

Detección de pigmentos en aceites con un espectrofotómetro de bajo costo: propuesta de un proyecto para la introducción a la espectrometría

Detection of pigments in oils with a low-cost spectrophotometer: Proposal for a project for the introduction to spectrometry

Evelyn Toque-Huaman¹ y Julio David Gonzales-Balladares²

Resumen

Con el fin de enseñar a los estudiantes universitarios los conceptos básicos sobre la espectrometría de manera práctica, se proponen tres actividades para el seguimiento de un proyecto interdisciplinario mediante el aprendizaje basado en proyectos como metodología educativa debido al alto costo de los espectrofotómetros de laboratorio. Con este objetivo se utiliza el reconocido CD-espectrofotómetro para visualizar los espectros de absorción, e identificar los pigmentos de clorofillas, y carotenoides en tres aceites comerciales, *Plukenetia volubilis* (sacha inchi), oliva, y soya. Posteriormente, con la ley de Beer-Lambert se evalúa la relación entre las absorbancias de distintas concentraciones de astaxantina en aceite de sacha inchi. Para finalmente evaluar la satisfacción de los estudiantes a esta propuesta de proyecto interdisciplinario con esta metodología.

Palabras clave: educación interdisciplinaria; enseñanza de química analítica; espectrofotómetro; ABP; pigmentos del aceite.

Abstract

To teach university students the basic concepts of spectrometry in a practical way, three activities are proposed to follow up an interdisciplinary project using project-based learning as an educational methodology due to the high cost of laboratory spectrophotometers. With this objective, the renowned CD-spectrophotometer is used to visualize the absorption spectra and identify the chlorophyll and carotenoid pigments in three commercial oils, *Plukenetia volubilis* (sacha inchi), olive, and soybean. Subsequently, the relationship between the absorbances of different concentrations of astaxanthin in sacha inchi oil was evaluated using the Beer-Lambert law. Finally evaluate the students' satisfaction to this interdisciplinary project proposal with this methodology.

Keywords : interdisciplinary education; teaching, analytical chemistry; PBL; spectrophotometer; oil pigments.

CÓMO CITAR:

Toque-Huaman, E., y Gonzales-Balladares, J. D. (2024). Detección de pigmentos en aceites con un espectrofotómetro de bajo costo: propuesta de un proyecto para la introducción a la espectrometría. *Educación Química*, 35(4). <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2024.4.87493>

¹ Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas

² Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC)

Introducción

La metodología de Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) o en sus siglas en inglés (PBL) es considerada como una estrategia de enseñanza donde los estudiantes planifican, implementan, y evalúan proyectos con aplicaciones en el mundo real (Toledo y Sánchez, 2018). Un elemento importante en estos modelos educativos para la educación universitaria es el diseño de proyectos transversales, e interdisciplinarios, que integren los aprendizajes claves de diferentes asignaturas para resolver una situación o problemática. (Escobedo y Cordero, 2023). Por ejemplo, el problema de adulteración del aceite comestible con colorantes artificiales (Gandul-Rojas et al., 2013), o el problema de adulteración en los componentes de los suplementos nutricionales (SN) que generan grandes riesgos para la salud (Martínez-Sanz et al., 2021).

La educación interdisciplinaria requiere de prácticas educativas que favorezcan los procesos integrativos, y constituyan una potente herramienta para el desarrollo de habilidades en los estudiantes (Corbacho, 2018). Por ello, las actividades experimentales deben ser integradoras, y complementar el aprendizaje con información que le permita al estudiante construir sus conocimientos (Carrasquero-Durán et al., 2004). El análisis por espectroscopia es una de las técnicas fundamentales de reconocimiento de sustancias, y la construcción de espectrofotómetros hechos en casa permiten a los estudiantes comprender su funcionamiento, y los preparan en estas técnicas analíticas (Cid y González-Fernández, 2020).

Los principios del análisis espectrofotométrico en la región visible (VIS), y ultravioleta (UV) del espectro electromagnético son importantes en los cursos de química analítica a nivel universitario. Por ello, las clases teóricas deben complementarse con actividades de laboratorio (Carrasquero-Durán et al., 2004). La espectrometría es una técnica analítica que mide la cantidad de luz absorbida en función de la longitud de onda usada. Esta relación adimensional entre la intensidad de luz incidente (I_0) y la intensidad de la luz transmitida (I_i) proporciona la transmitancia (T) mostrada en Ec.1, y la absorbancia (A) mostrada en Ec.2 (Grasse et al., 2015). Mientras la ecuación de la ley de Beer-Lambert mostrado en Ec.3 relaciona a la absorbancia con la concentración (C), la absorvtividad molar (ε), y la longitud del recorrido de la luz en el medio (b) (Swinehart, 1962).

$$T = \frac{I_i}{I_0} \quad (1)$$

$$A = -\log\left(\frac{I_i}{I_0}\right) = -\log(T) \quad (2)$$

$$A = \varepsilon \cdot b \cdot C = -\log(T) \quad (3)$$

Los experimentos en el laboratorio deben centrarse en introducir la química que existe en las cosas cotidianas con la educación química, como el estudio de la coloración de los alimentos (Braniša et al., 2014). El aceite es un alimento muy utilizado en el mundo, y su color se debe a la presencia de pigmentos naturales como: Los carotenoides (β -caroteno, luteína, violaxantina, neoxantina, xantofilas), clorofila-a, clorofila-b, y derivados (feofitinas). Estas sustancias son responsables de las características cualitativas del aceite, y están relacionados con su calidad. (Lazzerini et al., 2016; Borello y Domenici, 2019). El tipo de pigmento presente en el aceite comercial depende del vegetal utilizado en su fabricación, y

una técnica para determinar la presencia de estos pigmentos es mediante el uso de un espectrofotómetro UV-Vis. En el caso de los carotenoides, estos son observados directamente en el aceite entre los 430 a 480 nm (Lazzerini et al., 2016). Un carotenoide muy utilizado en la industria farmacéutica debido a su uso como antioxidante es la astaxantina ($C_{40}H_{52}O_4$) que pertenece a la familia de las xantofilas (Ver Figura 1) pero por ser sensible a la oxidación es industrialmente estabilizado en el aceite adicionándole vitamina E. La astaxantina pura se puede identificar, y cuantificar mediante técnicas espectrofotométricas debido a que presenta un valor máximo de absorbancia a 488 nm en una disolución con metanol (Córdoba-Castro et al., 2015).

