



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**TESIS DOCTORAL**

**Evaluación de la actividad antioxidante de la col morada (*Brassica oleracea var. capitata f. rubra*) para contrarrestar los efectos de la generación de radicales libres durante el ejercicio en un modelo animal**

**PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**PRESENTA:**

**M.C.A. JEAN ALEJANDRO VÁZQUEZ GARCÍA**

**Director:**

**Dr. Javier Piloni Martini**

**Co-directora:**

**Dra. Aurora Quintero Lira**

**Tulancingo de Bravo. Hgo., julio 2024.**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**  
**DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**TESIS DOCTORAL**

**Evaluación de la actividad antioxidante de la col morada (*Brassica oleracea var. capitata f. rubra*) para contrarrestar los efectos de la generación de radicales libres durante el ejercicio en un modelo animal**

**PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**PRESENTA:**

**M.C.A. JEAN ALEJANDRO VÁZQUEZ GARCÍA**

Director: Dr. Javier Piloni Martini

Co-directora: Dra. Aurora Quintero Lira

Asesores:

Dr. Sergio Soto Simental

Dr. Juan Ocampo López

Tulancingo de Bravo. Hgo., julio 2024

11/julio /2024

Asunto: Autorización de impresión

**Mtra. Ojuky del Rocío Islas Maldonado**  
**Directora de Administración Escolar**  
**Presente.**

El Comité Tutorial **DR. JAVIER PILONI MARTINI, DR. SERGIO SOTO SIMENTAL, DRA. AURORA QUINTERO LIRA, DR. JUAN OCAMPO LÓPEZ** del programa educativo de posgrado titulado **“EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE LA COL MORADA (*Brassica oleracea var. capitata f. rubra*) PARA CONTRARRESTAR LOS EFECTOS DE LA GENERACIÓN DE RADICALES LIBRES DURANTE EL EJERCICIO EN UN MODELO ANIMAL”**, realizado por el sustentante **JEAN ALEJANDRO VÁZQUEZ GARCÍA** con número de cuenta **387675** perteneciente al programa de **DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

### **AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN**

Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

**Atentamente**  
**“Amor, Orden y Progreso”**  
**Lugar, Hidalgo a 11 de julio de 2024**

El Comité Tutorial



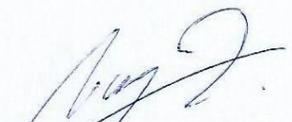
**Dr. Javier Piloni Martini**  
Nombre y firma del director



**Dra. Aurora Quintero Lira**  
Nombre y firma del Codirector



**Dr. Sergio Soto Simental**  
Nombre y firma del miembro del comité



**Dr. Juan Ocampo López**  
Nombre y firma del miembro del comité

## **Agradecimientos**

A mis padres, por brindarme todo el apoyo, la paciencia y la motivación de principio a fin, gracias por siempre estar presentes y darme todo el respaldo y seguridad, los amo infinitamente.

A mi madre, quien fue la mejor compañera, amiga, asistente y testigo de cada paso que se fue dando en cada etapa experimental. Enfrentar retos y tomar decisiones a su lado fue una experiencia inolvidable. Los momentos de risa, desesperación, locura y logros, los vivimos juntos. Gracias por seguir cuidando de “tu niño”, te mega amo mamita hermosa.

A mi Maru, gracias abue por brindarme todo tu amor y paciencia, por acompañarme de camino a la escuela y de regreso a casa, escuchando mi día a día, escuchando mis estados de ánimo y dándome tus consejos y tu bendición, te mega amo mi corazón.

A la Dra. Norma Güemes (q.e.p.d) quien creyó en mi desde el primer día que me conoció y me abrió las puertas al mundo de la ciencia, gracias por el infinito apoyo y confianza depositada, su ausencia dejó en mi mucha tristeza, pero le prometí culminar y lo hemos logrado, sé que aún me acompaña y me guía.

Al Dr. Piloni por aceptarme como su tesista en un momento que nunca imaginamos enfrentar. Gracias Dr. Por su paciencia, por su confianza, por brindarme todos sus conocimientos y por toda su calidad humana, es una persona a la que admiro mucho y siempre llevaré en mi corazón.

A la Dra. Aurora, gracias por su asesoría y apoyo, la admiro mucho y agradezco demasiado por todas sus enseñanzas y siempre pasar momentos agradables.

A mis asesores el Dr. Sergio y el Dr. Ocampo, que me acompañaron en este trayecto y me brindaron su sabiduría en áreas completamente desconocidas para mí, gracias por su paciencias y dedicación.

A todos mis amigos de las diferentes áreas de mi vida que me apoyan, me orientan y aman, infinitas gracias, los amo profundamente.

## Índice

<b>1. Introducción</b>	1
<b>2. Marco teórico</b>	3
2.1. Estrés oxidativo	3
2.1.2. Estrés oxidativo inducido por el ejercicio	4
2.2. Antioxidantes naturales	5
2.3. Col morada	6
2.3.1. Investigaciones de col morada aplicada al daño oxidativo	6
<b>3. Justificación</b>	8
<b>4. Objetivos</b>	10
4.1. Objetivo general	10
4.2. Objetivos específicos	10
<b>5. Hipótesis</b>	10
<b>6. Metodología</b>	11
6.1. Diseño experimental	11
<b>7. Referencias</b>	12
<b>Capítulo 1</b>	
1.1. Resumen	19
1.2. Introducción	20
1.3. Materiales y métodos	21
1.4. Análisis estadístico	26
1.5. Resultados y discusión	26
1.5.1. Obtención y caracterización fisicoquímica de la harina de col morada	26
1.5.2. Actividad de agua (aW), pH, °Brix y azúcares reductores directos y totales (ARD y ART)	27
1.5.3. Tamíz fitoquímico	28
1.5.4. Compuestos bioactivos, actividad antioxidante y su comportamiento durante la digestión <i>in vitro</i>	29
1.6. Conclusiones	31
1.7. Referencias	32
<b>Capítulo 2</b>	
1.1. Resumen	37
1.2. Introducción	38
1.3. Materiales y métodos	40

1.4. Análisis estadístico	43
1.5. Resultados y discusión	44
1.5.1. Mediciones corporales	44
1.5.2. Medición del consumo de alimento y agua	46
1.5.3. Determinación de lactato en sangre	48
1.5.4. Cuantificación de la capacidad antioxidante total plasmática (FRAP)	49
1.5.5. Análisis de color en carne	50
1.5.6. Análisis químico proximal en carne	51
1.5.7. Histopatología	52
1.6. Conclusiones	60
1.7. Referencias	61
1.8. Anexos	65

## Índice de tablas

Capítulo 1	
Tabla 1. Análisis químico proximal en harina de col morada	27
Tabla 2. Actividad de agua (aW), pH y ° Brix en harina de col morada	28
Tabla 3. Tamiz fitoquímico de harina de col morada	29
Tabla 4. Compuestos bioactivos, capacidad antioxidante y digestión <i>in vitro</i> en harina de col morada	31
Capítulo 2	
Tabla 5. Medición de largo y ancho (cm)	46
Tabla 6. Consumo de alimento <i>ad libitum</i> (g/semana)	47
Tabla 7. Consumo de agua <i>ad libitum</i> (mL/semana)	48
Tabla 8. Lactato en sangre (mmol/L)	49
Tabla 9. Capacidad antioxidante en plasma (mmol/L eq. Trolox)	50
Tabla 10. Análisis de color en músculos	51
Tabla 11. Análisis químico proximal en músculos	52

## Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de diseño experimental	11
Figura 2. Medición de peso (g)	45
Figura 3. Color en carne de los diferentes grupos de experimentación	51
Figura 4. Hallazgos histopatológicos de órganos de ratas Wistar adultas sometidas a ejercicio y suplementadas con col morada	58
Figura 5. Hallazgos histopatológicos de músculo estriado esquelético de ratas Wistar adultas sometidas a ejercicio y suplementadas con col morada	59

## Resumen

El objetivo de la presente investigación fue evaluar el contenido de los compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante de la harina de col morada (*Brassica oleracea var. capitata f rubra*) sobre un modelo animal inducido a estrés oxidativo por medio de ejercicio físico. La investigación se dividió en 2 etapas: 1. La fase experimental dio inicio recolectando la materia prima para procesarla y obtener la harina de col morada y así proceder con la caracterización fisicoquímica, dentro de las pruebas de los compuestos bioactivos se realizó un tamiz fitoquímico para posteriormente determinar antocianinas, fenoles y flavonoides, en cuanto a la capacidad antioxidante se realizó por el método DPPH y ABTS, conjuntamente se efectuó una evaluación de su comportamiento mediante una digestión *in vitro* en la cual los compuestos bioactivos y la actividad antioxidante obtuvieron una pérdida, habiendo diferencias significativas en comparación a las diferentes fases. Los valores finales fueron para antocianinas de  $0.57 \pm 0.00$  mg/g eq Cianidina 3 glucosidada, fenoles  $3.77 \pm 0.13$  mg/g EAG y flavonoides  $0.09 \pm 0.00$  mg/g EQ, en la actividad antioxidante fueron ABTS  $68.94 \pm 0.48$  % y DPPH  $44.10 \pm 0.14$  %. Teniendo estos valores como referencia se inició con la siguiente etapa: 2.-Se hizo el experimental *in vivo* para inducir el estrés oxidativo por medio del ejercicio físico y evaluar la capacidad de la harina de col morada para disminuir el estrés oxidativo generado. Se emplearon 24 ratas macho de la línea Wistar. Estas fueron divididas en 4 grupos de 6 ratas, Grupo 1: control, Grupo 2: con suplementación sin inducción, Grupo 3 con inducción sin suplementación y Grupo 4: con inducción y suplementación. El protocolo duró 64 días. Dentro de las pruebas se realizó la determinación de lactato en sangre como indicador de estrés oxidativo obteniendo al final los siguientes valores, Grupo 1:  $1.6 \pm 0.35$ , Grupo 2:  $2.4 \pm 0.42$ , Grupo 3:  $3 \pm 0.29$  y Grupo 4:  $2.6 \pm 0.30$ . Además, se evaluó la capacidad antioxidante en el plasma en donde los valores finales fueron, Grupo 1:  $4.88 \pm 0.83$ , Grupo 2:  $7.58 \pm 0.87$ , Grupo 3:  $5.77 \pm 0.63$  y Grupo 4:  $.09 \pm 0.55$ . Se concluye que el consumo de los compuestos bioactivos de col morada ayuda a disminuir el estrés oxidativo generado por la actividad física.

**Palabras clave:** Col morada, Estrés oxidativo, Capacidad antioxidante.

## Abstract

The objective of the present investigation was to evaluate the content of bioactive compounds and the antioxidant capacity of red cabbage flour (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra*) in an animal model induced to oxidative stress through physical exercise. The research was divided into 2 stages: 1. The experimental phase began by collecting the raw material to process it and obtain the purple cabbage flour and thus proceed with the physicochemical characterization, within the tests of the bioactive compounds a phytochemical sieve was carried out. to subsequently determine anthocyanins, phenols and flavonoids, regarding the antioxidant capacity, it was carried out by the DPPH and ABTS method, together an evaluation of its behavior was carried out through an in vitro digestion in which the bioactive compounds and the antioxidant activity obtained a loss, there being significant differences compared to the different phases. The final values were for anthocyanins of  $0.57 \pm 0.00$  mg/g eq Cyanidin 3 glucosidated, phenols  $3.77 \pm 0.13$  mg/g EAG and flavonoids  $0.09 \pm 0.00$  mg/g EQ, in the antioxidant activity they were ABTS  $68.94 \pm 0.48$  % and DPPH  $44.10 \pm 0.14$ %. Having these values as a reference, the following stage began: 2. The in vivo experimental was carried out to induce oxidative stress through physical exercise and evaluate the capacity of red cabbage flour to reduce the oxidative stress generated. 24 male rats from the Wistar line were used. These were divided into 4 groups of 6 rats, Group 1: control, Group 2: with supplementation without induction, Group 3 with induction without supplementation and Group 4: with induction and supplementation. The protocol lasted 64 days. Within the tests, blood lactate was determined as an indicator of oxidative stress, obtaining in the end the following values: Group 1:  $1.6 \pm 0.35$ , Group 2:  $2.4 \pm 0.42$ , Group 3:  $3 \pm 0.29$  and Group 4:  $2.6 \pm 0.30$ . In addition, the antioxidant capacity in plasma was evaluated where the final values were, Group 1:  $4.88 \pm 0.83$ , Group 2:  $7.58 \pm 0.87$ , Group 3:  $5.77 \pm 0.63$  and Group 4:  $.09 \pm 0.55$ . It is concluded that the consumption of bioactive compounds from purple cabbage helps reduce oxidative stress generated by physical activity.

Keywords: Purple cabbage, Oxidative stress, Antioxidant capacity.

## Introducción

En los últimos años, ha habido un aumento significativo en el interés por investigar, describir, utilizar y aplicar productos naturales, motivado especialmente por sus contribuciones positivas a la salud. La col morada también llamada “col lombarda”, es una variedad cuyo nombre científico es *Brassica oleracea var. capitata f. rubra*, tiene gran importancia en la alimentación del ser humano debido a su disponibilidad y aplicación en la dieta habitual, pero además por el contenido nutrimental ya que contiene vitaminas A, B, C y K, además presenta un 91 % de agua, 4 % de carbohidratos, 1 % de fibra, 2.6 % de proteína y 1 % de lípidos, de la misma forma esta hortaliza se caracteriza por el color morado de sus hojas, esto se debe a la presencia de antocianinas (Infoagro, 2020).

En la col morada se encuentran más de 30 tipos de antocianinas que contienen principalmente derivados del glucósido cianidina-3-diglucósido-5 en formas aciladas o no aciladas (Ahmadiani *et al.* 2019). A estos compuestos se les atribuyen grandes propiedades para la salud, como antiinflamatorios, antidiabéticos, anticancerígenos y una alta compatibilidad con los sistemas biológicos, a su vez son responsables de más del 89 % de la capacidad antioxidante total (Farooq *et al.*, 2020). Esto puede ser de gran ayuda ya que a pesar de que el cuerpo humano posee mecanismos naturales o endógenos para mantener concentraciones normales de especies reactivas de oxígeno (ERO) puede presentarse un desequilibrio entre las rutas de generación y consumo de ERO, en estas se considera la participación de las rutas celulares o el efecto de los antioxidantes endógenos del organismo (Ortiz Escarza & Medina López, 2020).

Cuando se genera un incremento en la concentración de las especies reactivas de oxígeno debido a un incremento exagerado en la producción de ERO o debido a la disminución o inhibición de los mecanismos antioxidantes endógenos, se dice que el cuerpo entra en el estado de estrés oxidativo (Zhao *et al.*, 2007). De manera interesante, una causa de probable estrés oxidativo es la realización de ejercicio, ya que existe un desbalance redox que aumenta las especies reactivas de oxígeno generando un estrés oxidativo que favorece

el daño muscular incidiendo en el rendimiento físico y deportivo (Donadio *et al.*, 2022).

Los polifenoles son metabolitos secundarios de las plantas y ejercen importantes funciones fisiológicas y de defensa ante situaciones de estrés, así mismo, son responsables del color y sabor de muchas plantas, razón por la que resultan importantes en la calidad de éstos (Valdez, 2021).

La col morada contiene un alto contenido de compuestos fenólicos destacando las antocianinas las cuales le confieren su característico color y le brindan una alta capacidad antioxidante. Con base a lo anteriormente mencionado se realizó una caracterización fisicoquímica de harina de col morada (*Brassica oleracea var. capitata f. rubra*) para evaluar el contenido de compuestos bioactivos y su capacidad antioxidante antes y después de ser sometida a una digestión *in vitro*.

Por lo antes mencionado, el objetivo general de la presente investigación fue evaluar el efecto antioxidante de los compuestos bioactivos de la col morada (*Brassica oleracea var. capitata f. rubra*) en un modelo animal sometido a ejercicio físico para comprobar la disminución del estrés oxidativo generado.

## Marco teórico

### Estrés oxidativo

Los radicales libres son moléculas inestables y altamente reactivas que contienen un número impar de electrones en su estructura. Debido a esta configuración electrónica desequilibrada, los radicales libres son muy propensos a reaccionar con otras moléculas en un intento de estabilizarse, estas reacciones pueden generar una cadena de eventos químicos en el cuerpo (Godoy Martínez, 2024).

El estrés oxidativo se refiere al desequilibrio entre la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés) y la capacidad del sistema antioxidante del cuerpo para neutralizar estos compuestos. Las ROS son moléculas altamente reactivas que incluyen radicales libres como el oxígeno singlete, peróxido de hidrógeno y radicales hidroxilos. Estas moléculas pueden causar daño oxidativo a las biomoléculas, incluidos lípidos, proteínas y ADN, lo que se relaciona con el envejecimiento y diversas enfermedades crónicas como el cáncer, enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas (Pisoschi & Pop, 2015).

El cuerpo humano tiene un sistema antioxidante endógeno que incluye enzimas como la superóxido dismutasa, catalasa y glutatión peroxidasa, así como antioxidantes no enzimáticos como la vitamina C, vitamina E, glutatión y flavonoides. Estos antioxidantes neutralizan las ROS y protegen contra el estrés oxidativo (Sies, 2015).

Este fenómeno puede ser causado por diversos factores, que incluyen:

Exposición a contaminantes ambientales: Según estudios recientes, la exposición como el humo del tabaco, los contaminantes industriales y los pesticidas puede incrementar la producción de ROS en el cuerpo humano, desencadenando estrés oxidativo significativo (Smith *et al.*, 2021).

Estilo de vida y dieta: Investigaciones indican que la dieta rica en grasas saturadas y carbohidratos refinados, junto con el consumo excesivo de alcohol y el tabaquismo, pueden contribuir al estrés oxidativo debido a la generación de ROS y la reducción de la actividad antioxidante endógena (Jones & Nguyen, 2022).

Factores psicológicos y estrés crónico: Estudios han demostrado que el estrés crónico y los estados emocionales negativos pueden aumentar los niveles de ROS y disminuir la actividad antioxidante, provocando el estrés oxidativo en el organismo (Gupta *et al.*, 2023).

Radiación ultravioleta (UV): La exposición prolongada a la radiación UV, especialmente sin protección adecuada, puede generar especies reactivas de oxígeno en la piel, contribuyendo al estrés oxidativo y al envejecimiento prematuro (Pillai *et al.*, 2005).

Enfermedades crónicas: Condiciones médicas como la diabetes, la enfermedad cardiovascular y la enfermedad renal crónica están asociadas con niveles elevados de estrés oxidativo debido a la inflamación crónica y otros mecanismos fisiopatológicos específicos (Leyane *et al.*, 2022).

