



Abanico Microbiano. Enero-Diciembre 2025; 1:1-10. <https://doi.org/10.21929/abanicomicrobiano/2025.7>

Revisión de Literatura. Recibido: 06/01/2025. Aceptado: 27/11/2025. Publicado: 06/12/2025. Clave: 2025-7.

<https://www.youtube.com/watch?v=cAZisEK0sF8>

Manipulación de la fermentación ruminal mediante electrofermentación

Manipulation of ruminal fermentation by electrofermentation

López-Hernández Rocío*¹ , Casanova-Moreno Jannu² , Vital-Jácome Miguel³ , González-Dávalos Laura⁴ , Mora-Izaguirre Ofelia**⁴ 



¹Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Producción y la Salud Animal, México. ²Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, Querétaro, México. ³Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Unidad Académica Juriquilla, Laboratorio de Investigación en Procesos Avanzados de Tratamiento de Aguas, México. ⁴Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores-Cuautitlán, Laboratorio de Rumiología y Metabolismo Nutricional. C.P. 76231, Querétaro, México. *Autor Responsable: López-Hernández Rocío. **Autor para correspondencia: Mora-Iza Ofelia. E-mail: mvz.rlh@gmail.com, jcasanova@cideteq.mx, mvitalj@ingen.unam.mx, lauragd@comunidad.unam.mx, ofemora66@unam.mx

RESUMEN

La fermentación ruminal (FR) es un proceso anaerobio de óxido-reducción realizado por una comunidad microbiana compleja, mediante el cual se generan ácidos grasos volátiles (AGV), principal fuente de energía para los rumiantes. Sin embargo, la FR también produce metano, un gas de efecto invernadero que afecta la sostenibilidad de los sistemas ganaderos. Esto ha impulsado el interés en estrategias que aumenten la eficiencia energética del rumen, lo que favorece una mayor producción de AGV y reduce simultáneamente las emisiones de metano por unidad de alimento fermentado. La electrofermentación (EF) puede considerarse como una alternativa innovadora para abordar estas limitaciones. Este enfoque combina fermentación microbiana con la aplicación de corrientes eléctricas mediante electrodos que funcionan como sumideros o fuentes de electrones. Al modificar el balance redox microbiano y superar restricciones termodinámicas, la EF redirige el flujo de electrones hacia rutas metabólicas que incrementan la síntesis de AGV. Estudios *in vitro* han demostrado aumentos superiores al 80% en la producción de AGV, acompañados de una reducción significativa del biogás y un incremento en biomasa microbiana. En conjunto, estos avances posicionan a la EF como una estrategia prometedora para mejorar la eficiencia alimentaria y disminuir el impacto ambiental de la ganadería, aunque su implementación *in vivo* requiere mayor investigación técnica y metodológica.

Palabras clave: fermentación ruminal, electrofermentación, microbiota ruminal.

ABSTRACT

Rumen fermentation (RF) is an anaerobic redox process carried out by a complex microbial community that generates volatile fatty acids (VFAs), the primary energy source for ruminants. However, RF also produces methane, a greenhouse gas that negatively impacts the sustainability of livestock systems. This has intensified interest in strategies aimed at improving rumen energy efficiency by increasing VFA production while simultaneously reducing methane emissions per unit of fermented feed. Electrofermentation (EF) has emerged as an innovative alternative to address these limitations. This approach integrates microbial



fermentation with the application of electrical currents through electrodes that act as electron sinks or sources. By modifying the microbial redox balance and overcoming thermodynamic constraints, EF redirects electron flow toward metabolic pathways that enhance VFA synthesis. *In vitro* studies have reported increases of over 80% in VFA production, accompanied by significant reductions in biogas generation and increased microbial biomass. Collectively, these findings position EF as a promising strategy to improve feed efficiency and reduce the environmental impact of livestock production, although its *in vivo* implementation still requires further technical and methodological research.

Keywords: rumen fermentation, electrofermentation, rumen microbiota.

