

Generación de energías eléctricas a través de desechos de lácteos en celdas de combustible microbianas

Electric power generation through dairy waste in microbial fuel cells

Rojas-Flores Segundo¹, Santiago M. Benites¹, De La Cruz Noriega Magaly², Nazario-Naveda Renny³, Gallozzo-Cardenas Moises⁴, Félix Diaz⁵, Delfin-Narciso Daniel⁶

¹Vicerrectorado de Investigación, Universidad Autónoma del Perú, Lima 15842, Perú; segundo.rojas.89@gmail.com; santiago.benites@autonoma.pe

²Instituto de Investigación en Ciencias y Tecnología de la Universidad Cesar Vallejo, Trujillo 13001; mdelacruz@ucv.edu.pe

³Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Cesar Vallejo, Trujillo 13001; scored731@gmail.com

⁴Universidad Tecnológica del Perú, Trujillo 13011, Perú; c21228@utp.edu.pe

⁵Escuela Académica Profesional de Medicina Humana, Universidad Norbert Wiener, Lima 15046, Perú; felix.diaz@uwiener.edu.pe

⁶Grupo de Investigación en Ciencias Aplicadas y Nuevas Tecnologías, Universidad Privada del Norte, Trujillo 13007, Perú; daniel.delfin@upn.edu.pe

Resumen— El aumento de la población humana a generado que el consumo de diferentes tipos de lácteos aumente también, debido a que es uno de los principales alimentos en la dieta en la vida temprana de cada ser humano. Esto a generado que los desechos de este tipo de alimento aumenten de la misma forma, motivo por el cual se ha buscado una forma de utilizarlo ecoamigablemente, encontrado en las celdas de combustible microbiana una forma de generar energía eléctrica de manera sostenible. En esta investigación se utilizó desechos de leche como combustible en celdas de combustible microbiana a escala de laboratorio, logrando generar picos de corriente eléctrica y voltaje de 4.125 ± 0.347 mA y 1.104 ± 0.101 V con pH óptimo de operación de 7.46 ± 0.35 cuya conductividad eléctrica del sustrato fue de 119.373 ± 4.59 mS/cm, todo esto en el día 21. Así mismo se calculó la densidad de potencia máxima en 443.765 ± 26.738 mW/cm² con una densidad de corriente de 5.257 A/cm² y mostrando un voltaje de 1005.78 ± 13.54 mV, todo esto operando con una resistencia interna de 61.795 ± 8.691 Ω . Por último las tres celdas de combustible microbiana se conectaron en serie, logrando generar 2.66 V lo suficiente para encender un foco LED de color rojo. De esta forma se da una novedosa forma de generar corriente eléctrica a pequeña escala, dando grandes esperanzas a las empresas ganaderas para reutilizar sus residuos en forma beneficiosas para ellas mismas

Palabras clave: leche, desechos, celdas de combustible microbianas, energía eléctrica

Abstract— The increase in the human population has

generated that the consumption of different types of dairy products also increases, because it is one of the main foods in the diet in the early life of each human being. This has caused the waste of this type of food to increase in the same way, which is why a way to use it eco-friendly has been sought, found in microbial fuel cells a way to generate electricity in a sustainable manner. In this research, milk waste was used as fuel in microbial fuel cells on a laboratory scale, managing to generate electrical current and voltage peaks of 4.125 ± 0.347 mA and 1.104 ± 0.101 V with an optimum operating pH of 7.46 ± 0.35 whose electrical conductivity of the substrate was 119.373 ± 4.59 mS/cm, all this on day 21. Likewise, the maximum power density was calculated at 443.765 ± 26.738 mW/cm² with a current density of 5.257 A/cm² and showing a voltage of 1005.78 ± 13.54 mV, all this operating with an internal resistance of 61.795 ± 8.691 Ω. Finally, the three microbial fuel cells were connected in series, managing to generate 2.66 V, enough to light a red LED light. In this way, an innovative way of generating electricity on a small scale is given, giving great hope to livestock companies to reuse their waste in a beneficial way for themselves.

Keywords—milk, waste, microbial fuel cells, electric power.

