimiento, protejan contra infecciones patógenas y mejoren parámetros de producción como la absorción de nutrientes y la calidad de productos derivados. En este contexto el ensilaje de yacón y de residuos de yacón representan una alternativa viable para mejorar valores nutricionales como digestibilidad, fibra, proteína, almidones y carbohidratos no estructurales, sugiriendo al ensilado de yacón como un recurso forrajero local de gran interés (Koike *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2019; Lopera-Marin *et al.*, 2024).

El yacón (*Smallanthus sonchifolius* Poepp. & Endl., familia Asteraceae) es una planta herbácea perenne originaria de los valles andinos de Sudamérica, donde se cultiva principalmente por sus raíces reservantes ricas en fructooligosacáridos (FOS). La parte aérea —tallos, hojas y pecíolos— puede alcanzar 1–2 m de altura, permanece verde y con alto contenido de agua durante un período prolongado tras la cosecha, y constituye un residuo abundante de bajo costo disponible en las zonas de producción. En la región NOA (Argentina), el yacón se cultiva en pequeña y mediana escala, generando volúmenes significativos de biomasa aérea postcosecha que rara vez se aprovechan como alimento animal de forma conservada. Además, presenta gran adaptación a diferentes condiciones climáticas, prosperando en zonas marginales donde otras especies no se desarrollan. Actualmente, solo se utilizan los tubérculos para alimentación humana, mientras que las partes aéreas postcosecha no son utilizadas. Existen pocos estudios que caractericen el valor nutricional de las partes aéreas y sus conservados (silaje y material fresco), los cuales podrían ser beneficiosos para la alimentación de animales productivos, favoreciendo la proliferación de microbiota benéfica que mejore la inmunidad, ganancia de peso corporal y calidad de productos derivados en rumiantes, cerdos y aves. El conocimiento y aprovechamiento de especies tuberosas como el yacón son importantes para la seguridad alimentaria y como aporte a la sostenibilidad del frágil ecosistema montañoso andino (Soplín, 2004).

Entre los compuestos bioactivos presentes en el yacón se encuentran los FOS, oligosacáridos

de fructosa de diferente grado de polimerización con actividad prebiótica. Pedreschi *et al.* (2003) demostraron que los FOS del yacón son metabolizados por tres cepas de bacterias ácido-lácticas (BAL) probióticas conocidas: *Lactobacillus acidophilus* NRRL-1910, *Lactobacillus plantarum* NRRL B-4496 y *Bifidobacterium bifidum* ATCC 15696, demostrando la fermentabilidad selectiva de estos compuestos. Sin embargo, estas cepas corresponden a ensayos de fermentación intestinal *in vitro*. El único antecedente directo de inoculación con BAL en microsilos de residuo de yacón es el de Wang *et al.* (2019), quienes utilizaron *Lactiplantibacillus plantarum* y obtuvieron, en comparación con el control sin inóculo, un descenso más rápido del pH, menor concentración de nitrógeno amoniacal (N-NH₃) e inhibición temprana de mohos y clostridios. Estos resultados constituyen el antecedente experimental más próximo al presente trabajo y sustentan el uso de inoculantes comerciales de BAL en residuos de cosecha de yacón. Estudios en conejillos de indias alimentados con harina de yacón demostraron su efecto prebiótico promoviendo el crecimiento de bifidobacterias y lactobacilos, resultando en altos niveles de ácidos grasos de cadena corta (AGCC) en las heces y mejora de la densidad celular y formación de criptas en el ciego, indicando beneficios para la salud del colon (Campos *et al.*, 2012). Estas bacterias producen ácidos orgánicos y bacteriocinas que inhiben el crecimiento de microorganismos patógenos como *Escherichia coli* (Pundir *et al.*, 2013). Koike *et al.* (2009) investigaron el valor nutritivo y antioxidante de los restos postcosecha de yacón en cerdos mediante ensilaje, indicando que presenta un valor nutricional destacable como forraje conservado. En material fresco, el contenido de proteína bruta (PB) de los tallos y hojas oscila entre 11 y 17 % de la materia seca (Koike *et al.*, 2009), valores comparables a gramíneas tropicales de calidad media. En ensilajes de residuos vegetales de composición similar, Cao *et al.* (2011) reportaron PB de 20,6–22,8 % y fibra detergente neutro (FDN) de 22,7–33,6 % de MS, reflejando la variabilidad composicional según la especie y fracción vegetal ensilada. Para el caso específico del yacón, Lopera-Marin *et al.* (2024) reportaron la composición bromatológica del silaje según la fracción vegetal (tallos, hojas, planta entera), evidenciando diferencias en el contenido de materia seca, PB y fibra que condicionan la

calidad fermentativa del material. Esto sugiere que se necesita más investigación para determinar los beneficios y limitaciones del ensilaje de yacón para la alimentación de ungulados y otras especies productoras de alimentos.

