

Fabricación de una celda solar sensibilizada por colorantes naturales basada en TiO₂ utilizando extractos de remolacha

Alvaro Marcelo Porcel Padilla

Resumen— En el presente estudio, se fabrica una celda solar sensibilizada por colorante obtenido a partir de extracto de remolacha. El pretratamiento térmico de la remolacha y el uso de alcohol influenciaron la extracción de la betalaina. La absorción de betalaina en la película de TiO₂ modificó el espectro de banda de los compuestos orgánicos adsorbidos en la superficie del óxido. Tanto el colorante como su adsorción en la película de TiO₂ influenciaron en la eficiencia de conversión de energía solar en energía eléctrica (η) que fue del orden de 3,97 veces menor cuando se compara con una celda solar de silicio.

Aunque la eficiencia de la celda solar sensibilizada por colorante natural a partir del extracto de remolacha fue inferior a la celda comercial de silicio, el resultado es alentador. Se demuestra experimentalmente la capacidad de los colorantes naturales en la producción de celdas solares como una alternativa de soluciones basadas en la naturaleza, reemplazando colorantes sintetizados, tóxicos y de coste elevado, por un colorante natural, de menor coste y respetuosos con el medio ambiente, que puede servir como alternativas a las baterías de aparatos electroelectrónicos.

Palabras Claves— Celda solar sensibilizada, remolacha, TiO₂, soluciones basadas en la naturaleza.



1. INTRODUCCIÓN

Ante el aumento de la demanda energética y a la dependencia de los hidrocarburos, surge la fotoelectroquímica, con la transformación de la energía lumínica en energía eléctrica, como una alternativa para variar la matriz energética y reducir el impacto ambiental en el sector energético.

Las celdas solares convencionales requieren una película relativamente gruesa y libre de defectos, mientras que el dopaje de catalizadores de TiO₂ requieren la incorporación de metales nobles para tener buena eficiencia y bajas tasas de recombinación, esto incrementa el coste-beneficio de las celdas solares tradicionales, sin considerar el impacto ambiental asociado a la extracción del silicio y las tierras raras.

Una alternativa de bajo impacto, es la utilización de celdas solares sensibilizadas con extracto naturales. Esta alternativa basada en la naturaleza permite el uso de colorantes naturales, presentes en frutas, raíces, flores y semillas, de amplio espectro, que permite trabajar con celdas solares a diferentes rangos del espectro electromagnético.

Ante este panorama beneficioso de la química verde, se

impone la eficiencia de conversión de la luz de las células solares de silicio cristalino del 25% [1], frente a las celdas solares sensibilizadas por colorantes naturales que actualmente alcanzan aproximadamente el 12,3%. Sin embargo, para las celdas sensibilizadas, el potencial de lograr costes de producción por debajo de 0,5 dólares por vatio pico de electricidad solar es razonable.

Una alternativa para mejorar la eficiencia de conversión de la energía solar en energía eléctrica, para una celda solar sensibilizada, es la selección de un colorante natural de amplio espectro, próximo al azul. Entre estos colorantes naturales la betalaina, presente en la remolacha (*Beta vulgaris*), ha demostrado ser un colorante natural con bandas en el espectro visible, buena interacción con el óxido metálico y alta eficiencia en la transformación de energía lumínica en energía eléctrica.

En este sentido, el objetivo del presente trabajo es fabricar una celda solar sensibilizada por colorante obtenido a partir de extracto de remolacha y evaluar su eficiencia en la conversión de energía solar a energía eléctrica, comparándolo con datos obtenidos con una celda solar de silicio.

2. METODOLOGÍA

2.1. Elección y Extracción del Colorante

Para la selección del colorante natural se consideró el resultado de [2] usando *B. vulgaris* (remolacha) en la sensibilización de celdas solares con TiO₂. Para la selección del método de extracción de betalaina de la remolacha (550,47 g/mol), se modificó la metodología propuesta por [3].