INTRODUCCIÓN

Los rumiantes son mamíferos que pueden transformar alimentos fibrosos en productos de alto valor biológico para el consumo humano, como la carne y la leche. Esto es posible gracias a un sistema digestivo complejo, que incluye el rumen-retículo, el cual funciona como un cultivo continuo donde los alimentos son fermentados por los microorganismos que lo habitan. La fermentación ruminal (FR) es un proceso de óxido-reducción que proporciona energía para el crecimiento de estos microorganismos y produce ácidos grasos volátiles (AGV), que son la principal fuente de energía para el rumiante. Sin embargo, también se generan gases de efecto invernadero como dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄) (Romagnoli *et al.*, 2017). Satisfacer la creciente demanda de productos cárnicos y lácteos con un bajo impacto ambiental plantea un desafío significativo para la producción ganadera a nivel mundial. La estrategia más destacada para abordar esta problemática es aumentar la eficiencia energética de los rumiantes, es decir, mejorar la manera en que transforman los alimentos que consumen en energía utilizable para su mantenimiento y para la producción de carne y leche. Esto resultaría en una mayor producción de alimentos para consumo humano con una menor carga ambiental.

Dado que la fermentación ruminal es un punto clave en el metabolismo energético de los rumiantes, se han desarrollado múltiples investigaciones centradas en comprenderla y modificarla hacia una mayor eficiencia. Entre las opciones evaluadas se encuentran la modificación de diferentes raciones, el uso de concentrados de alta calidad, aditivos alimenticios, antibióticos (ahora en desuso), mejoramiento genético e incluso vacunas. No obstante, la mayoría de estas estrategias han resultado ser poco prácticas y efectivas, o bien, han afectado negativamente el equilibrio energético y, por ende, la productividad animal (Lan & Yang, 2019). Actualmente se evalúa una nueva perspectiva relacionada con la manipulación de las rutas metabólicas de los microorganismos involucrados mediante electrofermentación (EF). La EF es un proceso que integra técnicas electroquímicas microbianas (TEM) con procesos fermentativos. Consiste en la aplicación de corrientes eléctricas anódicas o catódicas a cultivos microbianos, lo que ayuda a eliminar las restricciones redox y mejora la formación de productos específicos como los AGV (Moscoviz *et al.*, 2016; Sravan *et al.*, 2019).

El rumen como biorreactor

El rumen es una cámara grande donde el alimento ingerido se somete a digestión microbiana anaerobia. En este proceso, el rumen actúa como un sistema de cultivo continuo que opera bajo condiciones bien definidas, las cuales regulan de manera crucial los tipos, número y actividades bioquímicas de los microorganismos. Este sistema se asemeja a un "quimiostato", donde hay una incorporación continua de agua y alimentos para los microorganismos y una eliminación constante de desechos y productos finales (Liu *et al.*, 2021; Morais & Mizrahi, 2019) (Figura 1). Los productos finales de la fermentación, como los AGV, se eliminan mediante absorción a través de la pared ruminal hacia la sangre o por eructos (en el caso del biogás) (Nagaraja, 2016). Mantener estas condiciones, es esencial para la supervivencia de los microorganismos ruminales, la salud del epitelio ruminal y por lo tanto, la salud y productividad de los rumiantes (Romagnoli *et al.*, 2017).