El objetivo del presente trabajo fue determinar la dinámica fermentativa del silaje de residuos de cosecha de yacón con diferentes inoculantes comerciales de bacterias ácido-lácticas en distintas dosis, evaluando el pH como indicador del proceso fermentativo y la dinámica fermentativa del producto final.

Materiales y métodos

Elaboración del ensilaje

Las muestras se recolectaron de un predio experimental ubicado en San Pablo T (26.868907°S, 65.315995°O) en la ciudad de Lules, Tucumán, el 14 de julio de 2022. Los nódulos fueron originarios de Las Caleras, Salta. Las plantas se sembraron en octubre de 2021, los nódulos fueron colocados en macetas hasta alcanzar 30 cm de altura, posteriormente se trasplantaron al predio con distancia entre plantas de 80 cm.

Las características del cultivo al momento de la recolección fueron: estado fenológico 10 % de floración, altura de planta de 100-120 cm, 8-16 pares de hojas por tallo, 5-6 inflorescencias por planta, altura de corte de 25 cm y humedad de 67 %. La composición química del material de partida (PB, FDN, FDA, cenizas, carbohidratos solubles, FOS) no fue determinada, no obstante, la bibliografía ofrece valores de referencia para materiales comparables: la parte aérea del yacón contiene 11-17 % de PB (Koike *et al.*, 2009), y silajes de residuos vegetales similares, 20,6-22,8 % de PB y 22,7-33,6 % de FDN en base seca (Cao *et al.*, 2011).

Transcurridas 12 horas de retirados los tubérculos, se procedió al cortado de la parte aérea y al troceado en fragmentos de 1 cm de tamaño. El material se colocó en microsilos de PVC de 20 cm de altura y 10 cm de diámetro con tapa tipo Bunsen para permitir la salida de gases e impedir la entrada de aire. En cada microsiló se agregó 1 kg de materia verde (MV). La compactación promedio fue de 640 ± 40 kg MV m⁻³. El valor se calculó considerando las dimensiones de los microsilos de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura ($V = \pi r^2 h = 1,57 \times 10^{-3}$ m³); con 1 kg de MV por

microsiló (n = 4 por tratamiento).

Tratamientos experimentales

El diseño experimental fue completamente aleatorizado con cinco tratamientos y cuatro repeticiones (Tabla 1).

Tabla 1. Tratamientos experimentales según tipo de inoculante y dosis aplicada.

Tratamiento	Tipo de inoculante	Dosis (g t ⁻¹ MV)
T1	Control	0
T2	Líquido	250
T3	Líquido	500
T4	Sólido	250
T5	Sólido	500

Caracterización de los inoculantes

Se evaluaron dos inoculantes comerciales de composición microbiana equivalente, pero de presentación física diferente: líquido y sólido.

El inoculante líquido contenía las cepas *Lactobacillus plantarum*, *Lactococcus lactis* y *Pediococcus acidilactici*, con una concentración de 1×10^{10} UFC g⁻¹ de producto (1 g equivale a 1,25 ml), y dextrosa como excipiente (7 % p/p). El inoculante sólido contenía las mismas tres especies bacterianas (*L. plantarum*, *L. lactis* y *P. acidilactici*) a una concentración de $1,5 \times 10^5$ UFC g⁻¹ de producto, extracto de levadura (3 %) y otras bacterias no especificadas por el fabricante (6,7 % p/p).

La carga bacteriana efectiva aplicada por kg de MV entre inoculantes fue la siguientes: En IL, T2: $2,5 \times 10^9$ UFC kg⁻¹ MV; T3: $5,0 \times 10^9$ UFC kg⁻¹ MV, IS, en cambio, T4: $3,75 \times 10^4$ UFC kg⁻¹ MV y T5: $7,5 \times 10^4$ UFC kg⁻¹ MV.

Modo de administración

Para la preparación de las soluciones de inoculación, en los tratamientos de dosis baja (T2 y T4) se disolvieron 0,25 g de inoculante en 2 ml de agua destilada estéril por kg de MV; mientras que en los tratamientos de dosis alta (T3 y T5) se utilizaron 0,5 g de inoculante en 2 ml de agua destilada estéril por kg de MV. La dilución se hizo en referencia a lo recomendado por ambos fabricantes. En todos los casos la solución se distribuyó de manera uniforme sobre el material mediante aspersión. Inmediatamente después, cada muestra fue homogeneizada manualmente

durante 60 seg y envasada en los tubos de ensilaje, los cuales se cerraron de forma hermética de inmediato para garantizar condiciones anaeróbicas desde el inicio del proceso fermentativo.