Se pesaron 200 g de remolacha cocida y pelada (*B. vulgaris*) y se procedió a cortar y luego a machacar en el mortero. Posteriormente se añade, poco a poco, 30 ml de una solución de etanol (95%), para después de 20 min filtrar en un embudo con papel celulosa. El extracto natural obtenido, la betalaina, se almacenó en un vaso precipitado, protegiéndola con papel film.

2.2. Preparación de la Celda Solar

2.2.1. Preparación del Electrodo de TiO₂

Durante todo el experimento, se siguió la metodología propuesta por [4]. La capa nanoestructurada mesoporosa del óxido conductor (óxido de titanio IV), fue preparada a partir de una solución ácida con titanio en polvo (P-25). Para esto, se añade ácido nítrico (65%, Merck) en 25 ml de agua destilada hasta obtener una solución de pH entre 3 y 4 (0.00055 M). Posteriormente, en un mortero de cristal, se añaden 6,5 ml de etanol y 2 ml del ácido diluido. Una vez obtenida la solución ácida se añade, cuidadosamente, 1,5 g de TiO₂ en polvo, poco a poco en agitación constante. La solución resultante de TiO₂ en suspensión se almacenó cubriendo el mortero con papel film.

2.2.2. Deposición de la Solución de TiO₂ en Suspensión

Se utilizó una placa vidrio transparente (4 cm²) como celda solar con una capa traslúcida de FTO fluorine-doped tin oxide (óxido de estaño dopado con flúor) (FTO) para mejorar su conductividad eléctrica. Antes de verter la solución de TiO₂ en la placa vidrio, se verificó con un amperímetro el lado recubierto con FTO y se limpió la superficie con alcohol y papel.

Posteriormente, se procedió a delimitar un recuadro con cinta adhesiva sobre la cara conductora, para delimitar la zona de trabajo. Luego, se vertió cuidadosamente, la solución de TiO₂ aplicando la metodología doctor blade [5]. La placa de vidrio se dejó secar aproximadamente 15 min a temperatura ambiente y después se llevó a secar a una placa calefactora por aproximadamente 30 min a 450 °C. El fotoánodo fue retirado, muy cuidadosamente, para evitar choques térmicos.

2.2.3. Sensibilización del electrodo de TiO₂

Para la sensibilización del fotoánodo, se impregnó el fotoelectrodo con el colorante natural obtenido a partir de la remolacha (betalaina). La impregnación con el colorante demoró 10 minutos, hasta que la capa de TiO₂ obtuvo un color rosa-violáceo. Al igual que el paso anterior, este proceso se realizó en triplicado.

2.2.4. Preparación del Contraelectrodo

Para la preparación del contraelectrodo se utilizó el carbón en fase grafito de un lápiz Faber Castell HB. Después de identificar la cara conductora, se procedió a recubrir el electrodo con grafito, para crear una capa fina de grafito. A continuación, se sumergió en etanol y se limpió con papel, cuidadosamente.

2.2.5. Preparación del Electrolito

La solución electrolito se preparó a partir de 0,67 g de LiI y 0,13 g de yodo. Estas cantidades se diluyeron en 10 ml de metil acetato. La solución se vertió en un matraz envuelto en papel de aluminio, y el tapón se recubrió de Parafilm para evitar la evaporación del disolvente.

2.2.6. Montaje de la Celda Solar

Una vez secos el electrodo y contraelectrodo, se unieron uno frente al otro, dejando en contacto la cara con grafito del contraelectrodo con la cara de titanio del electrodo. Se desplazó aproximadamente medio centímetro para facilitar el agarre de las conexiones eléctricas. Finalmente se conectaron pinzas al sistema, para asegurar la sujeción.

2.3. Caracterización de la celda solar

2.3.1. Medición de absorbancia

La medición del espectro de absorción de la celda solar sensibilizada por el extracto de la remolacha fue analizada en un espectrofotómetro.

2.3.2. Fotocorriente y eficiencia

Con una fuente de luz en laboratorio (lámpara), simulando el cenit, se mide la fotocorriente generada por la celda solar sensibilizada con extracto de remolacha. A partir de una gota de la solución electrolito, y diferentes valores de resistencia, se obtuvieron resultados de intensidad y voltaje de la celda solar (curva intensidad-voltaje).

