

Artículo científico

Suplementación de enzimas de *Pycnoporus sanguineus* CS2 en agua de bebida: efectos sobre el desempeño productivo y la morfología intestinal en pollos de engorda

Supplementation of *Pyconoporus sanguineus* CS2 Enzymes in Drinking Water: Effects on Productive Performance and Intestinal Morphology in Broiler Chicken

Suplementação de enzimas de *Pycnoporus sanguineus* CS2 na água potável: efeitos sobre o desempenho produtivo e a morfologia intestinal em frangos de corte

Datos de autoría

Iosvany López-Sandin[†]

Ingeniero Agrónomo

Philip Morris México, México

Contacto: iosvanyls@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7691-101X

Uziel Castillo-Velázquez[†]

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Nuevo León, México

ROR: <https://ror.org/01fh86n78>

Contacto: uziel.castillovl@uanl.edu.mx

ORCID: 0000-0002-0342-1703

Carlos Alberto Hernández Martínez

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía, Nuevo León, México

ROR: <https://ror.org/01fh86n78>

Contacto: carlos.hernandezmtz@uanl.edu.mx

ORCID: [0000-0003-2306-9679](https://orcid.org/0000-0003-2306-9679)

Raymundo Alejandro Pérez-Hernández

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Biológicas, Nuevo León, México

ROR: <https://ror.org/01fh86n78>

Contacto: raymundo.perezhrz@uanl.edu.mx

ORCID: [0000-0002-3981-8737](https://orcid.org/0000-0002-3981-8737)

Joel Horacio Elizondo-Luevano

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía, Nuevo León, México

ROR: <https://ror.org/01fh86n78>

Contacto: joel.elizondolv@uanl.edu.mx

ORCID: [0000-0003-2954-5939](https://orcid.org/0000-0003-2954-5939)

Carlos Jesús Castillo-Zacarias

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, Nuevo León, México

ROR: <https://ror.org/01fh86n78>

Contacto: carlos.castillozcr@uanl.edu.mx

ORCID: [0000-0003-1739-4379](https://orcid.org/0000-0003-1739-4379)

Roberto Parra-Saldívar

Cranfield University, Magan Centre of Applied Mycology, Bedfordshire, Reino Unido

ROR: <https://ror.org/05cncd958>

Contacto: R.ParraSaldivar@Cranfield.ac.uk

ORCID: [0000-0002-4958-5797](https://orcid.org/0000-0002-4958-5797)

Jesús Andrés Pedroza Flores

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía, Nuevo León, México

ROR: <https://ror.org/01fh86n78>

Contacto: jesus.pedrozafl@uanl.edu.mx

ORCID: [0000-0003-2713-639X](https://orcid.org/0000-0003-2713-639X)

Marcela Alejandra Gloria Garza

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Odontología, Nuevo León, México

ROR: <https://ror.org/01fh86n78>

Contacto: jmarcela.gloriagz@uanl.edu.mx

ORCID: [0000-0002-2838-3774](https://orcid.org/0000-0002-2838-3774)

Guadalupe Gutiérrez-Soto

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía, Biomolecular ROR:

<https://ror.org/01fh86n78>

Innovation Group, Nuevo León, México

Contacto: ggutierrez0402@gmail.com

ORCID [0000-0001-9754-7755](https://orcid.org/0000-0001-9754-7755)

[†] Estos autores contribuyeron por igual a este trabajo

Recibido 05-01-2026

Revisado 13-02-2026

Aceptado 27-03-2026

Resumen

El presente estudio evaluó el efecto sobre los parámetros productivos y la arquitectura intestinal en pollos de engorda del sobrenadante obtenido de *Pycnoporus sanguineus* CS2 suplementado en el agua de bebida. La investigación fue desarrollada en el municipio de Marín, Nuevo León, utilizando pollos de la raza Ross con un día de edad y distribuidos en dos tratamientos, el grupo control al cual se le suministró agua sin sobrenadantes y el grupo control al que se les brindó agua con 5% del sobrenadante. Previamente fueron cuantificadas las unidades enzimáticas de lacasa, celulasas y xilanasas por técnicas espectrofotométricas. Fue utilizado un diseño experimental completamente y los parámetros medidos fueron el consumo de alimento y agua, aumento de peso, eficiencia alimenticia y rendimiento de canal caliente. Posterior al sacrificio fue realizado el análisis morfométrico de tejidos intestinales mediante técnicas de histología convencional y tinción con hematoxilina y eosina para medir la altura de las vellosidades y la profundidad de las criptas. Los resultados mostraron que el sobrenadante posee mayor actividad de lacasa y b-glucosidasa. Con respecto a los parámetros operativos, el consumo de alimento fue similar entre tratamientos ($p > 0.05$), el grupo suplementado con el sobrenadante tuvo una mayor eficiencia alimenticia.

El análisis histológico reveló un incremento en la altura de las vellosidades del duodeno, lo que favorece la superficie de absorción. Así, el uso del sobrenadante de *Pycnoporus sanguineus* CS2 mejora la asimilación de nutrientes sin comprometer la integridad fisiológica.

