

Batidos frutales con fibra dietaria incorporada: cinética de degradación térmica de compuestos bioactivos

Charito I. Vignatti^{1,2} <https://orcid.org/0000-0002-3748-6222>
Roberto J. Ceruti¹ <https://orcid.org/0000-0002-2372-2976>
Débora Manuale^{2,3} <https://orcid.org/0000-0003-2523-6530>
María E. Pirovani^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-7379-1187>

¹ Instituto de Tecnología de Alimentos (ITA), Facultad de Ingeniería Química (FIQ), Universidad Nacional del Litoral (UNL), Santa Fe, Argentina. (correo-e: cvignatti@fiq.unl.edu.ar, rceruti@fiq.unl.edu.ar, mpirovan@fiq.unl.edu.ar)

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina. (correo-e: cvignatti@fiq.unl.edu.ar, dmanuale@fiq.unl.edu.ar)

³ Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica (INCAPE) FIQ-UNL-CONICET, Parque Tecnológico Litoral Centro, Santa Fe, Argentina. (correo-e: dmanuale@fiq.unl.edu.ar)

* Autora a quien debe ser dirigida la correspondencia.

Recibido Dic. 26, 2023; Aceptado Feb. 8, 2024; Versión final Feb. 26, 2024, Publicado Ago. 2024

Resumen

En esta investigación se examina la degradación térmica de vitamina C y de compuestos fenólicos en dos batidos frutales: un batido base (BB) y otro con fibra de zanahoria adicionada (BF). Ambos productos son tratados a diferentes temperaturas (70-90 °C) y tiempos (0-60 min). Los datos experimentales son ajustados considerando modelos de cero y primer orden. Los resultados muestran que la degradación de vitamina C y de cianidina-3-O-glucósido durante el tratamiento térmico sigue una cinética de primer orden en ambos batidos. No se observa un efecto específico de la fibra de zanahoria sobre el contenido de compuestos fenólicos totales. Los valores de z obtenidos para BF indican que la fibra tuvo un efecto protector sobre la termoestabilidad de la vitamina C y la cianidina-3-O-glucósido. Se concluye que este efecto protector junto con el efecto beneficioso del consumo de fibra *per se* contribuyen a aumentar el potencial bioactivo de batidos tratados térmicamente.

Palabras clave: batidos frutales; fibra de zanahoria adicionada; tratamiento térmico; cinética de degradación térmica; compuestos bioactivos; vitamina C; compuestos fenólicos

Fruit smoothies with incorporated dietary fiber: kinetics of thermal degradation of bioactive compounds

Abstract

This research study examines the thermal degradation of vitamin C and phenolic compounds in two fruit smoothies: a base smoothie (BB) and an added carrot fiber smoothie (BF). Both products are treated at different temperatures (70-90 °C) and times (0-60 min). Experimental data are fitted considering zero and first order models. The results show that degradation of vitamin C and cyanidin-3-O-glucoside during the thermal treatment follows first-order kinetics in both smoothie types. No specific effect of carrot fiber on the content of total phenolic compounds is observed. The z values obtained for BF indicate that fiber has a protective effect on the thermal degradation of vitamin C and cyanidin-3-O-glucoside. It is concluded that the protective effect together with the beneficial effect of fiber consumption *per se* contribute to increasing the bioactive potential of heat-treated smoothies.

Keywords: fruit smoothies; added carrot fiber; thermal treatment; thermal degradation kinetics; bioactive compounds; vitamin C; phenolic compounds

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se han producido modificaciones en las conductas de los consumidores, asociadas a la concientización sobre los beneficios de una alimentación rica en frutas y hortalizas. Sin embargo, en Argentina, el consumo de productos hortifrutícolas aún es inferior a los 700 g recomendados por las Guías Alimentarias para la Población Argentina (GAPA) (Ministerio de Salud Argentina, 2016). Considerando aspectos vinculados a la estacionalidad de los cultivos, las variaciones en el precio y las preferencias de los consumidores, los batidos vegetales o *smoothies* constituyen una opción con posibilidades de desarrollo para promover el consumo de frutas y hortalizas (Nunes et al., 2016). A diferencia de los jugos, donde se extrae el líquido del prensado de frutas y hortalizas desechando la pulpa; los batidos son bebidas donde las fracciones comestibles completas de frutas y/u hortalizas, frescas o congeladas, se licúan brindando una mayor sensación de saciedad que los jugos tradicionales). Estos productos son atractivos para todos los rangos etarios, especialmente para niños y adolescentes (Reyes et al., 2023). Por otro lado, este tipo de alimento no alienta el reemplazo del consumo de los productos frutihortícolas enteros, sino que representa una iniciativa práctica, cómoda y segura para incorporarlos en circunstancias donde se dificulta su ingesta (escuela, gimnasio, oficina).

La sensación de saciedad que brindan los batidos se asocia al aporte de fibra. La fibra dietaria (FD) incluye a una variedad de polisacáridos como: celulosa, hemicelulosa, pectina, entre otros. Estos compuestos son resistentes a la hidrólisis de las enzimas digestivas y se encuentran principalmente en tejidos parenquimatosos de la célula vegetal. La FD se clasifica en función a su solubilidad en fibra dietaria soluble (FDS) y fibra dietaria insoluble (FDI). La FDS incluye pectinas, β -glucanos, arabinoxilanos, galactomananos, así como otros polisacáridos y oligosacáridos indigeribles. Por otra parte, la FDI está compuesta por polisacáridos como la celulosa y otros compuestos como lignina y cutina (Elleuch et al., 2011). Numerosos trabajos de investigación demuestran el papel de la FD presente en las frutas y hortalizas sobre la salud intestinal y la prevención de enfermedades crónicas como la diabetes y, además, contribuye al desarrollo y buen funcionamiento de la microbiota intestinal (Santana Vaz Rezende et al., 2021). Asimismo, los productos de descarte de la industria alimenticia son fuentes importantes de FD. En Argentina, la zanahoria es un cultivo hortícola tradicional y de consumo habitual. Se producen anualmente alrededor de 300.000 toneladas, la mayor parte se destina al consumo en fresco y una pequeña proporción a otros procesos. A pesar de ello, las empresas empaquetadoras tienen un descarte que asciende al 30% de la cosecha, que no cumple con las exigencias del consumidor en cuanto a tamaño, presencia de daños superficiales y aspecto del producto, que se destina al consumo animal (Vénica et al., 2019).