En este experimento, se usó una celda solar de silicio como referencia. La caracterización y método para la obtención de la celda solar de silicio no se presentan en este estudio.

Para ambas celdas solares, se graficaron las curvas de intensidad-voltaje, curva de potencia y curva de eficiencia.

Para calcular la eficiencia de conversión de energía solar en electricidad de la celda solar (η), se tendrá en cuenta el punto más alto de la curva de eficiencia (densidad de potencia máxima), aplicando la ecuación (1):

$$\eta = \frac{J_{\max} \cdot V_{\max}}{I_{\text{luz}}} * 100 \quad (1)$$

J_{\max} [mA/cm²]: Densidad de corriente máxima

V_{\max} [V]: voltaje en el punto de J_{\max}

I_{luz} [mW/cm²]: 100 mW/cm²

Para la intensidad de la luz (I_{luz}), se considera que el sol irradia 100 J*s, entonces:

$$I_{\text{LUZ}} = \frac{100 \text{ mW}}{\text{cm}^2} \quad (2)$$

Para la intensidad de la luz (I_{luz}), se consideró que el sol irradia 100 mW/cm², pero al realizar el experimento con la luz de una lámpara en el laboratorio, con la caracterización de la lámpara usando una celda solar de silicio como referencia en 1 sol (100 mW/cm²) se generaron 93 mA de corriente en circuito cerrado, sin embargo, en el laboratorio, con la lámpara utilizada, sólo se generó 1,7 mA, por tanto, aproximadamente la intensidad de la lámpara es un factor 93/1,7 más baja que 100 mW/cm² (3):

$$I_{\text{LUZ}} = \frac{100 \text{ mW}}{\text{cm}^2} * \left(\frac{93}{1.7}\right) = \frac{1.83 \text{ mW}}{\text{cm}^2} \quad (3)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Extracto de remolacha

Estudios de [6] y [7] reportan el uso beneficioso de extracto de remolacha en la sensibilización de celdas solares, debido a la presencia de bandas de absorción en el espectro del visible, además de la presencia de grupos de oxígenos conjugados (=O) e hidroxilas (-OH) que fortalecen la creación de enlaces con Ti⁴⁺, además de la presencia de betalaina, los grupos carboxilos (-COOH) ayudan en la creación de enlaces con el TiO₂ [8].

La extracción del colorante de remolacha se presenta en la Figura 1. El extracto obtenido tuvo un volumen reducido, debido al tiempo de extracción y el solvente poco ácido utilizado (etanol).



Fig. 1. Extracto de remolacha.

3.2. Absorbancia de la celda solar

El resultado del espectro de absorción de la celda solar sensibilizada por el extracto de remolacha se presenta en la Figura 2. Se observan bandas de absorción con valores máximos en el intervalo 700 – 850 nm, correspondientes al color rojo del espectro visible. Se encuentra una banda de absorción centradas en 766 nm, correspondientes a polifenoles presentes en la remolacha (ácido gálico), similar al reportado por [9], [10], [11].

Al mismo tiempo, se denota la ausencia de las bandas típicas del extracto de remolacha 537 nm y 480 nm, correspondientes a las betacianinas (rojo-violeta) y las betaxantinas (amarillo-naranja), respectivamente [12], [13], [14]. La ausencia de las bandas pudo deberse a que todos los autores mencionados utilizan remolacha fresca. En el presente experimento, se utilizó remolacha cocida, este proceso térmico afectó las propiedades fisicoquímicas de la remolacha. Gómez *et al.* [15] indican que el tiempo de cocción conlleva a la degradación de los ácidos orgánicos de la remolacha, además que las betalainas se solubilizan y degradan en agua.

Otro proceso que pudo haber reducido la presencia de betalaina es el método de extracción del colorante natural. Syafinar *et al.*, [6] reportan el uso de ultrasonidos y centrifugas para mejorar la tasa de extracción de betalaina, utilizando etanol como solución ácida, mientras que otros autores usan ácidos fuertes [8]. Comparando los valores de absorbancia de nanopartículas de TiO₂ con el fotoánodo sensibilizado por el colorante natural, se observa que esta última muestra una menor reflectancia difusa debido a la absorción de la luz por los colorantes. Esta adsorción del colorante sobre la película de titania pudo haber provocado que el pico de adsorción del ácido gálico de la remolacha se desplazase de 750 a 766 nm cuando el colorante se ancla con el fotoánodo TiO₂.