Envejecimiento: El proceso natural de envejecimiento se asocia con un aumento en la producción de ROS y una disminución en la eficacia de los sistemas antioxidantes del cuerpo, lo que puede contribuir al estrés oxidativo y a la aparición de enfermedades relacionadas con la edad (Tsang *et al.*, 2022).

Ejercicio físico intenso: El ejercicio vigoroso puede aumentar la producción de ROS en el cuerpo debido al incremento en el metabolismo aeróbico y la demanda de oxígeno, lo que puede superar la capacidad antioxidante natural durante períodos prolongados de entrenamiento intenso (Qing & Chun-Hsein, 2024).

### **Estrés Oxidativo Inducido por el Ejercicio**

El ejercicio físico, especialmente el ejercicio aeróbico de alta intensidad, puede provocar un aumento en la producción de ROS debido a un aumento en el consumo de oxígeno y al estrés mecánico en los músculos (Fisher-Wellman & Bloomer, 2009). Este aumento en ROS durante el ejercicio puede resultar en daño oxidativo a las células y tejidos, pero también desencadena adaptaciones antioxidantes en el organismo para contrarrestar este efecto (Qing & Chun-Hsein, 2024).

Los principales sitios de producción de ROS durante el ejercicio son las mitocondrias y el sarcolema de las células musculares, donde el desequilibrio entre la producción de ROS y la capacidad antioxidante puede llevar a la fatiga

muscular y al daño celular si no se controla adecuadamente (Powers & Jackson, 2008). Además, el impacto en la función muscular y fatiga producidos por el estrés oxidativo que se genera durante el ejercicio puede afectar la contracción muscular y la capacidad de generar fuerza. Los ROS pueden alterar la función de las proteínas contráctiles y afectar la capacidad de las células musculares para generar energía de manera eficiente, contribuyendo así a la fatiga muscular (Powers & Jackson, 2008).

Los estudios han demostrado que el ejercicio regular promueve la adaptación antioxidante al aumentar la actividad de enzimas antioxidantes y la expresión de proteínas protectoras, lo que mejora la capacidad del cuerpo para manejar el estrés oxidativo inducido por el ejercicio (Qing & Chun-Hsein, 2024).

### **Antioxidantes naturales**

Los antioxidantes naturales son compuestos presentes en alimentos de origen vegetal y animal que pueden neutralizar los efectos dañinos de las especies reactivas de oxígeno (ROS) y los radicales libres. Estos compuestos incluyen vitaminas como la C y la E, minerales como el selenio y el zinc, así como fitoquímicos como los flavonoides y polifenoles. La capacidad antioxidante de estos compuestos se debe a su estructura química que les permite donar electrones para estabilizar los radicales libres y reducir el estrés oxidativo en el cuerpo humano (Prior & Wu, 2006).

Algunos alimentos ricos en antioxidantes naturales incluyen frutas como las bayas, cítricos y kiwis, vegetales como el brócoli, espinacas y col morada, frutos secos, té verde y ciertas especias como la cúrcuma y el jengibre. Consumir una dieta rica en estos alimentos puede ayudar a aumentar la capacidad antioxidante del cuerpo y proteger contra el daño oxidativo asociado con el envejecimiento y diversas enfermedades (Shahidi & Zhong, 2015).

La investigación sobre antioxidantes naturales ha demostrado que pueden tener efectos beneficiosos en la prevención de enfermedades crónicas como enfermedades cardiovasculares, cáncer y enfermedades neurodegenerativas. Además, los antioxidantes naturales también pueden jugar un papel importante en la protección contra el estrés oxidativo inducido por factores

externos como la contaminación ambiental y el ejercicio intenso (Sies & Jones, 2020).

### **Col morada**

La col morada, también conocida como repollo morado o col lombarda, es una variedad de *Brassica oleracea* que se distingue por su color morado intenso, que es debido a la presencia de antocianinas, un tipo de compuesto bioactivo conocido por sus propiedades antioxidantes. Estas antocianinas son flavonoides que actúan como potentes antioxidantes, protegiendo las células del daño oxidativo al neutralizar los radicales libres (Khoo *et al.*, 2017).

Además de las antocianinas, la col morada también contiene otros compuestos bioactivos como los glucosinolatos y los polifenoles, que han demostrado tener efectos protectores contra enfermedades crónicas y promover la salud general. Estos compuestos no solo contribuyen a su color y sabor característicos, sino que también le confieren propiedades nutricionales significativas (He & Giusti, 2010).

Los compuestos bioactivos presentes en la col morada incluyen una variedad de fitoquímicos como las antocianinas mencionadas anteriormente. Estos compuestos no solo actúan como antioxidantes, sino que también tienen propiedades antiinflamatorias y pueden contribuir a la regulación del metabolismo celular y la salud cardiovascular (He & Giusti, 2010). Además, estudios recientes sugieren que los polifenoles presentes en la col morada pueden tener efectos protectores contra el estrés oxidativo y el daño celular asociado con el envejecimiento y las enfermedades crónicas (He & Giusti, 2010).

### **Investigaciones de col morada aplicada al daño oxidativo**

Investigaciones recientes han explorado el potencial de la col morada para mitigar el daño oxidativo en diversos contextos. Se han realizado estudios *in vitro* e *in vivo* que han demostrado que los extractos de col morada son efectivos en la reducción de los niveles de especies reactivas de oxígeno y protegen las células contra el estrés oxidativo inducido por diferentes agentes estresantes (He & Giusti, 2010; Khoo *et al.*, 2017).

Además, se ha observado que el consumo regular de col morada o sus extractos puede mejorar la capacidad antioxidante total del cuerpo y ofrecer protección contra enfermedades relacionadas con el estrés oxidativo, como enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer (He & Giusti, 2010; Khoo *et al.*, 2017).

Un estudio relevante sobre el efecto antioxidante de la col morada se evaluó el papel protector del extracto de col morada rico en antocianinas (ARCE) sobre la hipercolesterolemia inducida por una dieta aterogénica (ATH) y el estrés oxidativo cardíaco y hepático relacionado en ratas. Los resultados indicaron que el extracto de ARCE atenuó significativamente las alteraciones en los antioxidantes cardíacos, hepáticos, la peroxidación lipídica, y los cambios histopatológicos en el tejido cardíaco y hepático (Sankhari *et al.*, 2012).

En otro estudio realizado por Tajalli *et al.* (2020) investigaron la evaluación de las propiedades antioxidantes del extracto de col lombarda mediante un ensayo de eliminación de radicales DPPH y la exploración de su actividad anticancerígena sobre el crecimiento y la viabilidad de las células cancerosas humanas deseadas mediante un ensayo in vitro para detectar la actividad citotóxica. Los resultados mostraron efectos mejorados al aumentar la concentración, mostrando el valor más alto de IC90+ a una concentración de 2500 µg/ml en comparación con el valor de IC50 del extracto de col lombarda a una concentración de 750 µg/ml. Se encontró que los compuestos polifenólicos 39,55 mg de GAE/100 g de extracto de col roja y el extracto de col roja aumentan la tasa de muerte de las células cancerosas y el efecto de citotoxicidad dependía de la dosis.

## Justificación

El estrés oxidativo es un proceso biológico asociado con la realización del ejercicio físico junto a otras diversas enfermedades crónicas, incluyendo enfermedades cardiovasculares, neurodegenerativas y ciertos tipos de cáncer. Este fenómeno se produce cuando hay un desequilibrio entre la producción de especies reactivas de oxígeno (ERO) y la capacidad del organismo para neutralizar y eliminar estas especies dañinas. El ejercicio físico regular es fundamental para la salud cardiovascular, el mantenimiento del peso corporal y el bienestar general. Sin embargo, durante la actividad física intensa, se produce un aumento en la generación de especies reactivas de oxígeno (ERO) y radicales libres en el organismo, lo que puede resultar en estrés oxidativo. Este fenómeno no solo puede afectar el rendimiento deportivo, sino que también está asociado con el daño celular y la inflamación crónica si no se maneja adecuadamente. En este contexto, los antioxidantes naturales se presentan como una estrategia prometedora para contrarrestar el estrés oxidativo. Estos compuestos, presentes en una amplia variedad de alimentos y plantas, son capaces de neutralizar los ROS y proteger así las células y tejidos de los efectos perjudiciales de la oxidación. Las antocianinas, compuestos flavonoides que dan el color característico a frutas y vegetales como los de la col morada, han demostrado tener propiedades antioxidantes significativas. Estos antioxidantes naturales tienen la capacidad única de neutralizar los ROS y proteger las células del daño oxidativo inducido por diversas condiciones estresantes, incluido el ejercicio físico intenso. Estudios científicos han confirmado que las antocianinas poseen potentes propiedades antioxidantes que pueden contrarrestar los efectos perjudiciales de los radicales libres generados durante el ejercicio físico intenso. Este efecto ayuda a preservar la integridad celular y a minimizar el daño muscular post-ejercicio. Sin embargo, existen aún muchas oportunidades para explorar y optimizar su uso en la prevención y tratamiento de enfermedades relacionadas con el estrés oxidativo. Este proyecto abordó la integración de antioxidantes naturales de harina de col morada como suplemento, ofreciendo una estrategia accesible y no invasiva para disminuir el estrés oxidativo generado por el ejercicio físico, no solo representando una estrategia innovadora y efectiva para mejorar el rendimiento deportivo y la salud metabólica, sino que también para abrir

nuevas oportunidades para investigaciones avanzadas en diferentes campos de estudio.

## Objetivos

### Objetivo general

Evaluar el efecto antioxidante de los compuestos bioactivos de la col morada (*Brassica oleracea var. capitata f. rubra*) en un modelo animal sometido a ejercicio físico para comprobar la disminución del estrés oxidativo generado.

### Objetivos específicos

1. Caracterizar la col morada (*Brassica oleracea var. capitata f. rubra*) mediante pruebas físico-químicas para identificar sus componentes.
2. Evaluar la degradación de los compuestos antioxidantes de la col morada por medio de una digestión *in vitro* para ver cómo se comportan en las distintas fases del proceso digestivo y así determinar la concentración que se suministrará al modelo animal.
3. Suplementar la col morada (*Brassica oleracea var. capitata f. rubra*) al modelo animal sometido a ejercicio físico para comparar el valor bioquímico de lactato en sangre y la cuantificación de la actividad antioxidante total plasmática en los grupos de experimentación y así evaluar la funcionalidad de la hortaliza.
4. Evaluar los músculos de los diferentes equipos de experimentación por medio de un análisis químico proximal y de color para determinar si existieron cambios químicos entre ellos
5. Identificar los cambios histológicos en músculo, hígado, riñón, pulmón y corazón para observar los efectos de la col morada (*Brassica oleracea var. capitata f. rubra*) en los órganos de las ratas Wistar de los diferentes equipos de experimentación.

## Hipótesis

Los compuestos bioactivos de la col morada (*Brassica oleracea var. capitata f. rubra*) ayudan a disminuir el estrés oxidativo generado durante el ejercicio.

## Metodología

### Diseño experimental

En la Figura 1 se observa el diseño experimental realizado en esta investigación. El estudio constó de 2 etapas. La primera etapa (Capítulo 1) consistió en la evaluación de la composición de la harina de col morada (*Brassica oleracea var. Capitata F. rubra*) mediante su caracterización fisicoquímica (análisis químico proximal, aW, pH, ° Brix y azúcares reductores totales y directos por DNS), un tamiz fitoquímico, la determinación de compuestos bioactivos (antocianinas, fenoles y flavonoides), la capacidad antioxidante (DPPH y ABTS) y una digestión *in vitro* de los compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante. La segunda etapa (Capítulo 2) incluyó la evaluación del efecto de la suplementación de la harina de col morada sobre un modelo animal con inducción al estrés oxidativo por medio del ejercicio físico, determinando parámetros bioquímicos (lactato en sangre y capacidad antioxidante en plasma) morfológicos (peso y longitud) e histológicos (órganos y musculo esquelético).

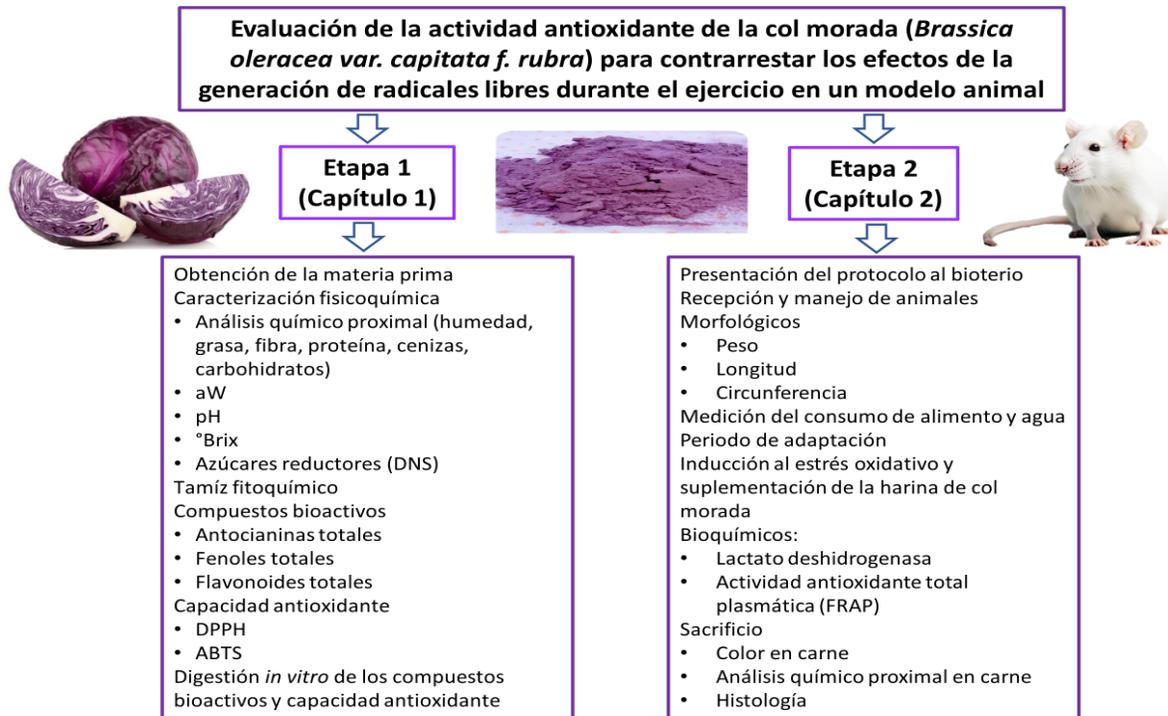


Figura 1. Diagrama de diseño experimental

## Referencias

- Ahmadiani, N., Sigurdson, G. T., Robbins, R. J., Collins, T. M., & Giusti, M. M. (2019). Solid phase fractionation techniques for segregation of red cabbage anthocyanins with different colorimetric and stability properties. *Food research international (Ottawa, Ont.)*, 120, 688–696. doi: 10.1016/j.foodres.2018.11.026
- Baum, J., Howard, R., Prior, R., & Lee, S. (2016). Efecto de la suplementación con *Aronia melanocarpa* (aronia negra) sobre el desarrollo de la obesidad en ratones alimentados con una dieta alta en grasas. *Journal of Berry Research*, 6, 203 – 212. doi.org/10.3233/JBR-160134
- Cossio, M., Gómez, R., Vargas, R., Hochmuller, R., & Arruda, M. (2013). Curvas de referencia para valorar el crecimiento físico de ratas machos Wistar. *Nutrición Hospitalaria*, 8 (6), 2151-2156. doi: https://dx.doi.org/10.3305/nh.2013.28.6.6659
- Donadio, P., Muñoz, C., Fores-Lucero, F., García-Días, D., Quezada, E., & Poblete-Aro, C. (2022). Efectividad de la suplementación nutricional con polifenoles sobre el daño muscular y marcadores de estrés oxidativo en diferentes tipos de ejercicios físicos: Una revisión de la literatura. *SPORT TK-Revista EuroAmericana de Ciencias del Deporte*, 11,4. doi: https://doi.org/10.6018/sportk.550641
- FAO. (2020). Frutas y verduras esenciales en tu dieta. Año Internacional de las Frutas y Verduras, 2021. Documento de antecedentes.
- Farooq, S., Shah, M., Siddiqui, M., Dar, B., Mir, S., & Ali, A. (2020). Recent trends in extractions techniques of anthocyanins from plants materials. *Journal of Food Measurement and Characterization*. doi: https://doi.org/10.1007/s11694-020-00598-8

- Fisher-Wellman, K., & Bloomer, R. (2009). Acute exercise and oxidative stress: a 30-year history. *Dynamic medicine: DM*, 8,1. doi: <https://doi.org/10.1186/1476-5918-8->
- Godoy Martínez, M. (2024). *Ejercicio físico, radicales libres y estrés oxidativo. Suplementación con antioxidantes naturales derivados del consumo de arándanos*. Retrieved from Universidad Internacional de Andalucía: [https://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/8609/1559\\_Godoy.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/8609/1559_Godoy.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Godoy, G., Travassos, P., Antunes, M., Iwanaga, C., Sá-Nakanishi, A., Curi, R., . . . Bazotte, R. (2022). Strenuous swimming raises blood non-enzymatic antioxidant capacity in rats. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 55: e11891. doi: <https://doi.org/10.1590/1414-431X2022e11891>
- Gonçalves, A., Gaspar, D., Flores-Félix, J., Falcão, A., Alves, G., & Silva, L. (2022). Effects of Functional Phenolics Dietary Supplementation on Athletes' Performance and Recovery: A Review. *International journal of molecular sciences*, 23(9), 4652. doi: <https://doi.org/10.3390/ijms23094652>
- González, M., López, A., & Dos Santos, C. (2010). Efecto del tipo y controlabilidad del estrés sobre la conducta alimentaria en ratas. *Revista mexicana de análisis de la conducta*, 36(2), 111-127. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-45342010000200008&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-45342010000200008&lng=es&tlng=es)
- Guashca, J. F. (2023). Evaluación de dos métodos de extracción de ruda, ortiga y ajo para el control de *Brevicoryne brassicae* (pulgon) en cultivo de col morada (*Brassicaceae oleracea* var. *capitata* f. *rubra*). [Tesis de Ingeniería inédita], Universidad Técnica de Ambato.
- Gupta, S., Sharma, A., & Singh, S. (2023). Psychological stress and oxidative stress: An overview. *Psychoneuroendocrinology*, 129, 105347. doi: [10.1016/j.psyneuen.2023.105347](https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2023.105347)