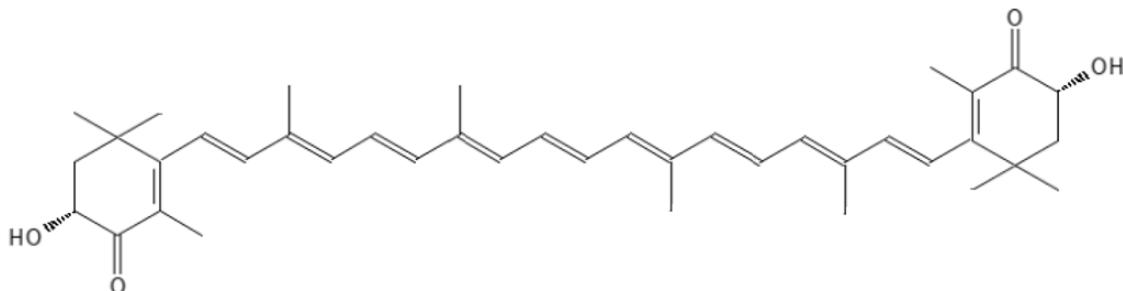


FIGURA 1. Estructura molecular de la astaxantina.

La observación de espectros es una manera efectiva para que los estudiantes se interesen en la espectroscopia (Wakabayashi y Hamada, 2006), y para ayudarlos en la comprensión del funcionamiento de estos equipos de medición (espectrofotómetros) es necesario presentarles experiencias que demuestren sus mecanismos, y posibles fallas. En un estudio realizado con estudiantes universitarios se observó que después de una breve demostración, y de permitir una interacción de 45 minutos entre los estudiantes con el espectrofotómetro, los grupos que participaron de esta actividad demostraron un conocimiento superior que los grupos que solo leyeron el libro sobre absorción óptica (Scheeline, 2010).

Toledo y Sánchez (2018) mencionan que la metodología ABP demuestra tener un alto nivel de satisfacción en los estudiantes al crear un ambiente de aprendizaje positivo en el aula que facilita la comunicación con los docentes, y permite un mejor proceso de enseñanza-aprendizaje. Mientras González et al. (2015) explican que las actividades con enfoque interdisciplinario contribuyen con el cumplimiento de los objetivos en la formación educativa, y en la aplicación integrada de los conocimientos, perfeccionando con ello el trabajo científico, y metodológico de las ciencias básicas.

La novedad en nuestro estudio es la aplicación de la metodología ABP como una propuesta de enseñanza para introducir a los estudiantes universitarios en los conocimientos básicos de espectrometría. Con este fin se muestra el funcionamiento de un espectrofotómetro de bajo costo para visualizar los espectros de los pigmentos de clorofilas, carotenoides, y sus derivados en tres aceites vegetales (sacha inchi, soya, oliva), así como también la relación entre las absorbancias de distintas concentraciones de astaxantina presente en capsulas de SN. De esta manera, con el uso de un espectrofotómetro elaborado por los mismos estudiantes se busca resolver el problema de accesibilidad a los instrumentos de laboratorio que tienen un alto costo.

El presente trabajo se limita a evaluar la compresión de los principios básicos de espectrometría relacionados con la ley de Beer-Lambert, y la satisfacción de un grupo de estudiantes universitarios a la propuesta de un proyecto interdisciplinario mediante la aplicación de la metodología ABP. Por esta razón, no se evalúan temas avanzados sobre validación de métodos de ensayos (robustez, veracidad, rango de trabajo, incertidumbre, selectividad, límite de detección, y límite de cuantificación).

Materiales y método

Diseño del Espectrofotómetro

El espectrofotómetro que presentamos fue basado en el trabajo de Wakabayashi y Hamada (2006), y Montoya et al. (2013). Requiere de una laptop para procesar la información, y sus componentes presentan un costo de USD \$30.0. Estos son: una cámara web con enfoque manual, un disco compacto (CD), una celda de plástico para espectrofotómetro de base de 1 cm por 1 cm, una caja de madera oscura de 35 cm de largo por 10 cm de alto por 10 cm de ancho, bisagras de metal, y distintas fuentes de luz (diodos emisores de luz, bombilla incandescente, fluorescentes), ensamblados como se muestra en la Figura 2. El ensamblado del CD-espectrofotómetro se puede encontrar en sitios web como Physicsopenlab (2015) o canales de youtube de Electrical Projects (2018), y DiodeGoneWild (2022).