Palabras clave: basidiomicetos; eficiencia alimenticia; enzimas activas en carbohidratos (CAZymes); lacasa; salud animal

Abstract

The present study evaluated the effects of the supernatant obtained from *Pycnoporus sanguineus* CS2, supplemented in drinking water, on productive performance parameters and intestinal architecture in broiler chickens. The research was conducted in the municipality of Marín, Nuevo León, Mexico, using one-day-old Ross broilers distributed into two treatments: a control group receiving water without supernatant supplementation and a treatment group receiving water supplemented with 5% (v/v) fungal supernatant. Prior to supplementation, enzymatic activities of laccase, cellulases, and xylanases were quantified using spectrophotometric techniques. A completely randomized experimental design was employed. The measured parameters included feed and water intake, body weight gain, feed conversion efficiency, and hot carcass yield. After slaughter, intestinal tissues were subjected to morphometric analysis using conventional histological techniques and hematoxylin and eosin staining to measure villus height and crypt depth. Results showed that the supernatant exhibited higher

laccase and β -glucosidase activities. Regarding productive parameters, feed intake did not differ significantly between treatments ($p > 0.05$); however, the group supplemented with the supernatant showed improved feed conversion efficiency. Histological analysis revealed increased duodenal villus height, enhancing the absorptive surface area. Thus, supplementation with *Pycnoporus sanguineus* CS2 supernatant improves nutrient assimilation without compromising physiological integrity.

Keywords: animal health; basidiomycetes; Carbohydrate-Active enzymes (CAZymes); feed efficiency; laccase

Resumo

O presente estudo avaliou o efeito do sobrenadante obtido de *Pycnoporus sanguineus* CS2, suplementado na água de bebida, sobre os parâmetros produtivos e a arquitetura intestinal de frangos de corte. A pesquisa foi conduzida no município de Marín, Nuevo León, México, utilizando frangos da linhagem Ross com um dia de idade, distribuídos em dois tratamentos: grupo controle, que recebeu água sem suplementação de sobrenadante, e grupo tratado, que recebeu água suplementada com 5% (v/v) do sobrenadante fúngico. Previamente, as atividades enzimáticas de lacase, celulasas e xilanasas foram quantificadas por meio de técnicas espectrofotométricas. Foi adotado um delineamento experimental inteiramente casualizado. Os parâmetros avaliados incluíram consumo de ração e água, ganho de peso, eficiência alimentar e rendimento de carcaça quente. Após o abate, realizou-se a análise morfométrica dos tecidos intestinais por meio de técnicas histológicas convencionais e coloração com hematoxilina

e eosina para mensurar a altura das vilosidades e a profundidade das criptas. Os resultados demonstraram que o sobrenadante apresentou maior atividade de lacase e β -glicosidase. Em relação aos parâmetros produtivos, o consumo de ração foi semelhante entre os tratamentos ($p > 0,05$); entretanto, o grupo suplementado apresentou melhor eficiência alimentar. A análise histológica revelou aumento na altura das vilosidades do duodeno, favorecendo a ampliação da superfície de absorção. Assim, o uso do sobrenadante de *Pycnoporus sanguineus* CS2 melhora a assimilação de nutrientes sem comprometer a integridade fisiológica.

Palavras-chave: basidiomicetos; eficiência alimentar; enzimas ativas em carboidratos (CAZymes); lacase; saúde animal

Introducción

La producción de carne de pollo enfrenta numerosos retos que afectan significativamente a la sostenibilidad y la viabilidad económica del sector. El cambio climático es una de las principales preocupaciones, ya que el aumento de las temperaturas provoca estrés térmico, lo que disminuye el rendimiento del crecimiento, reduce la eficiencia alimentaria y aumenta las tasas de mortalidad, lo que se traduce en pérdidas económicas sustanciales estimadas en 2360 millones de dólares anuales sólo en Estados Unidos (Abbas et al., 2025). Además, la escasez y el alto costo de los piensos, especialmente en las regiones tropicales, complican aún más los esfuerzos de producción (Kpomasse et al., 2021). La prevalencia de enfermedades, incluidos los

patógenos transmitidos por los alimentos y zoonóticos, supone una amenaza constante para la salud de las aves de corral y la confianza de los consumidores (Hafez et al., 2020).

Para mejorar los sistemas de producción de carne de pollo han surgido varias alternativas alimenticias que pueden sustituir eficazmente a las fuentes tradicionales de proteínas, como la harina de soya. Los aminoácidos sintéticos y cristalinos constituyen una opción viable, ya que permiten reducir el contenido de proteína bruta en la alimentación sin comprometer el rendimiento de los pollos de engorda, lo que podría reducir a la mitad la dependencia de la industria de la harina de soya (Selle et al., 2020). Las harinas de insectos, en particular de especies (como *Tenebrio molitor* y *Hermetia illucens*) ofrecen proteínas y grasas de alta calidad, lo que influye positivamente en el crecimiento y la calidad de la carne (Chodová y Tůmová, 2019). Además, la espirulina (*Arthrospira platensis*) se ha mostrado prometedora como suplemento alimenticio funcional, ya que mejora la salud y la calidad de la carne, al tiempo que presenta ventajas ecológicas con respecto a la agricultura convencional (Lestingi et al., 2024).

Otras alternativas para mejorar los sistemas de producción de carne de pollo identificados son las alternativas enzimáticas (Walker et al., 2024). En este sentido se ha reportado que enzimas como la xilanas, la celulasa, la glucanasa y la fitasa mejoran la digestibilidad de los ingredientes alternativos de los piensos, lo que mejora la utilización de los nutrientes y el rendimiento general de los pollos de engorda (Velázquez-De Luci et al., 2021). Así, los basidiomicetos ofrecen alternativas prometedoras a las enzimas lignocelulolíticas tradicionales para mejorar los sistemas de producción de carne de pollo gracias a sus capacidades enzimáticas únicas (Nuraini et al., 2022). Estos