- He, J., & Giusti, M. (2010). Anthocyanins: natural colorants with health-promoting properties. *Annual review of food science and technology*, 163-187. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.food.080708.100754>
- He, J., Giusti, M., & Cuppett, S. (2018). Antioxidant Activity of Brassica oleracea Vegetables. *Bioactive Foods in Promoting Health*, Chapter 12. In: Lila M. A., Tsao R.
- Heim, K., Tagliaferro, A., & Bobilya, D. (2002). Flavonoid antioxidants: chemistry, metabolism and structure-activity relationships. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 572-584. doi: [https://doi.org/10.1016/S0955-2863\(02\)00208-5](https://doi.org/10.1016/S0955-2863(02)00208-5)
- Infoagro. (2020). *Lo que hay que saber del repollo morado*. Retrieved from <https://infoagro.com.ar/lo-que-hay-que-saber-del-repollo-morado/amp/>
- Jones, E., & Nguyen, L. (2022). Lifestyle factors and oxidative stress: A systematic review. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 98, 108912. doi: [10.1016/j.jnutbio.2021.108912](https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2021.108912)
- Jumayi, A., Allam, A., El-Beltagy, A., Hassan, A., Mahmoud, A., & Halim, K. (2022). Bioactive Compound, Antioxidant, and Radical Scavenging Activity of Some Plant Aqueous Extracts for Enhancing Shelf Life of Cold-Stored Rabbit Meat. *Antioxidants*, 11(6):1056. doi: <https://doi.org/10.3390/antiox11061056>.
- Khoo, H., Azlan, A., Tang, S., & Lim, S. (2017). Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. *Food & nutrition research*, 61(1), 1361779. doi: <https://doi.org/10.1080/16546628.2017.1361779>
- Leyane, T., Jere, S., & Houreld, N. (2022). Oxidative Stress in Ageing and Chronic Degenerative Pathologies: Molecular Mechanisms Involved in Counteracting Oxidative Stress and Chronic Inflammation. *Int. J. Mol. Sci*, 13: 7273. doi: <https://doi.org/10.3390/ijms2313727>

- Manhães-de-Castro, R., Vilela, F., Pereira, L., & Guedes, R. (2020). Stress-induced hypophagia in rats is associated with oxidative events in the hypothalamus. *Behavioural Brain Research*, 383, 112507. doi:doi:10.1016/j.bbr.2019.112507
- Niesto, G., Ros, G., & Castillo, J. (2018). Antioxidant and Antimicrobial Properties of Rosemary (*Rosmarinus officinalis*, L.): A Review. *Medicines (Basel, Switzerland)*, 5(3), 98. doi:https://doi.org/10.3390/medicines5030098
- Ortiz Escarza, J., & Medina López, M. (2020). Estrés oxidativo ¿un asesino silencioso? *Educación Química*, 1-11. doi:http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2020.1.69709
- Pedersen, B., & Saltin, B. (2015). Exercise as medicine - evidence for prescribing exercise as therapy in 26 different chronic diseases. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 25 Suppl 3, 1–72. doi:https://doi.org/10.1111/sms.12581
- Pillai, S., Oresajo, C., & Hayward, J. (2005). Ultraviolet radiation and skin aging: roles of reactive oxygen species, inflammation and protease activation, and strategies for prevention of inflammation-induced matrix degradation - a review. *Int J Cosmet Sci*, 17-34. doi:10.1111/j.1467-2494.2004.00241.x
- Pisoschi, A., & Pop, A. (2015). The role of antioxidants in the chemistry of oxidative stress: A review. *The role of antioxidants in the chemistry of oxidative stress: A review.*, 55-74. doi:doi:10.1016/j.ejmech.2015.04.040
- Poblete, C., Russell, J., Parra, P., Soto, M., Villegas, B., Cofré, C., & Herrera, T. (2018). Efecto del ejercicio físico sobre marcadores de estrés oxidativo en pacientes con diabetes mellitus tipo 2. *Revista médica de Chile*, 146(3), 362-372. doi:https://dx.doi.org/10.4067/s0034-98872018000300362

- Powers, S., & Jackson, M. (2008). Exercise-induced oxidative stress: cellular mechanisms and impact on muscle force production. *Physiological reviews*, 1243–1276. doi: <https://doi.org/10.1152/physrev.00031.2007>
- Powers, S., Duarte, J., Kavazis, A., & Talbert, E. (2010). Reactive oxygen species are signalling molecules for skeletal muscle adaptation. *Experimental physiology*, 95(1), 1–9. doi: <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2009.050526>
- Prior, R., & Wu, X. (2006). Anthocyanins: structural characteristics that result in unique metabolic patterns and biological activities. *Free radical research*, 1014-1028. doi: <https://doi.org/10.1080/10715760600758522>
- Prommachart, R., Cherdthong, A., Navanukraw, C., Pongdontri, P., Taron, W., Uriyapongson, J., & Uriyapongson, S. (2021). Effect of Dietary Anthocyanin-Extracted Residue on Meat Oxidation and Fatty Acid Profile of Male Dairy Cattle. *Animals: an open access journal from MDPI*, 11(2), 322. doi: <https://doi.org/10.3390/ani11020322>
- Qing, M., & Chun-Hsein, S. (2024). The Impact of Physical Exercise on Oxidative and Nitrosative Stress: Balancing the Benefits and Risks. *Antioxidants*, 13(5), 573. doi: <https://doi.org/10.3390/antiox13050573>
- Šamec, D., & Salopek-Sondi, B. (2019). Chapter 3.11 - Cruciferous (Brassicaceae) Vegetables. *Supplements*, 195-202. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812491-8.00027-8>
- Sankhari, J., Thounaojam, M., Jadeja, R., Devkar, R., & Ramachandran, A. (2012). Anthocyanin-rich red cabbage (*Brassica oleracea* L.) extract attenuates cardiac and hepatic oxidative stress in rats fed an atherogenic diet. *Journal of the science of food and agriculture*, 1688–1693. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.5532>
- Santa-González, G., & Camargo, M. (2017). Protección celular antioxidante y respuesta adaptativa inducida por estímulos oxidativos crónicos.

*Actualidades Biológicas*, 38(104), 71–80. doi:  
<https://doi.org/10.17533/udea.acbi.328979>

Seymour, E., Tanone, I., Urcuyo-Llanes, D., Lewis, S., Kirakosyan, A., Kondoleon, M., . . . Bolling, S. (2011). La ingesta de arándanos altera la actividad del receptor activado por el proliferador de peroxisomas del músculo esquelético y del tejido adiposo y reduce la resistencia a la insulina en ratas obesas. *Revista de Alimentos Medicinales*, 14, 1511 – 1518. doi:  
<https://doi.org/10.1089/jmf.2010.0292>

Shahidi, F., & Zhong, Y. (2015). Measurement of Antioxidant Activity. *Journal of Functional Foods*, 757-781. doi:  
<https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.01.047>

SIAP. (2020). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Retrieved from  
<https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola>

Sies, H. (2015). Oxidative stress: a concept in redox biology and medicine. *Redox Biol*, 4:180-3. doi:10.1016/j.redox.2015.01.002

Sies, H., & Jones, D. (2020). Reactive oxygen species (ROS) as pleiotropic physiological signalling agents. *Nature reviews. Molecular cell biology*, 363-383. doi: <https://doi.org/10.1038/s41580-020-0230-3>

Smith, A., Jones, C., & Brown, E. (2021). Environmental pollutants and oxidative stress in humans: A review. *Environmental Health Perspectives*, 129(7). doi:10.1289/EHP8832

Souza, L., Aidar, F., Matos, D., Marçal, A., Souza, R., dos Santos, J., . . . Araújo, S. (2020). Analysis of oxidative stress in Wistar rats submitted to high-intensity interval training. *Motricidade*, vol. 16, n. 3, pp. 274-281. doi:  
<http://dx.doi.org/10.6063/motricidade.21310>

Tajalli, F., Saeedi, M., & Malekabadi, A. (2020). Anticancer and antioxidant effects of red cabbage on three cancerous cell lines and comparison with a normal cell line (HFF-3). *Journal of Genes and Cells*, 6(1):12-23. doi:10.15562/gnc.73

- Tsang, Y., Cao, C., Lin, S., & Li, C. (2022). Mitochondrial Dysfunction and Oxidative Stress in Aging and Disease. *Biomedicines*, 10(11), 2872. doi: doi.org/10.3390/biomedicines10112872
- Tsuda, T., Horio, F., Uchida, K., Aoki, H., & Osawa, T. (2003). Dietary cyanidin 3-O-beta-D-glucoside-rich purple corn color prevents obesity and ameliorates hyperglycemia in mice. *The Journal of nutrition*, 133(7), 2125–2130. doi: https://doi.org/10.1093/jn/133.7.2125
- Tsuda, T., Ueno, Y., Kojo, H., Yoshikawa, T., & Osawa, T. (2005). Gene expression profile of isolated rat adipocytes treated with anthocyanins. *Biochimica et biophysica acta*, 1733(2-3), 137–147. doi: https://doi.org/10.1016/j.bbaliip.2004.12.014
- Valdez, A. (2021). *Evaluación del efecto del jugo de frambuesa (Rubus idaeus L.) procesado con microondas sobre la conducta tipo depresiva y el estrés oxidativo en la rata Wistar*. Retrieved from https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/1944/50814/ValdezBetanzosaAlejandra.pdf?sequ
- Viera, L., Carlos, A., dos Santos, J., Lopes, F., dos Santos, S., Santana, A., . . . Brito, C. (2022). El ejercicio de resistencia de alta intensidad y la suplementación con *Schinus terrenbinthifolius* atenúan el estrés oxidativo y los biomarcadores del daño muscular. *Revista Internacional de Morfología*, 40 (3), 781-788. doi: http://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022022000300781
- Zhao, W., Diz, D., & Robbins, M. (2007). Oxidative damage pathways in relation to normal tissue injury. *The British journal of radiolog*, 23-31. doi:10.1259/bjr/18237646

## Capítulo 1

### Caracterización fisicoquímica compuestos bioactivos, actividad antioxidante y su comportamiento durante la digestión *in vitro* de harina de col morada (*Brassica oleracea var. Capitata F. rubra*)

#### Resumen

La col morada (*Brassica oleracea var. capitata f. rubra*) es una hortaliza que se produce para su uso en la elaboración de diversos platillos culinarios. Destaca por su alto contenido de agua, proteínas, minerales, fibra y su bajo aporte de grasa. Contiene compuestos bioactivos como antocianinas, fenoles y flavonoides necesarios para neutralizar radicales libres en el cuerpo humano. Se elaboró una harina para evaluar las características fisicoquímicas y propiedades antioxidantes de la col morada y su comportamiento mediante una digestión *in vitro*. Los resultados mostraron que la harina de col morada es rica en carbohidratos  $68.61 \pm 0.15$  %, proteínas  $15.57 \pm 0.17$  % y cenizas  $8.71 \pm 0.53$  %, además de ser baja en grasas  $0.55 \pm 0.03$   $0.55 \pm 0.03$  %. Los compuestos bioactivos y las propiedades antioxidantes presentaron un comportamiento descendente en cada fase digestiva. En conclusión, los antioxidantes sufren una degradación en las diferentes fases de la digestión *in vitro*.

#### Palabras clave:

Composición químico proximal, antocianinas, fenoles, digestibilidad, col morada.

## Abstract

Purple cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra*) is a vegetable that is produced for use in the preparation of various culinary dishes. It stands out for its high content of water, proteins, minerals, fiber and its low-fat content. It contains bioactive compounds such as anthocyanins, phenols and flavonoids necessary to neutralize free radicals in the human body. A flour was prepared to evaluate the physicochemical characteristics and antioxidant properties of purple cabbage and its behavior through *in vitro* digestion. The results showed that red cabbage flour is rich in carbohydrates  $68.61 \pm 0.15\%$ , proteins  $15.57 \pm 0.17\%$  and ash  $8.71 \pm 0.53\%$ , in addition to being low in fat  $0.55 \pm 0.03\%$ . Bioactive compounds and antioxidant properties showed a decreasing behavior in each digestive phase. In conclusion, antioxidants suffer degradation in the different phases of *in vitro* digestion.

## Key words:

Proximate chemical composition; anthocyanins; phenols; digestibility; purple cabbage flour

## Introducción

Las hortalizas son plantas comestibles utilizadas como alimento, se caracterizan por ser utilizadas en gran medida sin ninguna transformación industrial y se cultivan de forma intensiva (FAO, 2020). El género *Brassica* incluye varias plantas que tienen importancia económica debido a que proporcionan raíces, hojas y semillas oleaginosas comestibles incluidas la col (*Brassica oleracea* var. *capitata*), la col rizada (*Brassica oleracea* var. *sabellica*), el brócoli (*Brassica oleracea* var. *itálica*), las coles de Bruselas (*Brassica oleracea* var. *gemmifera*), la coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) (Shah et al., 2021). De este género, *oleracea* es una de las especies más consumidas en todo el mundo (Šamec & Salopek-Sondi, 2019), debido a su consumo en estado fresco en diferentes platillos (Hanschen, 2020) y a su composición química, que incluye micronutrientes y fitoquímicos, como vitaminas A, C y K,

polifenoles totales, glucosinolatos y antocianinas (Drozdowska *et al.*, 2020). El color de la col está influenciado por varios factores, incluido el pH del suelo y la cantidad de las 30 antocianinas que se encuentran en la col morada, que contienen principalmente derivados de cianidina-3-diglucósido-5 glucósidos en formas aciladas o no acetiladas (Ahmadiani *et al.*, 2019). Las antocianinas muestran efectos sobre la salud en humanos, como antiinflamatorios, antidiabéticos y una alta compatibilidad con los sistemas biológicos (Farooq *et al.*, 2020). Sin embargo, para conferir estos efectos benéficos sobre la salud, los compuestos antioxidantes deben encontrarse biodisponibles después del tracto digestivo, llegando al intestino delgado considerablemente reducidos, afectando su biodisponibilidad (Izzo *et al.*, 2020). Con base en lo anterior, se realizó una caracterización fisicoquímica de la obtención de la molienda de col morada deshidratada (harina) (*Brassica oleracea var. capitata f. rubra*) enfatizando en el contenido de compuestos bioactivos y su capacidad antioxidante para apreciar su comportamiento antes y después de ser sometida a la digestión *in vitro* en las tres diferentes fases: oral, gástrica e intestinal y evaluar su biodisponibilidad.

## **Materiales y Métodos**

### **Obtención de la materia prima**

Se obtuvieron 45 kg de col morada fresca (*Brassica oleracea var. capitata f. rubra*) en la central de abastos de Pachuca de Soto, Hidalgo, México, en la temporada de junio a julio del 2021. Las hojas de la hortaliza se lavaron con solución de hipoclorito de sodio al 1 % para después dejarlas escurrir y proceder a cortarlas en tiras, las cuales fueron extendidas en charolas para llevar a deshidratar en un horno de secado con flujo de aire (BOV-T70C) a temperatura constante de 45 °C durante 36 h. Posteriormente se molió con ayuda de un molino modelo HC-2000Y (Jiawanshun, HC-2000Y, China) y se tamizó en un tamiz de acero inoxidable con malla del Núm. 100, posteriormente se almacenó en bolsas herméticas metalizadas hasta su uso.

### **Análisis químico proximal**

Se realizó por triplicado en la harina de col morada determinando por gravimetría la humedad (925.10), fibra (985.29) y cenizas (923.03), el contenido de lípidos se determinó por método de Soxhlet utilizando como disolvente éter de petróleo (920.39), el contenido de proteína fue determinado por método Kjeldahl (920.87) y finalmente se obtuvo el contenido de carbohidratos totales por diferencia (AOAC, 2005).

### **Actividad de agua (aW)**

La determinación de la actividad de agua se realizó con en el equipo HygroPalm AW-1 con una sonda AW-DIO después de 10 min de lectura a 23°C (Budryn *et al.*, 2013).

### **pH**

El pH se midió aplicando el método AOAC (2005)10.035, para esto se pesaron 5 g de harina de col morada y se disolvieron en 25 mL de agua destilada, y se midió directamente con un potenciómetro previamente calibrado (buffers pH 4,7 y 10) (HINOTEK®) (AOAC, 2005).

### **Sólidos solubles (°Brix)**

La cantidad de sólidos solubles totales se determinó aplicando la norma ISO 2173:2003, se pesó 1 g de muestra y se diluyó en 10 mL de agua destilada; se utilizó un refractómetro (ATAGO SMART 1) (ISO, 2003).

### **Azúcares reductores Totales y Directos por el método DNS**

Para determinar los azúcares reductores de la harina de col morada se preparó el reactivo DNS (3,5-dinitrosalicílico), primero se realizó una curva patrón a partir de glucosa al 0.2 % y se realizaron diluciones a concentraciones que fueron de 0.2 g/L hasta 2.0 g/L. Posteriormente se determinaron por triplicado los azúcares reductores totales (ART) en donde se colocó en un tubo de ensaye 0.5 g de muestra, 2.6 mL de agua destilada y 300 µL de HCl al 5 %, después se agitó el contenido en un vortex y se calentó en baño maría a 60 °C por 30 min., posteriormente se realizó un choque térmico en agua con hielo, se ajustó el

pH entre 6 a 8 con una solución de KOH 3N y se aforo el contenido a 15 mL. De esta muestra hidrolizada se tomaron 500  $\mu$ L y se colocaron en un tubo de ensaye con 500  $\mu$ L de DNS para calentar a ebullición por 5 min, después se enfrió en agua con hielo y se agregaron 5 mL de agua destilada homogenizando perfectamente, las lecturas se realizaron en el espectrofotómetro a 540 nm. Para los azúcares reductores directos (ARD), se colocaron 0.5 g de muestra en un vaso de precipitado y se le agregaron 5 mL de agua destilada, se ajustó pH entre 6 a 8 con una solución de KOH al 3N y después se aforó a 10 mL con agua destilada, de la muestra se tomaron 500  $\mu$ L y se colocaron en un tubo de ensaye y se le agregaron 500  $\mu$ L de DNS, se calentaron a ebullición por 5 min., se enfrió en agua con hielo y se le agregaron 5 mL de agua destilada, finalmente se homogenizó y se realizó la lectura a 540 nm. (Miller, 1959).