En la Universidad Nacional del Litoral (Santa Fe, Argentina), se ha desarrollado un programa para el aprovechamiento del descarte de zanahorias defectuosas para obtener un subproducto en polvo, rico en fibra. La composición del polvo obtenido luego del secado de este subproducto es de 73,6% p/p de fibra total (54,0% p/p de fibra insoluble y 19,6% p/p de fibra soluble), 7,1% p/p de proteínas, 7,0% p/p de cenizas, 0,2% p/p de grasa y 11,4% p/p de humedad (Vénica et al. 2019). En este escenario, la incorporación de este tipo de subproducto de la industria alimenticia constituye una opción prometedora para la formulación de alimentos de consumo diario en vista a incrementar su valor nutritivo (Vénica et al., 2019; Dong et al., 2022). Además, Ramírez et al. (2023) han demostrado que la suplementación prolongada con esta fibra de descarte de zanahoria influye sobre ciertos parámetros metabólicos y sobre el peso corporal de ratas, los cuales son consistentes con un efecto protector contra el desarrollo de obesidad y control de los niveles glucémicos. En particular, el agregado de fibra de descarte de zanahoria a batidos vegetales constituye una forma de aumentar el contenido de FD aprovechando los residuos de la cadena productiva de dicha hortaliza, con un potencial impacto beneficioso para la salud.

Además de FD, las matrices vegetales aportan fitoquímicos tales como, compuestos fenólicos, carotenoides, vitaminas, entre otros, que poseen propiedades antioxidantes y/o antiinflamatorias que promueven la salud general, reduciendo el riesgo de padecer enfermedades crónicas (Ribas-Agusti et al., 2017). Entre los compuestos bioactivos aportados por los alimentos vegetales se destacan los compuestos fenólicos (CF). Estos metabolitos secundarios de las plantas representan los antioxidantes más abundantes aportados por las frutas y las hortalizas. Comprenden una amplia variedad de compuestos simples o polimerizados formados por uno o varios anillos aromáticos unidos a uno o más grupos hidroxilos. Estas sustancias se pueden clasificar en diferentes grupos en función del número de anillos fenólicos que contienen y de los elementos estructurales que se unen a estos últimos. Estos grupos son: flavonoides, ácidos fenólicos, taninos (hidrolizables y condensados), estilbenos y lignanos. A estas moléculas se le atribuyen efectos beneficiosos para la salud asociados a su actividad antioxidante y a su capacidad de eliminar especies de oxígeno reactivas relacionadas con enfermedades neurodegenerativas y cardiovasculares, la inflamación crónica y ciertos tipos de cáncer (Rodríguez-Mateos et al., 2014). Los CF presentes en una especie vegetal y su concentración se modifican de acuerdo a la variedad, grado de madurez, factores geográficos, técnicas de cosecha, tipo de procesamiento y conservación del producto (Ernawita et al., 2019).

El tratamiento térmico es una tecnología que ha demostrado ser eficiente para inactivar microorganismos y enzimas responsables del deterioro de los productos frutihortícolas. Sin embargo, el procesamiento térmico puede tener consecuencias negativas sobre la calidad sensorial y nutricional de este tipo de alimentos, disminuyendo el contenido de CF (Patras et al., 2009). Asimismo, la vitamina C constituye otro nutriente esencial con propiedades antioxidantes que se considera termolábil, y se ha demostrado que los productos de degradación del ácido ascórbico pueden ocasionar el pardeamiento no enzimático en jugos de cítricos. Existen alternativas tecnológicas para prolongar la vida útil de batidos vegetales cuyo efecto sobre la concentración de compuestos bioactivos es mínimo como lo son: el procesamiento por altas presiones hidrostáticas, con microondas y con campos eléctricos pulsados (Rodríguez-Roque, et al. 2015). Sin embargo, los costos económicos asociados al desarrollo de tales tecnologías aún resultan prohibitivos para la industria alimenticia argentina.

En definitiva, resulta interesante conocer cómo el agregado de FD puede influir sobre los compuestos bioactivos presentes en batidos vegetales durante el tratamiento térmico. Por lo cual, en este trabajo se propone identificar los compuestos bioactivos presentes en batidos frutales a base de naranja, frutilla, manzana y banana, con y sin fibra de descarte de zanahoria agregada; y, evaluar la cinética de degradación térmica de dichos compuestos bioactivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la preparación de los batidos se emplearon frutillas (*Fragaria ananassa Duch L.*), naranjas (*Citrus sinensis*), manzanas (*Malus domestica*) variedad 'Granny Smith' y bananas (*Musa paradisiaca*) adquiridas al por menor en comercios de la ciudad de Santa Fe, Argentina. Todas las frutas se seleccionaron, se lavaron por separado con agua del grifo durante 1 min y, posteriormente, se desinfectaron por inmersión en hipoclorito de sodio 80 mg L⁻¹ durante 1 min; la relación volumen de agua de lavado o solución desinfectante/peso de fruto usada fue 3 L kg⁻¹. El jugo de naranja se obtuvo con exprimidor eléctrico y las manzanas y bananas se cortaron en trozos pequeños. Se formularon dos tipos de batidos: un batido base (BB: 40,00% frutilla; 40,00 % jugo de naranja; 10,00 % banana y 10,00 % manzana) y un batido con fibra dietaria (BF: 40,00% frutilla; 40,00 % jugo de naranja; 9,75 % banana; 9,75 % manzana y 0,50 % FD) utilizando un dispositivo Thermomix (Vorwerk & Co. KG, Wuppertal, Alemania). El polvo rico en fibra o FD se obtuvo a partir de zanahorias de descarte, procesadas en una juguera eléctrica separando al jugo del bagazo, al cual se le realizó un tratamiento de extracción con solvente, secado y molienda, según proceso patentado (Aimaretti et al., 2014). Una de las etapas de obtención de la FD es la extracción de compuestos carotenoides de la materia prima, por lo que el aporte de compuestos antioxidantes provenientes de la FD al batido resulta despreciable. Las formulaciones BB y BF se utilizaron para obtener la condición inicial, a tiempo cero, de cada estudio cinético.