hongos poseen dos sistemas enzimáticos extracelulares principales: un sistema hidrolítico, que incluye xilanasas y celulasas para la degradación de polisacáridos, y un sistema ligninolítico oxidativo, que comprende lacasa y peroxidasas que degradan eficazmente la lignina (Peralta et al., 2017). Estudios han identificado cepas específicas, como *Agaricus* sp., *Lentinula edodes*, *Cantharellus cibarius* o *Pleurotus* sp., que muestran una alta producción de enzimas durante la fermentación de diversos sustratos lignocelulósicos (Velázquez-De Luci et al., 2021). La capacidad de manipular las condiciones de fermentación permite adaptar la producción de enzimas, optimizando la relación entre la lacasa y la manganeso peroxidasa, lo que puede optimizar la degradación de materiales vegetales complejos, mejorando así la disponibilidad de nutrientes en las dietas avícolas (Zancan et al., 2015). Este enfoque biotecnológico no sólo favorece la gestión sostenible de los residuos, sino que también contribuye a sistemas de producción cárnica más eficientes. Por lo que, el uso de hongos basidiomicetos y sus complejos enzimáticos representa una de las fronteras más prometedoras en la nutrición avícola. En este contexto, la presente investigación evaluó el efecto de la suplementación de enzimas lignocelulolíticas de *Pycnoporus sanguineus* CS2 en agua de bebida sobre el desempeño productivo y la morfología intestinal en pollos de engorda.

Metodología

Todos los compuestos químicos utilizados fueron de grado reactivo. Los ingredientes para preparar los medios de cultivo fueron de la marca Becton, Dickenson and Company BD (Le Pont de Claix, Francia), de la casa Sigma-Aldrich (St. Louis, MO) o CTR Scientific.

Material biológico y preparación para el inóculo

La cepa *Pycnoporus sanguineus* CS2 se encuentra depositada en el cepario de macromicetos nativos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Es conservada por resiembras periódicas en medio YMGA: glucosa 4 g L⁻¹, extracto de malta 10 g L⁻¹, extracto de levadura 4 g L⁻¹ y agar 15 g L⁻¹.

La preparación del inóculo consistió en la reactivación de la cepa en el medio YMGA, cultivadas por cinco días. A partir de la periferia de las colonias reactivas, fueron tomados cilindros de 0.5 cm para la siembra de medios líquidos.

Producción enzimática en medio líquido

La producción enzimática fue llevada a cabo en matraces Erlenmeyer de dos litros, con 1000 mL del medio All-Bran Flakes de Kellogg's al 2% en buffer fosfato de potasio 60 mM, ajustado a pH 6.0. Los matraces fueron esterilizados a 121 °C por 15 minutos a 15 libras de presión. Fueron inoculados con seis cilindros de 0.5 cm de diámetro, tomados de la periferia de un cultivo con cinco días de crecimiento. Los cultivos fueron incubados a 28 °C, en condiciones de agitación a 150 rpm por 18 días. Tiempo al cual fueron filtrados a través de papel Whatman No. 1 y congelados hasta su utilización.

Ensayos enzimáticos

Las actividades de celulasa, xilanasas, amilasa y lacasa fueron cuantificadas a partir de los sobrenadantes de cultivo. Las actividades hidrolíticas (celulasas: CMCasas, Avicelasas y b-glucosidasa; xilanasas y amilasas) fueron detectadas mediante la

determinación de azúcares reductores liberados, siguiendo el método del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) descrito por Miller (1959).

La mezcla de reacción fue constituida por 0.5 mL de buffer citrato de sodio (50 mM, pH 5.0), 0.3 mL de sustrato al 1% (w/v) según el ensayo específico (carboximetilcelulosa, Avicel, celobiosa, almidón o xilano) y 0.2 mL de muestra. Las reacciones fueron incubadas por 30 min a 50 °C. Posteriormente, la cuantificación de azúcares reductores fue realizada tomando 0.1 mL de la mezcla de reacción, los cuales fueron adicionados a 0.1 mL del reactivo DNS.

La mezcla fue sometida a ebullición durante 5 min y, posteriormente, fue colocada en un baño de hielo por 5 min. Finalmente, 1 mL de agua bidestilada fue agregado a la reacción y la absorbancia fue leída a 540 nm en un espectrofotómetro Shimadzu UV-Vis 1800 (Tokio, Japón). La curva de calibración fue construida con glucosa o xilosa en un rango de 0 a 1000 mg/L. Todos los ensayos fueron realizados por triplicado. Una unidad de actividad (U) fue definida como la cantidad de enzima necesaria para liberar 1 mmol de azúcar reductor por minuto bajo las condiciones experimentales establecidas.

Para la determinación de la actividad lacasa fue seguido el método reportado por Abadulla et al. (2000), utilizando una mezcla de reacción que consistió en 0.1 mL de 2,6-dimetoxifenol (DMP) 20 mM como sustrato, 0.89 mL de buffer acetato de sodio (200 mM, pH 4.5) y 0.1 mL de muestra. La oxidación del DMP fue monitoreada mediante la lectura de la absorbancia a 468 nm en un espectrofotómetro Shimadzu UV-Vis 1800 (Tokio, Japón). El incremento en la densidad óptica fue registrado durante un minuto y la actividad fue calculada utilizando el coeficiente de extinción molar del DMP oxidado

($e_{468} = 49\,600\text{ M}^{-1}\text{ cm}^{-1}$). Una unidad de actividad enzimática (U) fue definida como la cantidad de enzima necesaria para oxidar 1 mmol de sustrato por minuto bajo las condiciones de ensayo descritas. Todos los análisis fueron realizados por triplicado.

