



MINERALES EN SEMILLAS DE CACHICHÍN (*Oecopetalum mexicanum*) SOMETIDAS A DIFERENTES TRATAMIENTOS TÉRMICOS

MINERALS IN SEEDS OF CACHICHIN (*Oecopetalum mexicanum*) SUBJECTED TO DIFFERENT HEAT TREATMENTS

Alejandro Esli Hernández-Mora¹, Libia Iris Trejo-Téllez², José Andrés Herrera-Corredor¹ y Fernando Carlos Gómez-Merino^{2*}

¹Colegio de Postgraduados (COLPOS), Campus Córdoba, Amatlán de Los Reyes, Veracruz, México. ²COLPOS, Campus Montecillo, Mntecillo, Texcoco, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia (fernandg@colpos.mx)

RESUMEN

El cachichín (*Oecopetalum mexicanum* Greenm. & C.H. Thomps.) es un árbol silvestre nativo de la Sierra de Misantla, Veracruz, México, que produce un fruto con semilla comestible, a la que se le atribuyen importantes propiedades nutricionales y nutracéuticas gracias a su contenido de componentes proteicos, antioxidantes e hipoglucémicos. Para su consumo, de forma tradicional la semilla es sometida a diferentes tratamientos térmicos que pueden afectar su composición nutrimental. A la fecha, no se cuenta con un estudio detallado de la concentración de minerales en la semilla de cachichín, ni de la forma en que tal concentración es afectada por los tratamientos térmicos a los que la semilla es sometida. El objetivo de este estudio fue determinar las concentraciones de los minerales N, P, K, Ca, Mg y S (macronutrientes), así como las de Fe, Zn, Cu, Mn, B y Ni (micronutrientes) en frutos con semillas crudas (T1), cocidas a 100 °C por 15 min (T2, cocidas por hervor), con tostado tradicional (T3, 180 °C por 20 min) y con tostado controlado (T4, 134 °C por 25 min). Las concentraciones de Ca, Zn, B y Ni no fueron afectadas por los tratamientos probados. Para N se observaron diferencias significativas entre el tratamiento tostado tradicional (2497 mg 100 g⁻¹ en peso seco) y el hervido (T2) (2030 mg 100 g⁻¹ p.s.). El tostado tradicional (T3) incrementó significativamente las concentraciones de P (181 mg 100 g⁻¹ p.s.), Mg (139 mg 100 g⁻¹ p.s.), Cu (1.015 mg 100 g⁻¹ p.s.) y Mn (0.796 mg 100 g⁻¹ p.s.) respecto a los demás tratamientos, y también aumentaron las concentraciones de K (429 mg 100 g⁻¹ p.s.) y S (116 mg 100 g⁻¹ p.s.) en comparación con los demás tratamientos, excepto respecto a semillas crudas (T1). La menor concentración de N se observó en semillas cocidas (T2). Se concluye que el tostado tradicional (T3) puede mejorar la concentración de algunos minerales que contribuyen a un mejor valor nutrimental de las semillas de cachichín.

Palabras clave: Macronutrientes, Metteniusaceae, micronutrientes, reacción de Maillard, semilla comestible, tratamientos térmicos, valor nutritivo.

SUMMARY

Cachichin (*Oecopetalum mexicanum* Greenm. & C.H. Thomps.) is a wild tree native to the Sierra de Misantla, Veracruz, Mexico, that produces an edible seed-bearing fruit to which important nutritional and nutraceutical properties are attributed due to its content of protein, antioxidant and hypoglycemic components. For consumption, the seed is traditionally subjected to different heat treatments that can affect its nutritional composition. To date, there is no detailed study on the concentration of minerals in the cachichin seed, nor of how this concentration is affected by the heat treatments to which the seed

is subjected. The aim of this study was to determine the concentrations of the mineral elements N, P, K, Ca, Mg and S (macronutrients), as well as those of Fe, Zn, Cu, Mn, B and Ni (micronutrients) in cachichin fruits with raw seeds (T1), cooked at 100 °C for 15 min (T2, boiled), with traditional toasting (T3, 180 °C for 20 min) and with controlled toasting (T4, 134 °C for 25 min). The concentrations of Ca, Zn, B and Ni were not affected by the tested treatments. For N, significant differences were observed between the traditional toasting treatment (2497 mg 100 g⁻¹ dry weight) and the boiled treatment (2030 mg 100 g⁻¹ d.w.). Traditional toasting (T3) significantly increased the concentrations of P (181 mg 100 g⁻¹ d.w.), Mg (139 mg 100 g⁻¹ d.w.), Cu (1.015 mg 100 g⁻¹ d.w.) and Mn (0.796 mg 100 g⁻¹ d.w.) compared to the other treatments, and also increased the concentrations of K (429 mg 100 g⁻¹ d.w.) and S (116 mg 100 g⁻¹ d.w.) compared to the other treatments, except when compared to raw seeds (T1). The lowest concentration of N was observed in cooked seeds (T2). It is concluded that traditional toasting (T3) can improve the concentration of some mineral elements that contribute to a better nutritional value of cachichin seeds.

Index words: Edible seed, Maillard reaction, Metteniusaceae, macronutrients, micronutrients, nutrition value, thermal treatments.

