

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**

“CINÉTICA DE EXTRACCIÓN ASISTIDA POR
ULTRASONIDO Y CONVENCIONAL DE
COMPUESTOS BIOACTIVOS OBTENIDOS DE
RESIDUOS DE CORONTA DE MAÍZ MORADO”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero Agroindustrial

Autor:

Juan Christian Tambra Hernandez

Asesor:

Dra. Meliza Lindsay Rojas Silva

<https://orcid.org/0000-0001-5750-8399>

Trujillo - Perú

2023

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	Cesia Elizabeth Boñón Silva	40222757
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 2	José Manuel Cedano Romero	45070233
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 3	Jackeline Marilyn León Vargas	18216170
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

INFORME DE SIMILITUD

Tesis

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%	9%	5%	1%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	exportcvuy.anii.org.uy Fuente de Internet	4%
2	www.tandfonline.com Fuente de Internet	2%
3	es.scribd.com Fuente de Internet	2%
4	docplayer.es Fuente de Internet	1%
5	repositorio.unf.edu.pe Fuente de Internet	1%

Excluir citas Activo
Excluir bibliografía Activo

Excluir coincidencias < 1%

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi familia, que siempre ha estado en todos los momentos para apoyarme.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres y hermano por siempre brindarme todo el apoyo necesario en la etapa de aprendizaje.

Así mismo, a mis profesores y compañeros, por aportar en las enseñanzas y vivencias dentro de la vida universitaria.

Tabla de contenido

Jurado Evaluador	2
Informe de Similitud	3
Dedicatoria	4
Agradecimiento	5
Tabla de contenido	6
Índice de tablas	7
Índice de figuras	8
Resumen	9
Capítulo I: Introducción	10
Capítulo II: Metodología	13
Capítulo III: Resultados	20
Capítulo IV: Discusión y Conclusiones	25
Referencias	30
Anexos	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de elementos usados para extracción de capacidad antioxidante.	16
Tabla 2. Valores de elementos usados para extracción de compuestos fenólicos totales.	17
Tabla 3. Parámetros obtenidos del ajuste del modelo de peleg a los datos experimentales de CA	22
Tabla 4. Parámetros obtenidos del ajuste del modelo de peleg a los datos experimentales de CFT	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva de calibración para capacidad antioxidante.	17
Figura 2. Curva de calibración para fenoles totales.	18
Figura 3. Cinética de extracción convencional de ca empleando diferentes concentraciones de etanol.	21
Figura 4. Cinética de extracción asistida con ultrasonido (EAU) de ca empleando diferentes concentraciones de etanol.	22
Figura 5. Cinética de extracción convencional de CFT empleando diferentes concentraciones de etanol.	23
Figura 6. Cinética de extracción asistida con ultrasonido (EAU) de CFT empleando diferentes concentraciones de etanol.	24
Figura 7. Comparación de cinéticas de extracción convencional (control) y EAU empleando etanol al 70%	24

RESUMEN

Con el aumento de enfermedades relacionadas al estrés oxidativo, la importancia de productos fuente de antioxidantes aumentó, siendo el maíz morado uno de estos productos. El objetivo de la investigación fue describir la cinética de extracción de compuestos fenólicos totales (CFT) y capacidad antioxidante (CA) a partir de residuos de coronta de maíz morado aplicando diferentes concentraciones de solvente (30%, 50% y 70%) durante la extracción asistida por ultrasonido (EAU) (40kHz, 32 ± 2 W/L, 22 ± 2 °C) y convencional (C) (100 rpm y T_{ambiente}). Las extracciones se realizaron utilizando 0.015 g de muestra/mL de solvente, se tomaron datos de CA (por método ABTS^{•+}) y CFT (por método de Folin-Ciocalteu) hasta los 60 min de proceso, posteriormente se ajustó el modelo de Peleg a las cinéticas. Los resultados indicaron que, para obtener mayores niveles de CA es preferible el uso de solvente al 50%. Para los CFT, el método EAU después de 1 min de proceso incrementó el contenido de CFT en un 12% y 58% comparado a la extracción convencional utilizando solventes con 30% y 70%, respectivamente. En conclusión, el método de EAU es más efectivo que el convencional, especialmente en aquellas concentraciones con las que el último presentó limitaciones.

PALABRAS CLAVES: Maíz morado, Sub-productos, Antioxidantes, Ultrasonido, Compuestos fenólicos.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

Con el aumento de las enfermedades relacionadas con el estrés oxidativo, también incrementó la demanda de alimentos que contengan antioxidantes entre sus propiedades, ya que estas moléculas secuestran especies reactivas de oxígeno e inhibe enzimas que producen los radicales libres, esto disminuye el riesgo de generar el estrés oxidativo y evita el daño celular que desencadenaría en el desarrollo de diferentes enfermedades (Guillén-Sánchez et al., 2014).

Una fuente de antioxidantes es el maíz morado (*Zea mays L.*) debido a su alto contenido de flavonoides como las antocianinas, las cuales poseen actividad antioxidante. De hecho, se han realizado diferentes estudios para determinar y cuantificar los compuestos bioactivos presentes en el maíz morado, así como su aplicación en el control de enfermedades degenerativas. Por ejemplo, la inhibición de la diabetes, tal cual lo informa Kang et al. (2013) y prevención de cancer de prostata, como lo menciona Long et al. (2012)

Sin embargo, el contenido de antocianinas no es uniforme en todas las partes de la mazorca del maíz, sino que es mayor en la coronta, en la cual podemos encontrar concentraciones de antocianina que rondan los 10.86 mg - 1516 mg por cada 100 g (Vásquez Arce et al., 2020). Así mismo, Aguilar-Hernández, et al.(2019) nos da a conocer que los granos de maiz morado se llega a obtener entre 201.3 a 496.3 mg por cada 100g.

Para la extracción de compuestos bioactivos y antocianinas del maíz morado se han venido utilizando diferentes tecnologías convencionales y emergentes tal como extracción por ultrasonido (Muangrat et al., 2017), extracción por microondas, tal como lo usa Yang & Zhai (2010); altas presiones (Monroy et al., 2020), por infrarrojo (Barba et al.,2022). Donde, entre los principales resultados se obtuvo que la aplicación de tecnologías emergentes da

mayores beneficios, tal como extracción por ultrasonido, debido a que se extraen antocianinas de alta calidad, además, debido al corto tiempo de extracción requerido como también un mayor rendimiento.

Es importante mencionar que el cultivo del maíz morado es habitual en diferentes regiones geográficas que incluyen principalmente a países como Perú y Bolivia. En Perú, durante la campaña agrícola agosto 2018 – julio 2019 sembró 4523 hectáreas de maíz morado a nivel nacional, produciendo en el 2019 la cantidad de 23164 toneladas en 11 departamentos, consiguiendo en los departamentos de Lima, Ayacucho Ancash, Arequipa y Cajamarca la mayor cantidad de maíz, con una concentración de 81% (*BOLETÍN MAÍZ MORADO.pdf*, s. f.). Ya para el año 2020, se logró producir 35083 toneladas y para el 2021, 38348 toneladas (MIDAGRI, 2021). Con el progresivo avance de los sembríos de maíz morado en territorio nacional, para el 2022 se logró exportar 21.5 toneladas de extracto del mismo (Chávez, 2023).