Los tratamientos térmicos se realizaron en equipo Water Bath Shaker SHZ-88 con baño de agua a 70, 80 y 90 °C. Se colocaron alícuotas de 9 g de cada batido en tubos de ensayo de vidrio con tapa. Para cada temperatura, se tomaron muestras, por triplicado, a los 5, 10, 20, 30, 40, 50 y 60 min de calentamiento. En todos los casos, el TTS se finalizó enfriando los tubos por inmersión en baño de agua a 4 °C. Finalmente, las muestras fueron congeladas y conservadas a -18°C. Los extractos de compuestos fenólicos se obtuvieron agregando, primero, 3,5 mL y después 2 fracciones de 8 mL de solución de extracción (0,5 % ácido acético glacial en 80 % metanol: 20 % agua desionizada) a 5 g de batido. Las mezclas se sonicaron a 25 °C durante 15 min y se centrifugaron a 4°C y 12000 g durante 15 min. De cada extracción se obtuvo y combinó el sobrenadante hasta completar 25 mL con el solvente de extracción. Cada extracto se preparó por triplicado.

La determinación de compuestos fenólicos totales (CFT) se llevó a cabo adaptando la técnica de Folin-Ciocalteu a microplacas donde cada extracto se analizó por triplicado, colocando en cada pocillo: 25 µL de extracto, 75 µL de agua destilada, 25 µL de solución Folin-Ciocalteu y 100µL de solución 10 % Na₂CO₃. La curva de calibrado se obtuvo reemplazando los 25 µL de extracto por 25 µL de soluciones patrones de ácido gálico (12,5; 25,0; 50,0; 100,0; 250,0 y 500,0 ppm) y en el blanco de reactivos se usó solución de extracción para compuestos fenólicos. Se dejó reposar 30 minutos en oscuridad y se midió absorbancia a 760 nm en lector de microplacas Biochrom Asys UVM 340 (Biochrom Ltd., Cambridge, Reino Unido). La identificación de compuestos fenólicos se realizó por HPLC de acuerdo con el protocolo publicado por Simirgiotis y Schmeda-Hirschmann (2010) utilizando un instrumento de cromatografía líquida (LC) Prominence LC-20AT (Shimadzu Co., Kyoto, Japón) equipado con un detector de matriz de fotodiodos (DAD) y con software LabSolutions para control y procesamiento de datos. La separación se realizó utilizando una columna Phenomenex Gemini de fase reversa, 25 mm x 4,6 mm, con tamaño de partícula de 5 µm (Phenomenex, Torrance, CA, EE. UU.) y un sistema de elución con solvente en gradiente con ácido fórmico (A) al 1 % y acetonitrilo (B) según el siguiente programa: 90-75 % A durante 30 min; y luego, 75-40 % A durante 30 min a un caudal de 1 mL min⁻¹. La identificación de los compuestos fenólicos se realizó por comparación de tiempos de retención y espectros DAD con estándares puros. La cuantificación de compuestos fenólicos se realizó mediante el método del patrón externo y los resultados se expresaron en g kg⁻¹ batido.

La extracción de vitamina C o ácido ascórbico total (AAT) se realizó de acuerdo a Van de Velde et al. (2012). Para ello, se pesaron 2 g de batido y se agregaron 10 mL de solución de extracción (30 g/L de ácido metafosfórico + 80 g/L de ácido acético glacial). La mezcla fue homogeneizada, tratada en baño de ultrasonido a 10 °C durante 15 min y centrifugada a 4 °C y 12000 g durante 15 min (Neofuge 18R Heal Force centrifuge, Shanghai, China). Se agregó 0,2 mL de solución de DTT (0,005 g DTT L⁻¹ preparado en fosfato de potasio dibásico 2,58 M) a 1 mL de sobrenadante, se homogeneizó y se dejó reposar a temperatura ambiente, en oscuridad, durante 1,5 h. Finalmente, se agregaron 4,8 mL de fase móvil de vitamina C (buffer acetato de sodio/ácido acético 0,03 M; 5% metanol), se homogeneizó y se filtró usando filtro jeringa de Nylon de 45 µm. Cada extracto se preparó por duplicado. La cuantificación se realizó mediante HPLC de fase reversa, con columna Phenomenex Gemini 5 µm, C18, a temperatura ambiente y a 266 nm. La fase móvil, en condiciones isocráticas, consistió en un buffer de acetato de sodio/ácido acético 0,03 M, metanol al 5%, cuyo pH se ajustó a 5,8.

Las curvas de degradación térmica de los compuestos bioactivos se ajustaron considerando dos modelos: cinética de orden cero (1) y de primer orden (2):

$$C = C_0 - k_T t \quad (1)$$

$$C = C_0 e^{-k_T t} \quad (2)$$

En estas ecuaciones, C es la concentración residual del compuesto bioactivo luego del tratamiento térmico a la temperatura T[°C] a tiempo t; C₀ es la concentración inicial a t=0 y k es la constante cinética a la temperatura T.

A partir de las constantes de inactivación térmica (k), correspondientes al modelo seleccionado, para cada producto se calcularon los valores de energía de activación (E_a) realizando la regresión lineal de la expresión de Arrhenius. El tiempo de reducción decimal (D_T) representa el tiempo necesario, a una temperatura dada, para reducir en un 90 % la concentración inicial del compuesto. Para las reacciones de primer orden, el valor D_T es inversamente proporcional a la constante de inactivación a una dada temperatura (3). Las constantes de resistencia térmica (z) se determinaron a partir de la representación gráfica de log D_T en función de la temperatura.