INTRODUCCIÓN

En términos de nutrición vegetal, la concentración de elementos esenciales (N, P, K, Ca, Mg, S, Cl, Fe, B, Mn, Zn, Cu, Mo y Ni, además de C, H y O) representa un atributo sobresaliente en semillas comestibles que tiene implicaciones vitales no solo en plantas, sino también en seres vivos que se alimentan de ellas, incluyendo animales y humanos (Kirkby, 2023). En plantas, estos nutrientes participan como componentes estructurales de biomoléculas como clorofilas, aminoácidos, ácidos nucleicos, proteínas (enzimas) o funcionan como catalizadores enzimáticos que garantizan los procesos vitales, entre otras funciones (Saleem *et al.*, 2023).

Para su consumo, muchas semillas son sometidas a diferentes tratamientos de cocción, lo que modifica su composición bioquímica y mineral (Liu *et al.*, 2020). Cuando la temperatura de cocción alcanza un intervalo de 140 a

165 °C en calor seco se induce la reacción de Maillard o glicación, como resultado de la unión no enzimática del grupo carbonilo de azúcares reductores como glucosa y fructosa con el grupo amino de proteínas y ácidos nucleicos (Parisi y Luo, 2018). Esta reacción da lugar a la formación de compuestos que aportan sabor, aroma y color, lo que mejora la calidad sensorial de los alimentos (Liu *et al.*, 2020); sin embargo, si no hay un correcto manejo de factores cruciales como pH, temperatura y tiempo de exposición al calor, también se puede generar condiciones que deterioran la calidad del alimento; de hecho, a partir de los 180 °C, los alimentos tienden a quemarse o carbonizarse si quedan expuestos al calor seco por tiempos prolongados (Parisi y Luo, 2018).

El árbol de cachichín (*Oecopetalum mexicanum* Greenm. & C.H. Thomps.) pertenece a la familia Metteniusaceae; se distribuye de manera natural desde México (Veracruz y Chiapas) hasta Guatemala. En el estado de Veracruz, México, su aprovechamiento está muy arraigado en pueblos originarios y pobladores locales de la Sierra de Misantla (Lascurain *et al.*, 2009; 2012). Su producción está vinculada a cuatro sistemas de manejo diferentes que ofrecen múltiples recursos: el bosque o monte, donde el cachichín crece y se reproduce de manera natural; el bosque enriquecido o cachichinal, en el que se plantan los árboles de cachichín, pero no se da un manejo agronómico al sistema; cachichín como árbol de sombra en cafetales; y los huertos familiares (Lascurain *et al.*, 2016). El árbol de cachichín es silvestre, y a la fecha no se tiene reportado ningún programa de mejoramiento genético para generar variedades o híbridos.

Esta especie produce un fruto globoso con semilla ovoide de amplio endospermo, textura suave y de sabor amargo (Hernández-Mora *et al.*, 2024; Lascurain *et al.*, 2012). En promedio, la semilla de cachichín contiene 41.61 % de carbohidratos, 39.25 % de lípidos, 12.59 % de proteínas, 4.25 % de fibra y 2.30 % de cenizas (Hernández-Mora *et al.*, 2021). Dentro del perfil lipídico, la semilla de esta especie contiene ácidos grasos poliinsaturados y otros compuestos antioxidantes y nutracéuticos importantes en la salud humana (Hernández *et al.*, 2013).

En los municipios que conforman la Sierra de Misantla y sus alrededores, la semilla de cachichín es consumida como botana saludable, hervida o tostada de manera tradicional sobre comales de barro o arcilla en fogones a la leña. En la literatura no existen reportes de análisis de concentración de los minerales esenciales para la nutrición de la planta (*i.e.*, C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S, Cl, Fe, B, Mn, Zn, Cu, Mo y Ni) en la semilla de cachichín, ni de los efectos de tratamientos térmicos sobre ésta. Estos minerales

esenciales para la planta también contribuyen a la nutrición humana; por tanto, este estudio tuvo por objetivo analizar las concentraciones de los minerales considerados macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg y S) y micronutrientes (Fe, Zn, Cu, Mn, B y Ni) en semillas de cachichín sometidas a cuatro tratamientos diferentes: semillas crudas (T1), cocidas por hervor (T2), tostadas en condiciones tradicionales (T3) y tostadas en condiciones controladas de laboratorio (T4). Dado que de manera tradicional los pobladores de la Sierra de Misantla consumen y comercializan la semilla de cachichín de manera tostada o hervida, resulta interesante analizar la manera en que los tratamientos afectan las concentraciones de los minerales en esta semilla.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención y tratamiento de semillas de cachichín