Nuevamente, la eficiencia de la extracción del colorante natural juega un rol importante en el anclaje a la película de TiO_2 . A pH elevados, la betanina se adsorbe mal en el TiO_2 debido a su inhibición por la indicaxantina (un tipo de betaxantina) que compete con la betanina por los sitios de adsorción, pero con un pH más bajo, la protonación del grupo del ácido carboxílico betaláinico de su forma aniónica se produce promoviendo su adsorción en el TiO_2 [16], [17].

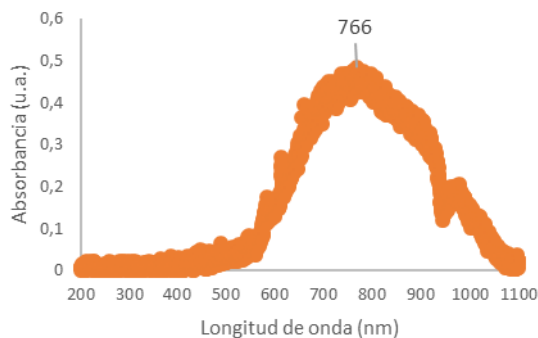


Fig. 2. Espectro de absorción de la celda solar sensibilizada con extracto de remolacha.

Por último, este desplazamiento al rojo del pico de adsorción se atribuye a la fijación del colorante en la superficie del óxido. Contrariamente a lo reportado por [7], la unión del colorante de betalaina en la superficie del TiO_2 no se desplaza hacia el azul del espectro de luz visible.

Los resultados del FTIR podrían complementar el estudio, identificando las bandas de absorción de la energía vibracional de las moléculas que interactúan en la celda solar sensibilizada por el extracto de remolacha.

3.3. Interacción TiO_2 – extracto de remolacha

En el espectro del fotoanodo de TiO_2 sensibilizado por el extracto de remolacha (Figura 3), el máximo de adsorción está en el rojo desplazado a 766 nm, lo que indica la interacción de la molécula de colorante betalaina con el TiO_2 , lo que es evidente por el cambio de color del rojo - violeta. Los grupos funcionales carboxilo ($-\text{COOH}$) de la molécula de colorante betalaina se combinan con el grupo hidroxilo ($-\text{OH}$) del TiO_2 para producir un enlace de tipo éster y potenciar los electrones desde el orbital molecular no ocupado más bajo (LUMO) del colorante hasta la banda de conducción del TiO_2 para facilitar transferencia de electrones por efecto de acoplamiento [8].

La Figura 3 presenta la interacción de la molécula de betalaina del extracto de remolacha con la titania, propuesta por [8].

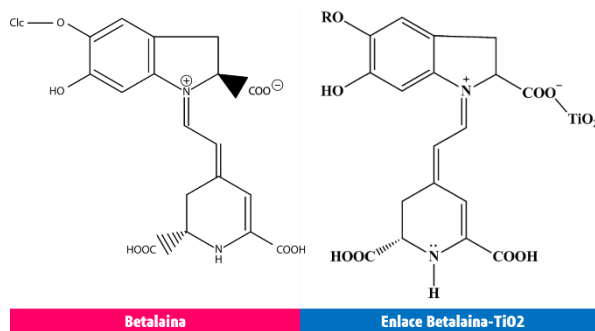


Fig. 3. Interacción betalaina – TiO_2 .

3.4. Fotocorriente

La curva intensidad-voltaje generada durante el paso de electricidad y sobre radiación solar se presenta en la Figura 4. Se observan mayores resultados en la cara de frente que en la cara reversa de la celda sola, esto debido a que la radiación llega directamente al fotoelectrodo (TiO_2).