Análisis de pH

Se extrajeron submuestras para medir pH a los 0, 1, 5, 10, 20 y 40 días. El pH se determinó por inserción directa del electrodo en la masa ensilada con pHmetro TESTO a la misma hora en cinco puntos distintos de cada submuestra, exceptuando los bordes para eliminar el efecto borde. Las cinco lecturas se promediaron a un único valor por microsilo (unidad experimental).

Análisis microbiológico

Se tomaron muestras de cada tratamiento en los días 1 y 40. Se realizaron diluciones seriadas de las muestras y plaqueo con los siguientes medios de cultivo:

Para las BAL se utilizó medio MRS, incubando a 30 °C durante 72 h en microanaerobiosis. Para bacterias indeseables se analizaron: a) coliformes totales en medio VRBA, incubando a 30 °C durante 24 a 48 h; b) hongos y levaduras en agar específico, incubando a 25 °C durante 3 a 5 días.

Análisis estadístico

Los datos de pH no presentaron distribución

normal según la prueba de Shapiro-Wilk, por lo que se analizaron mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Las comparaciones múltiples *post-hoc* se realizaron mediante la prueba de Dunn con corrección de Bonferroni. Se realizó análisis de componentes principales (PCA) para evaluar las relaciones entre variables. Se consideró significativo un valor de $p < 0,05$. Los análisis estadísticos y el procesamiento de datos se realizaron utilizando el lenguaje de programación R (Versión 4.6.0; R Core Team, 2026), ejecutado de forma remota en la plataforma en la nube Google Claboratory (Google, 2026).

Resultados

Evolución temporal del pH

La evolución del pH mostró un patrón de descenso progresivo en todos los tratamientos durante el período de evaluación (Tabla 2, Figura 1). Al inicio del ensayo (día 0), todos los tratamientos presentaron valores de pH similares entre 6,22 y 6,44 ($\chi^2 = 8,42$; $p = 0,077$), sin diferencias significativas. Al día 1, los valores se mantuvieron elevados (6,52–6,66) sin diferencias estadísticas entre tratamientos ($\chi^2 = 3,60$; $p = 0,463$).

A partir del día 5 comenzaron a observarse diferencias entre tratamientos, aunque sin alcanzar significancia estadística ($\chi^2 = 8,73$; $p = 0,068$). El tratamiento T4 presentó un valor de pH 4,58,

Tabla 2. Evolución del pH por tratamiento y día de medición. Valores expresados como mediana (Q1-Q3). Los tratamientos fueron T1(control): sin inoculante, T2: inoculante líquido, dosis 250 g t⁻¹ MV, T3: inoculante líquido, dosis 500 g t⁻¹ MV, T4: inoculante sólido, dosis 250 g t⁻¹ MV, T5: inoculante sólido, dosis 500 g t⁻¹ MV.

Día	T1	T2	T3	T4	T5	p-valor
0	6,45 (6,44-6,45)	6,22 (6,22-6,23)	6,38 (6,37-6,40)	6,35 (6,34-6,36)	6,30 (6,29-6,32)	0,077
1	6,54 (6,53-6,56)	6,66 (6,61-6,72)	6,54 (6,54-6,55)	6,52 (6,50-6,54)	6,52 (6,51-6,52)	0,463
5	5,19 (5,18-5,20)	5,10 (5,09-5,11)	6,10 (6,03-6,16)	4,58 (4,55-4,61)	5,92 (5,90-5,94)	0,068
10	5,37 (5,29-5,43)	4,95 (4,93-4,96)	4,65 (4,64-4,68)	4,89 (4,80-4,95)	5,22 (5,10-5,40)	0,002**
20	5,82 (5,80-5,86)	4,84 (4,73-4,95)	4,50 (4,45-4,54)	4,54 (4,51-4,58)	4,72 (4,69-4,78)	0,002**
40	4,77 (4,23-5,21)	5,15 (4,65-5,35)	5,00 (4,97-5,36)	4,29 (4,26-4,42)	4,36 (4,31-4,44)	<0,001***

** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

mientras que T3 mantuvo un pH elevado 6,10.

Al día 10 se detectaron diferencias significativas entre tratamientos ($\chi^2 = 16,6$; $p = 0,002$). El tratamiento T3 alcanzó el pH más bajo 4,67, significativamente diferente de T1 5,36 ($p = 0,006$) y de T5 5,28 ($p = 0,017$).

El día 20 las diferencias se mantuvieron significativas ($\chi^2 = 17,0$; $p = 0,002$). Los tratamientos T3 y T4 presentaron los valores más bajos (4,49 y 4,55, respectivamente), significativamente diferentes del control T1 con pH 5,84 ($p = 0,003$ y $p = 0,019$ respectivamente).