Las semillas de cachichín se obtuvieron de frutos maduros producidos por árboles silvestres de aproximadamente 15 años de edad, que crecen de manera natural en lotes ubicados en el municipio de Misantla, Veracruz, México, a 19° 58' de latitud norte, 96° 35' de longitud oeste, a 850 m de altitud, en suelos de tipo luvisol. El clima de la región es de tipo semicálido húmedo Af(m)(c) con lluvias todo el año, temperaturas promedio de 20 a 26 °C y precipitación media anual de 2000 mm (INEGI, 2010). Los frutos se recolectaron en el mes de abril, completamente maduros. Una vez recolectados, los frutos fueron secados a temperatura ambiente a la sombra por 20 días. Los tratamientos evaluados fueron: T1: frutos con semillas crudas, T2: frutos con semillas cocidos por hervor, T3: frutos con semillas sometidos a tostado tradicional y T4: frutos con semillas sometidos a tostado controlado. Para el tratamiento consistente en frutos con semillas crudas (T1), estas solo fueron extraídas de los frutos ya secos a temperatura ambiente a la sombra, para su análisis de minerales. Para la cocción por hervor de frutos con semillas (T2) se siguió el protocolo tradicional de la región de la Sierra de Misantla, que consiste en colocar los frutos con semillas en recipientes de acero inoxidable de 20 L de capacidad con agua corriente sobre fogones de leña, a 100 °C por 25 min, en un recipiente de acero inoxidable de 20 L de capacidad; una vez concluido el periodo de hervido, las semillas fueron extraídas de los frutos para su posterior procesamiento y análisis de laboratorio. El tostado tradicional de frutos con semillas (T3) se realizó en comales de barro o arcilla roja de la Sierra de Misantla, a temperaturas que oscilaron entre 180 y 200 °C por 25 min, a fuego lento, en fogones alimentados con leña; la temperatura sobre el comal se midió con termómetro. El tostado controlado de los frutos con semillas en laboratorio se hizo en una

cacerola de aluminio y una parrilla de calentamiento (Thermo-Scientific SP131015Q; Waltham, Massachusetts, EUA) a 134 °C por 25 min (Hernández-Mora *et al.*, 2017), temperatura inferior al intervalo óptimo de la reacción de Maillard (140-165 °C) (Lund y Ray, 2017). Las condiciones controladas de temperatura y tiempo fueron establecidas en etapas preliminares de experimentación con estas semillas dentro del fruto, a fin de conservar mejor su composición nutricional y nutracéutica para posteriores análisis.

En todos los casos, las semillas fueron sometidas a los tratamientos dentro del fruto. Esto significó que el hervor o tostado se hizo en frutos con cáscara. Para los subsecuentes análisis, las semillas fueron extraídas de los frutos, y procesadas según especificaciones que se indican a continuación.

Cuantificación de minerales en semilla

Una vez aplicados los diferentes tratamientos a los frutos con semilla, las semillas fueron extraídas de los frutos y secadas en condiciones controladas en una estufa de aire forzado (Riossa, HCF-125; Guadalajara, México) por 72 h a 72 °C. Una vez secas y a peso constante, las semillas fueron molidas en mortero de porcelana y tamizadas con malla No. 1 con el fin de obtener muestras homogéneas. Solo se procesaron las semillas, no la cáscara (pericarpio).

La concentración de N total se determinó por el método Semimicro-Kjeldahl (Bremner, 1965). Las concentraciones de P, K, Ca, Mg, S, Fe, Zn, Cu, Mn, B y Ni se cuantificaron mediante digestión ácida ($\text{HNO}_3:\text{HClO}_4$, 2:1, v.v), de acuerdo con la metodología descrita por Alcántar y Sandoval (1999). Los extractos obtenidos posterior a la digestión y filtrados fueron analizados en un equipo de espectrometría de emisión óptica de inducción por

plasma acoplado (ICP-OES, Agilent 725-ES, Santa Clara, California, EUA). Los resultados fueron expresados en $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ de peso seco (p.s.) de la semilla.

Diseño experimental y análisis estadístico

Para el análisis de los datos, los tratamientos se distribuyeron completamente al azar. Cada tratamiento tuvo cinco repeticiones. La unidad experimental estuvo representada por un lote de semilla de 500 g. Los datos fueron procesados utilizando el software estadístico RStudio versión 1.2.5033. Una vez que se demostraron los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro-Wilk) y homogeneidad (prueba de Levene) de los datos, se realizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA), y las medias fueron comparadas por la prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95 % ($P \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentraciones de macronutrientes

Las concentraciones de los minerales catalogados como macronutrientes en la nutrición de las plantas se presentan en el Cuadro 1. La concentración de N fue 23 % mayor en semillas sometidas a tostado tradicional (T3) con respecto a semillas hervidas (T2). Con excepción de las medias de T2 y T3, que fueron estadísticamente distintas, los demás tratamientos mostraron medias estadísticamente similares. El aporte medio de N a través de la semilla de cachichín con los tostados evaluados fue de 2270 mg por 100 g de semilla, lo que representa casi el 69 % de la concentración de N encontrada en nuez de la India (*Anacardium occidentale*), que es de 3290 mg por 100 g de semilla (USDA, 2024). Durante los procesos de tostado (calor seco) a muy alta temperatura (180 a 200 °C) hay enriquecimiento en el contenido de nitrógeno de las muestras (Bahureksa *et al.*, 2022), lo que coincide con

Cuadro 1. Concentración de macronutrientes ($\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ de peso seco) en semillas de cachichín (*Oecopetalum mexicanum* Greenm. & C.H. Thomps.) sometidas a cuatro tratamientos térmicos.