$$D_T = \frac{\ln 10}{k_T} \quad (3)$$

El software estadístico Statgraphics Centurion XVI fue usado para realizar el análisis de varianza (ANOVA), el análisis de regresión lineal y no lineal y para determinar los parámetros de los modelos. Para determinar diferencias significativas entre medias se usó el test de diferencias mínimas (LSD) al 5% de nivel de significación (P < 0,05). Para determinar el ajuste de los modelos a los datos experimentales se usó el coeficiente de determinación (R²).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 1 se presenta la evolución del contenido de CFT en función del tiempo, para cada temperatura, en BB (Fig.1.A) y en el BF (Fig.1.B), respectivamente. Los datos experimentales mostraron que en BB tratado 5 min a 70°C, el contenido de CFT se redujo en un 8,3 %; sin embargo, con el incremento del tiempo de tratamiento se observó una tendencia creciente, alcanzándose un aumento del 23,5-28,0 % al cabo de 40-60 min. Para el mismo batido tratado a 80 °C, la concentración de CFT siempre fue mayor que la inicial para todos los tiempos de tratamiento, registrándose un incremento máximo de 43,6 % a los 40 min. En cambio, cuando el tratamiento se efectuó a 90 °C, se observó un aumento máximo de 45,3 % a los 5 min, para luego disminuir hasta alcanzar valores en un 5 a 10 % inferiores al inicial a los 40-60 min de procesamiento. Por otro lado, en BF tratado a 70 °C, la retención de CFT osciló entre el 85,5 y 98,9 % durante todo el ensayo. Cuando el procesamiento se realizó a 80 °C, BF mostró un incremento inicial del 5,8 % respecto del valor inicial; pero la retención de estos compuestos bioactivos disminuyó a un 75,1-84,2 % cuando los tiempos de operación aumentaron. En BF tratado a 90 °C, la retención de CFT, en general, fue siempre inferior a la alcanzada en los tratamientos menos severos, siendo de 72,4 % después de 60 min de procesamiento.

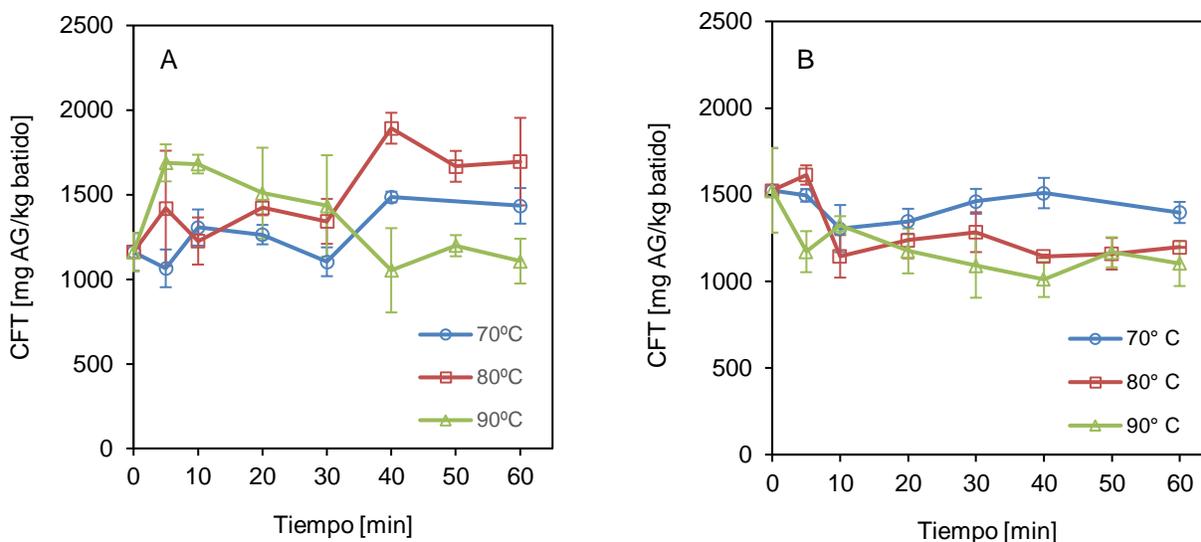


Fig. 1: Evolución del contenido de CFT en BB (A) y en BF (B) a diferentes temperaturas.

Turturică et al. (2016) informaron una reducción de CFT entre 4-23 % durante los primeros 5 min de tratamiento en extracto de ciruela a 70, 80 y 90 °C. Estos valores de reducción se incrementaron a 29-41 % cuando los tiempos de tratamiento térmico fueron superiores a los 20 min. En contraposición, Gonçalves et al. (2020), tanto para una pulpa, mezcla de pera, frutilla, remolacha y jugo de limón, y, otra constituida por pera y ananá, no observaron modificaciones significativas de CFT después de tratar ambas preparaciones con diferentes condiciones temperatura – tiempo (80 °C durante 10 y 20 min; 85 °C durante 2,5 y 20 min; 90 °C durante 2,5 y 10 min; y 98 °C durante 1 y 2 min). Por otra parte, Baroni et al. (2018) asociaron un incremento de los polifenoles en mermelada de membrillo tratada a 105 °C a la hidrólisis de moléculas grandes y posterior isomerización.

Considerando lo anterior, el comportamiento observado para los CFT en BB y en BF, puede deberse a la presencia de dos mecanismos. El incremento de CFT se debería a un mecanismo de liberación, donde se produce un aumento en el contenido CFT posiblemente debido a la alteración y ruptura de las paredes celulares. En zanahoria, pitahaya y brócoli cortado, el contenido de CFT se ha duplicado y hasta quintuplicado, en relación con los vegetales intactos (Surjadinata y Cisneros-Zevallos, 2012; Guan et al, 2021; Martínez-Hernández et al., 2011). En tanto que, la disminución del contenido de CFT se puede asociar a la degradación térmica de los compuestos fenólicos fuera de una matriz protectora (Badin et al., 2020). Los compuestos fenólicos identificados y cuantificados, tanto en BB como en BF, se presentan en la Tabla 1. En ambos batidos se determinó la presencia de dos flavanonas características de la naranja (naringenina-7-O-rutinósido y hesperedina-7-O-rutinósido), antocianinas que se asocian a la frutilla (cianidina-3-O-glucósido, pelargonidina-3-O-glucósido y pelargonidina-3-O-rutinósido); y, por último, ácido clorogénico presente en manzana y frutilla.