Al final del ensayo (día 40), se observaron las mayores diferencias entre tratamientos ($\chi^2 = 25,0$; $p < 0,001$). Los tratamientos T4 con 4,34 y T5 con 4,36 alcanzaron los valores más bajos de pH, significativamente diferentes de T2 con 5,18 ($p = 0,003$ y $p = 0,007$ respectivamente) y T3 con 5,07 ($p = 0,002$ y $p = 0,006$, respectivamente) (Figura 1).

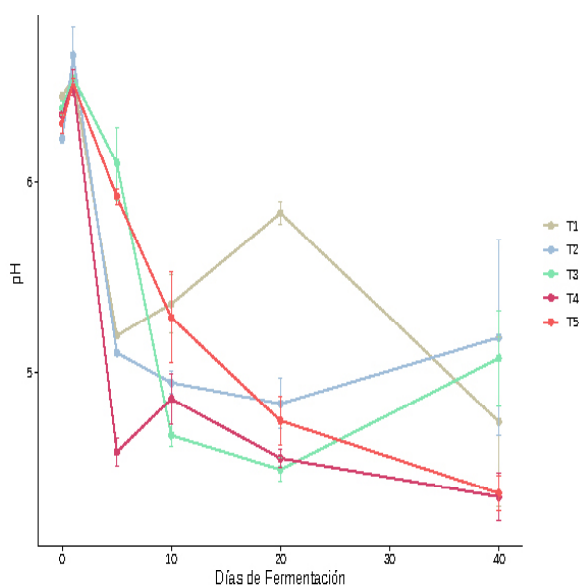


Figura 1: Evolución del pH en función del tiempo (días 0, 1, 5, 10, 20 y 40) del silaje de residuos de cosecha de yacón con diferentes inoculantes comerciales de bacterias lácticas en distintas dosis. Los tratamientos fueron T1(control): sin inoculante, T2: inoculante líquido, dosis 250 g t⁻¹ MV, T3: inoculante líquido, dosis 500 g t⁻¹ MV, T4: inoculante sólido, dosis 250 g t⁻¹ MV, T5: inoculante sólido, dosis 500 g t⁻¹ MV. El asterisco indica diferencia significativa respecto al testigo T1 ($p < 0,05$).

Comparación entre tratamientos al día 40

El análisis global al día 40 mediante Kruskal-Wallis reveló diferencias significativas entre tratamientos ($\chi^2 = 25,025$, $p < 0,001$). Las comparaciones post-hoc de Dunn identificaron

dos grupos estadísticamente diferentes: el grupo formado por T4 y T5 (pH 4,34–4,36) presentó valores significativamente menores que el grupo formado por T2 y T3 (pH 5,07–5,18), mientras que el control T1 (pH 4,74) presentó un comportamiento intermedio.

Efecto del tipo de inoculante

El análisis por tipo de inoculante mostró diferencias significativas en varios momentos del proceso fermentativo. Al día 10, el control difirió significativamente del inoculante líquido ($p = 0,007$). Al día 20, tanto el inoculante líquido como el sólido difirieron del control ($p = 0,017$ en ambos casos). Al día 40, los inoculantes líquido y sólido presentaron diferencias significativas entre sí ($p < 0,001$), con el inoculante sólido alcanzando valores de pH más bajos (mediana 4,32) comparado con el líquido (mediana 5,07).

Efecto de la dosis

El análisis por dosis reveló diferencias significativas en las etapas intermedias del proceso. Al día 5, la dosis de 500 g t⁻¹ difirió significativamente de la dosis de 250 g t⁻¹ ($p = 0,015$). Al día 10, el control presentó pH significativamente mayor que la dosis de 250 g t⁻¹ ($p = 0,047$). Al día 20, ambas dosis (250 y 500 g t⁻¹) difirieron significativamente del control ($p = 0,039$ y $p = 0,007$ respectivamente). Al día 40 no se observaron diferencias significativas entre dosis ($p = 0,976$).

Análisis microbiológico

Los recuentos microbiológicos se realizaron en los días 1 y 40 del proceso fermentativo (Tabla 3). En todos los tratamientos se observó un incremento significativo en las bacterias lácticas entre el día 1 y el día 40. El tratamiento T2 alcanzó el recuento más alto de BAL al día 40 ($9,0 \times 10^9$ UFC g⁻¹), seguido por T4 ($5,8 \times 10^9$ UFC g⁻¹) y T3 ($1,0 \times 10^9$ UFC g⁻¹).