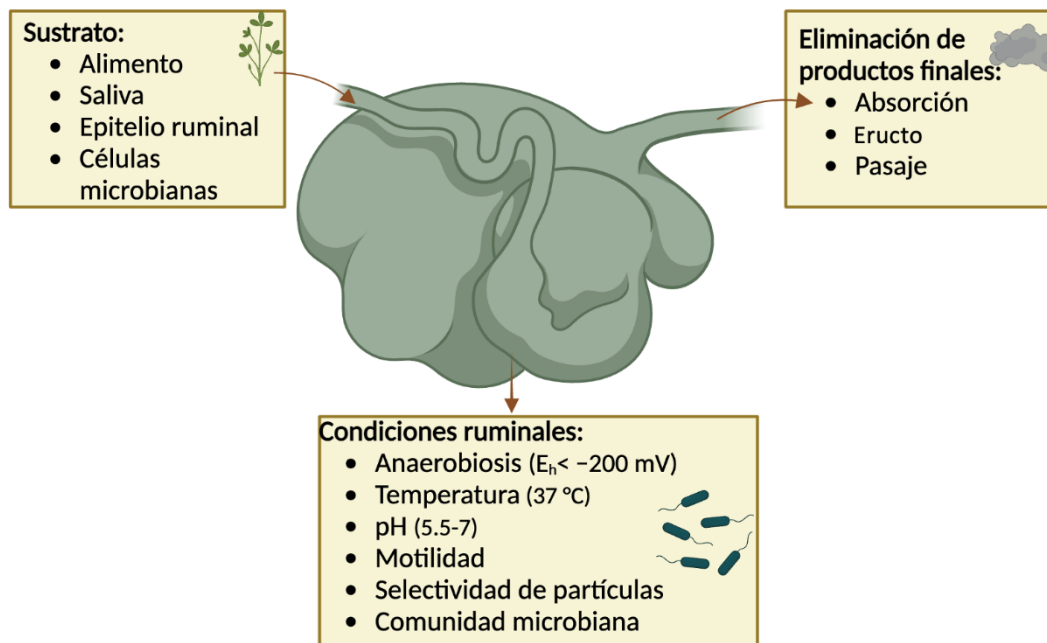


Figura 1. El rumen como biorreactor

Fermentación ruminal

Para llevar a cabo la FR, el ecosistema microbiano del rumen comprende una población simbiótica de diversos microorganismos anaerobios, que incluye miembros de los tres dominios: Eubacteria (Bacterias), Archaea (Metanógenos), Eukarya (Protozoos y hongos) y virus (Seshadri *et al.*, 2018; Newbold & Ramos-Morales, 2020).

En términos generales, la FR puede dividirse en tres niveles de evento metabólicos que son llevados a cabo por diferentes niveles tróficos. En el primer nivel trófico (I) las estructuras de la pared celular de las plantas son colonizadas por microorganismos especializados



en hidrolizar polímeros orgánicos complejos (celulosa y hemicelulosa) a monómeros (Leahy *et al.*, 2022; Sanjorjo *et al.*, 2023).

En el segundo nivel (II), los azúcares solubles son fermentados por la mayoría de los miembros de la microbiota ruminal a través de diversas vías. Esto da como resultado la excreción de AGV y gases como dióxido de carbono e hidrógeno molecular, el cuál debe ser regulado para evitar inhibir el metabolismo microbiano y bloquear la cascada metabólica. Durante la oxidación de azúcares a metabolitos, como acetil-coA, el NAD⁺ se reduce a NADH, que debe reoxidarse a NAD⁺ para permitir una fermentación continua. Esta relación entre NAD⁺/NADH actúa en reacciones específicas de la red metabólica y su equilibrio influencia la red de fermentación en general (González-Cabaleiro *et al.*, 2015).

En el tercer nivel trófico (III), se lleva a cabo la utilización de los electrones en forma de hidrógeno. En este nivel, las arqueas metanogénicas consumen la mayor parte del H₂ generado en la segunda etapa de fermentación. En la condición anaeróbica del rumen, el aceptor de electrones, como el oxígeno, está ausente. Por lo tanto, los metanógenos utilizan principalmente CO₂ (metanógenos hidrogenotróficos) como aceptor de electrones. Las arqueas metanogénicas también pueden reducir los compuestos metílicos (metanogénesis metilotrófica) y el acetato (acetoclástico) a metano, aunque son menos comunes. Estos microorganismos son esenciales para generar sumideros de electrones y representan una fuerza impulsora esencial para toda la cadena alimentaria (Figura 2) (Sikora *et al.*, 2017; Moraïs & Mizrahi, 2019).

Mediante este proceso fermentativo, los microorganismos ruminales obtienen energía para su mantenimiento, crecimiento y reproducción. Al ser un proceso anaerobio y no existir un aceptor de electrones terminal como el oxígeno, el ATP se genera principalmente mediante fosforilación a nivel de sustrato o a través de gradientes de protones generados por las diferencias energéticas entre el donante y el aceptor de electrones a través de la quimiosmosis (Kracke *et al.*, 2015; Vassilev *et al.*, 2021). Estas limitaciones termodinámicas en condiciones anóxicas generan un menor rendimiento energético y, por ende, menor rendimiento de biomasa (Buckel, 2021).

Por lo tanto, mantener el equilibrio redox y la conservación de la energía en los microorganismos ruminales dependen de un aceptor de electrones. Esto ha representado un verdadero reto para lograr manipular la FR hacia un aumento en la producción de AGV y disminución en las emisiones de metano (Leahy *et al.*, 2022).