En este trabajo se presenta únicamente la evolución del contenido de pelargonidin-3-O-glucósido (P3G) en BB (Fig.2.A) y en BF (Fig.2.B) y de cianidina-3-O-glucósido (C3G) en BB (Fig.3.A) y en BF (Fig.3.B) en función del tiempo de tratamiento a diferentes temperaturas. En BB, hubo un incremento del 6 % en la concentración de P3G con respecto al valor inicial cuando el batido fue tratado a 70 °C durante 60 min; sin embargo, cuando el tratamiento térmico se realizó a 80 y 90 °C la concentración de P3G disminuyó, siendo los porcentajes de retención 73,7 y 72,3 %, respectivamente. En el batido con fibra de descarte de zanahoria incorporada, la evolución de P3G mostró una tendencia decreciente con el tiempo y temperatura de tratamiento, obteniéndose retenciones del 72,9; 60,3 y 44,9 % con respecto a la concentración inicial a 70,80 y 90 °C, respectivamente. Resultados similares fueron informados por Özşen y Erge (2013) para antocianinas en pulpa de frutilla. En cuanto a C3G, en BB, la retención de este CF fue 68,8; 26,3 y 26,7 % al cabo de 60 min a 70, 80 y 90 °C, respectivamente; mientras que, en BF si bien la retención fue de 59,3 % a 70 °C, los valores fueron superiores a los obtenidos en el batido sin FD agregada cuando la bebida se trató a 80 y 90 °C, siendo estos 36,6 y 31,1%, respectivamente.

Tabla 1: Tiempos de retención (t_R), longitud de onda del máximo de absorbancia ($\lambda_{m\acute{a}x}$) y longitud de onda a la que se realiza la cuantificación (λ) de los compuestos fenólicos identificados en BB y BF.

Compuesto fenólico	t_R [min]	$\lambda_{m\acute{a}x}$ [nm]	λ [nm]
Cianidina-3-O-glucósido	12,4 ± 0,1	516	520
Ácido clorogénico	12,5 ± 0,4	326	320
Pelargonidina-3-O-glucósido	15,4 ± 0,1	501	520
Pelargonidina-3-O-rutinósido	16,4 ± 0,1	517	520
Naringenina-7-O-rutinósido	29,4 ± 0,2	283, 329	280
Hesperidina-7-O-rutinósido	32,0 ± 0,4	284, 328	280

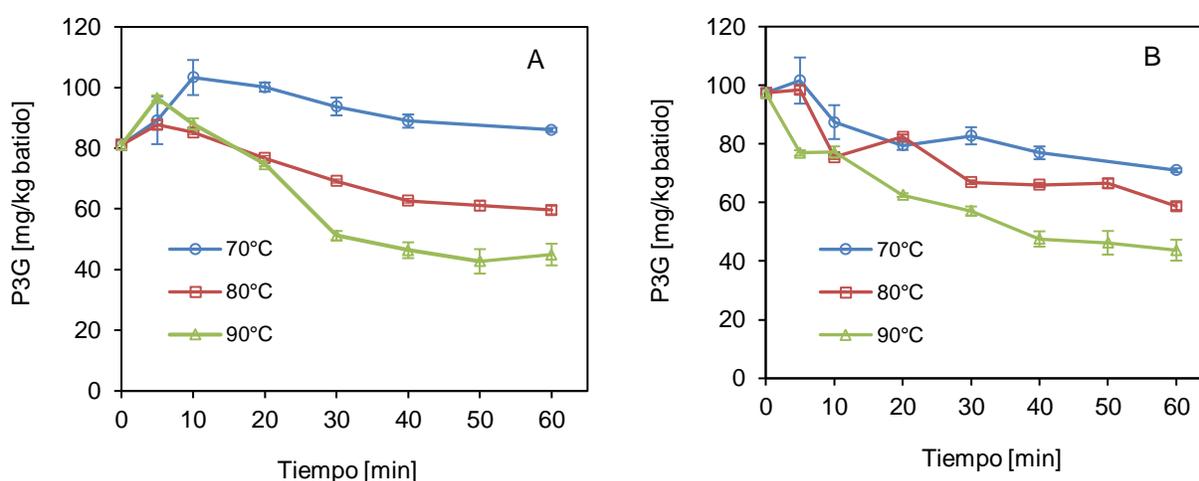


Fig. 2: Evolución del contenido de P3G en BB (A) y en BF (B) a diferentes temperaturas.

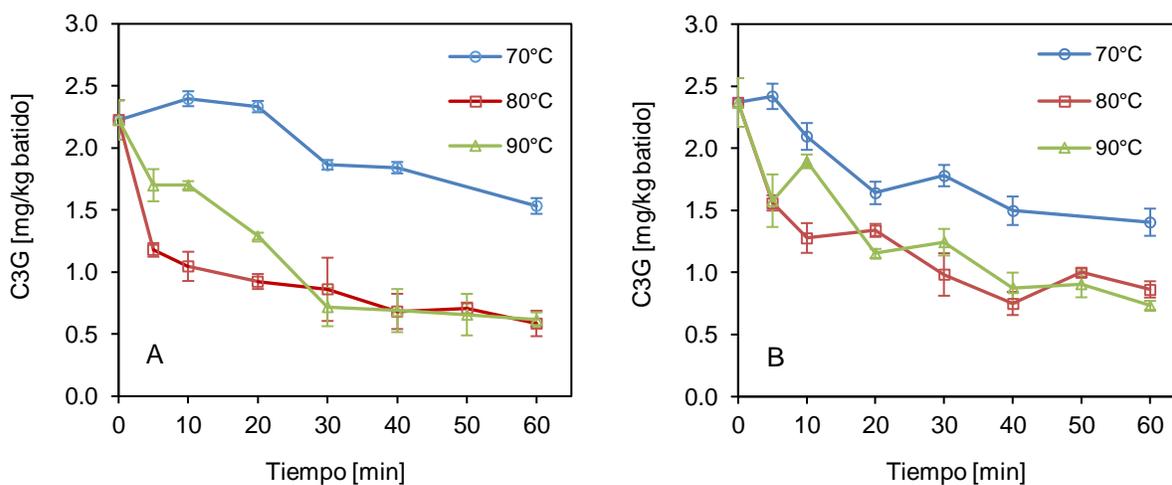


Fig. 3: Evolución del contenido de C3G en BB (A) y en BF (B) a diferentes temperaturas.