I. INTRODUCCION

Los productos lácteos durante la historia de la humanidad han altamente consumidos, de tal forma, que todo ser humano lo

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

ha consumido de diversas formas [1]. Uno de los últimos reportes realizados, fue en el 2013 donde se generó cerca de 328 000 millones de dólares en ventas del cual el 82.7 % fue de leche de vaca, 13.3% de leche de búfala, 2.3% de leche de cabra, 1.3 % de leche de oveja y el 0.4% de leche de camello; estimado un aumento de la producción mundial del 23 % para el 2025 [2-4]. Así también se ha reportado el consumo de la leche vegetal, que en el 2016 generó ventas por 8510 millones de dólares, estimando un aumento del 12.5% para el 2025 con una venta bruta de 24600 millones de dólares [5]. El alto consumo de los productos lácteos se debe principalmente por los componentes que contienen, por ejemplo, aminoácidos, proteínas, lípidos, minerales y vitaminas; mientras que la leche de vaca específicamente tiene su alto consumo debido a la lactosa (carbohidrato), caseína y proteína de suero, comúnmente en una proporción de 3:1 (caseína: suero), así como calcio [6-7]. Así como el consumo de estos tipos de productos tienden al aumento, se estimada que los desechos de los mismos aumentaran también [8], motivo por el cual se debe de buscar formas de reutilizar los desechos de los lácteos que de generar desde el proceso de extracción de los animales hasta el consumo.

En este sentido las celdas de combustible microbiana (CCMs) aparecen como una posibilidad de reutilizar diferentes tipos de desechos para la generación de energía eléctrica [9], este tipo de tecnología consta de dos cámaras (anódica y catódica) que casi siempre esta separado por una membrana de intercambio protónico por su interior y por el exterior por un circuito eléctrico que están unidos a sus electrodos (anódico y catódico), la electricidad se debe principalmente por la conversión de la energía química del sustrato utilizado (desechos) a energía eléctrica [10,11]. En la revisión de literatura se han reportado investigaciones sobre el uso de diferentes tipos de desechos en CCMs, por ejemplo, Tremouli et al. (2019) utilizó desechos de domésticos fermentables en CCM de una sola cámara con electrodos de grafito logrando generar picos de voltaje de 482 mV y un potencial de 3.2mW [12]. De la misma forma, utilizó desechos de mango, rambután and langsta como sustrato en las CCM de una sola cámara con electrodos grafito siendo la CCM con mayor voltaje (490 mV) y corriente eléctrica (0.026mA) la que contenía desechos de mango [13].

Así también, se ha reportado que el uso de electrodos metálicos ayudar a generar una mayor corriente eléctrica, debido a la característica inherente del mismo material [14,15], por ejemplo, la utilización de electrodos como el cobre y zinc han reportado excelentes valores de valores de voltaje (1.127 ± 0.096 V), corriente eléctrica (1.130 ± 0.018 mA) y densidad de potencia (3.155 ± 0.24 W/cm²) utilizando como sustrato desechos de blueberry en CCM de una sola cámara [16]. De forma similar, se ha utilizado desechos de mango y Microalgae Spirulina sp. como sustratos en celdas de combustible microbiana de doble cámara con electrodos

metálicos logrando generar picos de voltaje (0.84546 ± 0.314 V), corriente eléctrica (7.5948 ± 0.3109 mA) y densidad de potencia (657.958 ± 21.114 mW/cm²) [18].

Esta investigación tiene como objetivo principal evaluar la generación de bioelectricidad a través de desechos de leche mediante celdas de combustible microbiana de una sola cámara a escala de laboratorio, utilizando electrodos de cobre y zinc. Para ello se monitoreará los parámetros de voltaje, corriente eléctrica, pH y conductividad eléctrica por un periodo de 30 días. Así también se medirá los valores de densidad de potencia, densidad de corriente y resistencia interna de las celdas de combustible microbiana. Dando de esta forma, un nuevo uso de los desechos de leche, como lo es generar energía eléctrica a partir de desechos; de esta forma los ganaderos y empresas dedicadas a la compra y venta de estos productos podrán beneficiarse generando un bien para ellos mismos.