Considerando la cantidad de maíz producido en el país y sus diferentes usos, tradicionalmente en la elaboración de mazamorra morada y chicha morada como productos primarios (Bonilla et al., 2015)(Guillén-Sánchez et al., 2014). Tras la elaboración de estos productos se genera una gran cantidad de residuo (granos y coronta como subproductos) el cual es prácticamente el 100% de la materia prima ya que lo que se aprovecha es solo el extracto acuoso obtenido por cocción de la mazorca de maíz morado. Los residuos generados son la coronta y los granos, los cuales se suelen utilizar para alimentación de aves, tal como lo describe Luo et al. (2022). Mientras que también se usa para alimentar ganado vacuno y carprino, debido a que aporta beneficios a su carne, según lo reportado por Prommacharta et al. (2021) y Tian et al. (2021)

Sin embargo, los subproductos de maíz morado, principalmente la coronta, aún pueden ser utilizados para recuperar compuestos de interés para la industria. Hasta donde se conoce, a la fecha no se han realizado investigaciones sobre la recuperación de compuestos bioactivos a partir de los subproductos de maíz morado utilizando tecnologías emergentes.

En este contexto, el objetivo de la presente investigación es evaluar el comportamiento de las cinéticas de extracción de compuestos bioactivos (compuestos fenólicos y capacidad antioxidante) aplicando diferentes concentraciones de solvente y la tecnología emergente de ultrasonido de alta potencia, comparando con la extracción convencional.

1.2. Formulación del problema

¿Cómo es la cinética de extracción de compuestos bioactivos recuperados de residuos de coronta de maíz morado aplicando diferentes concentraciones de solvente durante la extracción asistida por ultrasonido y convencional?

1.3. Objetivos

General

- Evaluar el comportamiento de las cinéticas de extracción de compuestos bioactivos (compuestos fenólicos y capacidad antioxidante) aplicando diferentes concentraciones de solvente y la tecnología emergente de ultrasonido de alta potencia, comparando con la extracción convencional.

Específicos

- Describir el comportamiento de la cinética de extracción de capacidad antioxidante en los residuos de la coronta de maíz morado aplicando diferentes concentraciones de solvente durante la extracción asistida por ultrasonido y convencional.

- Describir el comportamiento de la cinética de extracción de compuestos fenólicos en los residuos de la coronta de maíz morado aplicando diferentes concentraciones de solvente durante la extracción asistida por ultrasonido y convencional.
- Evaluar la aplicación del modelo de Peleg y determinar los parámetros cinéticos de extracción de compuestos bioactivos en las diferentes condiciones de extracción estudiadas.

1.4. Hipótesis

El uso de la tecnología de ultrasonido acelerará la extracción de compuestos bioactivos, siendo favorecido por concentraciones intermedias de solvente.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1 Descripción de obtención de harina de coronta de maíz morado residual

Una muestra de 8 kg de maíz morado (*Zea Mays L*, kculli; (Diaz-Garcia et al. 2021)), en mazorca que fue adquirida en un mercado local de la ciudad de Trujillo, Perú, siendo oriunda de la sierra liberteña. La muestra utilizada para los ensayos experimentales fue seleccionada considerando una coloración homogénea, libre de hongos e insectos. El maíz morado fue inicialmente lavado con agua potable eliminando así impurezas. Posteriormente, se simuló el proceso tradicional de obtención de chicha morada, para esto, el maíz morado íntegro (coronta y grano) fue sumergido en agua y hervido por 90 minutos, empleando una relación de 2 kg de maíz por 4 litros de agua. Una vez finalizado el proceso, se filtró la bebida, separando así los residuos de maíz morado. A continuación, se separaron los granos de la coronta y se secó a una temperatura de 40 °C por 72 hrs. Finalmente la coronta fue molida y tamizada empleando un tamiz N° 200 con luz de malla de 75 µm, utilizándose para los experimentos la fracción de retenidos, es decir el tamaño de las partículas del polvo de coronta empleado fue < 75 µm. La humedad de la muestra fue de 9.41%, la cual se determinó utilizando un determinador de humedad (MB45, Ohaus, Suiza).

2.2 Descripción del proceso de extracción

2.2.1 Preparación de solvente

El solvente utilizado para realizar la extracción fue una solución acidificada de etanol en agua, a diferentes concentraciones. Diferentes autores como Jim (2007) y Yang et al, (2009) utilizaron soluciones de etanol acidificado a diferentes concentraciones para obtener extractos a partir de maíz morado. Basado en esto, las concentraciones de etanol utilizadas fueron de 30%, 50% y 70%, para su preparación se diluyó etanol absoluto al 99.5% (J. T. Baker, México) en agua destilada. Para acidificar las soluciones de etanol, se añadió ácido cítrico (Suman, Perú) hasta alcanzar un pH de 3.0 ± 0.1 en todas las soluciones. Para alcanzar este nivel de pH, la cantidad requerida de ácido cítrico varió dependiendo de la concentración de etanol, siendo necesario 0.1%, 0.2% y 0.4% (m/v) de ácido cítrico para acidificar las soluciones de 30%, 50% y 70%, respectivamente.

Una vez listas las soluciones se pasó a trabajar con los dos métodos de extracción.

2.2.2 Extracción convencional

En un matraz se colocó 20 mL de solvente acidificado en su respectiva concentración de etanol (al 30%, 50% y 70%) y 0.3 g de muestra, donde se introdujo una pastilla magnética y se cubrió con papel aluminio. El proceso de extracción se realizó a temperatura de ambiente en agitación constante a 100 rpm, empleando un agitador magnético (613-02-001, Isolab, Alemania). La muestra en cada matraz fue extraída individualmente, de acuerdo con los tiempos establecidos de extracción, los cuales fueron 1, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 y 60 min. En cada tiempo, el contenido total del matraz fue filtrado empleando papel filtro, el extracto filtrado fue colocado en tubos falcon debidamente codificados y forrados para protegerlos de la luz, para luego ser refrigerados a 1°C hasta su análisis. Cabe mencionar que este proceso se realizó en tres repeticiones para cada uno de los tiempos de extracción, siendo un total de 30 tratamientos realizados.

2.2.3 Extracción asistida por ultrasonido (EAU)

En la extracción asistida por ultrasonido (EAU) se emplearon las mismas condiciones de ratio de sólido-solvente y tiempos de extracción utilizados en la extracción convencional. Para el proceso, se empleó un baño de ultrasonido (ACP-120H, MRC, Israel) con frecuencia

de 40 kHz y potencia de 32 ± 2 W/L conteniendo 1.5 L de agua como medio de transmisión de la energía acústica. En el interior del baño de ultrasonido se colocaron los matraces (conteniendo la muestra y solvente) dispuestos de manera que se aprovechen mejor los puntos de emisión de energía ultrasónica, lo cual fue mapeado previamente empleando papel aluminio en la base del equipo, donde los puntos de mayor energía son los puntos de mayor erosión en el papel aluminio (Rojas & Miano 2021). Es importante mencionar que la temperatura de proceso de EAU fue controlada para ser mantenida en 22 ± 2 °C, empleando agua con hielo para reemplazar cada cierto tiempo una determinada cantidad del agua utilizada como medio de transmisión acústica. Una vez cumplidos los tiempos de extracción, los matraces fueron retirados del equipo de ultrasonido e inmediatamente la mezcla fue filtrada en papel filtro, el extracto obtenido fue puesto en tubos falcon debidamente codificados y forrados con papel aluminio para su posterior refrigeración a 1 °C hasta su análisis. El proceso se realizó en tres repeticiones para cada uno de los tiempos de extracción establecidos, siendo un total de 30 tratamientos realizados.