### **Tamiz fitoquímico**

Los compuestos químicos presentes en la harina de col morada se determinaron realizando los siguientes ensayos fitoquímicos de reacciones colorimétricas de acuerdo a Beltrán *et al.* (2013): alcaloides por prueba de Mayer, los esteroides con la reacción de Liebermann-Burchard, insaturaciones, sesquiterpenlactonas por la prueba de Baljet, flavonoides por prueba del ácido sulfúrico, saponinas mediante la prueba de Salkowski y prueba de Shinoda, cumarinas con la prueba de hidróxido de sodio, oxhidrilos fenólicos con la prueba del cloruro de hierro, glicósidos de antraquinona (prueba de Borntrager), glucósido cardíaco (prueba de Keller-Killiani), quinonas (ensayo de Bornträger), taninos (ensayo de cloruro férrico) y antocianinas con la prueba del ácido clorhídrico.

### **Cuantificación de antocianinas totales**

Se cuantificó el contenido total de antocianinas monoméricas mediante el método de pH diferencial utilizando las ecuaciones descritas en la AOAC (2005). Se prepararon dos soluciones *buffer*: una de KCl 0.025 M ajustando el pH a 1 con HCl y otra de acetato de sodio 0.5 M ajustando el pH a 4.5 con HCl. Se hicieron reaccionar de forma independiente 2 mL de los dos diferentes buffers con 0.5 mL del sobrenadante obtenido de la mezcla de harina de col

con agua destilada para dejarlos reposar por 15 min y posteriormente se traspasó el contenido a las celdas de cuarzo de 10 mm de longitud para colocarlas en el espectrofotómetro (Shimadzu, UV-1280, EUA), ambas celdas se leyeron a una longitud de onda de de 520 y 700 nm. Esto se hizo por triplicado. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de cianidina-3-glu (mg Cyn-3-glu) (Lee *et al.*, 2005).

### **Fenoles totales**

La cuantificación de fenoles totales se realizó por triplicado reaccionando 1580  $\mu$ L del sobrenadante (harina de col morada mezclada con agua destilada, llevada a la centrifuga por 5 min a 10,000 rpm (728 g) con 100  $\mu$ L Folin-Ciocalteu y dejando reposar en completa oscuridad por 8 min para posteriormente agregar 200  $\mu$ L de solución de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , al 20 %, una vez homogeneizado se colocó a baño maría a 50 °C por 50 min para después colocar en las celdas de cuarzo y leer en el espectrofotómetro (Shimadzu, UV-1280, EUA) a una absorbancia de 765 nm. Se realizó la curva de calibración de ácido gálico y los resultados se expresaron como miligramos de equivalentes de ácido gálico (Nguyen *et al.*, 2020).

### **Flavonoides totales**

El contenido total de flavonoides se determinó de acuerdo a Lin & Tang (2007) con algunas modificaciones (sustituyendo el alcohol por metanol) mezclando 1 g de harina de col morada en 5 mL de metanol (100 %), se homogeneizaron y centrifugaron a 10,000 rpm (728 g) durante 15 min. Luego, se colocaron 2 mL del sobrenadante en un tubo de ensayo y se le agregaron 2 mL de  $\text{AlCl}_3$  al 2%, y la mezcla se mantuvo en oscuridad durante 20 min. La absorbancia a 415 nm se midió con un espectrofotómetro (Shimadzu, UV-1280, EUA). Se usó quercetina para la curva estándar. El contenido total de flavonoides se expresó en mg de equivalente de quercetina/100 g de harina de col morada (mg QE/100 g).

## **Actividad antioxidante**

### **DPPH**

Se preparó la solución estándar de radicales de 2000 ppm del radical libre 1,1-difenil-2-picril-hidrazilo (DPPH\*) en metanol grado analítico, la cual se almacenó a 0 °C, en recipiente ámbar recubierto con papel aluminio para mayor protección contra luz. Se obtuvo el sobrenadante mezclando harina de col morada con agua destilada y se centrifuga por 5 min a 10,000 rpm (728 g). Se añadieron 1.95 mL de la solución estándar de radicales y se mezcló con 0.05 mL del sobrenadante previamente obtenido, se dejó reposar en total oscuridad por 30 min, posteriormente la absorbancia a 517 nm se midió con un espectrofotómetro (Shimadzu, UV-1280, EUA). Se realizó la curva de calibración con Trolox y los resultados fueron expresados en mg equivalentes de Trolox (Brand *et al.*, 1995; Xu *et al.*, 2014).

### **ABTS**

Se preparó una solución combinada con persulfato potasio al 2.45 mM, durante una prueba previa de mezcla de 16 h. El radical se ajustó en un espectrofotómetro (Shimadzu, UV-1280, EUA) con una longitud de onda de 732 nm a  $0.7 \pm 0.02$  nm de absorbancia a una longitud de onda de 732 nm para después en un tubo de ensayo mezclar 1.450 mL de radical y 50  $\mu$ L de muestra, se dejó reaccionar durante 30 min en oscuridad total, la absorbancia a 732 se midió con un espectrofotómetro (Shimadzu, UV-1280, EUA). Se realizó la curva de calibración con Trolox y los resultados fueron expresados en mg equivalentes de Trolox (mg ET) (Re *et al.*, 1999; Minekus *et al.*, 2014).

### **Digestión *in vitro* de los compuestos bioactivos y capacidad antioxidante**

La simulación *in vitro* de la digestión gastrointestinal de la harina de col morada se realizó según Minekus *et al* (2014) con algunas modificaciones (mayor cantidad de agua y solución salivaría en la fase oral). Esta se dividió en tres etapas: (a) Fase oral, en donde 2 g de harina de col morada se mezclaron con 9.950 mL de agua, 3.5 mL de solución salivaria simulada, 1500 U de  $\alpha$ -amilasa

y 25  $\mu\text{L}$  de  $\text{CaCl}_2$  0,3 M. La mezcla se incubó en baño maría a 37 °C, con agitación, durante 2 min. (b) Fase gástrica; 10 mL de muestra líquida de la fase oral se mezclaron con 7.5 mL de solución gástrica simulada, 2500 U de pepsina porcina, 5  $\mu\text{L}$  de  $\text{CaCl}_2$  0.3 M, 0.2 mL de HCl 1M para llegar a pH 3.0 y 0.695 mL de agua. La mezcla se incubó en baño maría a 37 °C, con agitación, durante 120 min. (c) Fase intestinal, 10 mL de fase gástrica se mezclaron con 11 mL de solución intestinal simulada, se añadió líquido pancreático al 10 % (0.4 g de pancreatina y 2.5 g de sales biliares en 100 mL de  $\text{NaHCO}_3$  0.1 M), se ajustó el pH a 7 con  $\text{NaHCO}_3$  0.5 M la mezcla se incubó en un baño maría a 37 °C, con agitación, durante 120 min. Se tomaron cuatro muestras para su posterior análisis: de la harina de col morada antes de iniciar la digestión, y al finalizar cada fase, oral, la gástrica y la intestinal. Todas las muestras se centrifugaron a 10,000 rpm (728 g) durante 10 min a 4 °C con una centrífuga (Hermle, Z 36 HK, Gosheim, Alemania) y posteriormente se mantuvieron en refrigeración hasta su análisis para la determinación de antocianinas, fenoles totales, flavonoides, capacidad antioxidante con el reactivo 2,2'-Azino-bis (ácido 3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) ( $\text{ABTS}^+$ ) y 2,2-Difenil-1-picrilhidrazilo ( $\text{DPPH}^+$ ).

### **Análisis estadístico**

El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el paquete estadístico SPSS 25.0 (SPSS Inc., Chicago, IL). Los datos recopilados fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA). Al encontrar diferencias significativas se realizó una prueba de comparación de medias de Tukey, considerando un nivel de significancia de  $p < 0.05$ .

### **Resultados y Discusión**

#### **Obtención y caracterización fisicoquímica de la harina de col morada**

De los 45 kg de col morada fresca se obtuvieron un total de 4.44 kg de harina, lo que representa un 9.88 % de rendimiento en comparación al peso inicial. Similares resultados reportan Rodríguez *et al.* (2019), donde obtienen 9.31% de materia seca. En la Tabla 1 se observan los resultados obtenidos del análisis químico proximal. En un estudio realizado por Brito *et al.* (2020), reportan que

en harina de col rizada tuvieron una concentración de humedad  $10.35 \pm 3.33$  % y cenizas  $18.05 \pm 0.66$  %, la diferencia de humedad pudo ser debido al método de secado utilizado, habiendo una diferencia en la temperatura y tiempo empleado ( $65^{\circ}\text{C}$  por 6 h) además de las diferentes partes de la hortaliza usada, ya que ellos ocuparon solamente los tallos, los cuales concentran mayor humedad. En relación con las cenizas, Mariga *et al.* (2012), reportan datos similares a Brito *et al.* (2020), por lo que se puede confirmar que la col rizada posee mayor contenido de cenizas en comparación a la col morada. En cuanto a los lípidos, Brito *et al.* (2020) reportan un total de  $0.80 \pm 0.53$  %, valor similar al obtenido en la harina de col morada  $0.55 \pm 0.03$  %. Para proteína reportan valores inferiores  $12.28 \pm 1.28$  % lo que pudo deberse a la parte de la hortaliza empleada y al contenido de humedad que esta contenía.

**Tabla 1. Análisis químico proximal en harina de col morada.**

<b>Parámetro (%)</b>	<b>Harina de col morada</b>
Humedad	$6.01 \pm 0.53$
Grasa	$0.55 \pm 0.03$
Fibra	$0.1 \pm 0.01$
Proteína	$15.57 \pm 0.17$
Cenizas	$8.71 \pm 0.53$
Carbohidratos	$68.61 \pm 0.15$

### **Actividad de agua (aW), pH, °Brix y azúcares reductores directos y totales (ARD Y ART)**

El valor de aW se encuentra dentro de los indicados de acuerdo con Ohaco, (2016) quien menciona que valores de aW inferiores de 0.6 son aceptados para que un producto deshidratado sea estable y que las reacciones de degradación ocurran a baja velocidad. Rodríguez *et al.* (2019), realizaron un análisis fisicoquímico en harina de col morada, obteniendo un pH de  $4.66 \pm 0.03$ , valor inferior al de esta investigación, lo que pudo deberse a las condiciones del suelo donde se cultivó. Los sólidos solubles totales obtuvieron un valor superior de  $16.7 \pm 1.01$  mg eq de glucosa, esto pudo deberse a la temporada del año en la que recolectaron la hortaliza y al nivel de maduración de la misma

de acuerdo a lo que reportan Cepeda *et al.* (2009), en relación al contenido de los sólidos solubles totales y el momento de corte en frutas y hortalizas Valencia *et al.*, (2020), determinaron los azúcares reductores en extracto de col morada fresca la cual presento  $0.93 \pm 0.01$  mg eq de glucosa, valor inferior en comparación al presente trabajo, atribuido al tratamiento empleado; ya que en el extracto pudieron estar diluidos mientras que en la harina se encontraban concentrados debido a la pérdida de humedad.

**Tabla 2. Actividad de agua (aW), pH y °Brix en harina de col morada**

<b>Parámetro</b>	<b>Harina de col morada</b>
aW	0.281±0
pH	6.15±0.02
°Brix	6.6±0.01
ARD (mg eq glucosa)	4.17±0.15
ART (mg eq glucosa)	6.01±0.08

ARD= Azúcares reductores directos

ART= Azúcares reductores totales

### **Tamiz fitoquímico**

Se detectó la presencia de alcaloides, insaturaciones, compuestos fenólicos, sesquiterpenlactonas, flavonoides, saponinas, taninos y antocianinas (Tabla 3). Fernández *et al.*; (2019), quienes realizaron un tamizaje fitoquímico al extracto etanolito de las hojas de col morada, se obtuvo la presencia de alcaloides, compuestos fenólicos, flavonoides, taninos y antocianinas, resultados similares a los del presente estudio.

**Tabla 3. Tamiz fitoquímico de harina de col morada**

Metabolito	Resultado
Alcaloides	+
Insaturaciones	+
Compuestos fenólicos	+
Sesquiterpenlactonas	+
Flavonoides	+
Saponinas	+
Cumarinas	-
Esteroles	-
Taninos	+
Antocianinas	+

+ = Presencia

- = Ausencia

### **Compuestos bioactivos, actividad antioxidante y su comportamiento durante la digestión *in vitro***

Se observaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en los valores de los compuestos bioactivos de la harina de col morada tras ser sometida a la fase oral. La actividad antioxidante no presentó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). Reyes *et al.*, (2023), mencionan la acción de la  $\alpha$ -amilasa como catalizadora en el rompimiento de las cadenas de azúcares quienes están asociados a los compuestos bioactivos, por lo que puede deberse la disminución de los compuestos bioactivos a este suceso. Podsędek *et al.* (2014), obtuvieron de antocianinas en col morada fresca un  $34.28 \pm 1.60$  mg/100 g (eq Cianidina 3 glucosidada) y para compuestos fenólicos  $108.78 \pm 7.61$  mg/100 g (eq ácido gálico), estos datos son inferiores al presente estudio; debido a la concentración de los compuestos por parte de la harina en relación a la humedad que posee en estado fresco. En relación a la actividad antioxidante Thi Tran *et al.* (2022), obtuvieron en un extracto con cloroformo de hojas deshidratadas de col morada para ABTS una actividad de  $87.86 \pm 0.16$  % y para DPPH  $92.08 \pm 0.66$  %, valores superiores en comparación a esta investigación debido posiblemente a los solventes empleados, ya que primero hicieron una extracción de compuestos no polares con hexano para posteriormente usar el

cloroformo en la extracción de los compuestos antioxidantes, lo que pudo favorecer el incremento de la actividad.

### **Fase gástrica (GP)**

Hubo una disminución de los compuestos bioactivos y en la actividad antioxidante en comparación a la fase oral. Esto puede deberse a que las condiciones del trayecto gástrico provocan algún tipo de hidrólisis o reacción con otros compuestos como el ácido estomacal o las enzimas que afectan la capacidad antioxidante (Zampedri *et al.*, 2018). Podsędek *et al.*, (2014), realizaron una digestión *in vitro* al extracto de col morada (metanol al 70 %) presentando un comportamiento de disminución similar, ellos concluyeron que las antocianinas se ven afectadas por la composición de la col y los componentes vegetales, incluida la fibra dietética.

### **Fase intestinal (IP)**

Los compuestos bioactivos y la actividad antioxidante presentaron una disminución habiendo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en comparación a las diferentes fases. Podsędek *et al.* (2014) reportan que, durante la digestión intestinal, la estabilidad de las antocianinas depende en gran medida de las matrices alimentarias. Por lo anteriormente mencionado y por lo obtenido en este estudio se puede deducir que las antocianinas se ven degradadas tras el paso digestivo. Izzo *et al.* (2020), realizaron una digestión *in vitro* en extracto de col morada con ácido fórmico (MeOH:H<sub>2</sub>O (6:4) 0.1 % FA) iniciando con un total de  $19.98 \pm 0.13$  y terminando en fase intestinal con  $22.28 \pm 0.29$  (mg/g eq ácido gálico), teniendo una potencialización de los compuestos fenólicos, efecto contrario a lo obtenido en este trabajo, lo que pudo deberse a la polaridad de los solventes empleados, consiguiendo en el extracto metanol-agua un tipo de antocianinas que con el pH modifiquen su estructura, además ellos mencionan que durante la digestión gastrointestinal, los compuestos bioactivos podrían ser metabolizados por la microflora colónica humana, generando metabolitos con mayor bioactividad y más efectos beneficiosos. Sodagari *et al.* (2015), reportan que hasta el 70 % de las antocianinas derivadas

de los alimentos podrían llegar al colon, por lo que una ingesta regular de alimentos ricos en antocianinas podría tener efectos beneficiosos para la salud humana.

**Tabla 4. Compuestos bioactivos, capacidad antioxidante y digestión *in vitro* en harina de col morada**

Compuesto/actividad	PCF	OP	GP	IP
Antocianinas mg/g eq Cianidina 3 glucosidada	1.18±0.00 <sup>a</sup>	1.15±0.00 <sup>b</sup>	0.72±0.00 <sup>c</sup>	0.57±0.00 <sup>d</sup>
Fenoles mg/g eq ácido gálico	11.36±0.01 <sup>a</sup>	10.35±0.02 <sup>b</sup>	8.85±0.06 <sup>c</sup>	3.77±0.13 <sup>d</sup>
Flavonoides mg/g eq Quercetina	3.13±0.09 <sup>a</sup>	2.69±0.02 <sup>b</sup>	0.13±0.00 <sup>c</sup>	0.09±0.00 <sup>c</sup>
ABTS % inhibición	73.24±1.08 <sup>a</sup>	71.23±1.08 <sup>ab</sup>	70.48±1.14 <sup>b</sup>	68.94±0.48 <sup>b</sup>
DPPH % inhibición	83.68±0.06 <sup>a</sup>	83.18±0.21 <sup>a</sup>	49.55±0.30 <sup>b</sup>	44.10±0.14 <sup>c</sup>

Diferentes letras minúsculas en las columnas representan una diferencia significativa ( $p < 0,05$ ) con una comparación de medias mediante la prueba de Tukey. PCF = Harina de col morada, OP = Fase oral, GP = Fase gástrica, IP = Fase intestinal.

## Conclusiones

La harina de col morada es rica en nutrimentos como carbohidratos y proteína, además posee un bajo aporte de grasa. En cuanto a los compuestos bioactivos contiene fenoles, flavonoides y antocianinas a los cuales se les atribuye la actividad antioxidante, sin embargo, estos compuestos sufren una disminución tras ser sometidos a la digestión *in vitro*, por lo que se sugiere la evaluación de su capacidad en un modelo *in vivo* para comprobar su funcionalidad.

## Referencias

- Ahmadiani, N., Sigurdson, G. T., Robbins, R. J., Collins, T. M., & Giusti, M. M. (2019). Solid phase fractionation techniques for segregation of red cabbage anthocyanins with different colorimetric and stability properties. *Food Research International*, 120, 688-696. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.11.026>
- AOAC (2005). Association of Official Analytical Chemistry. 18th Ed. Gaithersburg, MD (Estados Unidos): AOAC International; 2005.
- Beltrán Villanueva, C.E., Díaz Castillo, F., Gómez Estrada, H. (2013). Tamizaje fitoquímico preliminar de especies de plantas promisorias de la costa atlántica colombiana. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 18(4), 619-631. Recuperado en 23 de julio de 2023, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1028-47962013000400013&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1028-47962013000400013&lng=es&tlng=es). ISSN 1028-4796.
- Brand-Williams W., Cuvelier M.E., Berset C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Sci. Technol.*, 28(1):25-30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Brito, T. B. N., Pereira, A. P. A., Pastore, G. M., Moreira, R. F. A., Ferreira, M. S. L., & Fai, A. E. C. (2020). Chemical composition and physicochemical characterization for cabbage and pineapple by-products flour valorization. *LWT*, 124, 109028. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109028>.
- Budryn, G., Żyżelewicz, D., Nebesny, E., Oracz, J., & Krysiak, W. (2013). Influence of addition of green tea and green coffee extracts on the properties of fine yeast pastry fried products. *Food Research International*, 50(1), 149-160. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.10.006>
- De Michelis A, Ohaco E. 2016. Deshidratación y desecado de frutas, hortalizas y hongos. Procedimientos hogareños y comerciales de pequeña escala.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina.