II. MATERIALES Y METODOS

A. Fabricación de las celdas de combustible microbiana

Se utilizaron tres celdas de combustible microbiana, las cuales fueron adquiridas de la empresa SAIDKOCC (SAIDKOCC-10091720, Fujian, China) y los electrodos utilizados fueron de cobre (ánodo) y zinc (cátodo) de 40 y 62.5 cm² de área respectivamente. Mientras que, para el circuito externo se utilizó un alambre de cobre (6 mm de grosor) y una resistencia externa de 100Ω, y como membrana de intercambio protónico se utilizó Nafion 117 (Merck); como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Esquematización del diseño de las celdas de combustible microbiana.

B. Recojo de los desechos de leche

Los desechos de leche (marca Gloria, Perú) se obtuvieron del mercado Palermo -Ex Mayorista, Trujillo, Perú; de donde se recolectaron 1 litro para después llevarlo al laboratorio. Los desechos fueron colocados en vasos precipitados de 100 ml, los cuales fueron esterilizados antes de su uso y fueron mantenidos a temperatura ambiente (21 ± 1 °C) hasta su uso

C. Caracterización de las celdas de combustible microbiana

Los valores de corriente y voltaje se monitorearon por 30 días utilizando un multímetro (Prasek Premium PR-85, USA), mientras que los valores de densidad de potencia y densidad de corriente se midieron mediante el método descrito por Segundo et. al (2022) cuyas resistencias externas fueron 10 ± 0.2 , 40 ± 2.3 , 50 ± 2.7 , 100 ± 3.2 , 300 ± 6.2 , 390 ± 7.2 , 560 ± 10 , 680 ± 12.3 , 820 ± 14.5 , 1000 ± 20.5 Ω [18]. En este sentido, la resistencia interna se encontró utilizando el sensor de energía (Vernier- $\pm 30V$ & ± 1000 mA, USA) y usando la ley de ohm. Así también, se monitoreo los valores de pH y conductividad eléctrica con un pH-metro (110 Series Oakton, USA) y conductímetro (CD-4301, USA), durante los 30 días de operación.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Figura 2 (a) se observa los valores de voltaje monitoreados por 30 días, logrando observar que aumentan desde el primer día (0.144 ± 0.06 V) hasta 1.104 ± 0.101 V en el veinteavo día para después descender hasta el último día (0.754 ± 0.234 V). En la Figura 2 (b) se muestran los valores observados de la corriente, donde se apreció un incremento desde el día 1 (1.038 ± 0.04 mA) hasta el día 21 (4.125 ± 0.347 mA) para después decaer ligeramente hasta el último día (3.311 ± 0.817 mA). Los altos valores mostrados pueden deberse a varios factores, según lo reportado en la literatura, por ejemplo, se ha reportado que una buena formación de la biopelícula en el electrodo anódico favorece al transporte de electrones del ánodo hacia el catodo, así también, que al deberse electrodos puramente metálicos ayudan a la conductividad de la corriente eléctrica [19-21]. Mientras que la disminución de los valores eléctricos en la última parte del monitoreo puede deberse a la corrosión observada en los últimos días del electrodo catódico (electrodo de Zinc), lo cual perjudicaría al crecimiento de los microorganismos generadores de corriente eléctrica [22,23].