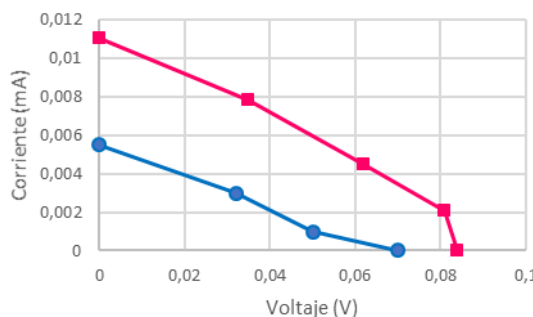


Fig. 4. Curva intensidad-voltaje: (—■—) frente, (—●—) reverso de la celda solar sensibilizada por colorante.

Para complementar el estudio fotoelectroquímico, se presentan la Figura 5, donde se representa la variación de la densidad de corriente vs el voltaje y Figura 6 que representa la densidad de potencia vs voltaje.

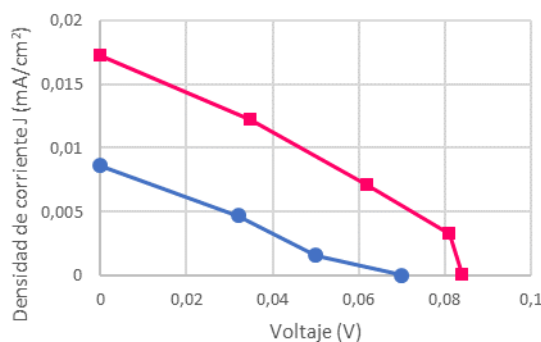


Fig. 5. Curva de densidad de corriente: (—■—) frente, (—●—) reverso de la celda solar sensibilizada por extracto de remolacha.

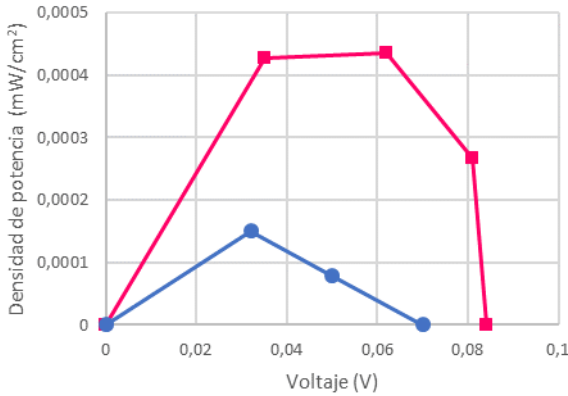


Fig. 6. Curva de eficiencia: (—■—) frente, (—●—) reverso de la celda solar sensibilizada por extracto de remolacha.

A partir de estos se resultados, se calculó la eficiencia de la celda solar sensibilizada por colorante usando extracto de remolacha (η_R) y la eficiencia de la celda solar de silicio (η_{Si}):

$$\eta_R = \frac{0,00454 \text{ mW}}{\frac{\text{cm}^2}{1,88 \text{ mW}} \text{ cm}^2} \times 100 \quad (4)$$

$$\eta_R = 0,024 \quad (5)$$

Para la eficiencia de la celda solar de silicio (η_{Si}), los resultados de la curva intensidad – voltaje se presentan en la Figura 7. Para efectos del cálculo de la densidad de la corriente eléctrica (Figura 8) y la curva de eficiencia (Figura 9), se considera un área de 16 cm².