Tratamiento	Macronutrientes					
	N	P	K	Ca	Mg	S
T1: Semillas crudas	2380 ± 107 ab	154 ± 1.01 c	408 ± 6.01 ab	76 ± 3 a	128 ± 2 b	105 ± 1 ab
T2: Semillas hervidas	2030 ± 73 b	163 ± 2.01 b	279 ± 2.01 c	93 ± 6 a	119 ± 1 b	99 ± 4 b
T3: Tostado tradicional	2497 ± 62 a	181 ± 1.02 a	429 ± 1.01 a	100 ± 5 a	139 ± 1 a	116 ± 1 a
T4: Tostado controlado	2147 ± 62 ab	151 ± 2.00 c	386 ± 15.01 b	82 ± 8 a	125 ± 4 b	97 ± 5 b

Medias ± EE con letra distinta en cada columna indican diferencia estadística significativas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).

los hallazgos aquí reportados en las semillas con tostado tradicional (T3), donde se alcanzó la mayor temperatura. Este enriquecimiento es atribuido a la formación de complejos de nitrógeno derivados de la reacción de proteínas, aminoácidos y ácidos nucleicos con azúcares durante la reacción de Maillard (Mondaca-Navarro *et al.*, 2020).

La concentración más alta de P se observó también en semillas con tostado tradicional (T3), valor que fue 17.5 % superior al observado en semillas crudas (154 mg 100 g⁻¹ p.s.) y 19.9 % superior al de semillas sometidas al tostado controlado (T4) (151 mg 100 g⁻¹ p.s.). En semillas hervidas, la concentración media de P fue 10 % inferior al encontrado en semillas con tostado tradicional, variación atribuible al procesamiento, en este caso mayor temperatura y mayor tiempo de proceso en el tostado tradicional. La composición bioquímica y mineral de las semillas puede ser afectada tanto por factores abióticos durante el proceso de producción como por el procesamiento y manipulación de las muestras (Al Juhaimi *et al.*, 2023). Al obtener el promedio de las concentraciones de P de los cuatro tratamientos evaluados, se revela un aporte de 162 mg de P por 100 g de semilla de cachichín, lo que es 69.6 % inferior a lo reportado en nuez de la India de 532 mg de P por 100 g (USDA, 2024). La ingesta diaria recomendada (IDR) de P es de 700 mg en la población adulta (NIH, 2023).

La media más alta de K (429 mg 100 g⁻¹ p.s.) también se registró en semillas con tostado tradicional, superando en 53.8 y 11.1 % a las concentraciones de este elemento en semillas cocidas por hervor (408 mg 100 g⁻¹ p.s.) y con tostado controlado (386 mg 100 g⁻¹ p.s.), respectivamente. La semilla cruda mostró una concentración media de K sin diferencias estadísticas con las concentraciones registradas en semillas con tostado tradicional y controlado. La disminución de la concentración de K en semillas hervidas es atribuida a la solubilidad de este elemento en agua (Ceccanti *et al.*, 2022). Esta reducción en la concentración de K como consecuencia del hervido de semillas se ha documentado en semillas de nogal africano (*Ricinodendron heudelotii*) (Kinge *et al.*, 2019). Se encontró una aportación media de 407 mg de K por 100 g de semilla de cachichín, excluyendo al tratamiento de hervido de semillas, valor inferior al reportado en nuez de la India de 638 mg K por 100 g (USDA, 2024). El consumo de 100 g de semillas de cachichín, aportaría 12 y 15.7 % de la ingesta adecuada (IA) de K en hombres (3400 mg K) y en mujeres (2600 mg), respectivamente (NIH, 2023).

Las concentraciones de Ca no fueron afectadas estadísticamente por los tratamientos a la semilla, aunque el tostado tradicional tuvo una media numéricamente más alta que los demás tratamientos. La reacción de

Maillard no afecta la solubilidad del Ca en los alimentos (Delgado-Andrade *et al.*, 2004), lo que coincide con los hallazgos aquí reportados. El consumo de al menos 100 g de semilla de cachichín con tostado controlado aportaría aproximadamente 82 mg de Ca, valor semejante al de 80.0 mg por 100 g aportado por cacahuate (*Arachis hypogaea*) (Gonçalves *et al.*, 2023). La IDR de Ca para la población adulta es de 1000 mg (Cormick y Belizán, 2019).

La concentración de Mg mostró una tendencia muy similar a lo observado en N y P, ya que la media más alta se presentó en semillas con tostado tradicional, que superó en promedio en 12.1 % a las concentraciones de Mg en semillas del resto de los tratamientos. Cada 100 g de semilla de cachichín con los tratamientos evaluados aporta en promedio 128 mg de Mg, lo que representa casi 50 % de lo reportado para almendra (258 mg 100 g⁻¹) (USDA, 2019). La IDR es de 400 a 420 mg en hombres y de 310 a 320 mg en mujeres (NIH, 2023).

La concentración de S mostró una tendencia similar a la de K. La media más alta de S se observó en semillas sometidas a tostado tradicional. Este valor fue superior en 17.7 % al registrado en semillas hervidas, y 19.6 % mayor respecto al valor promedio encontrado en semillas con tostado controlado. La concentración de S en semilla con tostado tradicional no presentó diferencia estadística con respecto a la concentración de S obtenida en semillas crudas. El consumo de 100 g de semilla de cachichín sometida a tostado tradicional aporta 116 mg de S, muy cercano al aporte de la nuez con 99.7 mg de S (ZamaniBahramabadi *et al.*, 2022).