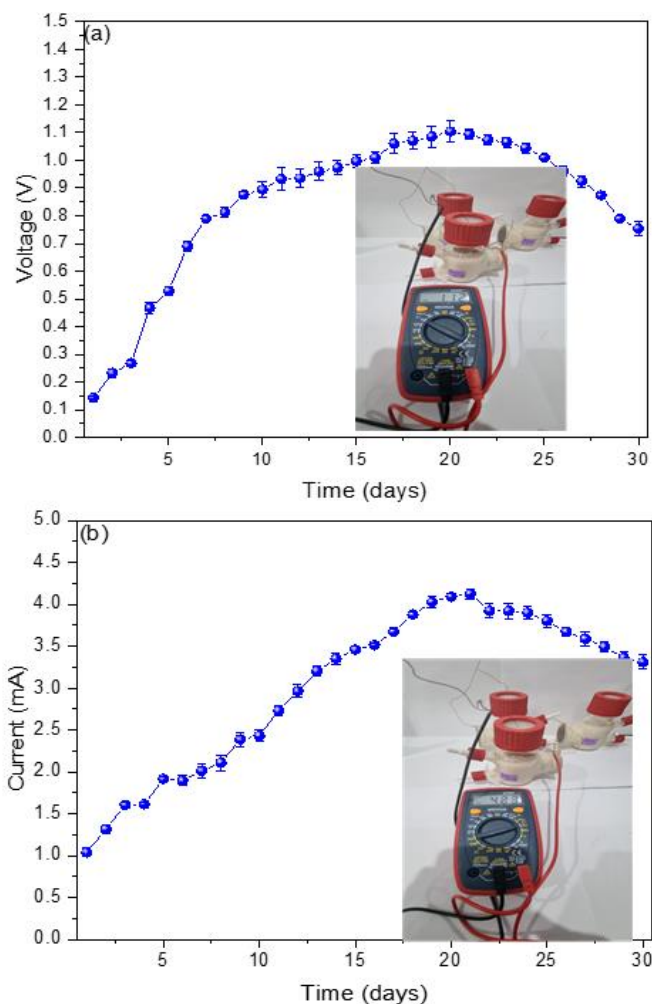


Figura 2. Monitoring values of (a) voltage and (b) electric current of microbial fuel cells.

En la Figura 3 (a) se observa los valores pH monitoreados durante los 30 días, lográndose observar que los valores estuvieron en la región neutra al inicio y termino en la región ligeramente alcalino, siendo 7.46 ± 0.35 su pH óptimo de operación. Se han reportado diferentes valores de pH para cada tipo de diseño de celda y para cada sustrato utilizado, un gran porcentaje de documentos coinciden que esto se debe principalmente a que cada sustrato tiene diferentes tipos de microorganismos generadores de bioelectricidad y cada de estos tipos microorganismos crecen a pH y parámetros ambientales específicos [24,25]. En la Figura 3 (b) se muestra los valores de la conductividad eléctrica monitoreados, logrando observar que los valores aumentan desde el primer día (40.679 ± 1.73 mS/cm) hasta el día 20 (119.373 ± 4.59 mS/cm) para después disminuir abruptamente hasta el último día (78.217 ± 4.509 mS/cm).

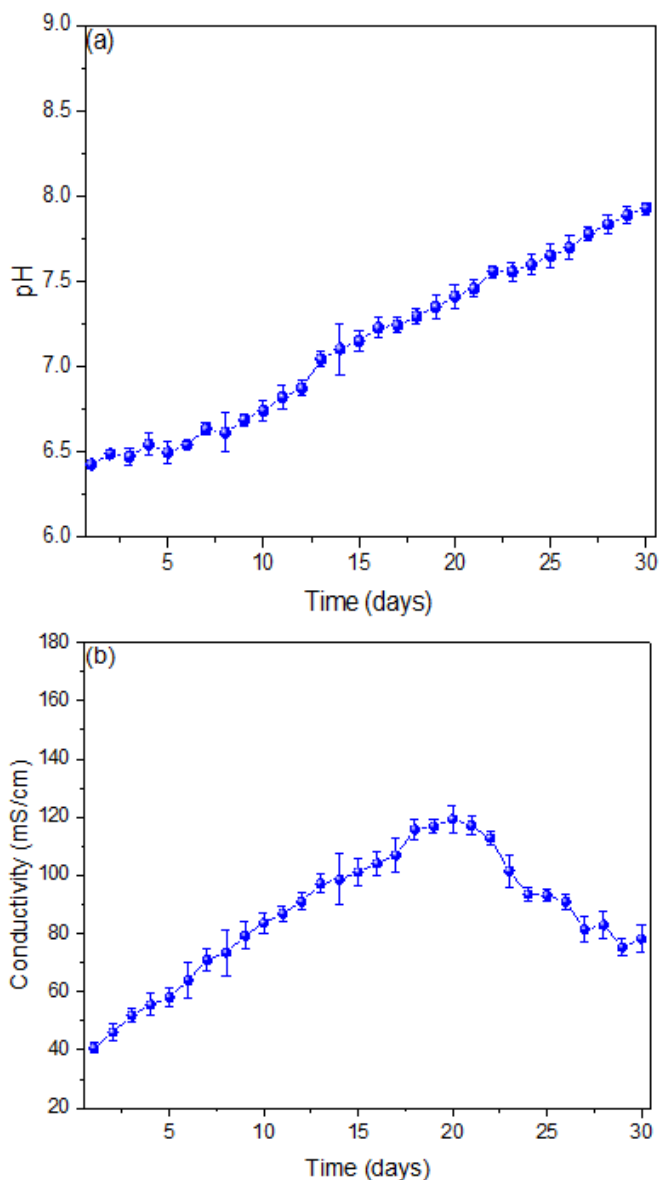


Figura 3. Monitoring of (a) pH and (b) conductivity values of microbial fuel cells.