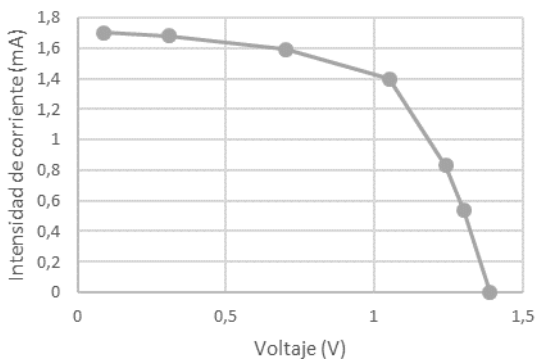


Fig. 7. Curva de intensidad-voltaje (—●—) de la celda de silicio

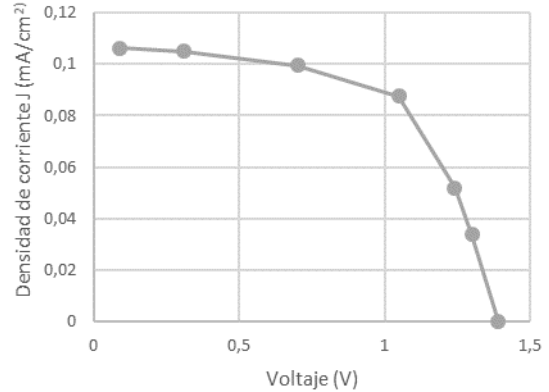


Fig. 8. Curva de densidad de corriente (—●—) de la celda de silicio.

Con estos resultados de la celda de silicio (Figura 8-10), se calculó su eficiencia $\eta_{Si} = 0,0952$.

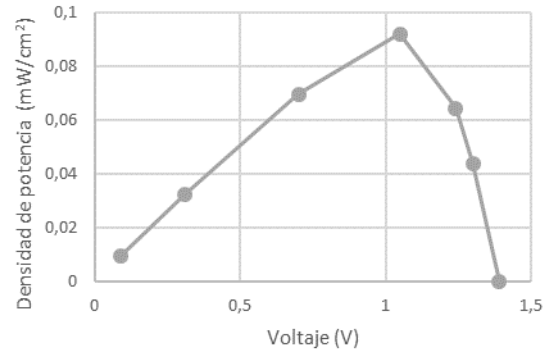


Fig. 9. Curva de eficiencia (—●—) de la celda de silicio.

Comparando ambas eficiencias, se evidencia la eficiencia del orden de 3,97 veces superior de la celda solar de silicio frente a la celda solar sensibilizada por colorante extraído de la remolacha. La baja eficiencia de la conversión de la energía solar a energía eléctrica puede deberse a:

- El espectro de absorción se encuentra en el espectro del rojo-infrarrojo (bajas energías),
- El tipo de enlace y energía asociada, como enlaces hidroxila (-OH) generan una unión débil unión de los colorantes naturales con los óxidos metálicos (betalaina-TiO₂) [17],
- Posiblemente, el tiempo no suficiente para anclar el colorante natural a la película del oxido,
- la tasa de recombinación par hueco-electrón (h⁺/e⁻),
- la recombinación del electrón con el catión del colorante (e⁻/S⁺) [17], originado por la naturaleza de la unión betalaina-TiO₂, no es suficiente para deslocali-

zar los electrones foto-excitados del colorante natural al fotoánodo [7],

- la posible degradación del colorante natural debido a reacciones secundarias con otras especies químicas presentes en el extracto de remolacha, electrolito oxidado ($I^3 \rightarrow I^2$) y especies reactivas de oxígeno.

4. Conclusiones

Aunque el extracto natural de la remolacha exhibe, en las condiciones de laboratorio, una eficiencia fotoelectroquímica del orden de 24 veces inferior a la celda de silicio, se reconoce el potencial de los colorantes vegetales como una solución verde para la transformación de energía solar a energía eléctrica.

Los colorantes naturales pueden ser una alternativa ecológica, una fuente de energía renovable para la fabricación de células solares sensibilizadas por colorantes naturales.

La comparación de los resultados experimentales abre nuevas expectativas hacia las células solares con silicio para fines eléctricos.