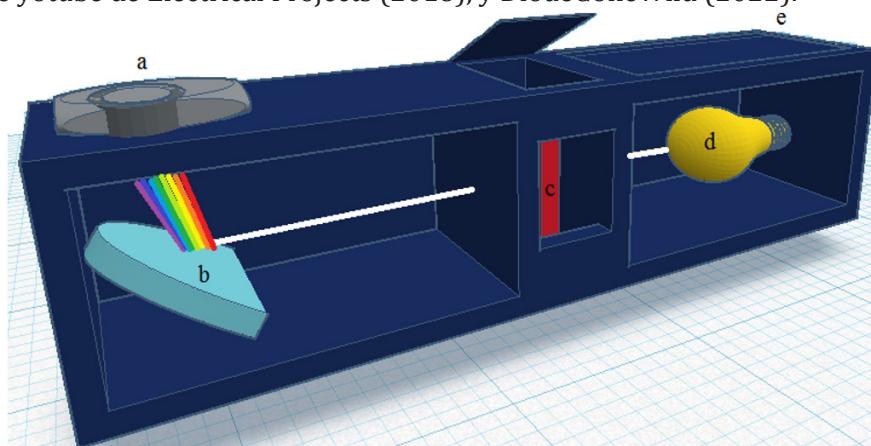


FIGURA 2. Vista del espectrofotómetro educativo. a) Cámara web, b) CD, c) celda de plástico, d) fuente de luz, e) estructura de madera oscura.

El software *Theremino Spectrometer-V.3* fue descargado de su [página web](#), y fue usado para recolectar los espectros, mientras que para calcular A , y T se usaron hojas de cálculo en Excel. Todos los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles abiertamente en [Mendeley Data](#).

Insumos

Cápsulas de suplemento nutricional que contenían; 4 mg de astaxantina Andina, y 10 mg de alfa-tocoferol (vitamina E) en una solución de 0.4166 mL de aceite de sacha inchi (densidad aceite $\approx 0.93 \text{ g mL}^{-1}$). También 20 mL de aceite de soya, 200 mL de aceite de sacha inchi, y 20 mL de aceite de oliva extra virgen (EVOO).

Procedimiento

Al iniciar el ciclo académico con duración de 16 semanas de clases, se propone un proyecto con estudiantes del cuarto ciclo de las carreras de ingeniería mecatrónica, ciencias de la

computación, ingeniería industrial, ingeniería civil, y bioingeniería. Para ello, el modelo ABP es dividido en tres etapas: En la primera etapa, se organizan los grupos interdisciplinarios conformados por cuatro estudiantes, se planifican las actividades que se van a evaluar y se plantea el problema a solucionar mediante una pregunta generadora. En la segunda etapa, los estudiantes investigan, y buscan información relevante para solucionar el problema a través de un producto, su diseño, los materiales, y el costo. En la tercera etapa, los estudiantes realizan una exposición final en la semana 16 para presentar sus hallazgos, y sus resultados obtenidos. En el ABP el seguimiento es continuo, por ello se han propuesto tres actividades demostrativas para realizarse en la semana 4, 8, y 12.

La primera actividad (semana 4) tiene como objetivo introducir los conceptos básicos en la construcción de un espectrofotómetro (dispersión de la luz, longitud de onda, y color), para ello con ayuda del software *Theremino Spectrometer* se evalúan los espectros generados por el CD-espectrofotómetro con distintas fuentes de luz como: Bombillas incandescentes, diodos emisores de luz (LED) de chip en placa (COB), lámparas compactas fluorescentes (CFL), etc. En la segunda actividad (semana 8) se tiene como objetivo que los estudiantes identifiquen los espectros de los pigmentos (clorofilas, carotenoides, y sus derivados) presentes en tres aceites (sacha inchi, oliva, y soya). En la tercera experiencia (semana 12) se tiene como objetivo introducir a los estudiantes en los principios de la ley de Beer-Lambert, y evaluar las absorbancias de distintas concentraciones de astaxantina en aceite de sacha inchi proveniente de cápsulas de SN.

Finalmente, en la semana 15 se tomó como referencia el cuestionario empleado por Ramírez et al. (2023) se realiza una prueba a 24 estudiantes para medir el nivel de satisfacción a la metodología ABP mediante la escala de Likert de 5 puntos (Ver Figura 3). En el formulario también se coloca una gráfica espectral para evaluar la capacidad de los estudiantes a identificar los pigmentos de clorofilas presentes en los aceites, y dos preguntas relacionadas con la percepción de sus conocimientos sobre la ley de Beer-Lambert antes de desarrollar el curso, y al finalizar el curso. Por último, se realiza una dinámica para emplear la herramienta de testeo denominada matriz receptora (feedback). Este tipo de diagramas permiten clasificar los puntos positivos, y los puntos de mejora de un proyecto, según Ibáñez-Alvarado et al. (2022). Por esta razón, los estudiantes respondieron a cuatro preguntas: ¿Qué te gusta del proyecto? ¿Qué mejorarías? ¿Qué pregunta nos harías? ¿Qué nueva idea propones para el proyecto?

Resultados y discusión

Primera Actividad (Semana 4)

En esta sesión de clases se presentaron espectrofotómetros de bajo costo realizados en ciclos anteriores con los diseños de Wakabayashi y Hamada (2006), y Montoya et al. (2013) para realizar una breve presentación sobre los conceptos básicos relacionados con la construcción del CD-espectrofotómetro (dispersión de la luz, longitud de onda, y color) al emplear como rejilla de difracción un CD, y una película holográfica similar a la usada por Scheeline (2010). Luego se ensambló el espectrofotómetro mostrado en la Figura 1 para que los estudiantes analicen la relación entre el color con la longitud de onda, y exploren sobre la dispersión de la luz con distintas fuentes (bombilla incandescente de 40 W, CFL de 21 W LED COB JH-5WBVG14G24 de 5 W, bombilla fluorescente en espiral de 23 W, y LED 5050RGB de 20 W).