2.3 Determinación de capacidad antioxidante (CA)

El proceso se inició preparando el radical ABTS^{•+}. Para esto, se preparó una solución de ABTS (2,2'-azinobis [3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfónico]-sal de diamonio) 7 mM en agua destilada, para oxidar la solución preparada de ABTS se mezcló con una solución de persulfato de potasio considerando que este se encuentre en una concentración final (en el total de mezcla) de 2.45 mM. La mezcla fue dejada en reposo por mínimo 16 h en la oscuridad, para así garantizar la formación del radical ABTS^{•+} (Rojas et al. 2020). Una vez finalizado el tiempo, el radical fue fraccionado y almacenado en congelación para su posterior uso.

Antes de iniciar las reacciones, se diluyó aproximadamente 1.6 mL de radical ABTS con 140 mL de etanol al 96% hasta alcanzar una absorbancia de 0.700 ± 0.03 a una longitud de onda de 734 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Vis (UV1900, Shimadzu, Japón). La solución preparada de radical ABTS con la absorbancia ajustada, fue la solución de trabajo utilizada para realizar las reacciones.

Debido a que los extractos obtenidos con proceso convencional y con EAU eran muy concentrados, se procedió a realizar diluciones para todos los tratamientos en una ratio de 1:5; es decir, 1 mL de extracto fue diluido en 4 mL de su respectivo solvente

(correspondiente a cada extracto). Una vez preparadas las diluciones, las reacciones se llevaron a cabo de acuerdo con lo mostrado en la Tabla 1.

Tabla 1.

Valores de elementos usados para extracción de capacidad antioxidante

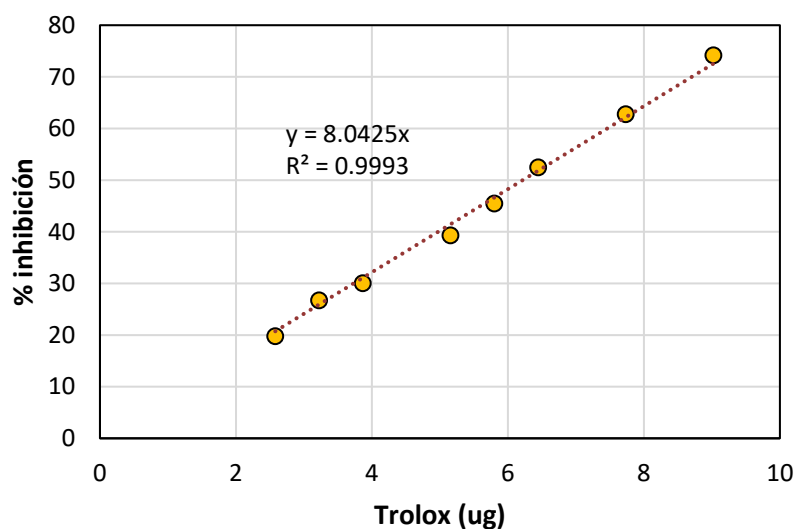
Código	ABTS (μL)	Etanol (μL)	Extracto diluido (μL)
Blancos	2000	200	0
Tratamientos	2000	150	50

Las reacciones fueron llevadas a cabo con la menor exposición posible a la luz, el volumen total de reacción trabajado fue de 2200 μL. El procedimiento inició vertiendo la solución de ABTS en tubos de ensayo, seguido del etanol y finalmente se añadió el extracto. La mezcla fue rápidamente agitada empleando un Vortex (V 3 S000, IKA, China). A continuación, se dejó reposar por 20 minutos en la oscuridad, para esto, los tubos con la muestra fueron colocados en una gradilla cubierta totalmente con papel aluminio. Culminado el tiempo de reacción, el contenido de cada tubo fue dispuesto en cubetas registrando la absorbancia a 734 nm en el espectrofotómetro.

Para cuantificar la capacidad antioxidante, se elaboró una curva de calibración con diferentes concentraciones de Trolox (0.5mM). Para las reacciones se empleó 2000 μL de solución ABTS y diferentes volúmenes de solución de Trolox (20, 25, 30, 40, 45, 50, 60, 70 μL) adicionado etanol hasta llegar a 200 μL, seguido del mismo procedimiento establecido anteriormente. Luego de registrar las lecturas de absorbancia para los blancos y para las diferentes cantidades de Trolox, se construyó la curva de calibración mostrada en la Figura 1. Los resultados se expresaron en μg de Trolox/g de materia seca (m.s.).

Figura 1.

Curva de calibración para capacidad antioxidante



Nota: La pendiente de la curva de calibración se empleó para realizar los cálculos y reportar la capacidad antioxidante de los extractos expresada en μg de Trolox/ g de materia seca.

2.4 Determinación de compuestos fenólicos totales (CFT)

Debido a que los extractos obtenidos con proceso convencional y con EAU eran muy concentrados, se procedió a realizar diluciones para todos los tratamientos en una ratio de 1:5; es decir, 1 mL de extracto fue diluido en 4 mL de su respectivo solvente (correspondiente a cada extracto). Una vez preparadas las diluciones, las reacciones se llevaron a cabo de acuerdo con lo mostrado en la Tabla 2.

Tabla 2.

Valores de elementos usados para extracción de compuestos fenólicos totales

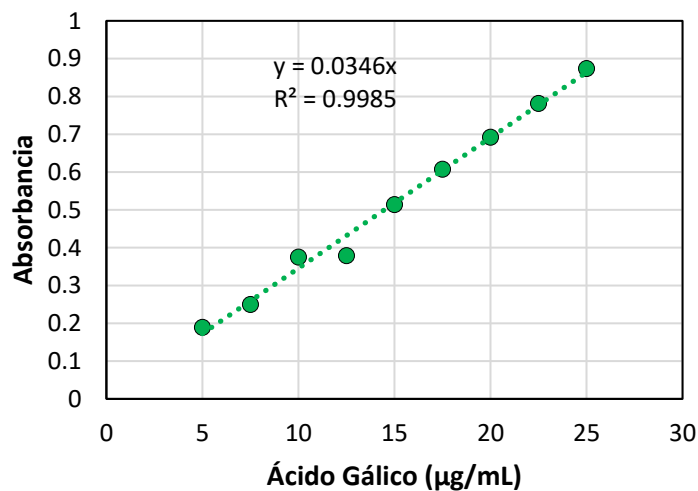
Código	Agua destilada (μL)	Extracto diluido (μL)	Folin-Ciocalteu (μL)	Na_2CO_3 (μL)
Blancos	2200	0	100	200
Tratamientos	2000	200	100	200