Existen diferentes enfoques para aumentar la eficiencia con la cual los rumiantes convierten el alimento en energía, con ello se busca incrementar la disponibilidad de alimento y reducir la carga ambiental. Algunas de estas metodologías incluyen la manipulación de la dieta, el uso de antibióticos, el empleo de metabolitos secundarios de las plantas, la selección genética, entre otros (Firkins & Mitchel 2023; Króliczewska *et al.*, 2023).



Sin embargo, todos estos enfoques tienen desventajas, por lo que existe la necesidad de desarrollar nuevas alternativas para aumentar la producción de AGV y reducir la liberación de biogás como el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2). Una alternativa más novedosa y que se encuentra en vías de desarrollo, es la manipulación de la fermentación ruminal mediante electrofermentación (EF), que nos ayuda a regular el flujo de electrones en la FR (Aguilar-González *et al.*, 2022; López-Hernández *et al.*, 2023).

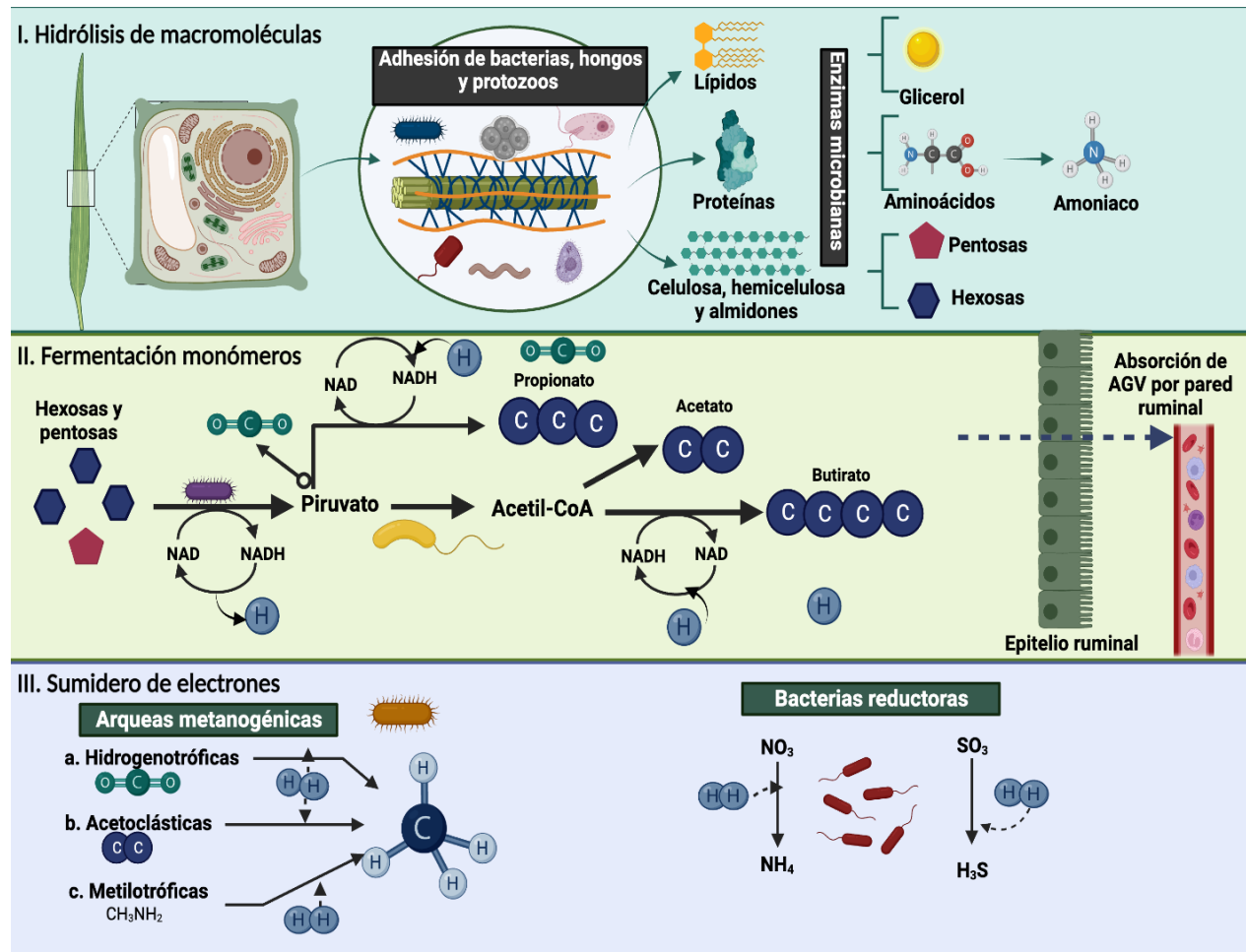


Figura 2. Cascadas metabólicas del rumen representadas por tres etapas de eventos metabólicos: hidrólisis de macromoléculas (I), fermentación de monómeros (II) y sumidero de electrones (III)