Localización del experimento

El presente trabajo se llevó a cabo en la Unidad Académica Marín, de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), ubicada en el Municipio Marín, Nuevo León, México. Marín está localizado en latitud 23° 53', longitud -100° 2' O y altitud de 400 m. La región presenta un clima predominantemente seco y semiseco, con una temperatura media anual de 20 °C. Durante el ciclo anual, la temperatura fluctúa habitualmente entre los 9 °C en el periodo invernal y los 36 °C en el estival.

El protocolo de manejo y cuidado de los pollos fue realizado de acuerdo con los lineamientos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-062-ZOO (1999). Donde un total de 60 pollos de la raza Ross con un día de edad y peso promedio de $38 \pm 2\text{ g}$ fueron utilizados en la investigación.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar con un total de 60 pollos, distribuidos aleatoriamente en dos tratamientos experimentales. Cada tratamiento estuvo conformado por 30 pollos no sexados, organizados en tres corrales con 10 aves por corral. Cada unidad experimental (corral) fue equipada con un comedero y un bebedero.

Los tratamientos consistieron en el suministro de agua de bebida de la siguiente manera: T1 = control con agua corriente y T3 = agua suplementada con el sobrenadante de *Pycnoporus sanguineus* CS2. Las dietas fueron formuladas de acuerdo con los

requerimientos establecidos por el NRC (1994) y fueron suministraron de manera similar a ambos tratamientos (Tabla 1).

Tabla 1. Composición de las dietas

Ingrediente (g/kg)	Iniciación (0-21 d)	Finalización (22-42 d)
Maíz molido	467.2	556.4
Pasta de soya (48% PC)	392.2	312.9
Gluten de maíz	53.3	44.4
Premezcla de vitaminas y minerales	11.7	13.3
Carbonato de calcio	14.4	21.4
Fosfato dicálcico	21.3	22.2
Cloruro de sodio	6	6.4
Metionina DL-	1.9	0.8
Aceite de canola®	32	22.2

Parámetros productivos.

El sacrificio de las aves fue realizado estrictamente de acuerdo con los lineamientos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-033-SAG/ZOO (2014), referente a los métodos para dar muerte a los animales domésticos y silvestres. Los parámetros productivos evaluados fueron el consumo de alimento (CA), consumo de agua (CAg), ganancia diaria de peso (GDP), peso al sacrificio (PS), eficiencia alimenticia (EA), rendimiento de canal caliente (RCC) y porcentaje de grasa corporal (PGC).

Para la determinación del CA, fue utilizada la siguiente ecuación:

$$CA = \text{Alimento ofrecido} - \text{Alimento rechazado}$$

El consumo de agua (CAg) fue estimado mediante la diferencia entre el agua ofrecida y la rechazada durante un periodo de 24 horas por 7 días. Para el cálculo de la GDP, los animales fueron pesados en una balanza digital y los datos fueron procesados mediante la ecuación:

$$GDP = \frac{W_{\text{actual}} - W_{\text{previo}}}{t}$$

Donde W_{actual} corresponde al peso registrado al final del periodo, W_{previo} al peso registrado al inicio de este y t al intervalo de tiempo en días (7 días para pesajes semanales).

La eficiencia alimenticia (EA) fue calculada empleando la relación entre el peso vivo y el alimento consumido:

$$EA = \frac{PS}{CA_{\text{total}}}$$

Donde PS representa el peso del ave al momento del sacrificio y CA_{total} el consumo acumulado durante el ciclo productivo.

Análisis histológico

Para la evaluación de la morfología intestinal, fue empleada la metodología descrita por Adibmoradi et al. (2006). Fueron recolectados tres segmentos de tejido de 1 cm de longitud de las porciones proximal, media y distal del duodeno, yeyuno e íleon. Estas

muestras fueron preservadas en una solución amortiguadora de formalina neutra al 10% para su fijación.

Posteriormente, las secciones transversales (5 mm de espesor) de cada segmento intestinal fueron embebidas en parafina de baja fusión y fueron teñidas con hematoxilina y eosina. Mediante esta técnica, fueron determinados los siguientes parámetros: altura de la vellosidad (AV) y profundidad de la cripta (PC). La AV fue medida desde el ápice de la vellosidad hasta la unión vellosidad-cripta, mientras que la PC fue registrada como la longitud desde el límite superior de la submucosa hasta la base de la vellosidad. Todas las mediciones fueron realizadas en un microscopio LEICA y el índice morfológico fue determinado mediante el procesador de imágenes (Version 1, Leica Imaging System Ltd, Cambridge, UK). Fueron efectuadas 15 mediciones por sección intestinal para cada parámetro por triplicado, asegurando la robustez estadística de los datos morfológicos.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados mediante un diseño experimental completamente al azar. El cumplimiento de los supuestos de homogeneidad de varianza fue verificado mediante la prueba de Levene. Posteriormente, los resultados fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) simple. En los casos donde fueron detectadas diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$), fue realizada una comparación de medias mediante la prueba de Tukey. Todos los procedimientos estadísticos fueron ejecutados utilizando el software InfoStat (versión 2021). Los resultados fueron expresados como la media aritmética $\pm$ el error estándar de la media (EEM).