- Drozdowska, M., Leszczyńska, T., Koronowicz, A., Piasna-Słupecka, E., Domagała, D., & Kusznierevicz, B. (2020). Young shoots of red cabbage are a better source of selected nutrients and glucosinolates in comparison to the vegetable at full maturity. *European Food Research and Technology*, 246(12), 2505-2515. <https://doi.org/10.1007/s00217-020-03593-x>
- FAO. 2020. Fruit and vegetables – your dietary essentials. The International Year of Fruits and Vegetables, 2021, background paper. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb2395en>
- Farooq, S., Shah, M. A., Siddiqui, M. W., Dar, B. N., Mir, S. A., & Ali, A. (2020). Recent trends in extraction techniques of anthocyanins from plant materials. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14, 3508-3519. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00598-8>
- Fernández Rebaza, G. A., Chambi Velasquez, Y. M., Ayme Huamaní, J. M., Quiñones Huayaney, M. E., Tolentino Chavez, J. L., & Bonilla Rivera, P. E. (2019). Estudio etnobotánico y fitoquímico de hojas de Brassica oleracea L. "Col morada". *Ciencia & Desarrollo*, (20), 7–11. <https://doi.org/10.33326/26176033.2015.20.498>
- Hanschen, F.S. (2020). Domestic boiling and salad preparation habits affect glucosinolate degradation in red cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata f. rubra). *Food Chemistry*. 321, 126694. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126694>.
- International Organization for Standardization, ISO. (2003). ISO: 2173:2003 Fruit and vegetable products – Determination of soluble solid- Refractometric method.
- Izzo, L., Rodríguez-Carrasco, Y., Pacifico, S., Castaldo, L., Narváez, A., & Ritieni, A. (2020). Colon bioaccessibility under in vitro gastrointestinal digestion

of a red cabbage extract chemically profiled through UHPLC-Q-Orbitrap HRMS. *Antioxidants*, 9(10), 955. <https://doi.org/10.3390/antiox9100955>

Lee, J., Durst, R.W., Wrolstad, R. (2005). Total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines. *J. AOAC Int*, 88, 1269. <https://doi.org/10.1093/jaoac/88.5.1269>

Lin, J. Y., & Tang, C. Y. (2007). Determination of total phenolic and flavonoid contents in selected fruits and vegetables, as well as their stimulatory effects on mouse splenocyte proliferation. *Food chemistry*, 101(1), 140-147. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.01.014>

Miller, G. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*, 31 (3). pp. 426-428. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>

Minekus, M., Alminger, M., Alvito, P., Ballance, S., Bohn, T. O. R. S. T. E. N., Bourlieu, C., & Brodkorb, A. (2014). A standardised static in vitro digestion method suitable for food—an international consensus. *Food & function*, 5(6), 1113-1124. <https://doi.org/10.1039/C3FO60702J>

Nguyen, H. K. N., Le Ngoc, T. P., PhanThiKieu, L., Tran Thanh, T., & Mai Huynh, C. (2020). Bioactive compounds from red cabbage by microwave-assisted extraction: anthocyanins, total phenolic compounds and the antioxidant activity. *Asian Life Sciences*, 12, 172-184. E-ISSN: 2230-8204 P-ISSN: 0117-3375

Podsędek, A., Redzyna, M., Klewicka, E., & Koziółkiewicz, M. (2014). Matrix effects on the stability and antioxidant activity of red cabbage anthocyanins under simulated gastrointestinal digestion. *BioMed research international*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/365738>.

Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation

decolorization assay. *Free radical biology and medicine*, 26(9-10), 1231-1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3).

Reyes-Morales, K. G., Michel, M. R., Gallegos-Infante, J. A., & González-Laredo, R. F. (2023) *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*.

Rodríguez-Basantes, A. I., Esparza-Bonilla, C. J., & Huacho-Chávez, I. F. (2019). Obtención de antocianinas de la Brassica oleracea var. Capitata para el uso en alimentos. *Dominio De Las Ciencias*, 5(1), 652–666. <https://doi.org/10.23857/dc.v5i1.1067>

Šamec, D., & Salopek-Sondi, B. (2019). Cruciferous (brassicaceae) vegetables. In *Nonvitamin and nonmineral nutritional supplements* (pp. 195-202). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812491-8.00027-8>.

Shah, A. N., Tanveer, M., Abbas, A., Fahad, S., Baloch, M. S., Ahmad, M. I. & Song, Y. (2021). Targeting salt stress coping mechanisms for stress tolerance in Brassica: A research perspective. *Plant Physiology and Biochemistry*, 158, 53-64. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.044>.

Sodagari, H. R., Farzaei, M. H., Bahramsoltani, R., Abdolghaffari, A. H., Mahmoudi, M., & Rezaei, N. (2015). Dietary anthocyanins as a complementary medicinal approach for management of inflammatory bowel disease. *Expert review of gastroenterology & hepatology*, 9(6), 807-820. <https://doi.org/10.1586/17474124.2015.1002086>.

Tianyi Yue, Yage Xing, Qinglian Xu, Shuang Yang, Lin Xu, Xiaomin Wang & Ping Yang (2021) Physical and chemical properties of purple cabbage as affected by drying conditions, *International Journal of Food Properties*, 24:1, 997-1010, DOI: 10.1080/10942912.2021.1953070.

Tran, H. T. T., Lubis, K., Van Doan, H., Ho, T. N., & Nguyen, K. T. T. 2022. Antioxidant potential of red and white cabbage: A comparison. *JBIO*:

Jurnal Biosains, 8(2), 57-65.  
<https://jurnal.unimed.ac.id/2012/index.php/biosains/article/view/36656>.  
<https://doi.org/10.24114/jbio.v8i2.36656>

Valencia-Arredondo, J. A., Hernández-Bolio, G. I., Cerón-Montes, G. I., Castro-Muñoz, R., & Yáñez-Fernández, J. (2020). Enhanced process integration for the extraction, concentration and purification of di-acylated cyanidin from red cabbage. *Separation and Purification Technology*, 238, 116492. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116492>.

Xu, F., Zheng, Y., Yang, Z., Cao, S., Shao, X., & Wang, H. (2014). Domestic cooking methods affect the nutritional quality of red cabbage. *Food chemistry*, 161, 162–167. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.04.025>

Zampedri CA, Zampedri PA, Scattolaro O, Zapata LM, Castagnini JM. 2018. Evaluación de la digestión in vitro de compuestos bioactivos de arándanos. *Ciencia, Docencia y Tecnología* 29: 285-295.

## Capítulo 2

### **Evaluación de la capacidad antioxidante de harina de col morada (*Brassica oleracea var. Capitata F. rubra*) sobre el estrés oxidativo inducido por medio de actividad física en ratas Wistar**

#### **Resumen**

Este estudio aborda el fenómeno del estrés oxidativo inducido por el ejercicio físico y la potencial utilidad de la suplementación con harina de col morada (*Brassica oleracea var. capitata f.rubra*) como antioxidante de origen vegetal para mitigar sus efectos negativos, debido a que durante la actividad física, el aumento en la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) puede superar las defensas antioxidantes endógenas, generando un desequilibrio redox que puede contribuir a la fatiga muscular, lesiones y alteraciones en la homeostasis celular. Las ratas macho de la línea Wistar inducidas al ejercicio presentaron valores más altos de lactato en sangre en comparación a las ratas que no realizaban ejercicio. Así mismo se observó que la capacidad antioxidante en el plasma aumentó en las ratas que eran inducidas al ejercicio con y sin suplementación de la harina de col morada, pero el mayor aumento en la capacidad antioxidante del plasma lo presentaron las ratas que se inducían al ejercicio y eran suplementadas con la harina de col morada. De igual forma el análisis químico proximal de la carne de las ratas inducidas por el ejercicio y suplementadas con la col morada demostró un aumento en la proteína y cenizas además de una disminución en el porcentaje de grasa. En conclusión, este trabajo proporciona datos para el uso de la harina de col morada como antioxidante natural que ayuda a prevenir y a disminuir el estrés oxidativo inducido por el ejercicio.

#### **Palabras clave:**

Col morada, estrés oxidativo, capacidad antioxidante

#### **Abstract**

This study addresses as an objective the phenomenon of oxidative stress induced by physical exercise and the potential usefulness of supplementation

with purple cabbage flour (*Brassica oleracea var. capitata f.rubra*) as an antioxidant of plant origin to mitigate its negative effects, due to that during physical activity, the increase in the production of reactive oxygen species (ROS) can overcome endogenous antioxidant defenses, generating a redox imbalance that can contribute to muscle fatigue, injuries and alterations in cellular homeostasis. Male rats from the Wistar line induced to exercise had higher blood lactate values compared to rats that did not exercise. Likewise, it was observed that the antioxidant capacity in the plasma increased in the rats that were induced to exercise with and without supplementation of purple cabbage flour, but the greatest increase in the antioxidant capacity of the plasma was presented in the rats that were induced to exercise. and they were supplemented with purple cabbage flour. Likewise, the proximal chemical analysis of the meat of rats induced by exercise and supplemented with purple cabbage demonstrated an increase in protein and ash in addition to a decrease in the percentage of fat. In conclusion, this work provides data for the use of red cabbage flour as a natural antioxidant that helps prevent and reduce oxidative stress induced by exercise.

**Keywords:**

Purple cabbage, oxidative stress, antioxidant capacity

**Introducción**

La práctica regular del ejercicio físico ha sido altamente promovida debido a sus múltiples efectos beneficiosos para la salud, entre los cuales destacan el aumento de la función cardiovascular y respiratoria, la mejora de la composición corporal, entre otros (Pedersen & Saltin, 2015). Sin embargo, diversos estudios mencionan que su realización desencadena respuestas bioquímicas complejas, entre ellas la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Poblete *et al.*, 2018). La producción de ROS durante el ejercicio es inevitable y constituye un componente necesario para desencadenar adaptaciones beneficiosas, Powers *et al.* (2010) mencionan que la generación de ROS durante la contracción muscular es esencial para la señalización celular que promueve adaptaciones en la capacidad antioxidante y la resistencia muscular. Sin embargo, la dualidad del estrés oxidativo se manifiesta en su capacidad para causar daño celular cuando se produce en exceso. Fisher y

Bloomer (2009) reportan que la producción excesiva de ROS puede contribuir al daño de las biomoléculas, afectando negativamente la función celular y prolongando la recuperación post-ejercicio. La búsqueda de estrategias para contrarrestar los efectos negativos del estrés oxidativo ha llevado a explorar el potencial efecto protector de los antioxidantes naturales presentes en alimentos como la col morada. Heim *et al.* (2002) reportan que las antocianinas, compuestos antioxidantes presentes en abundancia en la col morada, han demostrado tener propiedades antiinflamatorias y antioxidantes significativas. Esto ofrece una perspectiva novedosa para modular el estrés oxidativo, aprovechando los beneficios de los fitoquímicos presentes en los alimentos. La col morada, en particular, ha atraído la atención debido a su riqueza en antocianinas, pigmentos naturales con propiedades antioxidantes. Como señalan Tsuda *et al.* (2003), las antocianinas presentes en la col morada han demostrado tener efectos antioxidantes, protegiendo las células del daño inducido por ROS". Este hallazgo respalda la idea de que la inclusión de alimentos ricos en antioxidantes naturales en la dieta puede ser una estrategia efectiva para contrarrestar los efectos negativos del estrés oxidativo.

Gonçalves *et al.* (2022), reportan que la suplementación con compuestos fenólicos antes del ejercicio puede reducir la producción de ROS y mejorar la capacidad antioxidante, contribuyendo a una recuperación más rápida. Además, Tsuda *et al.* (2005), afirman que las antocianinas han demostrado tener efectos beneficiosos en la prevención de enfermedades crónicas, como la diabetes y las enfermedades cardiovasculares. Esta doble acción, no solo centrada en la reducción del estrés oxidativo sino también en la salud general, resalta la importancia de considerar la dieta como parte integral de la gestión del estrés oxidativo inducido por el ejercicio.

El objetivo de este estudio fue optimizar los beneficios y minimizar los riesgos asociados al entrenamiento físico por medio de la incorporación de los antioxidantes naturales como los presentes en la col morada como una estrategia prometedora para modular el desequilibrio redox, proporcionando beneficios tanto en la adaptación fisiológica como en la prevención de posibles efectos adversos.

## **Materiales y métodos**

Los procedimientos utilizados en este estudio fueron previamente aprobados por el Comité de bioética para el cuidado y uso de animales de laboratorio de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) quien otorgó el código CICUAL: CICUAL/005/2022.

### **Modelo animal**

Se utilizaron 24 ratas macho de la línea Wistar con una edad de 10 semanas y un peso promedio de 300 g. Los animales se dividieron en 4 grupos de 6 animales cada uno de forma aleatoria y se enumeraron con una marca con plumón en la cola del 1-6 respectivamente. Las especificaciones de cada grupo fueron las siguientes: Grupo I (sin suplementación de harina de col morada y sin inducción al ejercicio), Grupo II (con suplementación de harina de col morada y sin inducción al ejercicio), Grupo III (sin suplementación de harina de col morada y con inducción al ejercicio) y Grupo IV (con suplementación de harina de col morada y con inducción al ejercicio). Las ratas se mantuvieron bajo las condiciones controladas de acuerdo a la NOM-062-ZOO-1999 en un ciclo luz/oscuridad de 12 h, a 22 °C con control de humedad relativa del 45 %. Se les suministro alimento para roedores (Formulab diet 5008) y agua *ad libitum*.

### **Mediciones corporales**

Los animales se pesaron en una báscula digital y se midieron con ayuda de una cinta métrica a lo largo (de nariz al ano) y circunferencia. Esto se realizó al recibirlas para posteriormente hacerlo una vez al finalizar cada semana (los días viernes) hasta la conclusión del trabajo experimental.

### **Medición del consumo de alimento y agua**

Se realizó la medición del consumo de alimento (Formulab Diet 5008) pesando en una báscula digital 500 g al inicio de la semana y al transcurrir la semana se

pesó el sobrante para así restar la diferencia. El agua se midió con ayuda de una probeta graduada al inicio de cada semana para posteriormente volver a ser medida la finalizar la semana y restar la diferencia.

### **Periodo de adaptación al circuito de entrenamiento**

Las ratas del grupo 3 y 4 fueron adaptadas por 21 días al circuito de entrenamiento para poder inducirles el estrés oxidativo. Este circuito cuadrangular constó de 4 tubos de PVC de 6" de diámetro y de 1.5 m de largo con orificios para oxigenación. Se hizo una adaptación a cada sección del circuito por 4 días en periodos de 5, 10, 15 y 20 min.

### **Inducción al estrés oxidativo y suplementación de la harina de col morada**

Posterior al periodo de adaptación se realizó por 48 días la inducción al estrés oxidativo, la cual consistió en un entrenamiento de las ratas del grupo 3 y 4 dentro del circuito por 20 min diarios 5 veces a la semana. Cada vez que se concluía con el entrenamiento, se le suministró a cada rata del grupo 4 vía intragástrica 10 mg de harina de col morada diluida en 1 mL de agua destilada. De igual forma, pero sin la inducción al estrés oxidativo se les suministró a las ratas del grupo 2 la harina de col morada.

### **Determinación de lactato en sangre**

Con ayuda del equipo Accutrend Plus y de las tiras reactivas BM-Lactate, se realizó la determinación de lactato en sangre en las ratas de los diferentes grupos (I, II, III y IV). La sangre se obtuvo por medio de la técnica de punción en cola.

Las determinaciones se hicieron el día 1 y 21, antes de empezar el periodo de adaptación y al terminarlo para posteriormente dar inicio a la fase de inducción al estrés oxidativo. La prueba se volvió a realizar a mitad de la fase de inducción al estrés oxidativo (día 42) y al finalizarla (día 65).

## **Cuantificación de la capacidad antioxidante total plasmática (FRAP)**

El método FRAP monitorea la actividad inducida por plasma en donde se hace la conversión de  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$ . La extracción de la sangre de los animales se realizó por medio de la técnica de punción del seno retro orbital, esta se recolectó en tubos vacutainer que contenían EDTA. Los tubos se conservaron a 4 °C y posteriormente se centrifugaron a 1700 RPM durante 10 min. El ensayo FRAP se realizó como lo describen Benzie y Ceba (1996). El plasma se añadió al reactivo FRAP recién preparado (tampón acetato 300 mM [pH 3.6], 10 mM TPTZ y  $\text{FeCl}_3$  20 mM). La mezcla de reacción se incubó durante 5 min a 37 °C y se leyó la absorbancia a 593 nm. El FRAP se calculó a partir de una curva estándar preparada con Trolox. Los resultados se expresaron como nmol/ml de Trolox. Las determinaciones se hicieron el día 1 y 21, antes de empezar el periodo de adaptación y al terminarlo para posteriormente dar inicio a la fase de inducción al estrés oxidativo. La prueba se volvió a realizar a mitad de la fase de inducción al estrés oxidativo (día 42) y al finalizarla (día 65).

## **Sacrificio**

Las ratas fueron eutanasiadas de acuerdo con la NOM-062-ZOO-1999 en una cámara de eutanasia con  $\text{CO}_2$ . Inmediatamente se removieron el músculo esquelético, corazón, los riñones, el hígado y los pulmones para ser colocados en formaldehído al 3.8% en solución acuosa amortiguada con fosfatos.

## **Análisis de color de la carne**

La determinación del color en la carne de los cuádriceps de las ratas se realizó posterior al sacrificio conservando la muestra en recipientes herméticos a una temperatura de 4 °C. Se hizo uso de un colorímetro Minolta CM-508d, que utiliza el sistema internacional CIELAB, el cual considera las desviaciones entre blanco y negro (luminosidad), rojo a verde y amarillo a azul, dando los parámetros  $L^*$  (luminosidad)  $a^*$  (coordenadas rojo/verde)  $b^*$  (coordenadas amarillo/azul) (Pathare *et al.*, 2012).