Los datos experimentales obtenidos se ajustaron con modelos cinéticos de orden cero y primer orden. Para ambos CF, el modelo de primer orden ajustó mejor los datos experimentales; excepto para la degradación de P3G a 70°C, en BB (Tabla 2). En este caso, no se encontró modelo que explique el comportamiento observado. Para P3G en BF y para C3G en BB y en BF, con los valores de k obtenidos con el modelo de primer orden, se estimó el tiempo de reducción decimal (D) a 70, 80 y 90 °C. Asimismo, con los valores de k obtenidos considerando que tanto la degradación de P3G en BF, como la de C3G en BB y en BF, responden a una cinética de primer orden, se calcularon los parámetros termocinéticos: energía de activación (E_a) y constante de resistencia térmica (z). En BF, para P3G, la E_a fue de 43,3 kJ/mol ($R^2 = 0,994$) y el valor z fue de 54,9°C ($R^2 = 0,996$).

Por otro lado, para C3G, la E_a fue de 58,6 kJ/mol en BB ($R^2 = 0,896$); y de 31,9 kJ/mol en BF ($R^2 = 0,964$), y los valores z fueron de 41,0 °C en BB ($R^2 = 0,885$) y de 74,6 °C en BF ($R^2 = 0,958$). Los resultados obtenidos señalarían un efecto termoprotector de la FD sobre los compuestos fenólicos considerados. Específicamente, el mayor valor de z calculado para C3G en BF indicaría que la fibra de descarte de zanahoria contribuye a la estabilidad térmica de dicho compuesto en batidos vegetales tratados entre 70 y 90 °C.

Se han informado resultados diferentes en lo que refiere a cuál es la cinética que explica la degradación térmica de P3G y C3G en diferentes matrices tratadas térmicamente. Li et al (2021) determinaron que soluciones de P3G, tratadas entre 60 y 96 °C, se degradan según una cinética de orden 1,5. En la deshidratación de morera, Zhou et al. (2017) encontraron que la degradación térmica de cianidina-3-O-glucósido y cianidina-3-O-rutinósido sigue una cinética de segundo orden. En contraposición, la cinética de primer orden representa adecuadamente el efecto de la temperatura sobre las antocianinas monoméricas en pulpa de frambuesa (Badin et al., 2020) y mermelada de frutilla (Patrás et al., 2011).

Tabla 2: Constantes cinéticas (k) para P3G y C3G para los modelos de orden cero y primer orden y tiempos de reducción decimal (D) para modelo de primer orden en BB y BF.

Compuesto fenólico	T [°C]	BB					BF				
		Orden cero		Primer orden			Orden cero		Primer orden		
		k [min ⁻¹]	R ²	k [min ⁻¹]	R ²	D [min]	k [min ⁻¹]	R ²	k [min ⁻¹]	R ²	D [min]
P3G	70	0,0481	0,017	0,0004	0,013	-	0,4643	0,807	0,0055	0,838	418,7
	80	0,4898	0,903	0,0068	0,919	-	0,6126	0,800	0,0080	0,832	287,9
	90	0,9092	0,837	0,0143	0,866	-	0,8101	0,879	0,0127	0,930	181,3
C3G	70	0,0100	0,414	0,0073	0,833	315,5	0,0175	0,824	0,0094	0,856	245,0
	80	0,0186	0,603	0,0182	0,795	126,5	0,0191	0,647	0,0143	0,718	161,0
	90	0,0262	0,854	0,0225	0,898	102,4	0,0231	0,801	0,0174	0,867	132,4

La degradación de la vitamina C o ácido ascórbico total (ATT) también fue estudiada en BB y en BF por Tank et al. (2023) y los resultados de ese estudio se presentan en este trabajo. La Fig. 4 muestra la evolución del AAT en función del tiempo de tratamiento a 70, 80 y 90°C. Para ambas formulaciones, BB (Fig.4.A) y BF (Fig.4.B), se observó la disminución de la concentración AAT, expresada en mg AAT por porción de batido (250 mL de batido), al aumentar la temperatura y el tiempo de procesamiento. Comportamientos similares fueron informados por Badin et al. (2020) en pulpa de frambuesa.

Los valores experimentales obtenidos para AAT fueron ajustados considerando modelos de cero y primer orden y se encontró que la degradación térmica de la vitamina C en ambos batidos se describía mejor utilizando el modelo de primer orden (Tabla 3), y los valores de las constantes cinéticas aumentaron con la temperatura de tratamiento, tanto en BB como en BF. La degradación de AAT también ha sido modelada por una cinética de primer orden en pulpa de frambuesa (Badin et al., 2020), en jugo de ananá (Dhakal et al, 2018) y en pulpa de mango (Mendoza-Corvis et al., 2015).

A partir de los valores de las constantes cinéticas obtenidas para cada temperatura, se estimaron la energía de activación (E_a) y el valor z correspondientes a la degradación de vitamina C. En el BB, la E_a fue de 83,3 kJ/mol ($R^2 = 0,959$); mientras que, en BF, el valor obtenido fue 24,9 kJ/mol ($R^2 = 0,951$). Por otro lado, el valor z estimado para BB fue 28,7 °C ($R^2 = 0,952$); mientras que, este valor se incrementó significativamente para BF siendo 96,2 °C ($R^2 = 0,944$). El incremento del valor z en BF sugiere, dentro del rango de temperaturas evaluadas, un efecto protector del agregado de fibra en cuanto a la degradación térmica de vitamina C. Este efecto resulta especialmente interesante teniendo en cuenta que la vitamina C sería el compuesto bioactivo más termolábil de los estudiados en estos batidos.