Las reacciones fueron llevadas a cabo con la menor exposición posible a la luz, el volumen total de reacción trabajado fue de 2500 μL . El procedimiento se realizó utilizando las cantidades mostradas en la tabla 2, se inició vertiendo agua destilada en tubos de ensayo, seguido del extracto y el Folin-Ciocalteu; luego la mezcla fue agitada en Vortex, se dejó reposar por 5 minutos y finalmente, se agregó el carbonato de sodio al 20%. Finalmente, la mezcla fue rápidamente agitada empleando un Vortex y se dejó reposar por 60 minutos en la oscuridad, para esto, los tubos con la muestra fueron colocados en una gradilla cubierta totalmente con papel aluminio. Culminado el tiempo de reacción, el contenido de cada tubo fue dispuesto en cubetas registrando la absorbancia a 765 nm en el espectrofotómetro

Para cuantificar el contenido fenólico total, se elaboró una curva de calibración con diferentes concentraciones de ácido gálico (250 $\mu\text{g}/\text{mL}$). Para las reacciones se empleó 2000 μL de agua destilada y diferentes volúmenes de solución de ácido gálico (20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 μL), las cuales reemplazaron al extracto en la reacción, adicionado agua destilada hasta llegar a 200 μL , seguido del mismo procedimiento establecido anteriormente. Luego de registrar las lecturas de absorbancia para los blancos y para las diferentes cantidades de ácido gálico, se construyó la curva de calibración mostrada en la Figura 2. Los resultados fueron expresados en μg de ácido gálico (GA)/ g de materia seca (m.s.)

Figura 2.

Curva de calibración para compuestos fenólicos totales (CFT)



Nota: La pendiente de la curva de calibración se empleó para realizar los cálculos y reportar el contenido de compuestos fenólicos totales de los extractos expresado en μg de GA/ g de materia seca.

2.5 Descripción de cinética de extracción

Con las lecturas obtenida de CA y CFT se construyeron cinéticas de extracción para el proceso convencional (control) y EAU, las cuales fueron descritas utilizando el modelo de Peleg (ecuación 1). Esta ecuación fue utilizada debido a su bondad de ajuste y posibilidad de interpretación de sus parámetros.

$$CA_t \text{ o } CFT_t = \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (1)$$

Donde, CA_t o CFT_t es la capacidad antioxidante o compuestos fenólicos totales en el tiempo t (min), k_1 es la constante de velocidad en $[\text{min} \cdot (\text{ug Trolox/g m.s})^{-1}]$ o $[\text{min} \cdot (\text{ug GA/g m.s})^{-1}]$ para la capacidad antioxidante o compuestos fenólicos totales respectivamente y k_2 es la constante del nivel asintótico en $(\text{ug Trolox/g m.s})^{-1}$ o $(\text{ug GA/g m.s})^{-1}$ para la capacidad antioxidante o compuestos fenólicos totales respectivamente. El recíproco de k_1 representa la tasa inicial de extracción de los compuestos bioactivos y el recíproco de k_2 representa la cantidad de compuestos bioactivos extraídos en el equilibrio, es decir cuando $t \rightarrow \infty$.

La ecuación 1 se ajustó a los datos experimentales identificando los valores de sus parámetros que minimizan la suma de los errores cuadráticos (SSE, (ecuación 2)) entre los valores experimentales y predichos. Para ello se utilizó el método de Gradiente Reducido Generalizado no lineal, implementado en la herramienta ‘Solver’ del software Excel 2016 (Microsoft, USA).

$$\text{SSE} = \sum_{i=1}^n ((\text{modelados}) - (\text{experimentales}))^2 \quad (2)$$

Para reportar los criterios de ajuste del los modelos se considerará el coeficiente de determinación (R^2).

2.6 Consideraciones éticas

En la presente investigación se salvaguarda en todo momento la propiedad intelectual de los autores respecto a conocimientos, citándolos y referenciándolos apropiadamente. Por

otro lado, cabe mencionar que no hubo participación de personas y animales como sujetos de estudio no aplicando por lo tanto las consideraciones éticas relacionadas a este aspecto.

2.7 Análisis estadístico

Se utilizó un diseño completamente al azar (DCA), todos los procesos y análisis se realizaron en triplicado. Se realizó el ANOVA de una vía con un nivel de significancia del 10%. Para determinar diferencias estadísticas entre medias de tratamientos se utilizó la prueba de Tukey. Los análisis estadísticos se determinaron utilizando el software IBM SPSS Statistics 23 (IBM SPSS, EE. UU.).

CAPÍTULO III: RESULTADOS

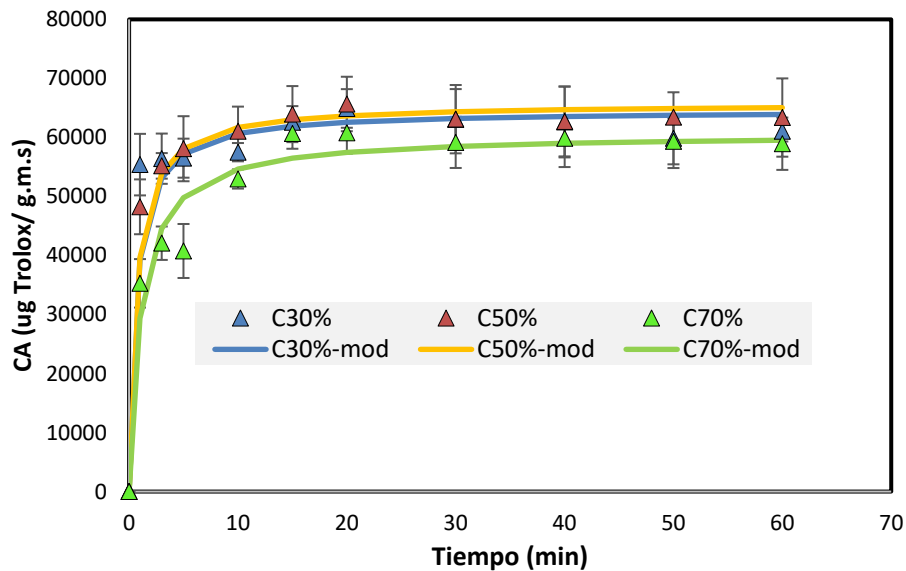
3.1. Cinética de capacidad antioxidante

La Figura 3 muestra la cinética de extracción convencional de CA empleando solvente con diferentes concentraciones de etanol. En la Figura 3 se observa que cuando se utilizó un solvente con 70% de etanol, se obtuvo menos capacidad antioxidante en todos los tiempos de extracción, a diferencia de la extracción con 50% y 30% de etanol. Mientras que, en estos últimos, se muestra una ligera diferencia en la que cuando se usa 50% de etanol, se obtiene mayor capacidad antioxidante.

En la Figura 4 se muestra la cinética de extracción asistida por ultrasonido de CA utilizando diferentes concentraciones de etanol. De manera similar a lo observado en la extracción convencional, durante la EAU se repite la tendencia que cuando se utilizó un solvente al 70% de etanol se obtuvo menos capacidad antioxidante en todos los tiempos de extracción comparado con las extracciones utilizando 50% y 30% de etanol, donde en estos dos últimos se observó un comportamiento cinético similar.