### **Análisis químico proximal en carne**

Se realizó por triplicado en la carne de los animales post mortem determinando por gravimetría la humedad (925.10), cenizas (923.03), el contenido de lípidos utilizando como disolvente éter de petróleo (920.39) y el contenido de proteína fue por método Kjeldahl (920.87) (AOAC, 2002).

### **Histopatología**

Las muestras que se conservaron en formaldehído al 3.8% fueron procesadas por el método de inclusión en parafina (Prophet, 1995) mediante un procesador automatizado de tejidos marca Microm, modelo TP1020, cortadas a 6  $\mu\text{m}$  en un micrótopo marca Leica modelo 2125RT a 4  $\mu\text{m}$  de grosor y coloreadas con la técnica de Hematoxilina-Eosina (H-E) (Prophet, 1995). Las preparaciones histológicas resultantes fueron observadas y analizadas con un microscopio compuesto de campo claro marca Olympus, modelo BX41. Las imágenes seleccionadas fueron capturadas con una cámara digital MediaCybernetics, Modelo Evolution VF, mediante el software Image-Pro Express 6.0 (MediaCybernetics), instalado en una computadora marca Vaio con procesador Pentium 4 y 1 Gb de RAM.

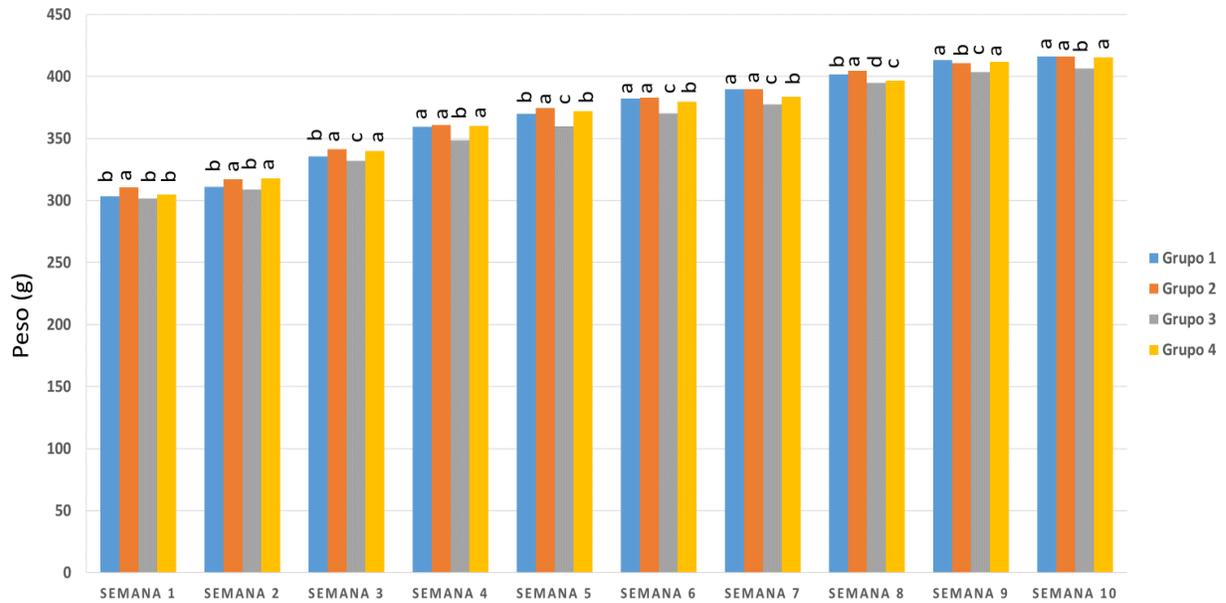
### **Análisis estadístico**

El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el paquete estadístico SPSS 25.0 (SPSS Inc., Chicago, IL). Los datos recopilados fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA). Al encontrar diferencias significativas se realizó una prueba de comparación de medias de Tukey, considerando un nivel de significancia de  $p < 0,05$ .

## Resultados y discusión

### Mediciones corporales

Como se observa en la Figura 2 y Tabla 5, los animales presentaron un aumento gradual de peso, longitud y circunferencia. En la semana 1 comenzaron con un peso promedio de  $305.17 \pm 4.01$  g, una longitud de  $21.25 \pm 0.71$  cm y una circunferencia de  $17.30 \pm 0.26$  cm. Conforme fueron transcurriendo las semanas, cada grupo fue ganando peso y aumentando sus mediciones de largo y circunferencia. Al terminar el protocolo en la semana 10, los animales obtuvieron un peso promedio final de  $413.71 \pm 4.83$  g, una longitud de  $22.60 \pm 0.31$  cm y una circunferencia de  $17.63 \pm 0.31$  cm. Se mostraron diferencias significativas entre el grupo 3 durante el trayecto de las semanas, este grupo presentó menor peso en comparación con los demás, relacionando esta información con el análisis químico proximal en la carne se puede concluir que esta disminución de peso se debió a un porcentaje menor de grasa. Un estudio realizado por Cossio *et al.* (2013) en donde se desarrollaron curvas de referencia para valorar el crecimiento físico de ratas machos Wistar en función de la edad cronológica y la maduración somática desde una perspectiva no-invasiva, muestra que en la semana 10 de crecimiento las ratas obtuvieron un peso promedio a los 300 g, peso similar al que tuvieron las ratas del presente estudio cuando se inició el experimental. De la misma forma en la semana final de su investigación (semana 18) los animales presentaron un peso final promedio de 400 g, resultado similar al obtenidos en el presente estudio en la etapa final. Por lo que los resultados en ambas investigaciones revelan que, en todos los percentiles, los valores se incrementan con el transcurso de la edad en animales que se encuentran en la fase de vida intermedia (hiperplasia-hipertrofia), que va desde los 17 hasta los 48 días de edad y en la fase final (almacenamiento), que comprende desde los 48 hasta los 160 días aproximadamente. Por otro lado, Cossio *et al.* (2013), no consideraron la medición de la longitud total y mencionan que este parámetro es una variable relevante para el seguimiento del crecimiento longitudinal de los roedores y es un predictor de la composición corporal. En la presente investigación se realizaron las mediciones de largo y de circunferencia, haciendo el aporte en esta área de estudio.



**Figura 2. Medición de peso (g)** Grupo 1 (sin suplementación de harina de col morada y sin inducción al ejercicio), Grupo 2 (con suplementación de harina de col morada y sin inducción al ejercicio), Grupo 3 (sin suplementación de harina de col morada y con inducción al ejercicio) y Grupo 4 (con suplementación de harina de col morada y con inducción al ejercicio)  
a, b, c, d literales diferentes entre filas indican diferencias significativas  $p < 0.05$

**Tabla 5. Medición de largo y ancho (cm)**

	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4	
	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho
<b>Semana 1</b>	20.33±1.08 <sup>b</sup>	16.97±0.77 <sup>a</sup>	22.00±0.54 <sup>a</sup>	17.42±0.49 <sup>a</sup>	21.08±0.66 <sup>a</sup>	17.23±0.71 <sup>a</sup>	21.58±0.97 <sup>a</sup>	17.58±0.38 <sup>a</sup>
<b>Semana 2</b>	20.83±1.16 <sup>b</sup>	17.75±0.68 <sup>a</sup>	22.08±0.49 <sup>a</sup>	17.83±0.68 <sup>a</sup>	21.17±0.68 <sup>b</sup>	17.42±1.07 <sup>a</sup>	21.67±0.88 <sup>a</sup>	17.50±1.0 <sup>a</sup>
<b>Semana 3</b>	21.92±0.80 <sup>a</sup>	18.17±0.40 <sup>a</sup>	22.08±0.49 <sup>a</sup>	18.17±0.60 <sup>a</sup>	21.42±0.37 <sup>a</sup>	17.92±0.86 <sup>a</sup>	21.67±0.81 <sup>a</sup>	17.42±0.80 <sup>b</sup>
<b>Semana 4</b>	22.00±0.0 <sup>a</sup>	18.17±0.58 <sup>b</sup>	22.17±0.72 <sup>a</sup>	19.17±0.68 <sup>a</sup>	21.58±0.37 <sup>a</sup>	18.25±0.82 <sup>b</sup>	22.08±0.49 <sup>a</sup>	18.25±0.82 <sup>b</sup>
<b>Semana 5</b>	22.00±0.0 <sup>a</sup>	17.50±0.54 <sup>a</sup>	22.17±0.75 <sup>a</sup>	17.25±0.27 <sup>a</sup>	21.92±0.49 <sup>a</sup>	17.00±0.44 <sup>a</sup>	22.17±0.40 <sup>a</sup>	16.83±0.60 <sup>a</sup>
<b>Semana 6</b>	22.00±0.0 <sup>a</sup>	17.83±0.75 <sup>a</sup>	22.33±0.51 <sup>a</sup>	17.83±0.40 <sup>a</sup>	22.00±0.0 <sup>a</sup>	17.33±0.60 <sup>a</sup>	22.25±0.41 <sup>a</sup>	17.25±1.08 <sup>a</sup>
<b>Semana 7</b>	22.00±0.0 <sup>a</sup>	17.58±0.58 <sup>a</sup>	22.33±0.51 <sup>a</sup>	17.33±0.51 <sup>a</sup>	22.00±0.0 <sup>a</sup>	17.75±0.41 <sup>a</sup>	22.25±0.41 <sup>a</sup>	18.00±0.31 <sup>a</sup>
<b>Semana 8</b>	22.00±0.0 <sup>a</sup>	17.58±0.49 <sup>a</sup>	22.42±0.49 <sup>a</sup>	17.82±0.38 <sup>a</sup>	22.08±0.20 <sup>a</sup>	17.50±0.63 <sup>a</sup>	22.33±0.40 <sup>a</sup>	17.58±0.66 <sup>a</sup>
<b>Semana 9</b>	22.08±0.20 <sup>a</sup>	18.67±0.81 <sup>a</sup>	22.83±0.25 <sup>a</sup>	18.50±0.54 <sup>a</sup>	22.58±0.37 <sup>a</sup>	17.58±0.66 <sup>b</sup>	22.83±0.51 <sup>a</sup>	17.42±0.86 <sup>b</sup>
<b>Semana 10</b>	22.17±0.26 <sup>a</sup>	18.00±0.63 <sup>a</sup>	22.83±0.25 <sup>a</sup>	17.75±0.54 <sup>a</sup>	22.58±0.37 <sup>a</sup>	17.42±0.73 <sup>a</sup>	22.83±0.51 <sup>a</sup>	17.33±0.60 <sup>a</sup>

a, b, c literales diferentes entre filas indican diferencias significativas  $p < 0.05$

### Medición del consumo de alimento y agua

En la semana 1 se obtuvo de los 4 grupos un consumo promedio de alimento de  $906.50 \pm 18.66$  g y agua de  $1472.5 \pm 28.30$  mL. Se observó que el consumo de estos fue gradualmente en aumento conforme transcurrían las semanas, sin embargo, después de la obtención de muestras de sangre el consumo presento un comportamiento de disminución en el alimento del 10.07 % y en el agua del 9.76 % en la semana 4 y en la semana 8 nuevamente se presentó la misma situación, habiendo una disminución en el consumo de alimento del 25.45 % y de agua del 26.78 %, esto en relación al consumo en la semana posterior a la obtención de las muestras de sangre en todos los grupos. Estos datos se pueden visualizar en la Tabla 6 y en la Tabla 7. Una investigación realizada por González *et al.* (2010), evaluó los efectos de dos tipos de estrés,

crónico y agudo, en situaciones de controlabilidad o incontrolabilidad sobre el peso corporal, consumo de alimento y agua en ratas, reportaron una disminución en el consumo de alimento y agua durante la exposición al estrés agudo y crónico, situación similar en la presente investigación. Además, un estudio realizado por Manhães-de-Castro *et al.* (2020) concluyó que las ratas expuestas a estrés agudo mostraron una reducción significativa en el consumo de alimento, lo cual es consistente con el fenómeno de la hipofagia inducida por estrés. También, observaron que este efecto se acompañaba de un aumento en los niveles de especies reactivas de oxígeno y un aumento en la actividad de enzimas antioxidantes en el hipotálamo. Esto sugiere que el estrés provoca un desequilibrio en el estado redox en el hipotálamo, lo que podría contribuir a la regulación del apetito y la ingestión de alimentos bajo condiciones estresantes, por lo que se asocia este hecho con lo sucedido en esta investigación.

**Tabla 6. Consumo de alimento *ad libitum* (g/semana)**

<b>Semana</b>	<b>Grupo 1</b>	<b>Grupo 2</b>	<b>Grupo 3</b>	<b>Grupo 4</b>
1	892 <sup>b</sup>	930 <sup>a</sup>	891 <sup>b</sup>	913 <sup>a</sup>
2	921 <sup>b</sup>	960 <sup>a</sup>	927 <sup>b</sup>	967 <sup>a</sup>
3	949 <sup>b</sup>	1012 <sup>a</sup>	925 <sup>c</sup>	966 <sup>b</sup>
4	872 <sup>b</sup>	905 <sup>a</sup>	818 <sup>c</sup>	872 <sup>b</sup>
5	951 <sup>a</sup>	962 <sup>a</sup>	937 <sup>b</sup>	946 <sup>a</sup>
6	880 <sup>b</sup>	908 <sup>a</sup>	895 <sup>a</sup>	877 <sup>b</sup>
7	898 <sup>a</sup>	908 <sup>a</sup>	873 <sup>b</sup>	884 <sup>b</sup>
8	647 <sup>b</sup>	680 <sup>a</sup>	657 <sup>b</sup>	672 <sup>a</sup>
9	983 <sup>b</sup>	993 <sup>b</sup>	1036 <sup>a</sup>	1050 <sup>a</sup>
10	1323 <sup>c</sup>	1379 <sup>b</sup>	1375 <sup>b</sup>	1413 <sup>a</sup>

a, b, c, literales diferentes entre filas indican diferencias significativas  $p < 0.05$

**Tabla 7. Consumo de agua *ad libitum* (mL/semana)**

Semana	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
1	1480 <sup>a</sup>	1480 <sup>a</sup>	1432 <sup>b</sup>	1498 <sup>a</sup>
2	1536 <sup>c</sup>	1650 <sup>a</sup>	1532 <sup>c</sup>	1592 <sup>b</sup>
3	1480 <sup>c</sup>	1636 <sup>a</sup>	1482 <sup>c</sup>	1546 <sup>b</sup>
4	1354 <sup>c</sup>	1444 <sup>a</sup>	1392 <sup>b</sup>	1354 <sup>c</sup>
5	1498 <sup>c</sup>	1562 <sup>b</sup>	1616 <sup>a</sup>	1622 <sup>a</sup>
6	1494 <sup>c</sup>	1493 <sup>c</sup>	1630 <sup>a</sup>	1524 <sup>b</sup>
7	1573 <sup>a</sup>	1558 <sup>b</sup>	1584 <sup>a</sup>	1512 <sup>c</sup>
8	1086 <sup>d</sup>	1111 <sup>c</sup>	1195 <sup>a</sup>	1167 <sup>b</sup>
9	1618 <sup>d</sup>	1593 <sup>c</sup>	1790 <sup>a</sup>	1662 <sup>b</sup>
10	2050 <sup>d</sup>	2170 <sup>b</sup>	2264 <sup>a</sup>	2140 <sup>c</sup>

a, b, c, d literales diferentes entre filas indican diferencias significativas  $p < 0.05$

### Determinación de lactato en sangre

Como se puede visualizar en la Tabla 8, al terminar el periodo de adaptación (día 21), se presentó un incremento del 21.73 % en los valores de lactato en los animales del grupo 3 y del 16.66 % en los animales del grupo 4, lo que demostró que la inducción al estrés oxidativo se estaba llevando de forma positiva. A mitad del periodo de inducción al estrés oxidativo (día 42) se obtuvieron niveles de lactato más elevados en las ratas del grupo 2 ( $2.6 \pm 0.13$ ) y del grupo 4 ( $2.7 \pm 0.38$ ) en comparación a los del grupo 1 ( $1.8 \pm 0.48$ ) y del grupo 3 ( $2.4 \pm 0.45$ ). Al finalizar el protocolo (día 65) se pudo observar que los niveles de lactato en el grupo 4 ( $2.6 \pm 0.30$ ) se veían disminuidos en comparación al grupo 3 ( $3 \pm 0.29$ ). En el estudio realizado por Viera *et al.* (2022) en donde se evaluó el ejercicio de resistencia de alta intensidad asociado con extracto etanólico de *Schinus terebenthifolius* sobre parámetros oxidativos y daño muscular en ratas Wistar, mencionan que concentraciones de lactato sanguíneo superiores a 4 mmol/L se consideran valores de alta intensidad después de la prueba física realizada. Los valores pre ( $2,17 \pm 0,65$  mmol/L y  $1,71 \pm 0,65$  mmol/L) se consideran de baja a mediana intensidad en comparación con los valores post ( $5,8 \pm 0,65$  mmol/L y  $4,8 \pm 0,65$  mmol/L). En la investigación realizada por Godoy *et al.* (2022) encontraron que la enzima lactato deshidrogenasa (LDH), junto con otros biomarcadores, tienen un papel importante en la detección y monitorización del daño muscular. Discutieron

cómo la liberación de LDH y otros marcadores en la circulación está relacionada con la intensidad y la duración del ejercicio físico, así como con la gravedad del daño muscular. Además, se destacó la importancia de estos biomarcadores en la evaluación de la recuperación muscular y la respuesta al tratamiento.