Referencias

- [1] Hug, H., Bader, M., Mair, P., & Glatzel, T. (2014). Biophotovoltaics: natural pigments in dye-sensitized solar cells. *Applied Energy*, 115, 216-225.
- [2] Sathyajothi, S., Jayavel, R., & Dhanemozhi, A. C. (2017). The fabrication of natural dye sensitized solar cell (DSSC) based on TiO₂ using henna and beetroot dye extracts. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 668-676.
- [3] Sarkar, T., Sen, M. K., & Nihar, S. (2015). Extraction of natural pigment from beet root and proper packaging of that red dye: A review. *J Agric Eng Food Technol*, 2(2), 116-8.
- [4] Guillén, E., Casanueva, F., Anta, J. A., Vega-Poot, A., Oskam, G., Alcántara, R., Fernández-Lorenzo, C. & Martín-Calleja, J. (2008). Photovoltaic performance of nanostructured zinc oxide sensitized with xanthene dyes. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 200(2-3), 364-370.
- [5] Berni, A., Mennig, M., & Schmidt, H. (2004). Doctor blade. In *Sol-gel technologies for glass producers and users* (pp. 89-92). Springer, Boston, MA.
- [6] Syafinar, R., Gomesh, N., Irwanto, M., Fareq, M., & Irwan, Y. M. (2015). FT-IR and UV-VIS spectroscopy photochemical analysis of dragon fruit. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10, 6354-6358.
- [7] Sengupta, D., Mondal, B., & Mukherjee, K. (2015). Visible light absorption and photo-sensitizing properties of spinach leaves and beetroot extracted natural dyes. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 148, 85-92.
- [8] Ramamoorthy, R., Radha, N., Maheswari, G., Anandan, S., Manoharan, S., & Williams, R. V. (2016). Betalain and anthocyanin dye-sensitized solar cells. *Journal of Applied Electrochemistry*, 46(9), 929-941.
- [9] Čanadanović-Brunet, J., Četković, G., Jakišić, M., Djilas, S., Vulić, J., & Stajčić, S. (2016). Encapsulation of Beetroot Pomace Extract: RSM Optimization, Storage and Gastrointestinal Stability. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 21(5).
- [10] Tumbas Šaponjac, V., Čanadanović-Brunet, J., Četković, G., Jakišić, M., Djilas, S., Vulić, J., & Stajčić, S. (2016). Encapsulation of beetroot pomace extract: RSM optimization, storage and gastrointestinal stability. *Molecules*, 21(5), 584.
- [11] Ben Haj Koubaier, H., Snoussi, A., Essaidi, I., Chaabouni, M. M., Thonart, P., & Bouzouita, N. (2014). Betalain and phenolic compositions, antioxidant activity of Tunisian red beet (*Beta vulgaris* L. conditiva) roots and stems extracts. *International journal of food properties*, 17(9), 1934-1945.
- [12] Chhikara, N., Kushwaha, K., Sharma, P., Gat, Y., & Panghal, A. (2019). Bioactive compounds of beetroot and utilization in food processing industry: A critical review. *Food Chemistry*, 272, 192-200.
- [13] Escribano, J., Pedreño, M. A., García-Carmona, F., & Muñoz, R. (1998). Characterization of the antiradical activity of betalains from *Beta vulgaris* L. roots. *Phytochemical Analysis: An International Journal of Plant Chemical and Biochemical Techniques*, 9(3), 124-127.
- [14] von Elbe, J. H., Schwartz, S. J. and Hildenbrand, B. E. (1981). Loss and regeneration of betacyanin pigments during processing of red beets. *J. Food Sci.* 46, 1713-1715
- [15] Gómez, M. N., & Cifuentes, A. L. D. (2018). Caracterización Físico Química y Contenido Fenólico de la Remolacha (*Beta vulgaris* L.) en Fresco y Sometida a Tratamiento Térmico. *Revista Ion*, 31(1), 43-47.
- [16] Isah, K. U., Ahmadu, U., Idris, A., Kimpa, M. I., Uno, U. E., Ndamitso, M. M., & Alu, N. (2015). Betalain pigments as natural photosensitizers for dye-sensitized solar cells: the effect of dye pH on the photoelectric parameters. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 4(1), 39.
- [17] Calogero, G., Di Marco, G., Cazzanti, S., Caramori, S., Argazzi, R., Di Carlo, A., & Bignozzi, C. A. (2010). Efficient dye-sensitized solar cells using red turnip and purple wild sicilian prickly pear fruits. *International journal of molecular sciences*, 11(1), 254-267. C. J. Kaufman, Rocky Mountain Research Laboratories, Boulder, Colo., personal communication, 1992. (Comunicación personal)



Alvaro Marcelo Porcel Padilla
estudiante de último año de
Ciencias ambientales.