Figura 3.

Cinética de extracción convencional de CA empleando diferentes concentraciones de etanol.



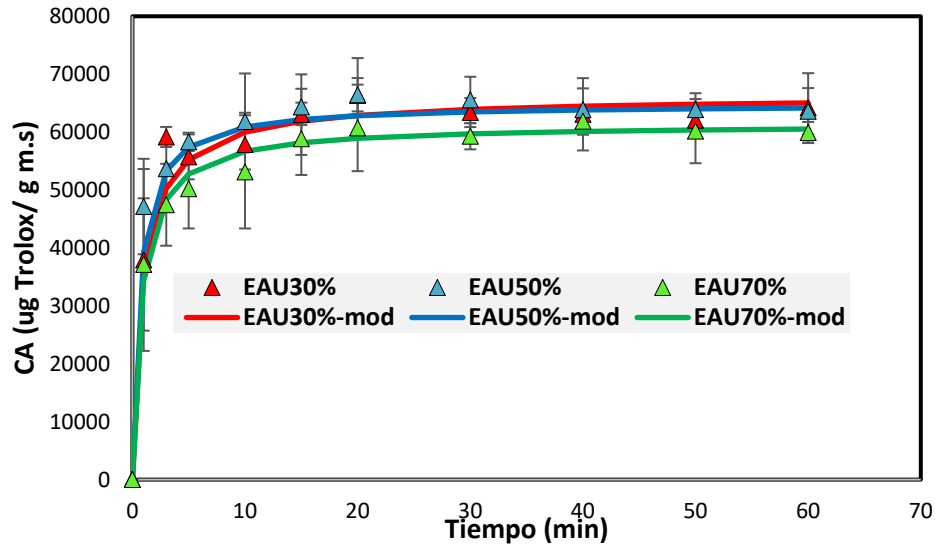
Nota: Los marcadores indican los datos experimentales, las curvas continuas indican los datos calculados (predichos) con el modelo de Peleg (ecuación 1), las barras verticales indican \pm desviación estándar.

Al observar las dos gráficas (Figura 3 y 4), se puede notar que, para ambos casos (con extracción convencional y con extracción asistida por ultrasonido), en los primeros 20 minutos extracción hay una diferencia notoria en la velocidad de extracción en función de la concentración de etanol, a partir de 20 min empieza un comportamiento casi constante de extracción para todos los casos hasta finalizar el proceso.

Estas diferencias en el comportamiento inicial y final de las cinéticas de extracción se pueden explicar según los valores obtenidos en los parámetros k_1 y k_2 del modelo de Peleg (ecuación 1) (Tabla 3), empleado para describir el comportamiento de las cinéticas de extracción.

Figura 4.

Cinética de extracción asistida con ultrasonido (EAU) de CA empleando diferentes concentraciones de etanol.



Nota: Los marcadores indican los datos experimentales, las curvas continuas indican los datos calculados (predichos) con el modelo de Peleg (ecuación 1), las barras verticales indican \pm desviación estándar.

Tabla 3.

Parámetros obtenidos del ajuste del modelo de Peleg (ecuación 1) a los datos experimentales de CA.

Tratamiento	Parámetros		
	k_1 ($\times 10^{-5}$)	k_2 ($\times 10^{-5}$)	R^2
C30%	1.000 \pm 0.000 a	1.549 \pm 0.041 a	\geq 0.850
C50%	1.000 \pm 0.000 a	1.525 \pm 0.097 a	\geq 0.948
C70%	1.787 \pm 0.436 a	1.655 \pm 0.109 a	\geq 0.941
EUA30%	1.523 \pm 1.296 a	1.516 \pm 0.109 a	\geq 0.911
EUA50%	1.000 \pm 0.000 a	1.545 \pm 0.078 a	\geq 0.915
EUA70%	1.362 \pm 0.626 a	1.631 \pm 0.055 a	\geq 0.884

Nota: Diferentes letras minúsculas significan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre los promedios de los tratamientos para cada uno de los parámetros k_1 y k_2 .

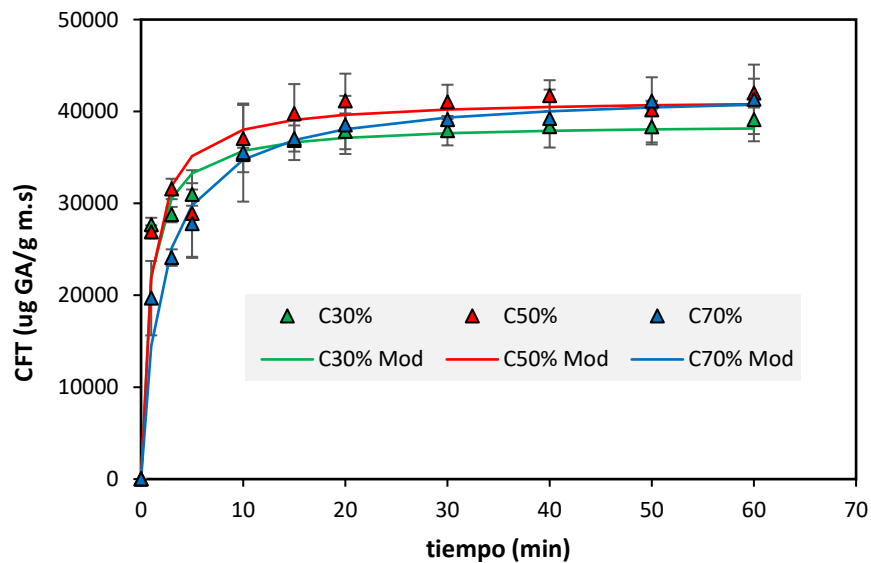
3.2. Cinética de extracción de compuestos fenólicos totales (CFT)

En la Figura 5 se muestran los resultados de la cinética de extracción de CFT utilizando la extracción convencional y diferentes concentraciones de etanol como solvente. En la Figura 5 se observa que en los primeros 15 min al usarse el solvente con 70% de etanol

se obtuvo una menor cantidad de fenoles; sin embargo, este comportamiento cambia desde los 15 min en adelante, donde al utilizar el solvente con 30% de etanol, este disminuye la cantidad de fenoles extraídos comparado con el solvente al 70%. A lo largo de todo el proceso, la cantidad de CFT, cuando se utilizó el solvente con 50% de etanol, se mantuvo por encima de los demás tratamientos.

Figura 5.

Cinética de extracción convencional de CFT empleando diferentes concentraciones de etanol.