Los valores de la conductividad eléctrica del sustrato en la etapa inicial se deben principalmente a la baja resistencia mostrada en esta etapa de proliferación de los microorganismos, mientras que la disminución de estos valores se debe a la sedimentación del sustrato y disminución de nutrientes derivados del carbono utilizados por los microorganismos como fuente de alimento [26,27].

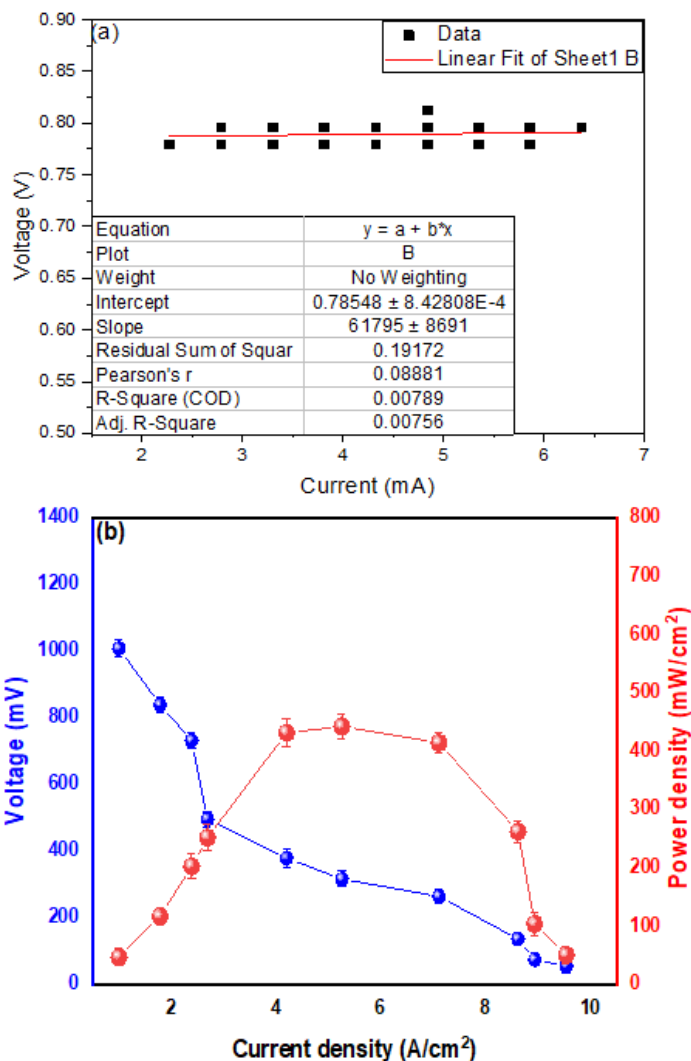


Figura 4. Values of (a) internal resistance and (b) power density as a function of current density.

En la Figura 4 (a) se muestra la resistencia interna (R_{int}) de las celdas de combustible, para lo cual se usó la Ley de Ohm ($V=IR$) donde los valores de voltaje se colocaron en el eje "Y" y los de corriente eléctrica en el eje "X", de esta forma la pendiente del ajuste lineal es la resistencia interna de las CCMS. El valor de la resistencia interna calculada fue de $61.795 \pm 8.691 \Omega$, este valor se calculó en el pico máximo de generación de voltaje y corriente eléctrica (veinteavo día). Según Christwardana et al. (2020) mencionada en su investigación que los valores de la resistencia interna tienen una dependencia de la biopelícula formada y que el pH en las CCMS varía las características de las biopelículas (forma, grosos y porosidad) [28]. En este sentido, la corrosión de los electrodos al paso del tiempo también se vio influenciada en la generación de energía eléctrica, debido a que al usar un electrodo puramente metálico la superficie se desgasta; cabe