Electrofermentación

La EF es un proceso biotecnológico que combina técnicas electroquímicas microbianas con procesos fermentativos. En este proceso, se manipula el metabolismo microbiano a través de reacciones electroquímicas para llevar a cabo la fermentación de sustratos orgánicos y obtener productos reducidos de interés productivo, como son los AGV (Moscoviz *et al.*, 2016; Schievano *et al.*, 2016).



En este tipo procesos se emplean potenciales controlados y electrodos sólidos que pueden actuar como sumideros (ánodos) o fuentes de electrones (cátodos), de tal manera que es posible manipular las reacciones redox que ocurren durante la fermentación. Estas corrientes eléctricas pueden provenir de fuentes externas (fuente de poder) o pueden ser generadas internamente (microorganismos electroactivos).

Como se mencionó anteriormente, durante la fermentación ruminal se producen electrones como resultado de las reacciones redox en los procesos metabólicos de los microorganismos. La aplicación de corrientes eléctricas permite la generación de electrones adicionales. Estos electrones pueden ser utilizados por los microorganismos en sus procesos metabólicos, por lo que aumenta la eficiencia de la producción de energía y las tasas metabólicas se ven estimuladas. Aunado a esto, la presencia de un ánodo o sumidero de electrones puede ayudar a eludir las restricciones termodinámicas impuestas por la disparidad redox interna, lo que da lugar a un proceso de electrofermentación desequilibrada o electrosíntesis bacteriana que resultará en un aumento en la formación de compuestos reducidos ([Bhagchandani et al., 2020](#); [Mukherjee et al., 2021](#)).

La efectividad del electrofermentador dependerá principalmente de (i) interacciones entre microorganismos, (ii) transportadores de electrones disueltos del medio, (iii) interacciones entre microorganismos y la superficie de los electrodos a través de mecanismos celulares de transferencia extracelular de electrones (TEE), (iv) sustrato y (v) configuración de la celda ([Bajracharya et al., 2022](#)). La eficiencia en cómo los microorganismos transportan electrones al ánodo o entre ellos, depende de sus mecanismos de TEE que hasta el momento se tiene información de una limitada cantidad de microorganismos ([Yee et al., 2020](#)).

Electrofermentación ruminal para mejorar la eficiencia y mitigar emisiones

La mayor parte de la investigación sobre la manipulación de la FR se ha centrado en modificar el flujo de electrones de las reacciones redox para reducir la producción de metano, sin comprometer la salud y nutrición del animal y, si es posible, aumentar la eficiencia en la producción. Sin embargo, superar las limitaciones termodinámicas del proceso ha sido un reto significativo, ya que aún no se comprende completamente el flujo de metabolitos clave en el rumen y la interacción de los microorganismos con ellos, así como la fisiología, microbiología y bioquímica de los microorganismos involucrados ([Lan & Yang, 2019](#); [Leahy et al., 2022](#)).

En investigaciones recientes se ha observado que, al emplear la EF en líquido ruminal *in vitro*, la producción de AGV ha aumentado hasta en un 80% y, al mismo tiempo, se ha disminuido la producción total de biogás e incrementado la biomasa microbiana. Estos cambios están asociados a un desequilibrio en el estado redox intracelular, al modificar la relación NAD⁺/NADH. La EF, mediante el uso de electrodos sólidos que acepta electrones derivados de reacciones oxidativas ha demostrado ser una estrategia efectiva



para alterar la relación NADH/NAD⁺ y crear gradientes de protones suficientes para la generación de ATP, con la finalidad de aumentar los rendimientos de biomasa y proteína microbiana disponible para los rumiantes (Choi & Sang, 2016; Buckel, 2021; Chandrasekhar *et al.*, 2021; Bhagchandani *et al.*, 2020; Aguilar-González *et al.*, 2022; López-Hernández *et al.*, 2023).