Puntuar de 1 a 5 (siendo 5 de mayor grado) tu satisfacción con la propuesta de **proyecto interdisciplinario para la educación universitaria** empleando la metodología ABP

- 1 (Nada Satisficho)
- 2 (Poco Satisficho)
- 3 (Neutral)
- 4 (Muy Satisficho)
- 5 (Totalmente Satisficho)

FIGURA 3. Escala de Likert empleada en el formulario para medir la satisfacción a la propuesta de proyecto interdisciplinario relacionada con la espectrofotometría.

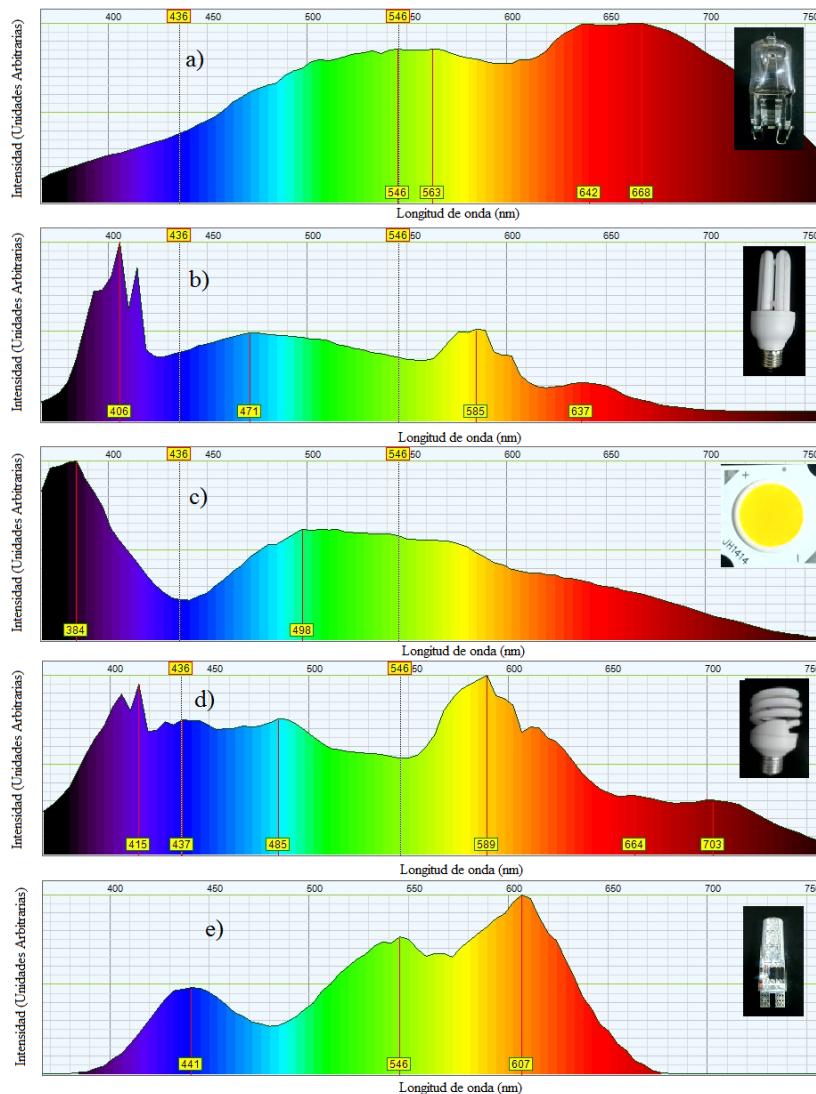


FIGURA 4. Espectros obtenidos con diferentes fuentes de luz: a) bombilla incandescente, b) CFL, c) LED COB, d) bombilla fluorescente en espiral, e) LED.

Posteriormente, se les pidió a los estudiantes que analicen los espectros mostrados en la Figura 4, y expliquen lo aprendido sobre la relación entre la dispersión de la luz, el color, y la longitud de onda en el espectro visible para evaluar su comprensión sobre el funcionamiento del CD-espectrofotómetro. Esta actividad no es calificada, pero permite realizar retroalimentación sobre los conceptos de espectrometría. Esto es posible debido a que los espectrofotómetros educativos tienen el potencial de ampliar la accesibilidad de los estudiantes a la formación práctica, su diseño fomenta la interacción de los estudiantes con sus componentes, ayuda a desarrollar la comprensión de su funcionamiento, y permite enseñar sobre los principios básicos de la luz, y longitud de onda (Grasse et al., 2015, y Ramos et al., 2023).

Segunda Actividad (Semana 8)

En esta sesión de clases se realizó una breve presentación sobre las estructuras químicas de algunos pigmentos (carotenoides, clorofilas, y sus derivados) en los aceites vegetales, así como los diferentes métodos existentes para su análisis químico. Para realizar la explicación sobre T (Ec.1), y A (Ec.2) se colocó una celda vacía en el CD-espectrofotómetro con un LED COB JH-5WBVG14G24 como fuente de luz para obtener I_0 , y muestras de aceite de sacha inchi, de soya, y EVOO en la celda para obtener I_i , posteriormente con ayuda de una hoja de cálculo en Excel se graficaron los espectros de absorción de los tres aceites

comerciales entre los 390 a 630 nm. Esto es representado en la Figura 5 donde se muestran las posiciones referenciales de longitud de onda de los pigmentos puros.