Las diferencias en las concentraciones de los minerales clasificados como macronutrientes que se encontraron en este estudio son atribuidas a las distintas condiciones térmicas en que se llevó a cabo la cocción. El tostado tradicional, tratamiento que detonó la reacción de Maillard, pudo haber ocasionado la formación o modificación de diferentes matrices de compuestos derivados de la reacción, que aumentaron la solubilidad de los elementos en las mezclas de reacción para su análisis (Alkaltham *et al.*, 2020). Así, tanto la propia composición bioquímica de la semilla, especialmente el contenido de proteínas y azúcares, como el manejo de temperaturas, tiempos y aireación de las muestras al aplicar los tratamientos térmicos ejercieron un efecto significativo en las concentraciones de los minerales analizados; de hecho, en la etapa final de la reacción de Maillard, los intermediarios metabólicos formados (compuestos de Amadori) se condensan y polimerizan, lo que conduce a la formación de melanoidinas y compuestos nitrogenados de color marrón (Şen y Gökmen, 2022). Se conoce poco sobre las melanoidinas, dado que sus estructuras son complejas y

dependen de la composición química de los alimentos que se procesan, específicamente de las formas y contenidos de azúcares simples y polisacáridos, proteínas, péptidos y aminoácidos; compuestos fenólicos, entre otros (Nunes *et al.*, 2022).

Concentraciones de micronutrientos

En el Cuadro 2 se muestra el efecto de los tratamientos en las concentraciones de minerales dentro de la categoría de micronutrientos. En semillas hervidas, la concentración de Fe fue 41 % más alta que la observada en semillas con tostado controlado. El aporte de Fe, en promedio de los cuatro tratamientos evaluados, fue de 3.89 mg por 100 g de semilla de cachichín, esto es 4.85 % superior a lo reportado en almendra con 3.71 mg por 100 g (USDA, 2019). El consumo de Fe recomendado en la dieta diaria asciende a 8 mg en hombres y 18 mg en mujeres (NIH, 2023).

Las concentraciones de Zn, B y Ni en semillas no fueron afectadas por los tratamientos. La semilla de cachichín aporta en promedio 1.21 mg Zn por 100 g de semilla. El consumo diario de Zn recomendado asciende a 11 mg para hombres y 8 mg para mujeres (NIH, 2023).

Las concentraciones de Cu y Mn fueron mayores en semillas con tostado tradicional, superando en promedio en 21.3 y 21.1 %, respectivamente, al resto de los tratamientos. Elementos como Fe y Cu tienen efecto catalizador en la formación de melanoidinas (Liu *et al.*, 2020), las cuales pueden tener actividad antioxidante y antimicrobiana, entre otras (Kim, 2020). La concentración promedio obtenida de

Cu fue de 0.88 mg por 100 g de cachichín, 14.6 % menor que lo reportado para almendra con 1.03 mg (USDA, 2019). La IDR de Cu en adultos asciende a 0.9 mg (NIH, 2023), muy cercana al aporte de 100 g de cachichín. El aporte promedio de Mn por 100 g de cachichín es de 0.69 mg, lo que representa un valor 68.3 % inferior a lo reportado en almendras, con 2.18 mg por 100 g de semilla (USDA, 2019). La IDR de Mn es de 2.3 mg en hombres y 1.8 mg en mujeres (NIH, 2023). El consumo de Mn debe hacerse con el debido cuidado, ya que una sobreexposición a este microelemento puede alterar el equilibrio homeostático en las células (Kulshreshtha *et al.*, 2021).

En este estudio se encontró un aporte promedio de 1.69 mg de B por 100 g de semilla de cachichín, similar al reportado para cacahuete de 1.70 mg de B por 100 g (NIH, 2024). La IDR de B para adultos oscila de 1 a 13 mg (NIH, 2023). El consumo de B puede tener efectos benéficos en el desarrollo y la reproducción, la formación ósea, respuestas inmunes y el metabolismo del calcio (Khaliq *et al.*, 2018).

En este estudio se encontró que la semilla de cachichín aporta 0.16 mg Ni por 100 g de peso seco, lo que representa 74.2 % menos que lo reportado en almendra (*i.e.*, 0.62 mg de Ni por 100 g de almendra) (Thebo *et al.*, 2014). La ingesta benéfica de Ni es menor de 100 µg en adultos; no obstante, se sugiere que sea más baja, del orden de 25 a 35 µg d⁻¹ (NIH, 2023). El Ni es un elemento esencial que en pequeñas cantidades optimiza la asimilación de Ca y potencia la acción de Fe, Mg, Zn y vitamina E (Genchi *et al.*, 2020).

Los resultados obtenidos en este estudio mostraron que

Cuadro 2. Concentración de micronutrientos (mg 100 g⁻¹ de peso seco) en semillas de cachichín (*Oecopetalum mexicanum* Greenm. & C.H. Thomps.) sometidas a cuatro tratamientos térmicos.