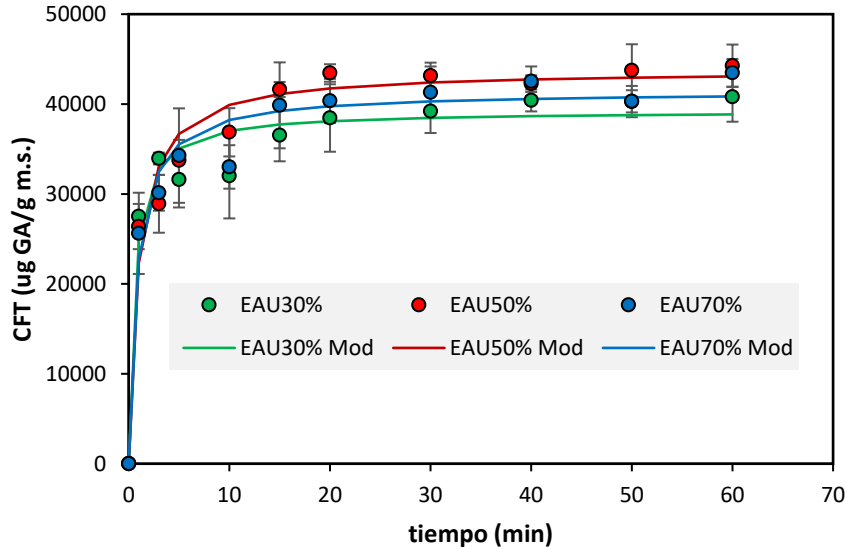
Nota: Los marcadores indican los datos experimentales, las curvas continuas indican los datos calculados (predichos) con el modelo de Peleg (ecuación 1), las barras verticales indican \pm desviación estándar.

En la Figura 6, a diferencia de la gráfica anterior, no se observa que en los primeros minutos el tratamiento con 70% de etanol haya sido con el que menor CFT se obtuvo. A partir de 5 min se mantiene que el solvente con 30% de etanol mostró una cantidad menor de fenoles hasta finalizar el proceso, por otra parte, predominó que con el solvente de 50% de etanol se obtuvo una mayor cantidad de CFT extraídos.

En la Figura 7 se muestra la comparativa de los dos métodos de extracción, usando el solvente con 70% de etanol, observándose como resultado que la extracción por EAU es más efectiva, incrementando la velocidad de extracción de CFT en los tiempos iniciales del proceso.

Figura 6.

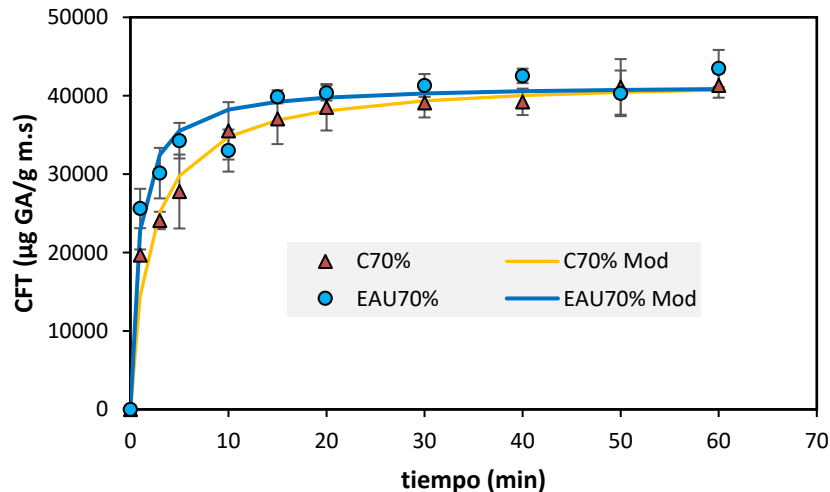
Cinética de extracción asistida con ultrasonido (EAU) de CFT empleando diferentes concentraciones de etanol.



Nota: Los marcadores indican los datos experimentales, las curvas continuas indican los datos calculados (predichos) con el modelo de Peleg (ecuación 1), las barras verticales indican \pm desviación estándar.

Figura 7.

Comparación de cinéticas de extracción convencional (control) y EAU empleando etanol al 70%.



Nota: Los marcadores indican los datos experimentales, las curvas continuas indican los datos calculados (predichos) con el modelo de Peleg (ecuación 1), las barras verticales indican \pm desviación estándar.

En la tabla 4 se muestran los resultados de los parámetros k_1 y k_2 del modelo de Peleg (ecuación 1), utilizado para describir la cinética de extracción EAU.

Tabla 4.

Parámetros obtenidos del ajuste del modelo de Peleg a los datos experimentales de CFT.

Tratamiento	Parámetros		
	K_1 ($\times 10^{-5}$)	K_2 ($\times 10^{-5}$)	R^2
C30%	2.114 \pm 1.342 ab	2.589 \pm 0.118 a	> 0.979
C50%	2.148 \pm 0.124 ab	2.417 \pm 0.067 ab	> 0.942
C70%	5.063 \pm 2.680 a	2.376 \pm 0.175 ab	> 0.970
EUA30%	1.506 \pm 0.467 b	2.552 \pm 0.122 ab	> 0.942
EUA50%	2.201 \pm 0.309 ab	2.286 \pm 0.068 b	> 0.973
EUA70%	1.987 \pm 0.553 b	2.421 \pm 0.154 ab	> 0.947

Nota: Diferentes letras minúsculas significan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre los promedios de los tratamientos para cada uno de los parámetros k_1 y k_2 .

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Cinética de capacidad antioxidante

En la Figura 3, se muestran los resultados de capacidad antioxidante (CA) durante el proceso de extracción convencional, observamos que con la solución de 50% seguido de la de 30% de etanol, tanto en fase inicial como en la de equilibrio del proceso, hay mayor extracción comparado con el comportamiento de extracción observado cuando se utilizó la solución de 70% de etanol. Por otro lado, el uso de las diferentes concentraciones de etanol como solvente mostró un comportamiento similar cuando se utilizó la extracción asistida por ultrasonido (EAU) (Figura 4), donde con 50% la extracción fue ligeramente mayor en una etapa inicial. Sin embargo, al finalizar el proceso (fase de equilibrio), el comportamiento de la extracción utilizando el solvente al 50% de etanol fue similar al de 30%, ocurriendo nuevamente que el uso de solvente al 70% de etanol el que presentó menor extracción. Esto coincide con lo reportado por autores quienes utilizaron soluciones alcohólicas para extraer compuestos a partir de productos ricos en antocianinas, por ejemplo, Xavier et al. (2008), realizaron un estudio en extracción de antocianinas en col morada, utilizando metanol, donde refiere que a mayor porcentaje de alcohol en el solvente, se obtiene menor extracción.

Las diferencias en el comportamiento de extracción observado en función de las concentraciones de etanol y tipo de método de extracción, fueron descritas utilizando el modelo de Peleg (ecuación 1). Los parámetros del modelo de Peleg están relacionados con la velocidad de extracción en el inicio del proceso (k_1) y con la cantidad de compuestos bioactivos extraídos en el equilibrio (k_2), donde a menor k_1 y menor k_2 , significa mayor velocidad de extracción inicial y mayor contenido de compuestos en el equilibrio, respectivamente.