La Figura 5 fue usada para explicar el traslape entre las señales de absorción de la mezcla de los pigmentos (carotenoides, clorofilas, y derivados) en el aceite entre los 390 a 520 nm, y compararlos con los valores de absorbancia máximos de los pigmentos puros en acetona como; los carotenos (454, y 480 nm), luteína (424, 448, y 476 nm), clorofila-a (430 nm), feofitina-a (407 nm), y clorofila-b (465 nm) mencionados por Braniša et al. (2014), y Lazzerini et al. (2016). La Figura 5 fue posteriormente utilizada para evaluar la capacidad de los estudiantes de identificar pigmentos entre los 390 a 630 nm. Este tipo de experimentos con espectrofotómetros tienen un alto valor motivacional, y de interés para los estudiantes, por ello son una buena alternativa para la educación universitaria (Braniša et al., 2014). Así mismo, en el [material suplementario](#) se compararon cualitativamente los perfiles espectrales de los

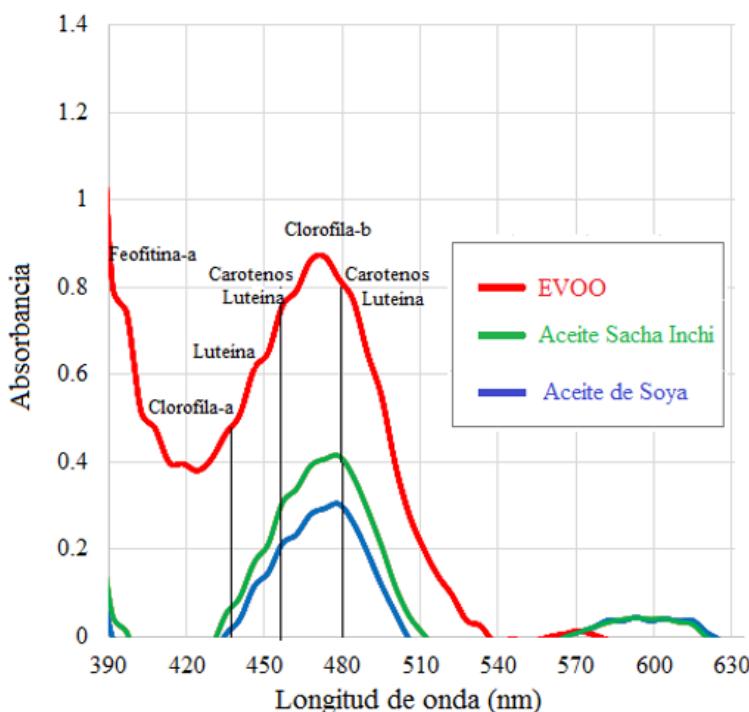


FIGURA 5. Espectros de Absorción de tres aceites comerciales con un espectrofotómetro de bajo costo diseñado para la enseñanza con las posiciones referenciales de los pigmentos.

pigmentos (carotenoides, y clorofilas) obtenidas en la extracción de espinaca y zanahoria registradas con un espectrofotómetro comercial y el CD-espectrofotómetro, tomado como referencia el estudio realizado con un espectrofotómetro UV-Vis por Cerdá y Manidurai (2019).

Tercera Actividad (Semana 12)

Para esta sesión de clases se prepararon previamente cinco diluciones (1:10; 0.8:10; 0.5:10; 0.4:10; 0.2:10) a partir de cápsulas de SN que contienen 0.8 % de astaxantina de porcentaje en masa (% mm) en aceite de sacha inchi, y se analizaron con un espectrofotómetro UV-Vis comercial de marca Shimadzu de la serie UV-2600. Durante la clase se realizó una breve presentación sobre la ley de Beer-Lamber (Ec.3), y se identificó el valor de longitud de onda de 485 ± 1 nm para la detección de astaxantina en aceite de sacha inchi (Ver Figura 6). Dado que la selección de la longitud de onda es un parámetro crucial en el análisis químico de una solución, y su demostración práctica es una herramienta valiosa para enseñar a los estudiantes durante la ejecución de un método analítico (Amaya et al., 2023).

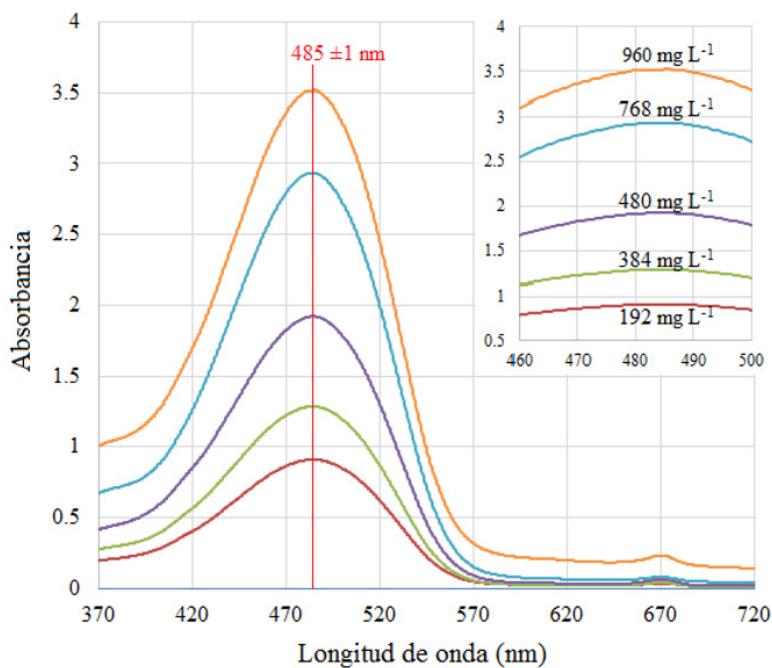


FIGURA 6. Espectros de absorción en diluciones de astaxantina en aceite de *Plukenetia volubilis* (sacha inchi) obtenidas con un espectrofotómetro UV-VIS comercial.