Resultados y discusión

Perfil enzimático

Los resultados del perfil enzimático del sobrenadante fueron analizados (Figura 1), revelando una capacidad multienzimática, destacando la actividad lacasa (3320 U/L) sobre las enzimas activas sobre carbohidratos (CAZymes), confirmando el robusto potencial ligninolítico de *Pycnoporus sanguineus* CS2. Si bien, las CAZymes fueron significativamente menores, la b-glucosidasa registró una actividad de 225 U/L, siendo la más representativa dentro del complejo de las celulasas. Por su parte, la xilanasa y la CMCase (endoglucanasa) mostraron niveles basales de 20 U/L y 18 U/L, respectivamente. Cabe mencionar que no fue detectada la actividad de avicelasa. Finalmente, la actividad de la amilasa fue detectada en niveles mínimos (4 U/L), lo que sugiere que el metabolismo del hongo está orientado preferencialmente hacia la degradación de componentes estructurales de la pared celular vegetal (lignocelulosa) más que hacía sustratos de reserva como el almidón.

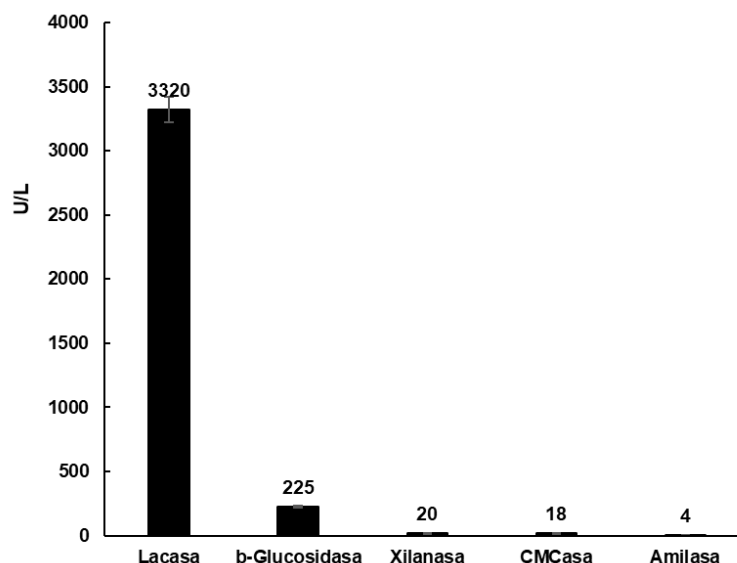


Figura 1. Actividad enzimática de los sobrenadantes de *Pycnoporus sanguineus* CS2. Todas las determinaciones fueron realizadas por triplicado, en todos los casos la desviación fue menor al 5%.

El perfil enzimático del sobrenadante de *Pycnoporus sanguineus* CS2 mostró un patrón multienzimático dominado por una alta actividad de lacasa y una presencia secundaria de CAZymes, lo cual concuerda con los comportamientos típicos de los basidiomicetos de la pudrición blanca (Zmitrovich et al., 2023). Aunque mostró niveles de lacasa mayores a los reportados para otras cepas de *P. sanguineus* (de Souza et al, 2022).

Los resultados obtenidos en los parámetros productivos (Tabla 2) indican que la suplementación enzimática a través del agua (T3) no afectó significativamente el

consumo diario de alimento (CDA) respecto al grupo control (T1), lo cual sugiere que la adición del suplemento no modificó la palatabilidad del agua ni el comportamiento alimentario de las aves. Este hallazgo coincide con lo reportado por Gous y Iji (2001), quienes evaluaron la administración de un complejo multienzimas en el agua y en el alimento, sin observar diferencias significativas en el consumo de alimento, pero sí mejoras en la eficiencia alimenticia y el crecimiento. Del mismo modo, Attia et al. (2020) demostraron que la suplementación continua o intermitente de multienzimas en el agua de bebida no altera la ingesta, aunque puede modular el metabolismo digestivo y la utilización de nutrientes.

A pesar de la ausencia de cambios en el consumo, se observaron diferencias significativas en la ganancia diaria de peso (GDP) y en la eficiencia alimentaria (EA). El grupo T3 presentó una GDP menor (0.247 kg/día) comparado con T1 (0.263 kg/día), lo que sugiere un posible efecto transitorio del suplemento sobre la tasa de crecimiento. Este fenómeno puede atribuirse a la adaptación intestinal al suplemento enzimático, que en fases iniciales puede redistribuir la energía hacia procesos digestivos antes que, al crecimiento, como lo plantean Mokoma y Ciacciariello (2010) al analizar dietas suplementadas con β -glucanasas y xilasas. Sin embargo, la mejor eficiencia alimentaria observada en T3 (3.09 vs. 2.85) indica que las aves utilizaron los nutrientes de manera más eficiente, lo que podría reflejar una optimización en la digestión de polisacáridos no amiláceos y una reducción de la viscosidad intestinal, tal como se ha descrito en diversos estudios (Bharathidhasan et al., 2010; Attia et al., 2020).

Estos resultados sugieren que, aunque el suplemento enzimático no incrementó la ganancia de peso absoluta, mejoró la eficiencia del aprovechamiento del alimento, lo que representa un beneficio metabólico neto en términos de conversión y costos. De hecho, Bharathidhasan et al. (2010) reportaron incrementos de hasta 7.9 % en el peso y una reducción de 10 % en el costo de alimentación por kilogramo de ganancia en aves tratadas con enzimas multicomponente.

En cuanto al consumo de agua (C_{agua}), los valores similares entre tratamientos (0.148 vs. 0.146 L/ave/día; $p = 0.05$) descartan efectos osmóticos o de rechazo al suplemento. Este comportamiento coincide con los hallazgos de Attia et al. (2020), quienes demostraron que la administración de enzimas vía agua no modifica significativamente la ingesta hídrica, aun en tratamientos continuos o intermitentes, lo que evidencia una tolerancia fisiológica adecuada del suplemento.