La Tabla 3 muestra los resultados de los parámetros k_1 y k_2 , así como el parámetro de ajuste (R^2) para el proceso de extracción convencional de CA. Se observa que en todos los casos el R^2 fue superior a 0.85, lo que significa que el modelo describe bien el comportamiento de los datos experimentales. Por otro lado, tanto para los parámetros k_1 y k_2 no hay diferencia estadísticamente significativa. El que no haya diferencia significativa en la CA debido a la concentración de solvente y método de extracción, podría deberse al tamaño de partícula utilizado, el cuál al ser pequeño no presentó resistencia suficiente a la transferencia de masa, por lo tanto, no hubo qué mejorar al aplicar las variables de estudio con respecto a la CA. De hecho, el tamaño de partícula en la extracción es importante como bien menciona Guo et al. (2021), ya que la varianza de extracción con el metodo usado va a depender del tamaño de partícula.

Sin embargo, a pesar de no existir diferencias significativas para el caso de CA, se observan tendencias las cuales indican que, para el método de extracción convencional, la mayor velocidad de extracción inicial se produjo en los tratamientos C30% y C50% (ambos presentan igual y menor k_1 que C70%), mientras que para el método EAU, la mayor velocidad de extracción inicial se produjo cuando se utilizó etanol al 50% (tratamiento EAU50% con menor k_1). Por ejemplo, según la predicción del modelo de Peleg, después de 5 min de extracción convencional se alcanzarían niveles de 57.187; 58.101 y 49.793 mg/g m.s. y con EAU se alcanzarían niveles de 55.242; 57.398 y 52.752 mg/g m.s., para las concentraciones de etanol al 30%, 50% y 70%, respectivamente. En relación con los valores de k_2 , se observa a que al aplicar el método EAU, se mejora la extracción convencional utilizando etanol al 30% o 70%, ocurriendo un ligero aumento de la capacidad antioxidante en el equilibrio.

4.2. Cinética de extracción de compuestos fenólicos totales (CFT)

La Figura 5 muestra la cinética de extracción para CFT por método convencional, se observa que con el uso de los solventes al 30% y 50% (C30% y C50%) de etanol se obtuvo mayor cantidad de compuestos fenólicos en etapa inicial. Sin embargo, a partir de los 15 min el contenido de CFT en el tratamiento C30% se invirtió, siendo menor a los demás tratamientos (C50% y C70%). Por otro lado, la Figura 6 muestra la extracción de CFT empleando el método de EAU, se observa que a partir de 15 min existe una diferencia más notoria entre los diferentes tratamientos. A partir de este tiempo, el tratamiento EAU50% se mantiene con los mayores niveles de CFT comparado con los otros dos tratamientos. Los resultados obtenidos coinciden con Sugiharto et al.(2020) quienes afirman que el tipo de solvente y el porcentaje usado afectan los niveles de extracción.

Comparando los métodos de extracción, hubo mejoras en las fases iniciales y de equilibrio cuando se utilizó el método de EAU. Por ejemplo, después de 1 min de proceso, para las concentraciones de solvente con 30% y 70% de etanol hubo un incremento con la aplicación de EAU de 12% y 58% con respecto a la extracción convencional, lo cual significa que la extracción asistida por ultrasonido es más eficaz en cortos tiempos de extracción principalmente en la extracción con etanol al 70%. Tal como lo afirman Chen et al. (2017) y Linares & Rojas (2022), el método EAU es más eficaz frente a un método de extracción convencional, esto debido a que la cavitación acústica causa modificaciones en la estructura de las partículas, también genera microcorrientes que promueven el contacto entre el solvente y la superficie de las partículas, todo esto favorece la transferencia de materia, mejorando la extracción de compuestos bioactivos.

En la Tabla 4, se observan los resultados de los parámetros del modelo de Peleg así como los valores del coeficiente de determinación R^2 . En todos los tratamientos se obtuvo un coeficiente R^2 mayor a 0.94, lo cual indica una buena calidad de ajuste del modelo a los datos experimentales de CFT. El comportamiento observado para cada tratamiento en las figuras 5 y 6 está relacionado con los valores de k_1 y k_2 . Con respecto al proceso convencional, la velocidad de extracción inicial del tratamiento C70% fue menor (mayor k_1) comparado a los otros dos tratamientos (C50% y C30%), mientras que el valor k_2 sugiere que el tratamiento C30% fue aquel que menor cantidad de CFT alcanzó en el equilibrio. Con respecto al proceso EAU, los tratamientos empleando etanol al 30% y 70% (EAU30% y EAU70%) mostraron mayor velocidad de extracción que el tratamiento EAU50%.

Finalmente, comparando ambos métodos de extracción, se observa que los tratamientos EAU30% y EAU70% mostraron mayor velocidad de extracción inicial (menor k_1), con una diferencia significativamente mayor comparado con el tratamiento convencional C70%. Mientras que, en el equilibrio aquel tratamiento con el que se obtuvo mayor cantidad de CFT (menor valor k_2), fue el tratamiento es el EAU50%, con una diferencia significativamente mayor comparado con el tratamiento convencional C30%.

4.3. Limitaciones e implicancias de la investigación

A pesar de los resultados relevantes obtenidos en la presente investigación, existen limitaciones identificadas antes y durante la ejecución de la investigación. La principal limitación previa a la ejecución ha sido la falta de estudios realizados en residuos de coronta; sin embargo, la literatura disponible de la tecnología de ultrasonido y de los análisis realizados permitieron llevar a cabo la investigación. Por otro lado, otras limitaciones se materializaron a lo largo del desarrollo relacionadas a la extracción de compuestos bioactivos y que hubiesen sido interesantes abordarlos; sin embargo, por motivos de tiempo y recursos en esta investigación ya no pudieron ser evaluados, entre ellos: el tamaño de partícula, temperatura de extracción, tipo de solvente e identificación de los tipos de compuestos bioactivos.

Cabe mencionar que, estas limitaciones son oportunidades de estudio para futuras investigaciones que complementen a la presente.

Entre las implicancias o alcances de la presente investigación es que al ser el primer estudio realizado sobre la recuperación de compuestos bioactivos a partir de residuos de coronta de maíz morado sirve de base de conocimiento sobre qué parámetros de extracción utilizar para futuras investigaciones. Por otro lado, los resultados obtenidos demuestran el efecto positivo del uso de la tecnología de ultrasonido y la posibilidad de aprovechar el residuo de coronta, siendo esto de interés académico, pero también muestra un potencial de aprovechamiento industrial de este recurso.

4.4. Conclusiones

En conclusión, las cinéticas de extracción de CA y CFT a partir de residuos de coronta de maíz morado indicaron diferentes comportamientos en función de la concentración de etanol en el solvente y el método de extracción, donde las diferencias más notorias y significativas se observaron en la extracción de CFT. Para describir las cinéticas

de extracción se ajustó el modelo de Peleg, mostrando un buen ajuste con valores de R^2 superiores a 0.85 en la extracción de CA y mayores a 0.942 en la extracción de CFT. A través de los parámetros k_1 y k_2 , se pudo determinar aquellos tratamientos que permitieron una mayor velocidad de extracción y mayor cantidad de compuestos en el equilibrio. Siendo que en un proceso convencional y con EAU, la velocidad de extracción de CA es mejor cuando se utilizó solventes con 30% y 50% de etanol. Por otro lado, para el caso de extracción de CFT, los mejores tratamientos en cuanto a velocidad de extracción inicial fueron los tratamientos EAU30% y EAU70%, mientras que el tratamiento EAU50% fue el que mayor concentración de CFT en el equilibrio, comparado a los demás tratamientos. Por lo tanto, los resultados indican que la extracción por EAU fue más efectiva acelerando el proceso, haciendo uso de tiempos cortos de extracción y concentraciones de etanol en las cuales el proceso convencional es más deficiente.