Posteriormente, con el CD-espectrofotómetro se obtuvieron los espectros de absorción de cuatro diluciones ($192, 288, 384, 480 \text{ mg L}^{-1}$) de astaxantina en aceite de sacha inchi (Ver Figura 7), y se ordenaron los valores de absorbancia obtenidos con ambos espectrofotómetros en la Tabla 1.

Los valores de absorbancia de la Tabla 1 fueron empleados en Ec. 3 para explicar la ley de Beer-Lambert a los estudiantes. Para ello se empleó el ajuste de regresión lineal para obtener la ecuación de la recta, y evaluar los coeficientes de determinación (R^2) en ambos espectrofotómetros (Ver Figura 8).

FIGURA 7. Espectros de absorción en distintas diluciones de astaxantina en aceite de *Plukenetia Volubilis* (sacha inchi) obtenidas con el espectrofotómetro educativo.

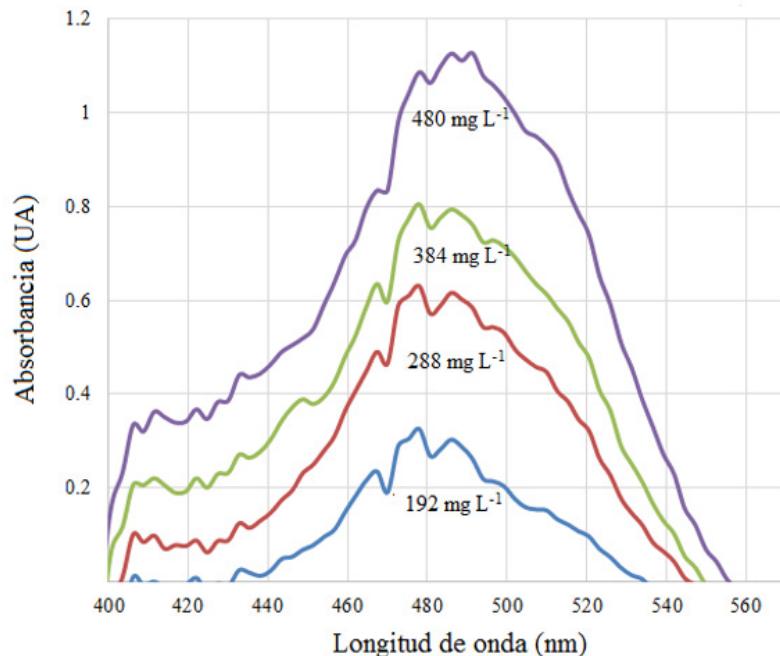


FIGURA 8. Relación entre la absorbancia, y la concentración de astaxantina obtenida con un CD-espectrofotómetro, y comparada con un espectrofotómetro comercial entre los 192 a 960 mg L^{-1} .

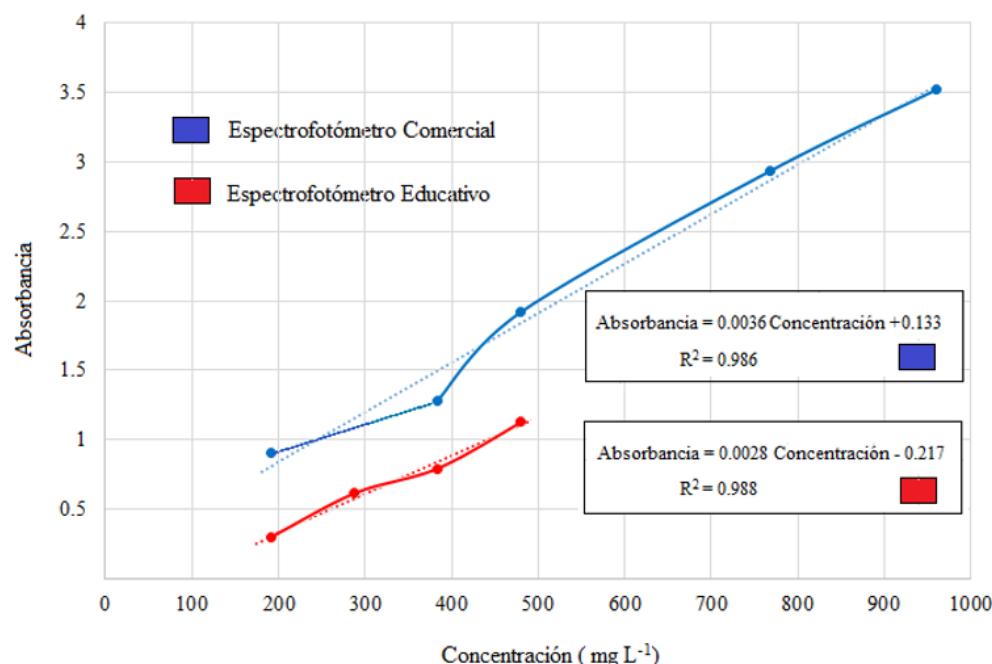


TABLA 1. Valores de absorbancia para la longitud de onda de 486 nm en distintas concentraciones de astaxantina.