resaltar que la resistencia interna de las CCMs están constituidas por tres tipos de resistencia: resistencia a la reacción electroquímica (que está relacionada con la barrera de energía de activación del metabolismo microbiano del sustrato), la resistencia óhmica (está asociada con la barrera de transferencia de electrones de los electricígenos al ánodo y del ánodo al cátodo) y la resistencia a la transferencia de masa (surge de las limitaciones de transferencia de masa tanto del sustrato hacia el ánodo como de la comunidad microbiana y los metabolitos fuera del ánodo) [29-32]. En la Figura 4 (b) se muestran los valores de densidad de potencia (DP) en función de la densidad de corriente (DC), la DP_{max} hallada fue de $443.765 \pm 26.738 \text{ mW/cm}^2$ en 5.257 A/cm^2 de DC con un voltaje pico de $1005.78 \pm 13.54 \text{ mV}$. En la Figura 05 se puede observar el ciclo de generación de bioelectricidad desde el desecho hasta su operación de las celdas de combustible microbiana, como se puede observar que las CCMs se conectaron en el último día logrando generar 2.66 V, este valor es muy superior a los encontrados en la literatura, que es suficiente para encender una luz LED roja.

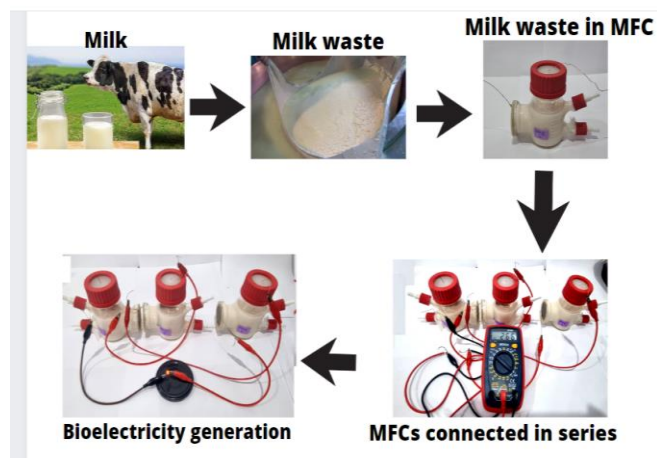


Figura 5. Esquematación del proceso de generación de bioelectricidad a través de desechos de leche.

IV. CONCLUSIONES

Se logro generar bioelectricidad exitosamente utilizando como sustrato desechos de leche en celdas de combustible microbiana de una sola cámara con electrodos de zinc y cobre a escala de laboratorio. Se logro generar picos de voltaje y corriente eléctrica de $1.104 \pm 0.101 \text{ V}$ y $4.125 \pm 0.347 \text{ mA}$ en el día 21, observándose el pH óptimo de operación de 7.46 ± 0.35 y una conductividad eléctrica del sustrato de $119.373 \pm 4.59 \text{ mS/cm}$. Asi también se calcula la resistencia interna de las celdas de combustible microbiano, logrando

observar que la Rint. fue de $61.795 \pm 8.691 \Omega$ y la densidad de potencia máxima hallada fue $443.765 \pm 26.738 \text{ mW/cm}^2$ con una densidad de corriente de 5.257 A/cm^2 y mostrando un voltaje de $1005.78 \pm 13.54 \text{ mV}$. Las tres celdas de combustible microbiana se conectaron en serie, para observar su potencial, lográndose generar 2.66 V lo suficiente para encender un LED (Rojo). Esta investigación da grandes aportes para el área de la ganadería y las empresas dedicadas a este rubro, debido principalmente a que los ganaderos pueden utilizar sus propios desechos de una forma rentable y generando energía eléctrica amigable con el medio ambiente.

Para trabajos futuros, se recomienda utilizar recubrimientos a los electrodos anódicos y catódicos, con el fin de evitar la corrosión observada en la etapa final de la investigación; y si las investigaciones a escalas mayores quieren ser investigadas se debería de utilizar el pH óptimo de operación reportado en esta investigación y si existiese variaciones en el proceso se debería de ajustar con compuestos químicos.