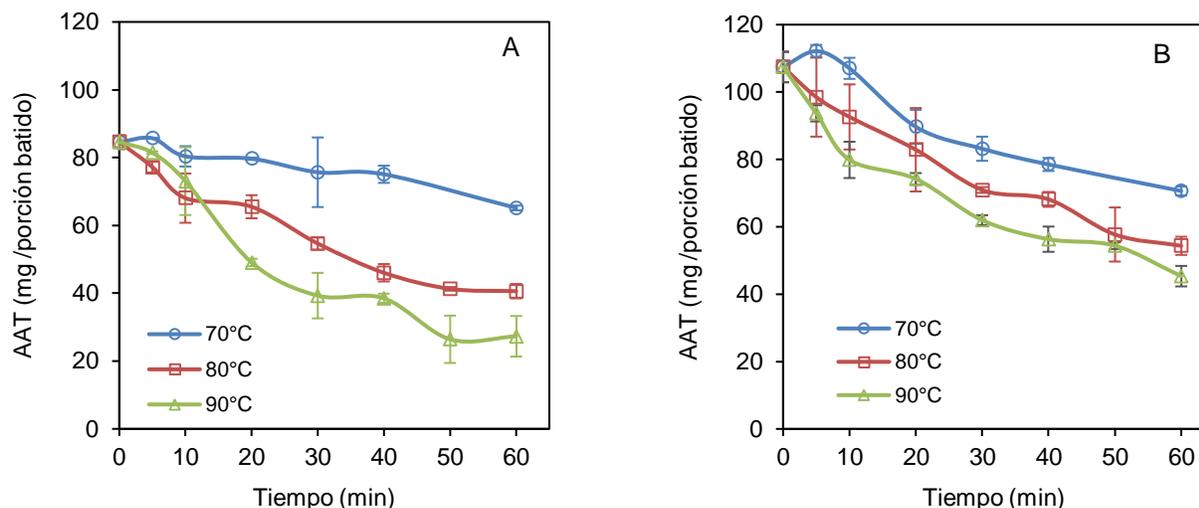


Fig. 4: Evolución del contenido de AAT en BB (A) y en BF (B) a diferentes temperaturas (Tank et al., 2023)

Tabla 3: Constantes cinéticas (k) para AAT para los modelos de orden cero y primer orden y tiempos de reducción decimal (D) para modelo de primer orden en BB y BF (Tank et al., 2023)

T [°C]	BB					BF				
	Orden cero		Primer orden			Orden cero		Primer orden		
	k [min^{-1}]	R^2	k [min^{-1}]	R^2	D [min]	k [min^{-1}]	R^2	k [min^{-1}]	R^2	D [min]
70	0,3169	0,948	0,0042	0,942	548,3	0,7275	0,911	0,0081	0,948	284,3
80	0,7426	0,949	0,0128	0,972	179,9	0,8735	0,970	0,0114	0,998	202,0
90	1,0428	0,913	0,0209	0,952	110,2	0,9267	0,910	0,0131	0,959	175,8

CONCLUSIONES

Este trabajo permite conocer el efecto de la incorporación de la FD a batidos frutales sobre los compuestos bioactivos durante el tratamiento a tres temperaturas diferentes (70, 80 y 90 °C). En general, las cinéticas de primer orden son las que mejor representaron las evoluciones de los compuestos bioactivos analizados P3G, C3G y vitamina C durante los tratamientos térmicos. En el BB, durante el tratamiento térmico a 70 y 80 °C se observaron incrementos en la concentración de CFT al cabo de 60 min, al igual que a 90 °C para tiempos inferiores a los 30 min; mientras que, en BF, el contenido de estos compuestos disminuyó, pero la retención fue superior al 72 % al cabo de 60 min a todas las temperaturas ensayadas. Respecto a la vitamina C, los valores E_a y z muestran que la FD tiene un efecto protector sobre la termoestabilidad de la vitamina lo que, junto al efecto beneficioso del consumo de fibra *per se*, contribuiría a preservar el potencial bioactivo de batidos tratados térmicamente. Asimismo, los parámetros termocinéticos obtenidos permiten diseñar tratamientos térmicos para minimizar la pérdida de estos compuestos bioactivos en batidos vegetales adicionados con FD proveniente de descarte de zanahoria.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional del Litoral (UNL) y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) por el apoyo financiero brindado a través de los proyectos CAI+D UNL 2020 y PICT 2017 N° 2265; y, a Micaela Tank y Vanesa Monci, estudiantes de la carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ, UNL), y a Melisa Donda Zbinden, estudiante de postgrado de la UNL, por colaboración parcial a este trabajo.

REFERENCIAS

- Aimaretti, N., Clementz, A., y otros cuatro autores, Proceso de extracción de subproductos a partir de zanahoria, AR099281A1, Patente de Invención INPI P20140104127 (2014)
- Badin, E.E., Rossi, Y.E., y otros cuatro autores, Thermal processing of raspberry pulp: Effect on the color and bioactive compounds, <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.08.016>, Food and Bioproducts Processing, 124, 469-477 (2020)
- Baroni, M.V., Gastaminza, J., y otros ocho autores, Changes in the antioxidant properties of quince fruit (*Cydonia oblonga* Miller) during jam production at industrial scale, <http://dx.doi.org/10.1155/2018/1460758>, J. Food Qual. 2018, 1-9 (2018)
- Dhakar, S., Balasubramaniam, V.M., Ayvaz, H., y Rodriguez-Saona, L., Kinetic modeling of ascorbic acid degradation of pineapple juice subjected to combined pressure-thermal treatment, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.12.016>, Journal of Food Engineering, 224, 62-70 (2018)
- Dong, R., Liao, W., y otros ocho autores, Enrichment of yogurt with carrot soluble dietary fiber prepared by three physical modified treatments: Microstructure, rheology and storage stability, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102901>, Innovative Food Science & Emerging Technologies, 75, 102901 (2022)
- Elleuch, M., Bedigian, D., y otros cuatro autores, Dietary fiber and fiber-rich by-products of food processing: Characterization, technological functionality and commercial applications: A review, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.077>, Food Chemistry, 124(2), 411-421 (2011)
- Thieme, C., Westphal, A., Malarski, A., y Böhm, V., Polyphenols, vitamin C, in vitro antioxidant capacity, α -amylase and COX-2 inhibitory activities of citrus samples from Aceh, Indonesia, <https://doi.org/10.1024/0300-9831/a000481>, Int. J. Vitam. Nutr. Res., 89 (5-6), 337-347 (2019)
- Gonçalves, E.M., Raposo, I., y otros cinco autores, Quality changes during thermal processing of two mixed formulas of fruits and vegetables pulps, <https://doi.org/10.9755/ejfa.2020.v32.i4.2093>, Emir. J. Food Agric., 32(4), 271-280 (2020)
- Guan, Y., Hu, W., y otros cinco autores, Proteomic analysis validates previous findings on wounding-responsive plant hormone signaling and primary metabolism contributing to the biosynthesis of secondary metabolites based on metabolomic analysis in harvested broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*), <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110388>, Food Research International, 145, 110388 (2021)
- Li, W., Gu, M., y otros siete autores, Glycosides changed the stability and antioxidant activity of pelargonidin, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111581>, LWT - Food Science and Technology 147, 111581 (2021)
- Martínez-Hernández, G.B., Gómez, P.A., y Pradas, I., Moderate UV-C pretreatment as a quality enhancement tool in fresh-cut Bimi Broccoli, <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.06.015>, Postharvest Biol. Technol., 62, 327-337 (2011)
- Mendoza-Corvis, F.A., Hernández, E.J., y Ruiz, L.E., Efecto del Escaldado sobre el Color y Cinética de Degradación Térmica de la Vitamina C de la Pulpa de Mango de Hilacha (*Mangifera indica* var *magdalena river*), <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000300003>, Información Tecnológica, 26(3), 9-16 (2015)
- Ministerio de Salud Argentina, Guías Alimentarias para la Población Argentina (GAPA), https://bancos.salud.gob.ar/sites/default/files/2020-08/guias-alimentarias-para-la-poblacion-argentina_manual-de-aplicacion_0.pdf (2016)
- Nunes, M.A., Costa, A.S.G., y otros cinco autores, How functional foods endure throughout the shelf storage? Effects of packing materials and formulation on the quality parameters and bioactivity of smoothies, <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2015.07.061>, LWT - Food Science and Technology, 65, 70-78 (2016)
- Özşen, D., y Erge, H.S., Degradation Kinetics of Bioactive Compounds and Change in the Antioxidant Activity of Wild Strawberry (*Fragaria vesca*) Pulp During Heating, <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0910-x>, Food Bioprocess Technol., 6, 2261-2267 (2013)
- Patras, A., Brunton, N. P., Da Pieve, S., y Butler, F., Impact of high pressure processing on total antioxidant activity, phenolic, ascorbic acid, anthocyanin content and colour of strawberry and blackberry purées, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2008.12.004>, Innovative Food Science & Emerging Technologies, 10(3), 308-313 (2009)
- Patras, A., Brunton, N.P., Tiwari, B.K., y Butler, F., Stability and degradation kinetics of bioactive compounds and colour in strawberry jam during storage, <https://doi.org/10.1007/s11947-009-0226-7>, Food Bioprocess Technol., 4, 1245 - 1252, (2011)