Tabla 2. Parámetros productivos

Tratamiento	CDA (kg/día)	GDP (kg/día)	EA	C_{agua} (L/día)
T1	0.746 ± 0.026 ^a	0.263 ± 0.009 ^a	2.85 ± 0.099 ^b	0.148± 0.005 ^a
T3	0.755 ± 0.022 ^a	0.247 ± 0.007 ^b	3.09 ± 0.092 ^a	0.146± 0.004 ^b
p-value	0.528	0.05	0.05	0.05

Nota. T1: Grupo control (dieta basal); T3: Suplemento multienzimático de *Pycnopus sanguineus* CS2 administrado en el agua de bebida. CDA: Consumo diario de alimento (kg/d); GDP: Ganancia diaria de peso (kg/d); EA: Eficiencia alimenticia (GDP/CDA);

C_{agua} : Consumo de agua (L/d). ^{a,b} Literales distintas en una misma columna indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$) según la prueba de Tukey. Los valores representan la media $\pm$ el error estándar.

Análisis morfométrico

El análisis morfométrico intestinal (Figura 2) evidenció que la suplementación enzimática líquida (T3) generó respuestas diferenciadas según el segmento intestinal, reflejando una adaptación funcional del epitelio digestivo frente a la acción del complejo multienzimático.

En el duodeno, el aumento en la altura de las vellosidades ($AV \approx 950 \mu m$) observado en el grupo T3 fue un hallazgo determinante que explica la mayor eficiencia alimenticia ($EA = 3.09$) registrada en este tratamiento. Este efecto coincide con lo reportado por Zubaidah et al. (2024) y Pourazadi et al. (2024), quienes demostraron que la suplementación con enzimas complejas (mananasa, proteasa y carbohidrasa) incrementa significativamente la altura y la relación AV:PC en el duodeno y yeyuno, debido a una mejor digestión de los polisacáridos no amiláceos (PNA) y una reducción de la viscosidad del quimo. La mejora en la arquitectura duodenal amplía la superficie de absorción de nutrientes, potenciando la acción conjunta de las enzimas endógenas y de las lacasa y β -glucosidasa aportadas por el suplemento fúngico, responsables de liberar azúcares y compuestos fenólicos de la matriz vegetal (Pourazadi et al. 2024).

En el yeyuno e íleon, el patrón fue opuesto, las aves del grupo control (T1) mostraron vellosidades de mayor tamaño, mientras que el grupo T3 presentó una reducción en la profundidad de las criptas ($PC \approx 65 \mu m$). Esto es relevante, ya que una menor PC indica menor recambio celular y, por ende, un menor costo energético de mantenimiento

epitelial (Pourazadi et al., 2024; Elsharkawy et al., 2025). Esta redistribución energética podría explicar porque, a pesar de una ligera reducción en la ganancia diaria de peso (GDP), las aves del grupo T3 utilizaron el alimento de manera más eficiente, optimizando la digestión y absorción en los tramos proximales del intestino (Elsharkawy et al., 2025).

La estabilidad de la PC en el íleon para ambos tratamientos sugiere que el suplemento no provocó efectos citotóxicos ni inflamatorios en la mucosa distal, lo cual coincide con los resultados de Zubaidah et al. (2024), donde la adición de enzimas a dietas con torta de palmiste no alteró negativamente la histología intestinal ni los indicadores de estrés. Este mantenimiento estructural implica una integridad epitelial preservada, fundamental para evitar fugas paracelulares y mantener la eficiencia osmótica intestinal.

Finalmente, la ligera reducción en el consumo de agua (C_{agua}) observada en el grupo T3 puede vincularse con la disminución de la viscosidad del quimo y la mayor eficiencia de absorción de nutrientes, efectos típicos de la degradación de PNA como arabinoxilanos y β -glucanos por enzimas exógenas (Pourazadi et al., 2024). Este fenómeno contribuye a un tránsito intestinal más fluido y a una menor carga osmótica en el íleon, favoreciendo un equilibrio hídrico y digestivo más estable.

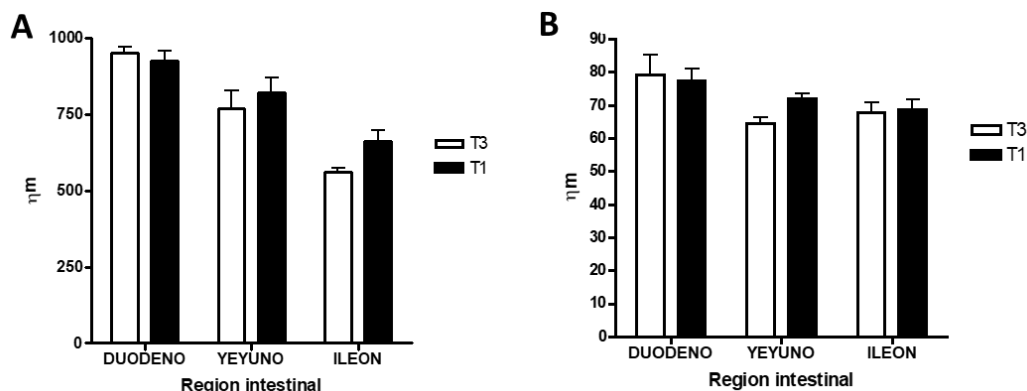


Figura 2. Efecto del complejo multienzimático en el intestino delgado de pollos de engorda. A corresponde a la altura de velocidad y B a la profundidad de criptas.