REFERENCES

- [1] Marangoni, F., Pellegrino, L., Verduci, E., Ghiselli, A., Bernabei, R., Calvani, R., ... & Poli, A. (2019). Cow's milk consumption and health: a health professional's guide. *Journal of the American College of Nutrition*, 38(3), 197-208.
- [2] Abbring, S., Hols, G., Garssen, J., & van Esch, B. C. (2019). Raw cow's milk consumption and allergic diseases—The potential role of bioactive whey proteins. *European journal of pharmacology*, 843, 55-65.
- [3] Alcantara, J. M., Sanchez-Delgado, G., Martinez-Tellez, B., Labayen, I., & Ruiz, J. R. (2019). Impact of cow's milk intake on exercise performance and recovery of muscle function: A systematic review. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 16(1), 22.
- [4] Haas, R., Schnepps, A., Pichler, A., & Meixner, O. (2019). Cow milk versus plant-based milk substitutes: A comparison of product image and motivational structure of consumption. *Sustainability*, 11(18), 5046.
- [5] Brick, T., Hettinga, K., Kirchner, B., Pfaffl, M. W., & Ege, M. J. (2020). The beneficial effect of farm milk consumption on asthma, allergies, and infections: from meta-analysis of evidence to clinical trial. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology: In Practice*, 8(3), 878-889.
- [6] Bórawski, P., Pawlewicz, A., Parzonko, A., Harper, J. K., & Holden, L. (2020). Factors shaping cow's milk production in the EU. *Sustainability*, 12(1), 420.
- [7] Santonicola, S., Ferrante, M. C., Murru, N., Gallo, P., & Mercogliano, R. (2019). Hot topic: Bisphenol A in cow milk and dietary exposure at the farm level. *Journal of dairy science*, 102(2), 1007-1013.