Astaxantina (mg L ⁻¹).	Absorbancia con el espectrofotómetro comercial.	Absorbancia con el CD-espectrofotómetro.
192	0.909	0.303
288	-	0.615
384	1.285	0.793
480	1.919	1.126
768	2.935	-
960	3.520	-

Los espectrofotómetros diseñados para la educación presentan limitaciones debido a los materiales en su construcción, y su diseño sencillo, que no consideran el límite de detección, el rango dinámico, fondo, ruido, y parámetros que pueden afectar las mediciones (Scheeline, 2010). Debido a estas limitaciones, en el CD-espectrofotómetro solo permitió evaluar cuatro diluciones de astaxantina (192, 288, 384, 480 mg L⁻¹) con un R² de 0.988 en comparación con las cinco diluciones (192, 384, 480, 768, 960 mg L⁻¹) obtenidas con el espectrofotómetro comercial con un R² de 0.986. La Figura 8 permitió profundizar en la ley de Beer-Lambert, y explicar a los estudiantes las limitaciones del espectrofotómetro educativo.

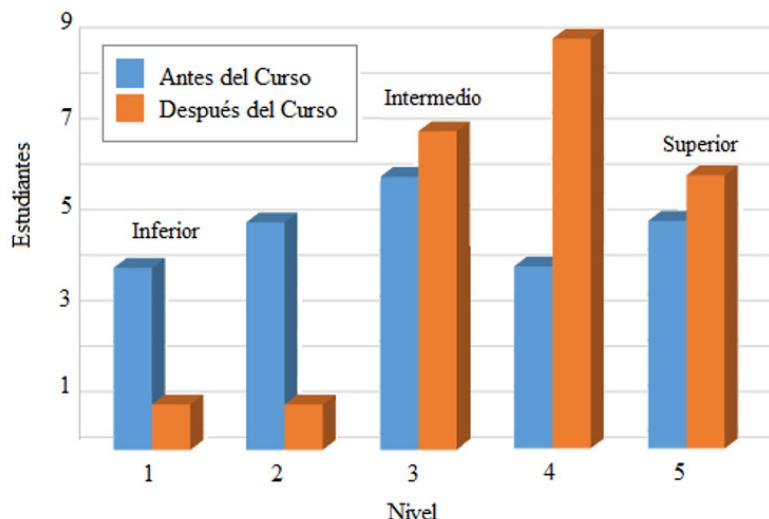


FIGURA 9. Nivel de conocimiento percibido por los estudiantes sobre la ley de Beer-Lambert antes, y después del curso.

Evaluación (Semana 15)

Después de realizar la prueba para medir el nivel de satisfacción a la metodología ABP con la escala de Likert de 5 puntos (Ver Figura 3). El 95.8% de los 24 estudiantes que evaluaron la propuesta de proyecto se mostraron entre satisfechos, y muy satisfechos. El 100 % sintió mayor integración, compromiso, y participación en la asignatura con este tipo de proyecto. El 75 % pudo distinguir entre la clorofila-a, y la clorofila-b en una imagen editada de la Figura 5. Así mismo, los estudiantes percibieron un mayor entendimiento sobre la ley de Beer-Lambert después de desarrollar el curso, esto es mostrado en la Figura 9. Finalmente, al

ordenar la información recopilada en la matriz de feedback. Se obtuvo que a los estudiantes les GUSTO lo innovador, novedoso, e interesante del proyecto, lo económico, accesible de los materiales, y también el diseño simple del espectrofotómetro. Respecto a las MEJORAS, solicitaron reforzar conceptos previos de espectrometría, aumentar la retroalimentación, y elaborar un espectrofotómetro de mayor tamaño con mejoras tecnológicas. Las INTERROGANTES que tenían estaban relacionadas con el costo de los espectrofotómetros comerciales, otros usos de los espectrofotómetros, y sobre las aplicaciones de la ley de Beer-Lamber. Finalmente propusieron NUEVAS IDEAS relacionadas con evaluar otros tipos de alimentos, y realizar mejoras tecnológicas al CD-espectrofotómetro con el uso de teclados, placas de desarrollo Arduino, pantallas, etc.

Conclusiones

El seguimiento continuo es importante durante el desarrollo del ABP por tal motivo las tres actividades propuestas para un proyecto interdisciplinario en las semanas 4, 8, y 12 permiten reforzar los conceptos básicos de la espectrofotometría, además el uso de materiales del hogar para elaborar un espectrofotómetro resuelve el problema de la accesibilidad a estos instrumentos de laboratorio que tienen un alto costo. El CD-espectrofotómetro con sus limitaciones permite a los estudiantes identificar los espectros de luz de los pigmentos (carotenos, clorofilas, y derivados) presentes en los aceites. Finalmente, este estudio al emplear la ley de Beer-Lambert para evaluar distintas diluciones de astaxantina en aceite de sacha inchi permitió introducir a los estudiantes en la espectrofotometría, y demostró tener una buena aceptación entre los estudiantes. Por esta razón, la propuesta de proyecto presentada en este estudio contribuye con la formación educativa universitaria.

Referencias

Amaya, Á. A., Carvajal, A. C., Gómez, R. A., y Mendoza, Y. R. (2023). Demostración práctica de la importancia de la longitud de onda en la espectroscopia ultravioleta visible. *Educación Química*, 34(2), 40-49. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2023.2.83275>

Borello, E., y Domenici, V. (2019). Determination of pigments in virgin and extra virgin olive oils: A comparison between two near UV-Vis spectroscopic techniques. *Foods*, 8(1), 3-10. <https://doi.org/10.3390/foods8010018>

Braniša, J., Jenisová, Z., y Jomová, K. (2014). Pigment profile of olive oils determined by school measurement system labquest and spectrometer. *Journal of Technology and Information Education*, 6(2), 48-57. <https://doi.org/10.5507/jtie.2014.017>