Los coliformes presentaron una reducción drástica en todos los tratamientos, disminuyendo desde valores entre 6,70 y 7,51 log₁₀ UFC g⁻¹ al día 1 hasta 3,65 log₁₀ UFC g⁻¹ al día 40 en todos los casos debido a que en las muestras analizadas no se notó desarrollo, se toma dicho valor como la sensibilidad del método de plaqueo utilizado. Los

Tabla 3. Recuentos microbiológicos ($\log_{10}$ UFC g^{-1}) por tratamiento a los 1 y 40 días

Microorganismo	Bacterias ácido-lácticas (BAL)		Coliformes		Hongos y Levaduras	
DÍA	1	40	1	40	1	40
T1	6,85	8,00	6,70	3,65	6,86	5,76
T2	7,70	9,95	7,15	3,65	7,04	6,36
T3	8,34	9,00	7,11	3,65	7,08	5,65
T4	8,73	9,30	7,26	3,65	6,94	6,04
T5	9,36	9,40	7,51	3,65	7,15	6,87

T1(control): sin inoculante, T2: inoculante líquido, dosis 250 g t^{-1} MV, T3: inoculante líquido, dosis 500 g t^{-1} MV, T4: inoculante sólido, dosis 250 g t^{-1} MV, T5: inoculante sólido, dosis 500 g t^{-1} MV.

hongos y levaduras mostraron una disminución moderada, pasando de 6,86–7,15 $\log_{10}$ UFC g^{-1} al día 1 a 5,65–6,87 $\log_{10}$ UFC g^{-1} al día 40.

Análisis de componentes principales

El PCA realizado con seis variables (pH, días, dosis, BAL, coliformes y hongos-levaduras) explicó el 91,1 % de la variabilidad total en las dos primeras dimensiones (65,0 % y 26,1 % respectivamente). La primera dimensión se correlacionó fuertemente con días y coliformes (correlaciones de -0,996, 0,986 y -0,971 respectivamente), representando el eje temporal del proceso fermentativo. El signo opuesto entre días (-0,996) y pH (0,971) sobre esta dimensión refleja la relación inversa entre ambas variables: a mayor tiempo de fermentación, menor pH, lo cual es coherente con la progresiva acidificación del ensilaje. La segunda dimensión se correlacionó principalmente con dosis (0,936) y BAL (0,753), representando el efecto del tratamiento aplicado. Cabe señalar que las BAL también presentaron una carga secundaria negativa sobre la primera dimensión (-0,548), lo que indica que su comportamiento responde tanto al tiempo de fermentación como al tratamiento, aunque su mayor poder discriminante se expresa en la segunda dimensión (Figura 2).

Discusión

Todos los tratamientos, incluyendo el control sin inoculante, lograron pH inferiores a 5,2 al día 40, cumpliendo con los criterios establecidos para silajes (McDonald *et al.*, 1991). El tratamiento

sin inóculo mostró una acidificación lenta y heterogénea: mantuvo pH elevado hasta el día 20 (mediana 5,82) y recién al día 40 descendió a 4,77, con un rango intercuartílico amplio (4,23–5,21). Este patrón evidencia que la microbiota epífita del residuo de yacón es capaz de conducir la fermentación, pero de forma más tardía y variable que los tratamientos inoculados. En consecuencia, el efecto principal de los inoculantes no es habilitar la fermentación —que igualmente ocurre— sino acelerar y homogeneizar la velocidad de acidificación durante las etapas iniciales, fase crítica para limitar pérdidas (Muck *et al.*, 2018).

La velocidad de acidificación varió considerablemente entre tratamientos, siendo este el principal efecto de los inoculantes. La fase aeróbica inicial del ensilado explica el comportamiento del pH durante las primeras horas. Si bien no se registraron diferencias significativas entre tratamientos en los días 0 y 1, el leve aumento del pH observado podría atribuirse a la respiración residual del material vegetal y de la microbiota epífita, junto con una proteólisis incipiente que libera compuestos nitrogenados básicos. Estos procesos preceden al predominio de las BAL, cuya producción de ácido láctico determina el descenso posterior del pH (Pahlow *et al.*, 2003; Muck, 2010). El descenso del día 5 no fue estadísticamente significativo ($p = 0,068$); por lo que el valor alcanzado por T4 (4,58) fue transitorio (llegando a 4,89 al día 10), por lo que no debe interpretarse como acidificación sostenida. La primera diferencia significativa entre tratamientos se encontró al día 10 ($p = 0,002$), donde T3 (inoculante líquido 500 g t^{-1}) alcanzó el descenso más rápido de pH, llegando a 4,67; mientras que