Tratamiento	Micronutrientos					
	Fe	Zn	Cu	Mn	B	Ni
T1: Semillas crudas	3.524 ± 0.09 ab	1.129 ± 0.02 a	0.863 ± 0.02 bc	0.617 ± 0.02 c	1.938 ± 0.02 a	0.153 ± 0.03 a
T2: Semillas hervidas	4.708 ± 0.47 a	1.166 ± 0.01 a	0.891 ± 0.04 b	0.708 ± 0.02 b	1.336 ± 0.07 a	0.166 ± 0.06 a
T3: Tostado tradicional	4.027 ± 0.02 ab	1.329 ± 0.19 a	1.015 ± 0.01 a	0.796 ± 0.1 a	1.772 ± 0.08 a	0.175 ± 0.05 a
T4: Tostado controlado	3.338 ± 0.35 b	1.209 ± 0.05 a	0.756 ± 0.03 c	0.647 ± 0.02 bc	1.735 ± 0.11 a	0.133 ± 0.02 a

Medias ± EE con letra distinta en cada columna indican diferencia estadística significativas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).

la semilla de cachichín tiene importantes concentraciones de minerales clasificados o categorizados como macronutrientes y micronutrientes en el ámbito de la nutrición de plantas. Estas concentraciones presentaron variaciones dependientes de los tratamientos evaluados (Cuadros 1 y 2). El tostado tradicional incrementó significativamente las concentraciones de P, Mg, Cu y Mn en comparación con el resto de los tratamientos; además, las semillas expuestas a tostado tradicional presentaron concentraciones altas de N, K y S, las cuales fueron estadísticamente similares a las concentraciones encontradas en semillas crudas. Resultó interesante observar que el Ca no fue afectado por los tratamientos probados, lo que puede explicarse debido a que las temperaturas alcanzadas no generaron suficiente cantidad de melanoidinas capaces de formar quelatos con elementos como el Ca (Rannou *et al.*, 2016; Seiquer *et al.*, 2010), y por tanto, no afectaron las concentraciones de Ca.

En condiciones de laboratorio y usando matrices de reacción que no contenían semillas de cachichín, los compuestos generados en las primeras etapas de la reacción de Maillard, a partir de la interacción de glucosa y lisina, así como glucosa y metionina, pueden aumentar la solubilidad de microelementos como Cu, Fe y Zn (Delgado-Andrade *et al.*, 2004), lo que pudo haber ocurrido en este estudio; sin embargo, la disponibilidad y absorción de oligoelementos están vinculadas a la generación de productos de la reacción de Maillard (PRM). Por lo tanto, cuanto más tiempo dura la reacción de Maillard, menor es la disponibilidad de oligoelementos como el Fe (Mesías *et al.*, 2009). De igual manera, Ca, Cu y Mg se enlazan con diversos productos de la reacción de Maillard (Delgado-Andrade *et al.*, 2007; Rendleman, 1987), mientras que el glutamato monosódico y la glucosa pueden fijar Ca, Zn, Cu y Mg (O'Brien y Morrissey, 1997), disminuyendo su solubilidad y disponibilidad durante la digestión *in vivo*. Por otro lado, los PRM derivados de prolina, leucina, glicina, ácido glutámico o lisina, en mezclas de glucosa a altas temperaturas, se unen a Zn y disminuyen su disponibilidad (Whitelaw y Weaver, 1988); además, el calentamiento a altas temperaturas de mezclas de caseína-glucosa-fructosa producen PRM que reducen la disponibilidad de Ca (Delgado-Andrade *et al.*, 2006), y esta insolubilidad puede variar según la matriz de compuestos que interactúan durante la reacción de Maillard (Parisi y Luo, 2018). Estas interacciones pueden explicar, al menos en parte, los resultados obtenidos en este estudio; sin embargo, para una mayor precisión, será necesario determinar la composición exacta de azúcares y aminoácidos en la matriz de las semillas de cachichín sometidas a los diferentes tratamientos en este estudio, y así determinar el efecto de estas matrices en la biodisponibilidad de los minerales en modelos *in vivo*.

CONCLUSIONES

La semilla de cachichín (*Oecopetalum mexicanum*) contiene concentraciones importantes de minerales (macronutrientes y micronutrientes) benéficos para la nutrición y la salud humana. Los tratamientos térmicos aplicados a los frutos con semilla de cachichín modificaron las concentraciones de N, P, K, Mg, S, Fe, Cu y Mn, mientras que las de Ca, Zn, B y Ni permanecieron sin cambios en todos los tratamientos probados. El tostado tradicional, como se realiza en la población de origen donde se produce y consume principalmente esta semilla, tuvo mayores temperaturas y tiempo de exposición al calor, lo que incrementó en forma significativa las concentraciones de P, Mg, Cu y Mn. Se recomienda evaluar la solubilidad y disponibilidad de estos elementos en modelos biológicos *in vivo*.

AGRADECIMIENTOS

El Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) otorgó beca de estudios a AEHM (CVU 960439).