Cabe destacar que, la aplicación de complejos enzimáticos de origen fúngico en la alimentación de pollos de engorde no sólo optimiza la liberación y absorción de nutrientes, sino que también ejerce un efecto modulador sobre la arquitectura y funcionalidad del ecosistema intestinal. La degradación parcial y controlada de los polisacáridos no amiláceos (PNA) —principalmente xilanos y celulosas— por acción de xilanasas, celulasas y β -glucosidasas derivadas de basidiomicetos como *Pleurotus*,

Trametes y *Pycnoporus*, genera xilo-oligosacáridos (XOS) y celo-oligosacáridos (COS) con reconocida actividad prebiótica (Pourazadi et al., 2024; Elsharkawy et al., 2025).

Estos oligosacáridos actúan como sustratos selectivos para bacterias beneficiosas —notablemente *Lactobacillus* y *Bifidobacterium*— promoviendo su proliferación y desplazando microorganismos potencialmente patógenos por exclusión competitiva. A su vez, la fermentación de XOS y COS en el intestino grueso conduce a la producción de ácidos grasos de cadena corta (AGCC), como el acetato, propionato y butirato, que reducen el pH luminal, fortalecen las uniones epiteliales y modulan la inmunidad

intestinal (Zubaidah et al., 2024; Pourazadi et al., 2024). El butirato, en particular, ha sido vinculado con una mayor altura de vellosidades y una menor profundidad de criptas, atributos que concuerdan con los resultados observados en el grupo T3.

En términos productivos, este efecto sinérgico entre digestión enzimática y microbiota intestinal se traduce en una mejora integral del índice de conversión alimenticia (FCR), ya que la energía destinada al mantenimiento intestinal disminuye mientras aumenta la eficiencia metabólica de absorción (Attia et al., 2020). Desde una perspectiva ambiental, la reducción de la excreción de nitrógeno y fósforo no asimilados constituye un beneficio adicional, mitigando la carga contaminante de los efluentes avícolas, un aspecto de creciente relevancia en la producción sostenible (Gous y Iji, 2001; Bharathidhasan et al., 2010).

En consecuencia, la suplementación con exo-enzimas fúngicas —ya sea directamente o mediante pretratamientos de fermentación en estado sólido (FES) de ingredientes fibrosos— representa una estrategia biotecnológica de doble impacto, mejora el aprovechamiento de nutrientes a nivel animal y contribuye a la sostenibilidad ambiental del sistema productivo. Este enfoque se alinea con las tendencias actuales de la nutrición aviar post-antibiótica, orientadas hacia la manipulación benéfica del microbioma intestinal a través de enzimas funcionales y metabolitos prebióticos (Elsharkawy et al., 2025; Pourazadi et al., 2024).

Conclusiones

La suplementación con el sobrenadante enzimático de *Pycnoporus sanguineus* CS2 en pollos de engorde mostró efectos positivos en el rendimiento productivo y la morfología intestinal. El extracto enzimático se caracterizó por una elevada actividad ligninolítica y un perfil multienzimático que favoreció la digestión de componentes estructurales de la dieta. Su inclusión no modificó el consumo de alimento ni de agua, lo que indica una adecuada aceptabilidad y compatibilidad fisiológica, pero sí se asoció con una mejor eficiencia alimenticia, evidenciando un uso más efectivo de los nutrientes ingeridos. A nivel intestinal, la suplementación promovió una mayor altura de vellosidades en el duodeno y una menor profundidad de criptas en el yeyuno, lo que sugiere una optimización de la absorción y una reducción del recambio epitelial, sin alteraciones en la integridad histológica del íleon

Así, el sobrenadante multienzimático de *Pycnoporus sanguineus* CS2 constituye una herramienta biotecnológica prometedora para la avicultura moderna, capaz de mejorar la eficiencia productiva y la salud intestinal de manera natural, alineando la productividad con la sostenibilidad ambiental y el bienestar animal.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por parte de la Universidad Autónoma de Nuevo León, a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por su apoyo al proyecto CBF-2025-I-2283 "Mico-biorrefinería para la valorización de residuos agroindustriales regional con base en el estudio y aplicación de basidiomicetos nativos: Una oportunidad para el fomento de la bioeconomía circular en el noreste de México" y al "Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo" dentro de la red latinoamericana de desarrollo 'Lacasas Inmovilizadas para la Degradación de Compuestos Aromáticos en Aguas Residuales' (LIDA, proyecto 318RT0552).

Referencia

Abadulla, E., Robra, K. H., Gübitz, G. M., Silva, L. M., & Cavaco-Paulo, A. (2000).

Enzymatic decolorization of textile dyeing effluents. *Textile Research Journal*, 70(5), 409–414. <https://doi.org/10.1177/004051750007000506>

Abbas, A. O., Nassar, F. S., & Al Ali, A. M. (2025). Challenges of ensuring sustainable poultry meat production and economic resilience under climate change for achieving sustainable food security. *Research on World Agricultural Economy*, 159–171. <https://doi.org/10.36956/rwae.v6i1.1441>

Adibmoradi, M., Navidshad, B., Seifdavati, J., & Royan, M. (2006). Effect of dietary garlic meal on histological structure of small intestine in broiler chickens. *The Journal of Poultry Science*, 43(4), 378–383. <https://doi.org/10.2141/jpsa.43.378>

Attia, Y. A., El-Kelawy, M., Al-Harathi, M., & El-Shafey, A. (2020). Impact of multienzymes dose supplemented continuously or intermittently in drinking water on growth performance, nutrient digestibility, and blood constituents of broiler chickens. *Animals*, 10(3), 375. <https://doi.org/10.3390/ani10030375>

Bharathidhasan, A., Chandrasekaran, D., Natarajan, A., Ravi, R., & Ezhilvalavan, S.