Estos avances representan un nuevo enfoque y una estrategia eficiente para modificar la FR de tal manera que se capaz de intervenir en el flujo de electrones hacia una mayor eficiencia productiva, lo que se podría traducir en un menor impacto ambiental al disminuir las emisiones de gases invernadero, así como por aumentar la eficiencia alimenticia de los animales si se aplica *in vivo*. Esto representa una contribución importante para abordar los desafíos económicos y de sostenibilidad ambiental que enfrenta la ganadería.

CONCLUSIONES

Implementar la EF en la producción animal enfrenta desafíos significativos, como el diseño de sistemas que se puedan aplicar *in vivo* y la necesidad de desarrollar nuevas metodologías o herramientas para medir los flujos de electrones. Así como evaluar el efecto a largo plazo sobre la salud y productividad del animal.

Financiamiento

Proyecto con financiamiento PAPIIT IN203924, Programa CATEDRAS FESC C12219 y Conahcyt (CF2023-I-1881). Rocío López Hernández cuenta con beca del Programa de Becas CONAHCYT.

LITERATURA CITADA

AGUILAR-GONZÁLEZ M, Buitrón G, Shimada A, Ayala-Summano J, González-Dávalos L, Varela-Echavarría A, Mora O. 2022. Study on manipulation of ruminal fermentation using a bioelectrochemical system. *J. Anim. Physiol. and Anim. Nutr.* 107(2):357-366. <https://doi.org/10.1111/jpn.13723>

BAJRACHARYA S, Sarkar O, Krige A, Matsakas L, Rova U, Christakopoulos P. 2022. Chapter 12: Advances in gas fermentation processes. In: *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, Eds Sirohi *et al.* Elsevier. Pp. 321-351. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91167-2.00004-6>

BHAGCHANDANII DD, Babu RP, Sonawane JM, Khanna N, Pandit S, Jadhav DA, Prasad R. 2020. A comprehensive understanding of electro-fermentation. *Fermentation*. 6(3):e92. <https://doi.org/10.3390/fermentation6030092>

BUCKEL W. 2021. Energy conservation in fermentations of anaerobic bacteria. *Front. Microbiol.* 12(703525):1-16. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.703525>



CHANDRASEKHAR K, Naresh K.A, Gopalakrishnan K., Dong-Hoon K., Young-Chae S., Sang-Hyoun K. 2021. Electro-fermentation for biofuels and biochemicals production: current status and future directions. *Bioresour. Technol.* 323:e124598 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124598>

CHOI O, Sang BI. 2016. Extracellular electron transfer from cathode to microbes: application for biofuel production. *Biotechnol. Biofuels.* 9(11):1-14. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0426-0>

FIRKINS JL, Mitchell KE. 2023. Rumen modifiers in today's dairy rations. *J. Dairy Sci.* 106(5):3053-3071. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22644>

GONZÁLEZ-CABALEIRO R, Lema JM, Rodríguez J. 2015. Metabolic energy-based modelling explains product yielding in anaerobic mixed culture fermentations. *PLoS One.* 10(5):e0126739. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126739>

KRACKE F, Vassilev I, Krömer JO. 2015. Microbial electron transport and energy conservation – the foundation for optimizing bioelectrochemical systems. *Front. Microbiol.* 6:e575. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00575>

KRÓLICZEWSKA B, Pecka-Kielb E, Bujok J. 2023. Strategies Used to Reduce Methane Emissions from Ruminants: Controversies and Issues. *Agriculture.* 13(3):e602. Pags.1-26. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030602>

LAN W, Yang C. 2019. Ruminal methane production: Associated microorganisms and the potential of applying hydrogen-utilizing bacteria for mitigation. *Sci. Total Environ.* 654:1270-1283. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.180>

LEAHY SC, Janssen PH, Attwood GT, Mackie RI, McAllister TA, Kelly WJ. 2022. Electron flow: key to mitigating ruminant methanogenesis. *Trends Microbiol.* 30(3):209-212. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2021.12.005>

LIU K, Zhang Y, Yu Z, Xu Q, Zheng N, Zhao S, Huang G, Wang J. 2021. Ruminal microbiota–host interaction and its effect on nutrient metabolism. *Anim. Nutr.* 7(1):49-55. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2020.12.001>