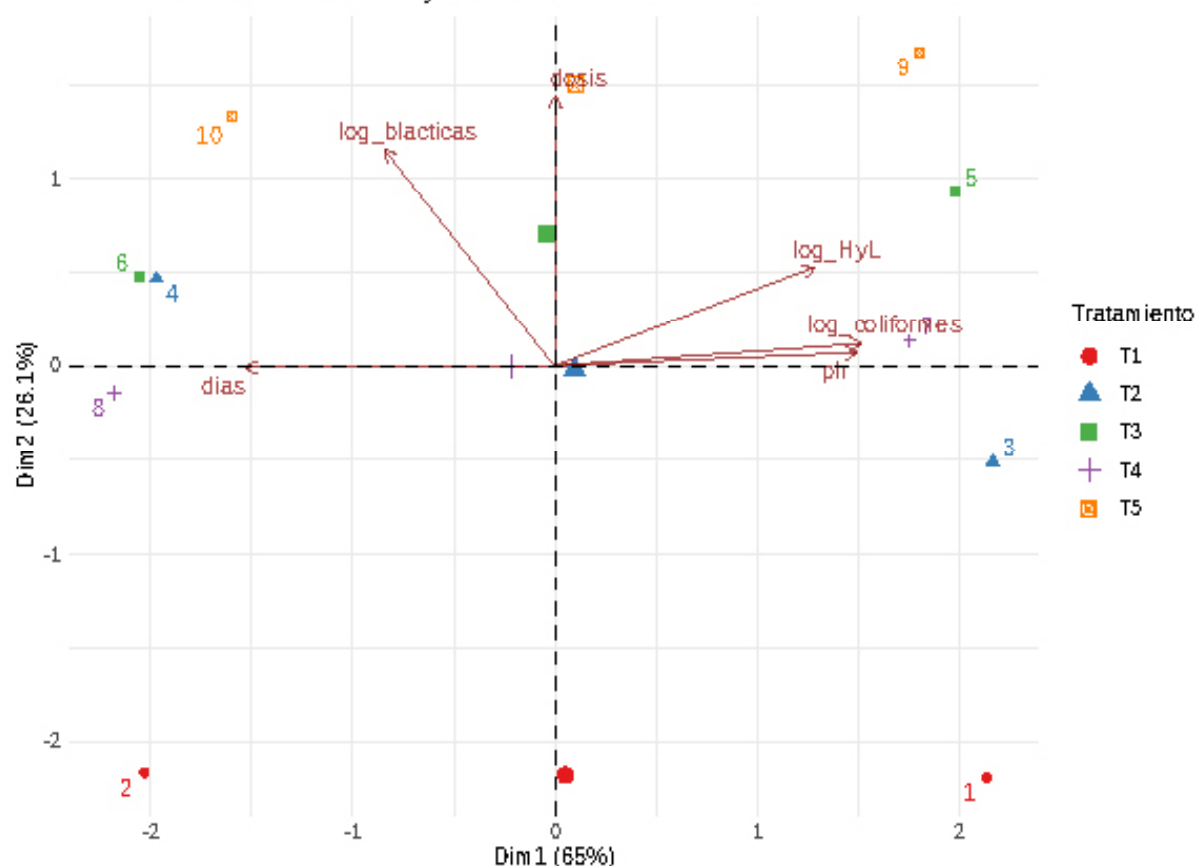


Figura 2: Grafica de bi-plot PCA con 6 variables y 5 tratamientos. La gráfica muestra las correlaciones entre las variables pH, días, dosis, bacterias lácticas, coliformes y hongos-levaduras. Los tratamientos fueron T1(control): sin inoculante, T2: inoculante líquido, dosis 250 g t⁻¹ MV, T3: inoculante líquido, dosis 500 g t⁻¹ MV, T4: inoculante sólido, dosis 250 g t⁻¹ MV, T5: inoculante sólido, dosis 500 g t⁻¹ MV.

el control T1 mantuvo valores superiores a 5,3 hasta el día 20. Este comportamiento coincide con lo reportado por Filya (2003), quien observó que los inoculantes de BAL aceleran la fase inicial de fermentación, reduciendo el riesgo de proliferación de microorganismos indeseables durante las primeras etapas del ensilaje.

Al día 40 los tratamientos con inoculante sólido (T4 y T5) presentaron los valores de pH más bajos (4,34–4,36), significativamente menores que los tratamientos con inoculante líquido (5,07–5,18). Este resultado sugiere que, aunque el inoculante líquido acelera la fermentación inicial, el inoculante sólido produce una acidificación más estable a largo plazo. Muck (2010) señala que diferentes formulaciones de inoculantes pueden presentar distinta persistencia y actividad metabólica durante el proceso fermentativo, lo cual podría explicar estas diferencias.

El control sin inoculante alcanzó un pH final de 4,74, intermedio entre ambos tipos de inoculantes. Esto demuestra que la parte aérea del yacón

posee microbiota láctica epífita suficiente para producir una fermentación adecuada, aunque con menor velocidad que los tratamientos inoculados. La presencia de carbohidratos fermentables en el material vegetal, incluyendo los FOS característicos del yacón (Pedreschi *et al.*, 2003), proporciona sustrato adecuado para el desarrollo de BAL.