(2010). Effect of enzyme supplementation to nutrient reduced diet on performance of broilers. *Tamilnadu Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 6(1), 1-7.*

Chodová, D., & Tůmová, E. (2020). Insects in chicken nutrition: A review. *Agronomy Research*, 18(2), 376-392. 10.15159/AR.20.003

de Souza Jr, E. F., Santos, I. M.,

Souto, F., Calado, V., & Pereira Jr, N. (2022). Optimization and implementation

of fed-batch strategy to produce ligninolytic enzyme from the white-rot basidiomycete *Pycnoporus sanguineus* in bubble column reactor. *Fermentation*,

8(9), 418. <https://doi.org/10.3390/fermentation8090418>

Elsharkawy, R. R., Abdelkhalek, A. M., Abd-Elsamee, M. O., & Elsherif, H. R. (2025).

Effect of dietary probiotics and enzymes addition on broiler performance, carcass characteristics and intestinal morphology. *Assiut Veterinary Medical Journal*,

71(184), 350-363. 10.21608/avmj.2025.310306.1337

- Gous, R. M., & Iji, P. A. (2001). Evaluating the route of administration of an exogenous microbial enzyme for broiler chickens. *Journal of Applied Poultry Research*, 10(2), 150-153. <https://doi.org/10.1093/japr/10.2.150>
- Hafez, H. M., & Attia, Y. A. (2020). Challenges to the poultry industry: Current perspectives and strategic future after the COVID-19 outbreak. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 516. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00516>
- Kpomasse, C. C., Oke, O. E., Houndonougbo, F. M., & Tona, K. (2021). Broiler production challenges in the tropics: A review. *Veterinary Medicine and Science*, 7(3), 831-842. <https://doi.org/10.1002/vms3.435>
- Lestingi, A., Alagawany, M., Di Cerbo, A., Crescenzo, G., & Zizzadoro, C. (2024). *Spirulina (Arthrospira platensis)* used as functional feed supplement or alternative protein source: A review of the effects of different dietary inclusion levels on production performance, health status, and meat quality of broiler chickens. *Life*, 14(12), 1537. <https://doi.org/10.3390/life14121537>

Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*, 31(3), 426-428.
<https://doi.org/10.1021/ac60147a030>

Mokoma, M. J., & Ciacciariello, M. (2010). The use of enzyme supplementation for wheat-barley diets in poultry as a means of improving productive performance. *M.Sc. Thesis, University of Limpopo, South Africa.*

Nuraini, N., Mirzah, M., Nur, Y. S., & Harnentis, H. (2022). Improving *Azolla microphylla* through fermentation with lignocellulolytic fungi and its application in broiler feed. *Advances in Animal and Veterinary Sciences*, 10(5), 1090-1100.
<https://doi.org/10.17582/journal.aavs/2022/10.5.1090.1100>

Ohimain, E. I., & Ofongo, R. T. S. (2014). Enzyme supplemented poultry diets: Benefits so far—A review. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*, 3(1), 31-39.

Peralta, R. M., da Silva, B. P., Côrrea, R. C. G., Kato, C. G., Seixas, F. A. V., & Bracht, A. (2017). Enzymes from basidiomycetes—Peculiar and efficient tools for

biotechnology. In *Biotechnology of Microbial Enzymes* (pp. 119–149). Academic Press.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803725-6.00005-4>

Pourazadi, Z., Salari, S., Tabandeh, M. R., & Abdollahi, M. R. (2024). Insoluble fibre and enzyme supplementation in mash or pellet diets on growth performance, apparent ileal digestibility and intestinal morphology of broiler chickens fed barley containing diets. *Veterinary Medicine and Science*, 10(2), e1399.

<https://doi.org/10.1002/vms3.1399>

Selle, P. H., Dorigam, J. C. D. P., Lemme, A., Chrystal, P. V., & Liu, S. Y. (2020). Synthetic and crystalline amino acids: Alternatives to soybean meal in chicken-meat production. *Animals*, 10(4), 729. <https://doi.org/10.3390/ani10040729>

Velázquez-De Lucio, B. S., Hernández-Domínguez, E. M., Villa-García, M., Díaz-Godínez, G., Mandujano-Gonzalez, V., Mendoza-Mendoza, B., & Álvarez-Cervantes, J. (2021). Exogenous enzymes as zootechnical additives in animal feed: A review. *Catalysts*, 11(7), 851. <https://doi.org/10.3390/catal11070851>

Walker, H., Vartiainen, S., Apajalahti, J., Taylor-Pickard, J., Nikodinoska, I., & Moran, C. A. (2024). The effect of including a mixed-enzyme product in broiler diets on

performance, metabolizable energy, phosphorus and calcium retention. *Animals*, 14(2),

328. <https://doi.org/10.3390/ani14020328>

Zancan, L. R., Barreto, A. R., & de Menezes, C. R. (2015). Estudo da produção enzimática fúngica por basidiomicetos cultivados em resíduos lignocelulósicos.

Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, 19(3), 850–860.

<https://doi.org/10.5902/2236117018368>

Zmitrovich, I. V., Arefiev, S. P., Kapitonov, V. I., Shiryaev, A. G., Ranadive, K. R., & Bondartseva, M. A. (2023). Substrate ecology of wood-inhabiting basidiomycetes.

In *Ecology of Macrofungi* (pp. 179–221). Springer.

Zubaidah, S., Ariyadi, B., Hanim, C., & Baskara, A. P. (2024). Health status of broiler chickens fed diets containing palm kernel cake with enzyme mixture supplementation. *Tropical Animal Science Journal*, 47(4), 465–474.

<https://doi.org/10.5398/tasj.2024.47.4.465>