**Tabla 8. Lactato en sangre**

Periodo	(mmol/L)			
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Día 0 Inicio adaptación	2±0.59 <sup>b</sup>	1.9±0.43 <sup>b</sup>	2.3±0.22 <sup>a</sup>	2.4±0.20 <sup>a</sup>
Día 21 Fin adaptación/inicio inducción	1.8±0.75 <sup>c</sup>	2±0.80 <sup>b</sup>	2.8±0.55 <sup>a</sup>	2.8±0.31 <sup>a</sup>
Día 42 Mitad de inducción	1.8±0.48 <sup>c</sup>	2.6±0.13 <sup>a</sup>	2.4±0.45 <sup>b</sup>	2.7±0.38 <sup>a</sup>
Día 65 Fin de inducción	1.6±0.35 <sup>d</sup>	2.4±0.42 <sup>c</sup>	3±0.29 <sup>a</sup>	2.6±0.30 <sup>b</sup>

a, b, c, d literales diferentes entre filas indican diferencias significativas p<0.05

### **Cuantificación de la capacidad antioxidante total plasmática (FRAP)**

Se obtuvo al final de la adaptación (día 21) un incremento en la capacidad antioxidante en el grupo 3 de un 33.26 % y en el grupo 4 de un 36.38 %, observando que la actividad física en los animales de esos grupos les ayudo a aumentar la capacidad antioxidante en comparación a los grupos 1 y 2 que no realizaban ninguna actividad. A mitad del entrenamiento (día 42) el grupo 3 tuvo otro incremento del 15.49 % y también el grupo 4 incrementó un 28.18 %, observando el beneficio de la suplementación de la harina de col morada en este último grupo. Al finalizar el protocolo (día 64) el grupo 2 mostró el mayor incremento en la capacidad antioxidante con un 39.59 % desde que inició la suplementación de harina de col morada (día 21) hasta la culminación del protocolo, por lo que se puede concluir que el consumo de harina de col morada elevó estos valores. Los grupos 3 y 4 presentaron una disminución en los niveles en comparación al día 42, estos datos se pueden visualizar en la Tabla 9. En la investigación realizada por Godoy *et al.* (2022) en donde se midió en ratas la capacidad antioxidante no enzimática plasmática después del ejercicio extenuante de natación y el ejercicio hasta el agotamiento,

reportaron en la determinación de FRAP que los niveles de FRAP de las ratas de ambos grupos fueron un 42% y un 50% más altos que los de las ratas del grupo control, situación similar a la ocurrida en el presente estudio con los grupos sometidos a la actividad física. En la investigación realizada por Souza *et al.* (2020), en donde tuvo como objetivo determinar si el nivel de estrés oxidativo hepático resultante del entrenamiento en intervalos de alta intensidad (HIIT) se ve afectado por el patrón de frecuencia (consecutivo versus no consecutivo) de las sesiones de entrenamiento reportaron que no hubo diferencias significativas en el nivel o FRAP en los grupos de prueba en comparación con los grupos de control, mencionan que esto pudo deberse a que la inducción al daño oxidativo que ellos realizaron posiblemente no fue tan alta como para ver generado un incremento en la misma.

**Tabla 9. Capacidad antioxidante en plasma (mmol/L L eq. Trolox)**

Periodo	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Día 0 Inicio adaptación	5.14±0.80 <sup>a</sup>	5.37±0.83 <sup>a</sup>	4.60±0.85 <sup>b</sup>	4.37±0.78 <sup>b</sup>
Día 21 Fin adaptación/inicio inducción	5.69±0.58 <sup>a</sup>	5.43±0.49 <sup>b</sup>	6.13±0.55 <sup>a</sup>	5.96±0.22 <sup>a</sup>
Día 42 Mitad entrenamiento	6.27±0.27 <sup>b</sup>	5.50±0.31 <sup>c</sup>	7.08±0.75 <sup>a</sup>	7.64±0.71 <sup>a</sup>
Día 64 Fin de entrenamiento	4.88±0.83 <sup>c</sup>	7.58±0.87 <sup>a</sup>	5.77±0.63 <sup>b</sup>	6.09±0.55 <sup>b</sup>

a, b, c literales diferentes entre filas indican diferencias significativas  $p < 0.05$

### **Análisis de color en carne**

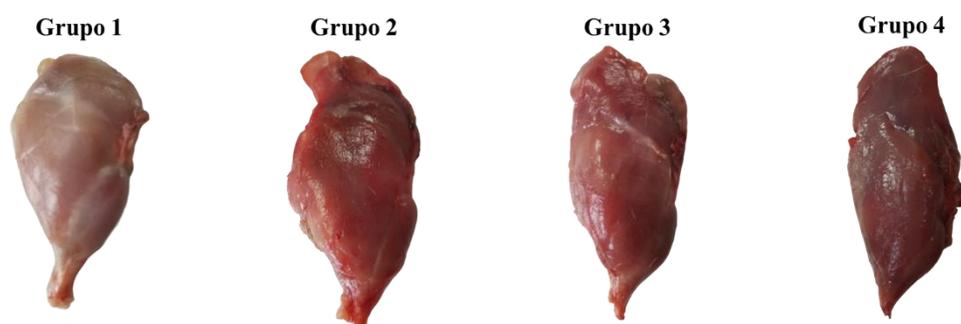
Como se observa en la Tabla 10 y Figura 3, las muestras de carne de los grupos 2,3 y 4 presentaron una luminosidad ( $L^*$ ) menor en comparación al grupo 1. Los grupos 2 y 4 tuvieron mayor tendencia al color rojo ( $a^*$ ) y amarillo ( $b^*$ ) en comparación a los grupos 1 y 3, estos resultados coinciden con lo reportado por Jumayi *et al.* (2022), cuya carne fue tratada con extractos acuosos de plantas, las cuales aumentaron su luminosidad ( $L^*$ ), tendencia al color rojo  $a^*$  y amarillento  $b^*$ . Estudios han encontrado que la inclusión de antioxidantes naturales, como los polifenoles presentes en ciertos extractos vegetales, pueden intensificar el color rojo de la carne debido a sus propiedades antioxidantes y quelantes (Niesto *et al.*, 2018). Estos compuestos pueden

interactuar con los radicales libres generados durante el procesamiento de la carne y, por lo tanto, preservar su coloración natural. En la investigación realizada por Prommachart *et al.* (2021) en donde el objetivo de este estudio fue investigar los efectos del nivel de inclusión de residuos extraídos con antocianina del arroz negro y el maíz morado en la dieta del ganado sobre el perfil de ácidos grasos de la carne y la oxidación de la carne durante el almacenamiento reportan que las antocianinas como fuente natural de antioxidantes ayudan a inhibir la oxidación tanto de lípidos como de proteínas y estabilizan la coloración roja en la carne.

**Tabla 10. Análisis de color en músculos**

Parámetro	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
L*	40.57±1.91 <sup>a</sup>	37.19±1.80 <sup>b</sup>	38.34±1.80 <sup>ab</sup>	37.83±1.63 <sup>b</sup>
a*	3.49±0.30 <sup>c</sup>	4.89±0.54 <sup>a</sup>	3.76±0.53 <sup>bc</sup>	4.42±0.69 <sup>ab</sup>
b*	8.85±0.52 <sup>b</sup>	10.18±0.86 <sup>a</sup>	9.19±0.56 <sup>b</sup>	9.40±0.43 <sup>ab</sup>

a, b, c, d literales diferentes entre filas indican diferencias significativas  $p < 0.05$



**Figura 3. Color en carne de los diferentes grupos de experimentación** Grupo 1 (sin suplementación de harina de col morada y sin inducción al ejercicio), Grupo 2 (con suplementación de harina de col morada y sin inducción al ejercicio), Grupo 3 (sin suplementación de harina de col morada y con inducción al ejercicio) y Grupo 4 (con suplementación de harina de col morada y con inducción al ejercicio).

### **Análisis químico proximal en carne**

En la Tabla 11 se muestra que el grupo 2 (animales suplementados con harina de col morada) en comparación al grupo 1 (control) presentó en la carne un incremento en humedad del 4.14 %, en proteína del 8.07% y en cenizas del 14.95%, mientras que obtuvo un 24.06 % menos en grasa. El grupo 4 (animales que estaban inducidos al estrés oxidativo y suplementados con harina de col

morada) en comparación al grupo 3 (animales inducidos al estrés oxidativo) no presenta diferencias significativas en el contenido de proteína, sin embargo, presenta diferencias significativas en la humedad, grasa y cenizas, pudiendo observar el efecto de la suplementación de la harina de col morada. Una investigación reporta que las antocianinas pueden inducir cambios en el tejido adiposo, como aquellos en los niveles de expresión de adipocitocinas, además mencionan que la suplementación con concentrado de jugo de aronia negra (*Aronia melanocarpa*) (AJC) disminuye la grasa epididimaria (en un -30%) e influye positivamente en la adiponectina en ratones macho C57BL/6J. Por lo tanto, esta suplementación previno el aumento de peso y moduló los marcadores de obesidad. (Baum *et al.*, 2016). Otro estudio reportó que la suplementación con 2% (peso/peso) de polvo de arándano (BBP) redujo el peso de la grasa intraperitoneal y mejoró la actividad del receptor activado por el proliferador de peroxisomas (PPAR) en el tejido adiposo blanco (WAT) y el músculo esquelético en ratas (Seymour *et al.*, 2011).

**Tabla 11. Análisis químico proximal en músculos**

	<b>Humedad (%)</b>	<b>Grasa (%)</b>	<b>Proteína (%)</b>	<b>Cenizas (%)</b>
<b>Grupo 1</b>	65.18±0.63 <sup>d</sup>	10.97±0.83 <sup>a</sup>	6.44±0.08 <sup>b</sup>	1.07±0.02 <sup>b</sup>
<b>Grupo 2</b>	67.88±0.72 <sup>c</sup>	8.33±0.97 <sup>b</sup>	6.96±0.04 <sup>b</sup>	1.23±0.05 <sup>a</sup>
<b>Grupo 3</b>	70.85±0.61 <sup>a</sup>	5.29±0.75 <sup>d</sup>	7.74±0.04 <sup>a</sup>	1.13±0.03 <sup>b</sup>
<b>Grupo 4</b>	68.71±0.88 <sup>b</sup>	6.76±0.71 <sup>c</sup>	7.22±0.03 <sup>a</sup>	1.2±0.01 <sup>a</sup>

a, b, c, d literales diferentes entre columnas indican diferencias significativas p<0.05

## Histopatología

### 1. Grupo Control sin inducción al estrés oxidativo y sin suplemento de col morada.

#### Músculo esquelético

Se realizaron cortes longitudinales y transversales de las muestras de músculo esquelético. En el corte longitudinal se observan miocitos con citoplasma

acidófilo y con estrías transversales, núcleos periféricos con eucromatina, presencia de capilares de aspecto normal y fibroblastocitos asociados sin cambios. En el corte transversal se observan células de aspecto poliédrico a redondo, con núcleos periféricos, capilares asociados y fibroblastocitos relativamente escasos. En el 100% de los animales muestreados se observaron estos hallazgos.

### **Músculo cardiaco**

En el corte de corazón se observan miocitos cardiacos con forma típica, columnar alargada ramificada, de aspecto normal, citoplasma acidófilo con estrías transversales, con 1 a 2 núcleos con cromatina dispersa, así como fibroblastocitos asociados. En el 100% de los animales muestreados se observaron estos hallazgos.

### **Hígado**

El 100% de los animales muestreados presenta un hígado con arquitectura tisular normal, lobulillos hepáticos bien estructurados, venas centrales hiperémicas y hepatocitos con citoplasma ligeramente granular, con ligera degeneración hidrópica, probablemente debido al proceso de eutanasia y manejo de la muestra.

### **Riñón**

El 100% de los animales muestreados presenta un riñón con arquitectura tisular normal, aunque con corteza y médula hiperémicas, probablemente por el método de sacrificio. Las células tubulares y los corpúsculos renales no presentaron cambios patológicos aparentes.

### **Pulmón**

El parénquima pulmonar se observó parcialmente colapsado e hiperémico, probablemente por el método de eutanasia empleado; en una zona cercana a

un bronquio se observó infiltración linfocitaria, probablemente un nódulo linfoide asociado que fue segmentado por el corte de la muestra. Esta característica se observó en uno de los animales muestreados, por lo que se consideró incidental.

## **2. Grupo Control sin ejercicio y con suplemento de col morada**

### **Músculo esquelético**

No se observan cambios con relación al Grupo 1 en el 100% de los individuos muestreados.

### **Músculo cardiaco**

No se observan cambios con relación al Grupo 1 en el 100% de los individuos muestreados.

### **Hígado**

No se observan cambios con relación al Grupo 1 en el 100% de los individuos muestreados.

### **Riñón**

No se observan cambios con relación al Grupo 1 en el 100% de los individuos muestreados.

### **Pulmón**

No se observan cambios con relación al Grupo 1 en el 100% de los individuos muestreados.

### **3. Grupo Control con ejercicio y sin suplemento de col morada.**

#### **Músculo esquelético**

En el corte longitudinal se observan miocitos similares al Grupo 1, pero hay un aumento en la densidad capilar, es decir, aumento en la microvascularización asociada a los miocitos. Aparentemente no hay hipertrofia de los miocitos. En el corte transversal se observó la presencia de cristales traslúcidos amorfos en uno de los individuos muestreados. Sin embargo, en ese individuo y el resto del grupo, se corrobora un aspecto similar, con aumento en la cantidad de capilares intercelulares asociados y sin hipertrofia.

#### **Músculo cardíaco**

No se observan cambios con relación al Grupo 1 en el 100% de los individuos muestreados.

#### **Hígado**

No se observan cambios con relación al Grupo 1 en el 100% de los individuos muestreados.

#### **Riñón**

No se observan cambios con relación al Grupo 1 en el 100% de los individuos muestreados.

#### **Pulmón**

No se observan cambios con relación al Grupo 1 en el 100% de los individuos muestreados.

#### **4. Grupo Experimental con ejercicio y suplemento de col morada.**

##### **Músculo esquelético**

Sin cambios significativos con relación al Grupo 3. No se observaron cristales en ningún individuo.

##### **Músculo cardiaco**

No se observan cambios con relación al Grupo 1 en el 100% de los individuos muestreados.

##### **Hígado**

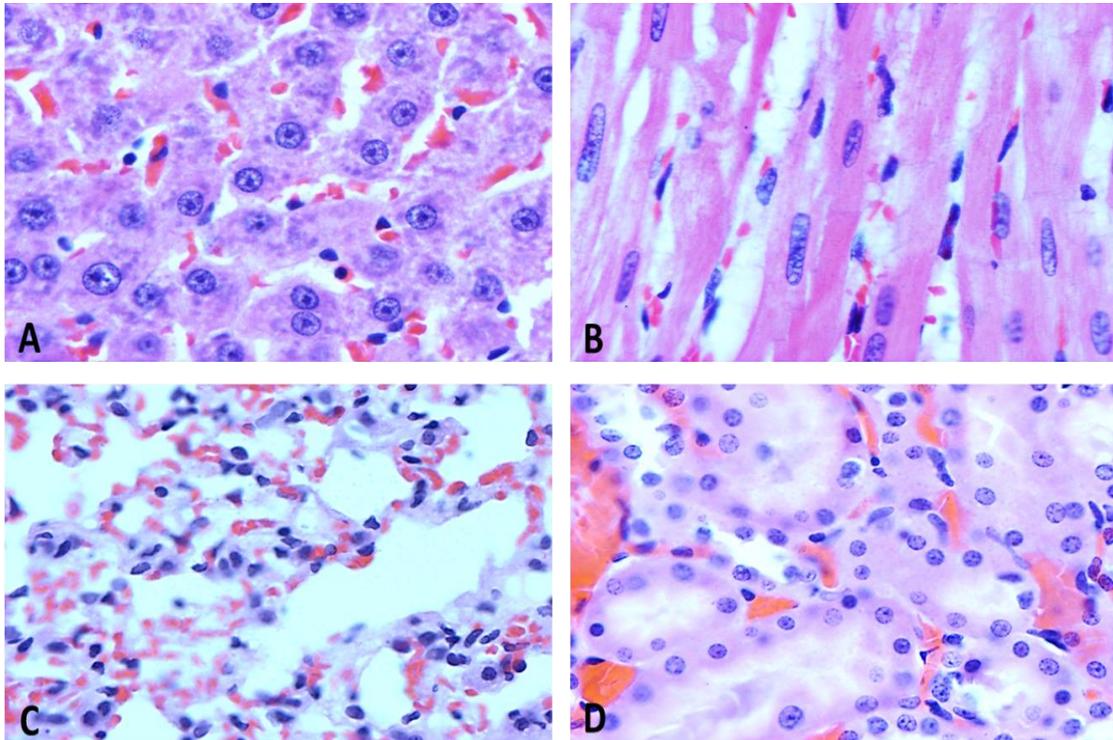
No se observan cambios con relación al Grupo 1 en el 100% de los individuos muestreados.

##### **Riñón**

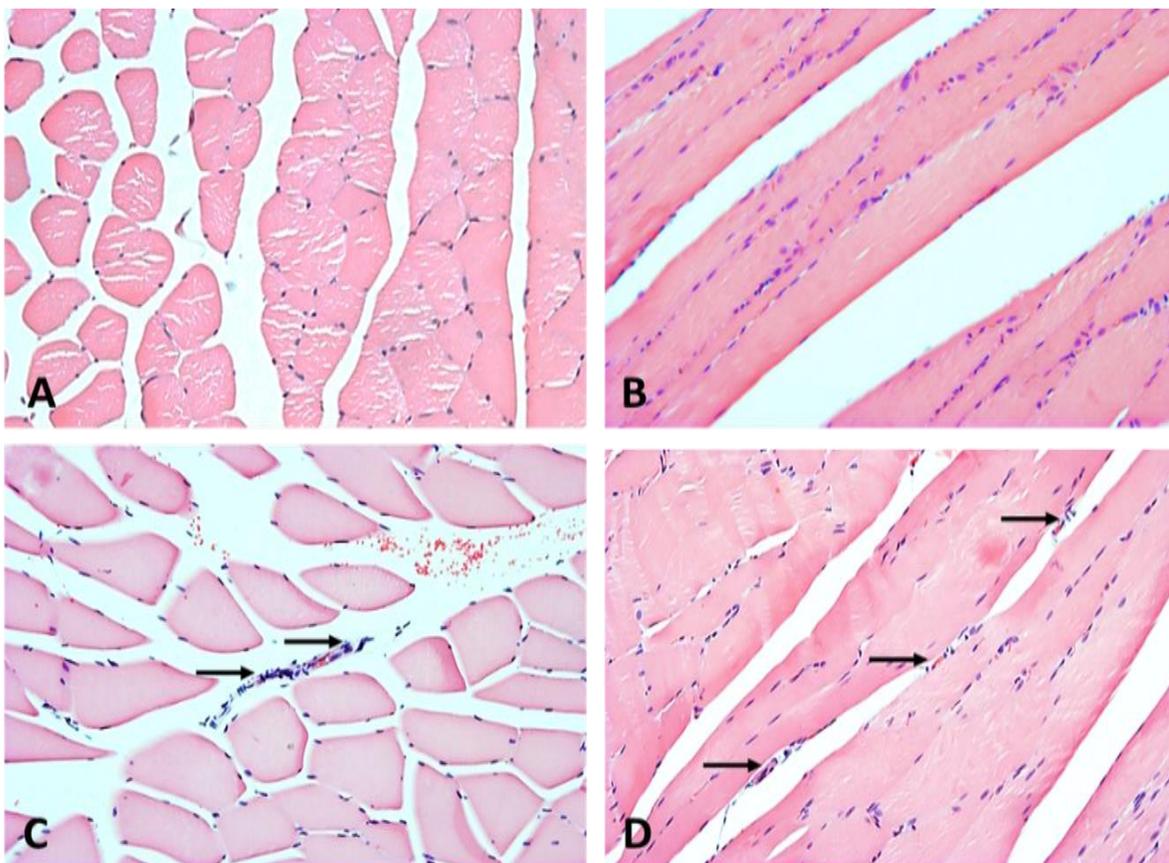
No se observan cambios con relación al Grupo 1 en el 100% de los individuos muestreados.