BIBLIOGRAFÍA

- Al Juhaimi F., I. A. M. Ahmed, M. M. Özcan and N. Uslu (2023) Effect of roasting times on bioactive compounds, fatty acids, polyphenol and nutrients of amaranth (*Amaranthus cruentus* L.) seed roasted in pan, and principal component analysis. *Journal of Food Science and Technology* 61:129-138, <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05828-7>
- Alcántar G. G. y M. Sandoval V. (1999) Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Guía de Muestreo, Preparación, Análisis e Interpretación. Publicación Especial No. 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo. Texcoco, México. 156 p.
- Alkaltham M. S., A. M. Salamatullah, M. M. Özcan, N. Uslu and K. Hayat (2020) The effects of germination and heating on bioactive properties, phenolic compounds and mineral contents of green gram seeds. *LWT - Food Science and Technology* 134:110106, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110106>
- Bahureksa W., R. B. Young, A. M. McKenna, H. Chen, K. A. Thorn, F. L. Rosario-Ortiz and T. Borch (2022) Nitrogen enrichment during soil organic matter burning and molecular evidence of Maillard reactions. *Environmental Science and Technology* 56:4597-4609, <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06745>
- Bremner J. M. (1965) Total nitrogen. In: Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Agronomy Monograph. C. A. Black (ed.). American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA. pp:1149-1178, <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c32>
- Ceccanti C., L. Guidi, C. D'Alessandro and A. Cupisti (2022) Potassium bioaccessibility in uncooked and cooked plant foods: Results from a static *in vitro* digestion methodology. *Toxins* 14:668, <https://doi.org/10.3390/toxins14100668>
- Cormick G. and J. M. Belizán (2019) Calcium intake and health. *Nutrients* 11:1606, <https://doi.org/10.3390/nu11071606>
- Delgado-Andrade C., I. Seiquer, R. Nieto and M. P. Navarro (2004) Effects of heated glucose-lysine and glucose-methionine model-systems on mineral solubility. *Food Chemistry* 87:329-337, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.12.002>
- Delgado-Andrade C., I. Seiquer and M. P. Navarro (2006) Changes in calcium absorption and subsequent tissue distribution