Basado en lo obtenido en el presente estudio, se recomienda, en futuras investigaciones de extracción de compuestos bioactivos a partir de residuos de coronta de maíz morado, se considere la granulometría de la muestra como una variable importante de estudio durante la aplicación de diferentes métodos de extracción.

REFERENCIAS

- Aguilar-Hernández, Á., Salinas-Moreno, Y., Ramírez-Díaz, J. L., Torre, I. A.-D., Bautista-Ramírez, E., & Flores-López, H. E. (2019). Antocianinas y color en grano y mazorca de maíz morado peruano cultivado en Jalisco, México. Ciudad de Mexico.
- Angela, D., Bettit, S., Nelson, B., & Luis, C. (2021). *Optimización de un té antioxidante natural bajo en calorías elaborado a partir de mazorcas de maíz morado*. Lima.
- Barba, F., Rajha, H., Dar, B. N., Debs, E., Abi-Khattar, A.-M., Simirgiotis, M., . . . Marun, R. (2022). *Optimización de la recuperación de polifenoles de mazorcas de maíz morado asistido por tecnología infrarroja y uso de extraído antocianinas como colorante natural en nabo en escabeche*. Basilea.
- Bonilla, P., Quispe, F., Negrón, L., & Zavaleta, A. (2015). *COMPUESTOS BIOACTIVOS Y ANÁLISIS SENSORIAL DE UNA BEBIDA FUNCIONAL DE MAÍZ MORADO (Zea mays L.) Y ESTEVIA (Stevia SP.)*. Lima.
- Chávez, H. (10 de Marzo de 2023). *Agraria.pe*. Obtenido de <https://agraria.pe/noticias/peru-exporto-21-5-toneladas-de-extracto-de-maiz-morado-en-20-31100>
- Chen, L., Yang, M., Mou, H., & Kong, Q. (2017). *Extracción y caracterización asistida por ultrasonido de antocianinas de salvado de maíz morado*. Qingdao.
- Guillén-Sánchez, J., Mori-Arismendi, S., & Paucar-Menacho, L. (2014). *Características y propiedades funcionales del maíz morado (Zea mays L.) var. subnigroviolaceo*. Ancash.
- Guillén-Sánchez, J., Mori-Arismendi, S., & Paucar-Menacho, L. (2014). *Características y propiedades funcionales del maíz morado (Zea mays L.) var. Subnigroviolaceo*.
- Guo, X., He, X., Dai, T., Liu, W., Liang, R., Chen, J., & Liu, C. (2021). *The physicochemical and pasting properties of purple corn flour ground by a novel low temperature impact mill*. Nanchang.
- Kang, M.-K., Lim, P. c., Lee, J.-Y., Yeo, K. M., & Kang, Y.-H. (2013). *El extracto de maíz morado rico en antocianinas inhibe la diabetes angiogénesis glomerular asociada*. Chuncheon.
- Linares, G., & Rojas, M. (2022). *Ultrasound-Assisted Extraction of Natural Pigments From Food Processing By- Products: A Review*. Trujillo.
- Long, N., Suzuki, S., Sato, S., Naiki-Ito, A., Sakatani, K., Shirai, T., & Takahashi, S. (2012). *Inhibición del color del maíz morado de la carcinogénesis de próstata al dirigirse a las vías de crecimiento celular*. Nagoya.
- Luo, Q., Li, J., Li, H., Zhou, D., XuWang, YayuanTian, . . . Lu, Q. (2022). *Los efectos del pigmento de maíz morado en el rendimiento del crecimiento, los índices bioquímicos sanguíneos, la calidad de la carne, los aminoácidos musculares y los ácidos grasos de los pollos en crecimiento*. Guiyang.

Mejía, L. (2009). *Boletín maíz morado*. Obtenido de https://comunidadilgo.org/back/_lib/file/doc/portadoc453_3.pdf

MIDAGRI. (2021). Análisis de mercado maíz morado. 31.

Monroy, Y., Rodrigues, R., Sartoratto, A., & Cabral, F. (2020). *Extractos hidroalcohólicos de pericarpio de maíz morado (Zea mays L.) obtenidos por procesos convencionales a presión atmosférica y por procesos a alta presión*. Campinas.

Muangrat, R., Pongsirikul, I., & Blanco, P. (2017). *Extracción asistida por ultrasonido de antocianinas y compuestos fenólicos totales de la mazorca seca de maíz ceroso morado utilizando la metodología de superficie de respuesta*. Chiang Mai.

P, J., & MM, G. (2007). *Efectos de las condiciones de extracción en la mejora del rendimiento y la calidad de un extracto de color de maíz morado rico en antocianinas*. Ohio.

Prommacharta, R., Uriyapongsonb, J., Cherdthongay, A., & Uriyapongsona, S. (2021). *Feed Intake, Nutrient Digestibility, Antioxidant Activity in Plasma, and Growth Performance of Male Dairy Cattle Fed Black Rice and Purple Corn Extracted Residue*. Khon Kaen.

Rojas, M. &. (2021). *Ultrasound technology: effect of processing conditions and material on cavitation level*. Trujillo.

Rojas, M., P, A., & J, C. (2020). *Ethanol pre-treatment to ultrasound-assisted convective drying of apple*. Valencia.

Sugiharto, K., Rahman, A., & Zainal. (2020). *El efecto del tipo de solvente y la duración de la extracción en los compuestos de antocianina de maíz morado (Zea Mays L)*. Makassar.

Tian, X., Li, J., Luo, Q., Wang, X., Wang, T., Zhou, D., . . . Lu, Q. (2021). *Effects of Purple Corn Anthocyanin on Growth Performance, Meat Quality, Muscle Antioxidant Status, and Fatty Acid Profiles in Goats*. Guiyang.

Xavier M, L. T. (2008). *Extraction of red cabbage anthocyanins: optimization of the operation conditions of the column process*.

Yang, Z., & Zhai, W. (2010). *Optimización de la extracción asistida por microondas de antocianinas de la mazorca de maíz morado (Zea mays L.) e identificación con HPLC-MS*. Jiangsu.

Zhendong Yang, Zhijie Chen, Shulin Yuan, Weiwei Zhai, Xiangshu Piao, & Xianglan Piao. (2009). *Extracción e identificación de antocianinas de maíz morado (Zea mays L.)*. Beijing.

ANEXOS

ANEXO N°1. Obtención de harina de maíz morado recién secado.



ANEXO N°2. Imagen del tamiz utilizado para la harina de maíz morado.



ANEXO N°3. Harina ya tamizada, guardada en envase hermético.



ANEXO N°4. Preparación de forrado de tubos falcon para su uso.



ANEXO N°5. Preparación de matraces para ser puestos en equipo de ultrasonido.



ANEXO N°6. Formación de matraces para ser puestos en equipo de ultrasonido.