- [8] Roufou, S., Griffin, S., Katsini, L., Polańska, M., Van Impe, J. F., & Valdramidis, V. P. (2021). The (potential) impact of seasonality and climate change on the physicochemical and microbial properties of dairy waste and its management. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 1-10.
- [9] Boas, J. V., Oliveira, V. B., Simões, M., & Pinto, A. M. (2022). Review on microbial fuel cells applications, developments and costs. *Journal of Environmental Management*, 307, 114525.
- [10] Ramya, M., & Kumar, P. S. (2022). A review on recent advancements in bioenergy production using microbial fuel cells. *Chemosphere*, 288, 132512.
- [11] Gul, H., Raza, W., Lee, J., Azam, M., Ashraf, M., & Kim, K. H. (2021). Progress in microbial fuel cell technology for wastewater treatment and energy harvesting. *Chemosphere*, 281, 130828.
- [12] Tremouli, A., Karydogiannis, I., Pandis, P. K., Papadopoulou, K., Argiris, C., Stathopoulos, V. N., & Lyberatos, G. (2019). Bioelectricity production from fermentable household waste extract using a single chamber microbial fuel cell. *Energy Procedia*, 161, 2-9.
- [13] Yaqoob, A. A., Guerrero-Barajas, C., Ibrahim, M. N. M., Umar, K., & Yaakop, A. S. (2022). Local fruit wastes driven benthic microbial fuel cell: A sustainable approach to toxic metal removal and bioelectricity generation. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(22), 32913-32928.
- [14] Yaqoob, A. A., Ibrahim, M. N. M., & Rodríguez-Couto, S. (2020). Development and modification of materials to build cost-effective anodes for microbial fuel cells (CCMs): An overview. *Biochemical Engineering Journal*, 164, 107779.
- [15] Naveenkumar, M., & Senthilkumar, K. (2021). Microbial fuel cell for harvesting bio-energy from tannery effluent using metal mixed biochar electrodes. *Biomass and bioenergy*, 149, 106082.
- [16] Rojas-Flores, S., Benites, S. M., De La Cruz-Noriega, M., Cabanillas-Chirinos, L., Valdiviezo-Dominguez, F., Quezada Álvarez, M. A., ... & Angelats-Silva, L. (2021). Bioelectricity production from blueberry waste. *Processes*, 9(8), 1301.
- [17] De La Cruz-Noriega, Magaly, et al. "Potential Use of Mango Waste and Microalgae Spirulina sp. for Bioelectricity Generation." *Environmental Research, Engineering and Management* 78.3 (2022): 129-136.
- [18] Segundo, R. F., De La Cruz-Noriega, M., Nazario-Naveda, R., Benites, S. M., Delfín-Narciso, D., Angelats-Silva, L., & Díaz, F. (2022). Golden Berry Waste for Electricity Generation. *Fermentation*, 8(6), 256.
- [19] Benites, S. M., Rojas-Flores, S., De la Cruz Noriega, M., Cabanillas-Chirinos, L., Otiniano, N. M., Silva-Palacios, F., & Angelats-Silva, L. (2020). Bioelectricity from *Saccharomyces cerevisiae* yeast through low-cost microbial fuel cells [Bioelectricidad a partir de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* a través de celdas de combustible microbiana de bajo costo].
- [20] La Cruz-Noriega, D., Rojas-Flores, S., Nazario-Naveda, R., Benites, S. M., Delfín-Narciso, D., & Vives-Garnique, J. (2022, July). Generation of electricity through yeast *Galactomyces* sp. Generación de bioelectricidad a través de levadura *Galactomyces* sp. LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology.
- [21] Arboleda Avilés, D. G., Núñez Barrionuevo, O. F., Sánchez Olmedo, O. F., Chinchín Piñan, B. D., Arboleda Briones, D. A., & Bahamonde Soria, R. A. (2019). Application of a direct current circuit to pick up and to store bioelectricity produced by microbial fuel cells. *Revista Colombiana de Química*, 48(3), 26-35.
- [22] Ayala Hinostrroza, Y. M., & Chávez Loo, A. C. (2021). Tratamiento de aguas residuales mediante bio-electrofonton impulsado por celda de combustible microbiana: revisión sistemática.
- [23] Benítez-Abril, M. G. (2021). Diseño de un sistema de tratamiento de efluentes producidos por una empresa procesadora de productos lácteos.
- [24] De La Cruz Taipe, R. C., & Huamani Sihuín, E. S. (2020). Bioelectricidad a partir de residuos de alimentos hidrolizados aplicando el sistema de Celda de Combustible Microbiana.}
- [25] Ayala Hinostrroza, Y. M., & Chávez Loo, A. C. (2021). Tratamiento de aguas residuales mediante bio-electrofonton impulsado por celda de combustible microbiana: revisión sistemática.
- [26] Ayala Hinostrroza, Y. M., & Chávez Loo, A. C. (2021). Tratamiento de aguas residuales mediante bio-electrofonton impulsado por celda de combustible microbiana: revisión sistemática.
- [27] Stasinakis, A. S., Charalambous, P., & Vyrides, I. (2022). Dairy wastewater management in EU: Produced amounts, existing legislation, applied treatment processes and future challenges. *Journal of Environmental Management*, 303, 114152.
- [28] Christwardana, M., Hadiyanto, H., Motto, S. A., Sudarno, S., & Haryani, K. (2020). Performance evaluation of yeast-assisted microalgal microbial fuel cells on bioremediation of cafeteria wastewater for electricity generation and microalgae biomass production. *Biomass and Bioenergy*, 139, 105617.
- [29] Yu, B., Feng, L., He, Y., Yang, L., & Xun, Y. (2021). Effects of anode materials on the performance and anode microbial community of soil microbial fuel cell. *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123394.
- [30] Xu, F., Ouyang, D. L., Rene, E. R., Ng, H. Y., Guo, L. L., Zhu, Y. J., ... & Kong, Q. (2019). Electricity production enhancement in a constructed wetland-microbial fuel cell system for treating saline wastewater. *Bioresour. Technol.*, 288, 121462.
- [31] Kim, B., Mohan, S. V., Papyane, D., & Chang, I. S. (2020). Controlling voltage reversal in microbial fuel cells. *Trends in biotechnology*, 38(6), 667-678.
- Gadkari, S., Shemfe, M., & Sadhukhan, J. (2019). Microbial fuel cells: a fast converging dynamic model for assessing system performance based on bioanode kinetics. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29), 15377-15386.