- induced by Maillard reaction products: *in vitro* and *in vivo* assays. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86:271-278, <https://doi.org/10.1002/jsfa.2323>
- Delgado-Andrade C., I. Seiquer and M. P. Navarro (2007) Effects of consumption of Maillard reaction products on magnesium digestibility and tissue distribution in rats. *Food Science and Technology International* 13:109-115, <https://doi.org/10.1177/1082013207078524>
- Genchi G., A. Carocci, G. Lauria, M. S. Sinicropi and A. Catalano (2020) Nickel: human health and environmental toxicology. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17:679, <https://doi.org/10.3390/ijerph17030679>
- Gonçalves B., T. Pinto, A. Aires, M. C. Morais, E. Bacelar, R. Anjos, ... and F. Cosme (2023) Composition of nuts and their potential health benefits – an overview. *Foods* 12:942, <https://doi.org/10.3390/foods12050942>
- Hernandez B., G. Luna, O. Garcia, M. R. Mendoza, E. Azuara, C. I. Beristain and M. Jimenez (2013) Extraction and characterization of *Oecopetalum mexicanum* seed oil. *Industrial Crops and Products* 43:355-359, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.07.022>
- Hernández-Mora A. E., M. Castillo-Morales, E. A. García-Montalvo y E. Flores-Andrade (2017) Prueba de toxicidad aguda-oral del aceite de la semilla *Oecopetalum mexicanum* en ratones BALB/c. *Journal CIM* 5:1043-1050.
- Hernández-Mora A. E., L. I. Trejo-Téllez, A. S. Hernández-Cázares, A. Contreras-Oliva and F. C. Gómez-Merino (2021) Cachichín seed (*Oecopetalum mexicanum* Greenm. & CH Thomps.): source of nutrients and bioactive compounds. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical* 1:57-69, <https://doi.org/10.5154/r.rchsat.2021.02.05>
- Hernández-Mora A. E., L. I. Trejo-Téllez, H. A. Zavaleta-Mancera, J. A. Herrera-Corredor, M. M. Crosby-Galván and F. C. Gómez-Merino (2024) Biochemical, anatomical, and histochemical characterization of cachichín (*Oecopetalum mexicanum* Greenm. & CH Thomps: Metteniusaceae) seeds exposed to different thermal treatments. *Peer J* 12:e16663, <https://doi.org/10.7717/peerj.16663>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010) Censo de información geográfica municipal. Misantla. Veracruz de Ignacio de la Llave. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/30/30109.pdf (Septiembre 2024).
- Khalique H., Z. Juming and P. Ke-Mei (2018) The physiological role of boron on health. *Biological Trace Element Research* 186:31-51, <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1284-3>
- Kim J. S. (2020) Antioxidant activity of various soluble melanoidins isolated from black garlic after different thermal processing steps. *Preventive Nutrition and Food Science* 25:301-309, <https://doi.org/10.3746/pnf.2020.25.3.301>
- Kinge E. E., F. R. Djikeng, M. S. L. Karuna, F. Z. Ngoufack and H. M. Womeni (2019) Effect of boiling and roasting on the physicochemical properties of Djansang seeds (*Ricinodendron heudelotii*). *Food Science and Nutrition* 7:3425-3434, <https://doi.org/10.1002/fsn3.1163>
- Kirkby E. A. (2023) Introduction, definition and classification of nutrients. In: Marschner's Mineral Nutrition of Plants. Z. Rengel, I. Cakmak and P. J. White (eds.). Elsevier-Academic Press. London, UK. pp:3-9, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00016-2>
- Kulshreshtha D., J. Ganguly and M. Jog (2021) Manganese and movement disorders: a review. *Journal of Movement Disorders* 14:93-102, <https://doi.org/10.14802/jmd.20123>
- Lascurain M., C. López and P. Zamora (2009) Production chain of *Oecopetalum mexicanum* ('cachichín'): a tropical fruit tree from Mexico. *Acta Horticulturae* 806:519-524, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.806.65>
- Lascurain M., S. Avendaño, C. López, J. C. López and M. Covarrubias (2012) Ecological, productive and cultural values of cachichín (*Oecopetalum mexicanum*): an edible wild fruit from Veracruz, Mexico. *BGjournal* 9:13-16.
- Lascurain M., C. López-Binnquist and M. R. Emery (2016) Culture and environment in the Sierra de Misantla, Veracruz, Mexico: the case of *Oecopetalum mexicanum*. *Maderas y Bosques* 22:11-21, <https://doi.org/10.21829/myb.2016.223489>
- Liu X., B. Xia, L. T. Hu, Z. J. Ni, K. Thakur and Z. J. Wei (2020) Maillard conjugates and their potential in food and nutritional industries: a review. *Food Frontiers* 1:382-397, <https://doi.org/10.1002/fft2.43>
- Lund M. N. and C. A. Ray (2017) Control of Maillard reactions in foods: strategies and chemical mechanisms. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 65:4537-4552, <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b00882>
- Mesías G. M., I. Seiquer, C. Delgado-Andrade, G. Galdó and M. P. Navarro (2009) Intake of Maillard reaction products reduces iron bioavailability in male adolescents. *Molecular Nutrition and Food Research* 53:1551-1560, <https://doi.org/10.1002/mnfr.200800330>
- Mondaca-Navarro B. A., R. Rodríguez R., A. G. Villa L., L. A. Ávila V. and G. Davidov P. (2020) Glycation of animal proteins via Maillard reaction and their bioactivity. In: Food Processing. R. A. V. Marc, A. Valero D. and G. D. Posada I. (eds.), IntechOpen. London, UK. pp:1-18, <https://doi.org/10.5772/intechopen.90373>
- NIH, National Institutes of Health (2023) Dietary supplement fact sheets. National Institutes of Health. Bethesda, Maryland, USA. <https://ods.od.nih.gov/factsheets/list-all/> (April, 2024).
- NIH, National Institutes of Health (2024) Toxicological Profile for Boron. Boron levels in food. National Institutes of Health. Bethesda, Maryland, USA. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK599072/table/ch6.tab3/> (April, 2024).
- Nunes F. M., M. D. del Castillo and F. Carbonero (2022) Food melanoidins: chemistry and nutrition. *Frontiers in Nutrition* 9:881690, <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.881690>
- O'Brien J. and P. A. Morrissey (1997) Metal ion complexation by products of the Maillard reaction. *Food Chemistry* 58:17-27, [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(96\)00162-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(96)00162-8)
- Parisi S. and W. Luo (2018) Maillard reaction and processed foods—Main chemical products. In: Chemistry of Maillard Reactions in Processed Foods. S. Parisi and W. Luo (eds.). Springer. Cham, Switzerland. pp:53-59, https://doi.org/10.1007/978-3-319-95463-9_3
- Rannou C., D. Laroque, E. Renault, C. Prost and T. Sérot (2016) Mitigation strategies of acrylamide, furans, heterocyclic amines and browning during the Maillard reaction in foods. *Food Research International* 90:154-76, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.10.037>
- Rendleman J. A. (1987) Complexation of calcium by the melanoidin and its role in determining bioavailability. *Journal of Food Science* 52:1699-1705, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1987.tb05909.x>
- Saleem S., N. U. Mushtaq, A. Rasool, W. H. Shah, I. Tahir and R. U. Rehman (2023) Plant nutrition and soil fertility: physiological and molecular avenues for crop improvement. In: Sustainable Plant Nutrition: Molecular Interventions and Advancements for Crop Improvement. T. Aftab and K. R. Hakeem (eds.). Elsevier-Academic Press. Amsterdam, The Netherlands. pp:23-49, <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18675-2.00009-2>
- Seiquer I., C. Delgado-Andrade, A. Haro and M. P. Navarro (2010) Assessing the effects of severe heat treatment of milk on calcium bioavailability: *in vitro* and *in vivo* studies. *Journal of Dairy Science* 93:5635-5643, <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3469>
- Şen D. and V. Gökmen (2022) Kinetic modeling of Maillard and caramelization reactions in sucrose-rich and low moisture foods applied for roasted nuts and seeds. *Food Chemistry* 395:133583, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133583>
- Thebo N., A. Simair, W. Sheikh, A. R. Abbasi, J. Laghari and H. Nizamani (2014) Clinical study of the *Prunus dulcis* (almond) shell extract on *Tinea capitis* infection. *Natural Products Chemistry and Research* 2:1000131, <https://doi.org/10.4172/2329-6836.1000131>
- USDA, United States Department of Agriculture (2019) FoodData Central. Food details. Nuts, almonds. Agriculture Research Service, Department of Agriculture. Washington, D. C., USA. <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/170567/nutrients> (September 2024).
- USDA, United States Department of Agriculture (2024) FoodData Central.

Food details. Nuts. cashew nuts. raw. Agriculture Research Service, USDA. Beltsville, Maryland, USA. <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/2515374/nutrients> (September 2024).

Whitelaw M. L. and C. M. Weaver (1988) Maillard browning effects on *in vitro* availability of zinc. *Journal of Food Science* 53:1508-

1510, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb09310.x>
ZamaniBrahamabadi E., H. M. Afshar and F. Rezanejad (2022) Chemical constituents of green peel of Persian walnut (*Juglans regia* L.) fruit. *Biomass Conversion and Biorefinery* 14:27519-27524, <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03633-4>