LÓPEZ-HERNÁNDEZ R, Cercado-Quezada B, Gómez-Velázquez H, Robles-Rodríguez C, González-Dávalos L, Varela-Echavarría A, Shimada A, Mora O. 2023. Single-chamber electrofermentation of rumen fluid increases microbial biomass and volatile fatty acid production without major changes in diversity. *Fermentation.* 9(6):e502. <https://doi.org/10.3390/fermentation9060502>



MORAÏS S, Mizrahi I. 2019. The road not taken: the rumen microbiome, functional groups, and community states. *Trends Microbiol.* 27(6):538-549.

<https://doi.org/10.1016/j.tim.2018.12.011>

MOSCOVIZ R, Toledo-Alarcón J, Trably E, Bernet N. 2016. Electro-fermentation: how to drive fermentation using electrochemical systems. *Trends Biotechnol.* 34(11):856-865.

<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.04.009>

MUKHERJEE T, Venkata Mohan S. 2021. Metabolic flux of *Bacillus subtilis* under poised potential in electrofermentation system: gene expression vs product formation. *Bioresour. Technol.* 342:e125854. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125854>

NAGARAJA TG. 2016. Microbiology of the Rumen. In: *Rumenology*. Eds. MILLEN DD et al. Springer International. Pp 39-61. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30533-2_2

NEWBOLD C, Ramos-Morales E. 2020. Review: Ruminant microbiome and microbial metabolome: Effects of diet and ruminant host. *Anim.* 14(1):78-86.

<https://doi.org/10.1017/S1751731119003252>

ROMAGNOLI EM, Kmit MCP, Chiaramonte JB, Rossmann M, Mendes R. 2017. Ecological aspects on rumen microbiome. In: *Diversity and Benefits of Microorganisms from the Tropics*. Eds. DE AZEVEDO JL and Quecine MA. Springer. Pp. 367-389.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-55804-2_16

SANJORJO RA, Tseten T, Kang MK, Kwon M, Kim SW. 2023. In pursuit of understanding the rumen microbiome. *Fermentation.* 9(2):e114.

<https://doi.org/10.3390/fermentation9020114>

SCHIEVANO A, Pepé-Sciarra T, Vanbroekhoven K, De Wever H, Puig S, Andersen SJ, Rabaey K, Pant D. 2016. Electro-fermentation- Mergin electrochemistry with fermentation industrial applications. *Trends in Biotechnol.* 34(11):866-878.

<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.04.007>

SESHADRI R, Leahy SC, Attwood GT, Teh KH, Lambie SC, Cookson AL, Eloë-Fadrosch EA, Pavlopoulos GA, Hajithomas M, Varghese NJ, Paez-Espino D, Hungate 1000 project collaborators, Perry R, Henderson G, Creevey CJ, Terrapon N, Lapebie P, Drula E, Lombard V, Rubin E, Kyrpides NC, Henrissat B, Woyke T, Ivanova NN, Kelly WJ. 2018. Cultivation and sequencing of rumen microbiome members from the Hungate1000 Collection. *Nat. Biotechnol.* 36:359-367. <https://doi.org/10.1038/nbt.4110>

SIKORA A, Detman A, Chojnacka A, Błaszczuk MK. 2017. Anaerobic digestion: I. A common process ensuring energy flow and the circulation of matter in ecosystems. II. A tool for the production of gaseous biofuels. *InTech.* 14(08):e271.

<https://doi.org/10.5772/64645>



SRAVAN JS, Butti SK, Sarkar O, Mohan SV. 2019. Chapter 5.1: Electrofermentation: chemicals and fuels. *In: Microbial Electrochemical Technology*. Eds. MOHAN VS, et al. Elsevier. Pp 723-737. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64052-9.00029-7>

VASSILEV I, Aversch Nils JH, Ledezma P, Kokko M. 2021. Anodic electro-fermentation: Empowering anaerobic production processes via anodic respiration. *Biotechnol. Adv.* 48:e107728. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107728>

YEE MO, Deutzmann J, Spormann A, Rotaru AE. 2020. Cultivating electroactive microbes—from field to bench. *Nanotechnol.* 31:e174003. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab6ab5>