De manera general no se observaron cambios histopatológicos (Figuras 4 y 5) en los grupos control y experimentales, lo cual puede ser por los mecanismos de adaptación celular que son detectables a nivel bioquímico, pero no a nivel morfológico, particularmente en el periodo de tiempo experimental que se utilizó en la metodología empleada. En este contexto, la regulación de los procesos celulares de producción y degradación de ROS es crítica para la supervivencia, incluyendo sensores de especies reactivas, transducción de señales y modulación de la maquinaria de transcripción y traducción. Varias evidencias indican que las ROS son mensajeros importantes vías de señalización que conducen a la adaptación celular (Powers *et al.*, 2010). La adaptación es un importante mecanismo por el cual las células y los

organismos responden a retos ambientales y a cambiantes necesidades funcionales. Para lograrlo, las células integran cambios en el fenotipo, actividad metabólica, expresión génica y función celular, que deben coordinarse adecuadamente para mantener la viabilidad ante estímulos nocivos, como es el caso del reto ante un exceso de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Santa-González & Camargo, 2017). El único morfológico cambio detectable es el aumento en la densidad capilar del musculo, lo que probablemente refleja el inicio de una adaptación tisular para un mayor aporte de oxígeno.



**Figura 4. Hallazgos histopatológicos de órganos de ratas Wistar adultas sometidas a ejercicio y suplementadas con col morada. H-E. 400X. A. Hígado.** Grupo sin ejercicio y sin suplemento de col. **B. Corazón.** Grupo sin ejercicio y con suplemento de col. **C. Pulmón.** Grupo con ejercicio y sin suplemento de col. **D. Riñón.** Grupo con ejercicio y con suplemento de col. No se observaron cambios patológicos aparentes en estos órganos, comparando los animales control con los sometidos a ejercicio y aquellos sin ejercicio y suplementados con col morada y con ejercicio y suplementados con col.



**Figura 5. Hallazgos histopatológicos de músculo estriado esquelético de ratas Wistar adultas sometidas a ejercicio y suplementadas con col morada. H-E. 100X. A. Músculo esquelético (corte transversal) de ratas sin ejercicio. No se observan cambios patológicos aparentes. B. Músculo esquelético (corte transversal) de ratas sin ejercicio y suplementadas con col. No se observan cambios patológicos aparentes ni hay diferencia con el grupo control, sin ejercicio y sin suplementación con col. C. Músculo esquelético (corte transversal) de ratas con ejercicio. Se observa un mayor aporte sanguíneo del tejido (flechas), con relación a los grupos anteriores. D. Músculo esquelético (corte transversal) de ratas con ejercicio y suplementadas con col. Se observa de igual modo una mayor vascularización capilar del tejido (flechas), en comparación con los grupos sin ejercicio y sin ejercicio y suplementados con col. No se observaron diferencias con relación al grupo con ejercicio y sin suplemento con col.**

## Conclusiones

Los grupos experimentales que tuvieron la suplementación de harina de col morada, con inducción al estrés oxidativo y sin inducción al estrés oxidativo, presentaron niveles más bajos de lactato y un incremento en la capacidad antioxidante plasmática, además se propiciaron cambios fisicoquímicos positivos en la carne, observando mayor coloración, mayor humedad, mayor contenido en proteína y menor porcentaje en grasa. Por lo que se puede decir que el consumo de harina de col morada disminuye el estrés oxidativo inducido por el ejercicio físico y otorga una mejora en la composición corporal. Esta investigación demuestra que la harina de col morada (*Brassica oleracea var. capitata f. rubra*) posee la capacidad para contrarrestar los efectos producidos por el estrés oxidativo inducido por la actividad física, ya que se observaron mejoras en los niveles de lactato en sangre y en la capacidad antioxidante plasmática. Además, se demostró que el consumo de harina de col morada ayuda a la disminución del porcentaje de grasa y al aumento del porcentaje de proteína en la carne, por lo que esta investigación podría tomar varios rumbos, tanto en la industria cárnica como en la industria de la salud humana.

## Referencias

- AOAC (2002). Association of Official Analytical Chemistry. 18th Ed. Gaithersburg, MD (Estados Unidos): AOAC International; 2002.
- Baum, J., Howard, R., Prior, R., & Lee, S. (2016). Efecto de la suplementación con *Aronia melanocarpa* (aronia negra) sobre el desarrollo de la obesidad en ratones alimentados con una dieta alta en grasas. *Journal of Berry Research*, 6, 203 – 212. <https://doi.org/10.3233/JBR-16013>
- Cossio, M., Gómez, R., Vargas, R., Hochmuller, R., & Arruda, M. (2013). Curvas de referencia para valorar el crecimiento físico de ratas machos Wistar. *Nutrición Hospitalaria*, 8 (6), 2151-2156. doi: <https://dx.doi.org/10.3305/nh.2013.28.6.6659>
- Fisher-Wellman, K., & Bloomer, R. (2009). Acute exercise and oxidative stress: a 30-year history. *Dynamic medicine: DM*, 8,1. doi: <https://doi.org/10.1186/1476-5918-8->
- Godoy, G., Travassos, P., Antunes, M., Iwanaga, C., Sá-Nakanishi, A., Curi, R., . . . Bazotte, R. (2022). Strenuous swimming raises blood non-enzymatic antioxidant capacity in rats. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 55: e11891. doi: <https://doi.org/10.1590/1414-431X2022e11891>
- Gonçalves, A., Gaspar, D., Flores-Félix, J., Falcão, A., Alves, G., & Silva, L. (2022). Effects of Functional Phenolics Dietary Supplementation on Athletes' Performance and Recovery: A Review. *International journal of molecular sciences*, 23(9), 4652. doi: <https://doi.org/10.3390/ijms23094652>
- González, M., López, A., & Dos Santos, C. (2010). Efecto del tipo y controlabilidad del estrés sobre la conducta alimentaria en ratas. *Revista mexicana de análisis de la conducta*, 36(2), 111-127. Retrieved from

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-45342010000200008&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-45342010000200008&lng=es&tlng=es)

- Heim, K., Tagliaferro, A., & Bobilya, D. (2002). Flavonoid antioxidants: chemistry, metabolism and structure-activity relationships. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 572-584. doi: [https://doi.org/10.1016/S0955-2863\(02\)00208-5](https://doi.org/10.1016/S0955-2863(02)00208-5)
- Jumayi , A., Allam, A., El-Beltagy, A., Hassan, A., Mahmoud, A., & Halim, K. (2022). Bioactive Compound, Antioxidant, and Radical Scavenging Activity of Some Plant Aqueous Extracts for Enhancing Shelf Life of Cold-Stored Rabbit Meat. *Antioxidants*, 11(6):1056. doi: <https://doi.org/10.3390/antiox11061056>.
- Manhães-de-Castro, R., Vilela, F., Pereira, L., & Guedes, R. (2020). Stress-induced hypophagia in rats is associated with oxidative events in the hypothalamus. *Behavioural Brain Research*, 383, 112507. doi: [10.1016/j.bbr.2019.112507](https://doi.org/10.1016/j.bbr.2019.112507)
- Niesto, G., Ros, G., & Castillo, J. (2018). Antioxidant and Antimicrobial Properties of Rosemary (*Rosmarinus officinalis*, L.): A Review. *Medicines (Basel, Switzerland)*, 5(3), 98. doi: <https://doi.org/10.3390/medicines5030098>
- Ortiz Escarza, J., & Medina López, M. (2020). Estrés oxidativo ¿un asesino silencioso? *Educación Química*, 1-11. doi: <http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2020.1.69709>
- Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A. -J. (2012). Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 6, 36–60. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>
- Pedersen, B., & Saltin, B. (2015). Exercise as medicine - evidence for prescribing exercise as therapy in 26 different chronic diseases. *Scandinavian*

*journal of medicine & science in sports*, 25 Suppl 3, 1–72. doi:  
<https://doi.org/10.1111/sms.12581>

Poblete, C., Russell, J., Parra, P., Soto, M., Villegas, B., Cofré, C., & Herrera, T. (2018). Efecto del ejercicio físico sobre marcadores de estrés oxidativo en pacientes con diabetes mellitus tipo 2. *Revista médica de Chile*, 146 (3), 362-372. doi: <https://dx.doi.org/10.4067/s0034-98872018000300362>

Powers, S., & Jackson, M. (2008). Exercise-induced oxidative stress: cellular mechanisms and impact on muscle force production. *Physiological reviews*, 1243–1276. doi: <https://doi.org/10.1152/physrev.00031.2007>

Powers, S., Duarte, J., Kavazis, A., & Talbert, E. (2010). Reactive oxygen species are signalling molecules for skeletal muscle adaptation. *Experimental physiology*, 95(1), 1–9. doi: <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2009.050526>

Prommachart, R., Cherdthong, A., Navanukraw, C., Pongdontri, P., Taron, W., Uriyapongson, J., & Uriyapongson, S. (2021). Effect of Dietary Anthocyanin-Extracted Residue on Meat Oxidation and Fatty Acid Profile of Male Dairy Cattle. *Animals: an open access journal from MDPI*, 11(2), 322. doi: <https://doi.org/10.3390/ani11020322>

Santa-González, G., & Camargo, M. (2017). Protección celular antioxidante y respuesta adaptativa inducida por estímulos oxidativos crónicos. *Actualidades Biológicas*, 38(104), 71–80. doi: <https://doi.org/10.17533/udea.acbi.328979>

Seymour, E., Tanone, I., Urcuyo-Llanes, D., Lewis, S., Kirakosyan, A., Kondoleon, M., . . . Bolling, S. (2011). La ingesta de arándanos altera la actividad del receptor activado por el proliferador de peroxisomas del músculo esquelético y del tejido adiposo y reduce la resistencia a la insulina en ratas obesas. *Revista de Alimentos Medicinales*, 14, 1511 – 1518. doi: <https://doi.org/10.1089/jmf.2010.0292>

- Souza, L., Aidar, F., Matos, D., Marçal, A., Souza, R., dos Santos, J., . . . Araújo, S. (2020). Analysis of oxidative stress in Wistar rats submitted to high-intensity interval training. *Motricidade*, vol. 16, n. 3, pp. 274-281. doi: <http://dx.doi.org/10.6063/motricidade.21310>
- Tsuda, T., Horio, F., Uchida, K., Aoki, H., & Osawa, T. (2003). Dietary cyanidin 3-O-beta-D-glucoside-rich purple corn color prevents obesity and ameliorates hyperglycemia in mice. *The Journal of nutrition*, 133(7), 2125–2130. doi: <https://doi.org/10.1093/jn/133.7.2125>
- Tsuda, T., Ueno, Y., Kojo, H., Yoshikawa, T., & Osawa, T. (2005). Gene expression profile of isolated rat adipocytes treated with anthocyanins. *Biochimica et biophysica acta*, 1733(2-3), 137–147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bbali.2004.12.014>
- Viera, L., Carlos, A., dos Santos, J., Lopes, F., dos Santos, S., Santana, A., . . . Brito, C. (2022). El ejercicio de resistencia de alta intensidad y la suplementación con *Schinus terenbinthifolius* atenúan el estrés oxidativo y los biomarcadores del daño muscular. *Revista Internacional de Morfología*, 40 (3), 781-788. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022022000300781>

## Anexos

ACTA AGRÍCOLA Y PECUARIA 10: e0101010.  
<https://doi.org/10.30973/aap/2024.10.0101010> (2024)

Artículo Científico

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA, COMPUESTOS BIOACTIVOS, ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE Y SU COMPORTAMIENTO DURANTE LA DIGESTIÓN *in vitro* DE HARINA DE COL MORADA (*Brassica oleracea* VAR. *capitata f. rubra*)

PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION, BIOACTIVE COMPOUNDS, ANTIOXIDANT ACTIVITY, AND THEIR BEHAVIOR DURING *in vitro* DIGESTION OF PURPLE CABBAGE FLOUR (*Brassica oleracea* VAR. *capitata f. rubra*)

Caracterización y digestibilidad de harina de col morada

Jean Alejandro Vázquez-García<sup>1</sup>, Javier Piloni-Martini<sup>1\*</sup>, Aurora Quintero-Lira<sup>1</sup>, Sergio Soto-Simental<sup>1</sup>, Juan Ocampo-López<sup>1</sup>, Lucio González-Montiel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Av. Rancho Universitario s/n Km 1, 43760, Tulancingo, Hidalgo, México.

<sup>2</sup>Instituto de Tecnología de los Alimentos, Universidad de la Cañada, 68540, Teotitlán de Flores Magón, Oaxaca, México.

\*Autor para correspondencia: [javier\\_piloni7632@uaeh.edu.mx](mailto:javier_piloni7632@uaeh.edu.mx)

Jean Alejandro Vázquez-García, ORCID: 0009-0006-4493-8692

Javier Piloni-Martini, ORCID: 0000-0002-1367-5010

Aurora Quintero-Lira, ORCID: 0000-0003-4638-6028

Sergio Soto-Simental, ORCID: 0000-0002-6923-0926

Juan Ocampo-López, ORCID: 0000-0002-9208-7216

Lucio González-Montiel, ORCID: 0000-0001-6222-3259

Fecha de recepción: 17 de noviembre de 2023

Fecha de aceptación: 28 de marzo de 2024

### RESUMEN

La col morada (*Brassica oleracea* var. *capitata f. rubra*) es una hortaliza que se produce para su uso en la elaboración de diversos platillos culinarios. Destaca por su alto contenido de agua, proteínas, minerales, fibra y su aporte de grasa bajo. Contiene compuestos bioactivos como antocianinas, fenoles y flavonoides necesarios para neutralizar radicales libres en el cuerpo humano. Se elaboró una harina para evaluar las características fisicoquímicas y propiedades antioxidantes de la col morada y su comportamiento mediante una digestión *in vitro*. Los resultados mostraron que la harina de col morada es rica en carbohidratos (68.61±0.15 %), proteínas (15.57±0.17 %) y cenizas (8.71±0.53 %), además de ser baja en grasas (0.55±0.03 0.55±0.03 %). Los compuestos bioactivos y las propiedades antioxidantes presentaron un comportamiento descendente en cada fase



UANL



UNIVERSIDAD DE  
GUANAJUATO



LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN Y LA  
UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

Otorga la presente CONSTANCIA a

**Jean Alejandro Vázquez García, Javier Piloni Martini, Aurora Quintero Lira, Sergio Soto Simental, Juan Ocampo López.**

Por su participación con el trabajo en modalidad ORAL, con título:

**Evaluación fisicoquímica de harina de col morada (*Brassica oleracea var. capitata f. rubra*) para usos alternos.**

Presentado en

**XXIII CONGRESO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS  
VIII CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE INNOVACIÓN Y  
TENDENCIAS EN PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS**

Realizado del 22, 23 y 24 de junio de 2022 en la modalidad virtual.

**San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México a 22 de junio de 2022**

**Dr. Juan Gabriel Báez González**  
Coord. del Congreso FCB,  
Universidad Autónoma de Nuevo  
León

**M.C. Karla G. García Alanís**  
Coord. del Congreso FCB,  
Universidad Autónoma de Nuevo  
León

**Dra. Ma. Del Rosario Abraham Juárez**  
Coord. del Congreso Universidad  
de Guanajuato

XIV CONGRESO INTERNACIONAL "SOBRE INOCUIDAD, CALIDAD Y FUNCIONALIDAD  
DE LOS ALIMENTOS EN LA INDUSTRIA Y SERVICIOS DE ALIMENTACIÓN



Se otorga la

# Constancia

a

Jean Alejandro Vázquez García, Javier Piloni Martini,  
Aurora Quintero Lira, Sergio Soto  
Simental, Juan Ocampo López

Por ser ganadores de segundo lugar en la presentación de trabajos de investigación  
modalidad cartel de posgrado con el trabajo:

*Análisis bromatológico de coliflor morada (Brassica oleracea var. Botrytis  
graffiti) cultivada en el estado de Hidalgo.*

25 Y 26 de noviembre del 2021

En la presentación de trabajos de investigación modalidad cartel.



Del XIV Congreso Internacional Virtual, Sobre Inocuidad, Calidad y  
Funcionalidad de los Alimentos en la Industria y Servicios de Alimentación



  
Dra. Mirna E. Santos Lara.  
PRESIDENTA NACIONAL  
SOMECCA A.C.

  
Q.F.B. Marco A. León Félix  
PRESIDENTE CONSEJO DIRECTIVO.  
SOMECCA A.C.

  
Dra. Ofelia Araceli López Mejía  
COORDINACIÓN DEL COMITÉ CIENTÍFICO  
SOMECCA A.C.

  
Dra. Patricia Porrás Loaiza  
COORDINACIÓN DEL COMITÉ CIENTÍFICO  
SOMECCA A.C.



XIV CONGRESO INTERNACIONAL "SOBRE INOCUIDAD, CALIDAD Y FUNCIONALIDAD DE LOS ALIMENTOS EN LA INDUSTRIA Y SERVICIOS DE ALIMENTACIÓN"



Se otorga la

# Constancia

a

**Jean Alejandro Vázquez García, Javier Piloni Martini, Aurora Quintero Lira, Sergio Soto Simental y Juan Ocampo López.**

Por su destacada participación con el trabajo:

*Análisis bromatológico de coliflor morada (Brassica oleracea var. Botrytis graffiti) cultivada en el estado de Hidalgo.*

**25 Y 26 de noviembre del 2021**

**En la presentación de trabajos de investigación modalidad cartel.**



**Del XIV Congreso Internacional Virtual, Sobre Inocuidad, Calidad y Funcionalidad de los Alimentos en la Industria y Servicios de Alimentación**



  
Dra. Mirna E. Santos Lara.  
PRESIDENTA NACIONAL  
SOMEICCA A.C

  
Q.F.B. Marco A. León Félix  
PRESIDENTE CONSEJO DIRECTIVO,  
SOMEICCA A.C.

  
Dra. Ofelia Araceli López Mejía  
COORDINACIÓN DEL COMITÉ CIENTÍFICO  
SOMEICCA A.C

  
Dra. Patricia Porras Loaiza  
COORDINACIÓN DEL COMITÉ CIENTÍFICO  
SOMEICCA A.C