El análisis microbiológico confirmó el éxito del proceso fermentativo en todos los tratamientos. El incremento de BAL desde 6,85–9,36 log₁₀ UFC g⁻¹ al día 1 hasta 8,00–9,95 log₁₀ UFC g⁻¹ al día 40 indica el establecimiento de una población bacteriana dominante. T2 registró el mayor recuento de BAL al día 40 (9,95 log₁₀ UFC g⁻¹) y, sin embargo, el pH más alto entre los inoculados (5,15). Esta disociación entre densidad de BAL y acidez puede existir debido a que el recuento en placa cuantifica células viables, no la producción neta de ácidos. El descenso del pH depende de varios factores, como la vía fermentativa predominante, la disponibilidad de sustrato

fermentable y la capacidad buffer del material ensilado (Pahlow *et al.*, 2003; Muck, 2010). Por ello, un recuento elevado de BAL no implica necesariamente menor pH.

La reducción de coliformes desde $6,70-7,51 \log_{10} \text{ UFC g}^{-1}$ hasta $3,65 \log_{10} \text{ UFC g}^{-1}$ en todos los tratamientos indica la efectividad del proceso de acidificación para inhibir microorganismos indeseables. Esta disminución de aproximadamente 3,5 ciclos logarítmicos está en concordancia con lo reportado por Pahlow *et al.* (2003), quienes establecen que pH inferiores a 4,5 son letales para la mayoría de enterobacterias. Los hongos y levaduras presentaron una reducción moderada, lo cual es esperable dado que estos microorganismos presentan mayor tolerancia a pH ácidos (Woolford, 1984). Finalmente, la estabilización del pH hacia los días 30–40 coincide con lo informado por Wang *et al.* (2019) en ensilaje de residuo de yacón inoculado con *Lactiplantibacillus plantarum*, donde el tratamiento con BAL redujo el pH más rápido, alcanzó el menor N-NH_3 e inhibió mohos y clostridios en las fases tempranas. La reducción de coliformes y enterobacterias observada en este trabajo concuerda asimismo con Cao *et al.* (2011) en ensilajes de residuos vegetales, donde el descenso de pH inhibe coliformes, mohos y levaduras en etapas iniciales.

El análisis de componentes principales reveló que el tiempo de fermentación (representado por días) es el factor que explica la mayor variabilidad en el sistema (65 %), mientras que el tratamiento aplicado (dosis e inoculante) explica el 26,1 %. Esto indica que, aunque los inoculantes modifican la dinámica fermentativa, el proceso temporal natural es el determinante principal de las características finales del silaje.

El efecto de la dosis presentó un patrón complejo. En las etapas intermedias (días 5, 10 y 20), las diferentes dosis mostraron comportamientos distintos, pero al día 40 estas diferencias desaparecieron. Esto sugiere que la dosis de inoculante afecta principalmente la velocidad de fermentación inicial, pero no determina el pH final una vez completado el proceso. Kleinschmit y Kung (2006) reportaron resultados similares, indicando que dosis superiores a las recomendadas no necesariamente mejoran la calidad final del silaje.

La composición microbiana final del silaje, con predominio de BAL (46–50 % de la población total) y reducción de coliformes (18–21 %),

indica un producto estable. Esta composición es favorable desde el punto de vista nutricional, ya que las BAL producen ácidos orgánicos que pueden actuar como promotores de crecimiento en animales (Weinberg *et al.*, 2003). Además, la presencia de FOS en el material vegetal de yacón (Lock y Rojas, 2005) podría potenciar estos efectos prebióticos en el animal.

Estudios futuros deberían evaluar el contenido de ácidos orgánicos específicos, la digestibilidad de la materia seca y el desempeño animal con dietas que incluyan este silaje, incluyendo el nitrógeno amoniacal (N-NH_3) y las pérdidas de materia seca, no determinados en este trabajo.

Conclusiones

El presente estudio demuestra que los residuos de cosecha de yacón pueden conservarse eficazmente mediante ensilaje, alcanzando valores de pH adecuados en la dinámica fermentativa del producto final. Todos los tratamientos lograron pH inferiores a 5,2 al día 40, indicando fermentación láctica.

Los inoculantes de BAL modifican la velocidad de acidificación, pero no el pH final del silaje. El inoculante líquido (500 g t^{-1}) acelera la fermentación inicial alcanzando pH de 4,67 al día 10, mientras el inoculante sólido produce acidificación más estable a largo plazo con pH de 4,34–4,36 al día 40.

El análisis microbiológico confirmó el incremento de BAL y la reducción drástica de coliformes en todos los tratamientos, indicando una mejor composición de la microbiota de los silos que podría repercutir en la calidad del silaje. El control sin inoculante alcanzó pH final aceptable (4,74), demostrando que el material vegetal posee microbiota epífita suficiente para una fermentación adecuada.