Carrasquero-Durán, A., Regalado, E., Guzmán, M., y Navas, P. B. (2004). Determinación de vitamina E en aceites. Una experiencia didáctica en química analítica instrumental. *Educación Química*, 15(4e), 343-348. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2004.4e.66153>

Cerda, B., y Manidurai, P. (2019). Características ópticas y eléctricas de celdas solares sensibilizadas por colorantes naturales de espinaca, maqui, zanahoria y zapallo. *La Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, S8(2), 33-37. <https://www.rlmm.org/ojs/index.php/rlmm/issue/view/31/s8>

Cid, R., y González-Fernández, D. (2020). Una aproximación a la espectrometría en educación secundaria. *Anales de la Química*, 116(1), 25-29. <https://analesdequimica.es/index.php/AnalesQuimica/article/view/1309>

Corbacho, A. M. (2018). El aprendizaje interdisciplinario, intensivo e integrado como herramienta para el desarrollo de conocimientos, habilidades y aptitudes en estudiantes de grado. *INTER DISCIPLINA*, 5(13), 63-85. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2017.13.62384>

Córdoba-Castro, N. M., Acero-Reyes, N. L., Duque-Buitrago, L. F., Jiménez-Aguilar, L. J., y Serna-Jiménez, J. A. (2015). Obtención y caracterización de Astaxantina de la microalga *Haematococcus Pluvialis*. *UGCiencia*, 21, 73-82. <https://doi.org/10.18634/ugcj.21v.1i.426>

DiodeGoneWild. (2022). Building a DIY spectrometer. [Archivo de vídeo]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=p3MzQ1OF3lk>

Electrical Projects [CreativeLab]. (2018). How to Make DIY Spectrometer/ Optical spectrum analyzer/ Light analysis. [Archivo de vídeo]. Youtube. <https://youtu.be/MgogwcXUloc?si=o80odizyD9I9E5NI>

Escobedo, R., y Cordero, T. (2023). Propuesta de proyecto transversal e interdisciplinario para educación media superior: "El calentamiento global". *Educación Química*, 34(2), 139-150. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2023.2.83845>

Gandul-Rojas, B., Gallardo-Guerrero, L., Roca, M., y Aparicio-Ruiz, R. (2013). Chromatographic methodologies: Compounds for olive oil color issues. In R. Aparicio y J. Harwood (Eds.), *Handbook of Olive Oil. Analysis and Properties* (pp. 219-260). Springer.

González, M. A., García, L., García, J. E., Travieso, Y., y Puldón, G. (2015). Propuesta de actividades con un enfoque interdisciplinario que favorezca la integración de las disciplinas de ciencias básicas. *Educación Médica Superior*, 29(3). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-21412015000300017

Grasse, E. K., Torcasio, M. H., y Smith, A. W. (2015). Teaching UV-Vis spectroscopy with a 3D-printable smartphone spectrophotometer. *Journal of Chemical Education*, 93(1), 146-151. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00654>

Ibañez-Alvarado, C., Rollo-Castro, A., Romero-Vega, B., Franco-Acevedo, J., Pardo-Mesa, J., y Cómbita-Niño, J. P. (2022). Diseño de prototipo de gancho portátil para baño público. *El Boletín de Innovación, Logística y Operaciones*, 4(1). <https://doi.org/10.17981/bilo.4.1.2022.17>

Lazzerini, C., Cifelli, M., y Domenici, V. (2016). Pigmentos en aceite de oliva virgen extra: Autenticidad y calidad. In D. Boskou y M. L. Clodoveo (Eds.), *Productos del árbol de olivo*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/64736>

Martínez-Sanz, J. M., Mata, F., Sala, M., Puya, J. M., Martínez, A., Sánchez, A. J., y Cortell, J. M. (2021). Fraude en suplementos nutricionales para deportistas: revisión narrativa. *Nutrición Hospitalaria*, 38(4), 839-847. <https://doi.org/10.20960/nh.03413>

Montoya, E., Baltuano, Ó., y López, A. A. (2013). Espectrómetro para radiación visible hecho en casa, de bajo costo y altas prestaciones. *Revista de la sociedad química del Perú*, 79(1), 80-91. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2013000100011

Physicsopenlab.(2015). Webcamdiffractiongratingspectrometer.<https://physicsopenlab.org/2015/11/26/webcam-diffraction-grating-spectrometer>

Ramírez, T., Plaza-Pedroche, R., y Rodríguez-López, J. (2023). Evaluación de la carga bacteriana del aire en centros educativos como proyecto didáctico. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 20(2), 220300-220314. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2023.v20.i2.2203

Ramos, L., Charca, J. R., y Veleto, M. I. (2023). Prototipo de un espectrofotómetro modular para la enseñanza de la química. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 20(2), 240200-240208. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2023.v20.i2.2402

Scheeline, A. (2010). Enseñanza, aprendizaje y uso de la espectroscopia con tecnología comercial lista para usar. *Espectroscopia aplicada*, 64(9), 256A-268A. <https://doi.org/10.1366/000370210792434378>

Swinehart, D. F. (1962). The Beer-Lambert Law. *Journal of Chemical Education*, 39(7), 333. <https://doi.org/10.1021/ed039p333>

Toledo, P., y Sánchez, J. M. (2018). Aprendizaje basado en proyectos: Una experiencia universitaria. *Profesorado, Revista de currículum y formación del profesorado*, 22(2), 472-491. <https://doi.org/10.30827/profesorado.v22i2.7733>

Wakabayashi, F., y Hamada, K. (2006). A DVD spectroscope: A simple, high-resolution classroom spectroscope. *Journal of Chemical Education*, 83(8), 1186–1187. <https://doi.org/10.1021/ed083p1186>