- Ramírez, M.R., Manuale, D., y Yori, J.C., Assessment of effectiveness of oral supplementation of isolated fiber of carrot on metabolic parameters in mature rats, <http://doi.org/10.1016/j.fshw.2023.03.016>, Food Science and Human Wellness, 12, 2022-2028 (2023)
- Reyes, M.S., Vignatti, C.I., y Pirovani, M.E., Competencias en alimentación: una mirada hacia el interior de las preparaciones vegetales licuadas tipo "smoothie", <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2023.4.86128e>, Educación Química, 34 (Número Especial), 55-67 (2023)
- Ribas-Agustí, A., Martín-Belloso, O., Soliva-Fortuny, R., y Elez-Martínez, P., Food processing strategies to enhance phenolic compounds bioaccessibility and bioavailability in plant-based foods, <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1331200>, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 58(15), 2531-2548 (2017)
- Rodríguez-Mateos, A., Vauzour, D., y otros siete autores, Bioavailability, Bioactivity and Impact on Health of Dietary Flavonoids and Related Compounds: An Update, <https://doi.org/10.1007/s00204-014-1330-7>, Arch. Toxicol., 88, 1803 -1853 (2014)
- Rodríguez-Roque, M. J., Ancos, B. D., y otros cuatro autores, Impact of food matrix and processing on the in vitro bioaccessibility of vitamin C, phenolic compounds, and hydrophilic antioxidant activity from fruit juice-based beverages, <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.01.020>, Journal of Functional Foods, 14, 33 - 43 (2015)
- Santana Vaz Rezende, E., Lima, G. C., y Veloso Naves, M. M., Dietary fibers as beneficial microbiota modulators: A proposed classification by prebiotic categories, <https://doi.org/10.1016/j.nut.2021.111217>, Nutrition, 89, 111217 (2021)
- Simirgiotis, M.J., y Schmeda-Hirschmann, G., Determination of phenolic composition and antioxidant activity in fruits, rhizomes and leaves of the white strawberry (*Fragaria chiloensis* spp. *chiloensis* form *chiloensis*) using HPLC-DAD-ESI-MS and free radical quenching techniques, <http://doi.org/10.1016/j.jfca.2009.08.020>, Journal of Food Composition and Analysis, 23(6), 545 - 553 (2010)
- Surjadinata, B.B., y Cisneros-Zevallos, L., Biosynthesis of phenolic antioxidants in carrot tissue increases with wounding intensity, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.01.097>, Food Chemistry, 134(2), 615-624 (2012)
- Tank, M.M., Monci, V.P., y otros cuatro autores, Incorporación de fibra dietaria en batidos vegetales: Degradación térmica de ácido ascórbico, IV Congreso Argentino de Biología y Tecnología Poscosecha, ISSN: 2314-3991, 10(2), 194 (2023)
- Turturică, M., Stănciuc, N., Bahrim, G., y Râpeanu, G., Effect of thermal treatment on phenolic compounds from plum (*Prunus domestica*) extracts: a kinetic study, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.10.024>, Journal of Food Engineering, 171, 200-207 (2016)
- Van de Velde, F., Vignatti, C., y otros cinco autores, Optimization and validation of a UV-HPLC method for vitamin C determination in strawberries (*Fragaria ananassa* Duch.), using experimental designs, <http://doi.org/10.1007/s12161-011-9347-5>, Food Analytical Methods, 5(5), 1097-1104 (2012)
- Vénica, C. I., Spotti, M. J., y otros tres autores, Influence of carrot fibre powder addition on rheological, microstructure and sensory characteristics of stirred-type yogurt, <https://doi.org/10.1111/jifs.14415>, International Journal of Food Science & Technology, 55(5), 1916-1923 (2019)
- Zhou, M., Chen, Q., y otros tres autores, Degradation kinetics of cyanidin 3-o-glucoside and cyanidin 3-o-rutinoside during hot air and vacuum drying in mulberry (*Morus alba* L.) fruit: a comparative study based on solid food system, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.131>, Food Chemistry, 229, 574-579 (2017)