El uso de inoculantes se justifica cuando se requiere acelerar el proceso fermentativo y reducir riesgos de fermentaciones indeseables (p. ej. clostrídicas y entéricas) durante las etapas iniciales del ensilaje. Entre los inoculantes sólidos, la dosis de 250 g t^{-1} (T4) resultó equivalente a la de 500 g t^{-1} (T5) en el pH final; por lo tanto, se recomienda la dosis menor por costo-eficiencia. El tipo de formulado (sólido o líquido) sí mostró efecto sobre la acidificación final, siendo el inoculante sólido a 250 g t^{-1} la opción más eficiente para obtener pH bajo y estable a largo plazo.

Referencias bibliográficas

- Campos D, Betalleluz-Pallardel I, Chirinos R, Aguilar-Galvez A, Noratto G (2012). Prebiotic effects of yacon (*Smallanthus sonchifolius* Poepp. & Endl.) as a source of fructooligosaccharides and phenolic compounds with antioxidant activity. *Food Chemistry* 135(3): 1592-1599.
- Cao Y, Cai Y, Takahashi T, Yoshida N, Tohno M, Uegaki R, Nonaka K, Terada F (2011). Effect of lactic acid bacteria inoculant and beet pulp addition on fermentation characteristics and *in vitro* ruminal digestion of vegetable residue silage. *Journal of Dairy Science* 94(8): 3902-3912. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3623>
- Filya I (2003). The effect of *Lactobacillus buchneri* and *Lactobacillus plantarum* on the fermentation, aerobic stability and ruminal degradability of low dry matter corn and sorghum silages. *Journal of Dairy Science* 86(11): 3575-3581.
- Google (2026). Google Colaboratory. Disponible en: <https://colab.research.google.com/> (consultado julio 2026).
- Kleinschmit DH, Kung L (2006). A meta-analysis of the effects of *Lactobacillus buchneri* on the fermentation and aerobic stability of corn and grass and small-grain silages. *Journal of Dairy Science* 89(10): 4005-4013.
- Koike A, Murata T, Matsuda Y, Masuoka C, Okamoto C, Kabata K (2009). Cultivation and ensiling of yacon plants (*Smallanthus sonchifolius* [Poepp. & Endl.] H. Robinson) and the function of yacon silage. *Grassland Science* 55(1): 6-10.
- Lock O, Rojas R (2005). Química, usos y análisis del yacón. *Revista de Química* 19(2): 25-35.
- Lopera-Marín JJ, Angulo-Arizala J, Murgueitio Restrepo E, Mahecha-Ledesma L (2024). Bromatological characterization of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) silage in the tropical highlands of Colombia. *Livestock Research for Rural Development* 36(5): artículo 3664.
- McDonald P, Henderson AR, Heron SJE (1991). *The Biochemistry of Silage*. 2nd ed. Chalcombe Publications, Marlow, Reino Unido.
- Muck RE (2010). Silage microbiology and its control through additives. *Revista Brasileira de Zootecnia* 39(supl. especial): 183-191.
- Muck RE, Nadeau EMG, McAllister TA, Contreras-Govea FE, Santos MC, Kung L Jr (2018). Silage review: Recent advances and future uses of silage additives. *Journal of Dairy Science* 101(5): 3980-4000. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13839>
- Pahlow G, Muck RE, Driehuis F, Oude Elferink SJWH, Spoelstra SF (2003). Microbiology of ensiling. En: Buxton DR, Muck RE, Harrison JH (eds.), *Silage Science and Technology*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, Estados Unidos. pp. 31-93.
- Pedreschi R, Campos D, Noratto G, Chirinos R, Cisneros-Zevallos L (2003). Andean yacon root (*Smallanthus sonchifolius* Poepp. & Endl.) fructooligosaccharides as a potential novel source of prebiotics. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51(18): 5278-5284.
- Pundir RK, Rana S, Kashyap N, Kaur A (2013). Probiotic potential of lactic acid bacteria isolated from food samples: An *in vitro* study. *Journal of Applied Pharmaceutical Science* 3(3): 85-93.
- R Core Team (2026). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Soplín H (2004). Yacón: Fundamentos para el aprovechamiento de un recurso promisorio. Centro Internacional de la Papa (CIP), Lima, Perú.
- Wang L, Guan L, Fang J, Cai Y, Cao Y (2019). Fermentation characteristics and *in vitro* ruminal digestion of yacon residue silage with lactic acid bacteria inoculant or beet pulp. *Revista Brasileira de Zootecnia* 48: e20180152. <https://doi.org/10.1590/rbz4820180152>
- Weinberg ZG, Ashbell G, Hen Y, Azrieli A, Szakacs G, Filya I (2003). Ensiling whole-crop wheat and corn in large round bales. *Journal of Animal Science* 81(3): 687-691.
- Woolford MK (1984). *The Silage Fermentation*. Marcel Dekker, New York, Estados Unidos.