

# Estudio del Fenómeno de Difusión de Colorantes Naturales en Cerezas en Conserva Elaboradas con Polialcoholes

## Study of the Diffusion Phenomenon of Natural Dyes in Preserved Polyol Cherries

Presentación: 05/08/2024

Doctorando/a:

**Juan Ignacio GONZALEZ PACHECO**

Laboratorio de Alimentos y Tratamiento de Efluentes (LATE), Departamento de Ingeniería Química, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, C. Rodríguez 273, Ciudad de Mendoza, Mendoza - Argentina  
[jgonzalez534@gmail.com](mailto:jgonzalez534@gmail.com)

Director/a:

**Mariela Beatriz MALDONADO**

### Resumen

Esta tesis investiga la viabilidad de reemplazar los colorantes sintéticos en las cerezas confitadas con pigmentos naturales extraídos del rábano, la remolacha y la gardenia, abordando la creciente demanda de los consumidores de productos alimenticios más saludables y naturales. El estudio abarca un análisis de la estabilidad y la cinética de difusión de estos colorantes naturales dentro de la matriz de la cereza durante un proceso de confitado. La primera fase de la investigación se centra en caracterizar la estabilidad de los colorantes naturales seleccionados en diversas condiciones de procesamiento, como su resistencia a las fluctuaciones de temperatura, la exposición a la luz y las variaciones de pH. La segunda fase profundiza en el intrincado proceso de difusión del colorante dentro de los tejidos de la cereza. Empleando una combinación de técnicas experimentales y modelos matemáticos, se cuantificó la cinética de difusión de cada colorante en pulpa y piel de la cereza durante el endulzamiento con una formulación de 50% sacarosa/50% xilitol de 35 Bx. Esto implicó analizar la influencia de las variables clave de procesamiento, como la temperatura (40, 50 y 60°C), la concentración de colorante (119, 238 y 357 ppm) durante el tiempo de impregnación, en la velocidad de transporte y el grado de difusión del pigmento. Al dilucidar los mecanismos subyacentes que rigen el transporte del colorante dentro de la matriz de la fruta, se estableció un modelo matemático predictivo (1D) como primera aproximación, quedando avanzar en más dimensiones (2D y 3D), para optimizar el proceso de confitado. Parte de la metodología y resultados presentados ha sido publicada en la revista Scientific Reports de Nature.

Palabras clave: Modelado matemático, Fenómenos de transferencia de masa, Polioles, Cerezas, Colorantes de origen vegetal, Difusividades efectivas, Producción de alimentos naturales.

### Abstract

The ongoing thesis pertains to the potential substitution of artificial colourants in candied cherries with plant-based dyes derived from radish, beet, and gardenia. This endeavour aligns with the escalating consumer demand for healthier and more natural food products. The research encompasses a comprehensive analysis of the stability and diffusion kinetics of these natural colorants within the cherry matrix during a candying process. The initial phase is dedicated to characterising the stability of the selected natural colourants under diverse processing conditions, including their resilience to temperature variations, light exposure, and pH fluctuations. Subsequently, the investigation delves deeper into the intricate diffusion

process of the colorant within the cherry tissues. Employing experimental techniques and mathematical models, the diffusion kinetics of each colourant in both skin and cherry flesh during sweetening with a 50% sucrose/50% xylitol formulation of 35 Bx was quantified. This entailed the analysis of crucial processing variables such as temperature (40, 50, and 60°C), dye concentration (119, 238, and 357 ppm) during impregnation time on the transport rate and extent of pigment diffusion. A predictive mathematical model (1D) was devised to comprehend the mechanisms dictating the transport of dye within the fruit matrix. This marks an initial step, affording the opportunity to progress into higher dimensions (2D and 3D), with the aim of refining the optimisation of the candied process. Part of the methodology and findings outlined have been previously published in Nature's Scientific Reports.

Keywords: Mathematical modelling, Mass transfer phenomena, Polyols, Cherries, Plant-based dyes, Effective diffusivities, Natural food production.

## Introducción

El tono rojo cautivador y brillante de las cerezas confitadas, una delicia de confitería apreciada en todo el mundo a menudo esconde una verdad menos atractiva: el uso generalizado de colorantes artificiales en su producción (Sigurdson et al., 2017). Si bien estos colorantes sintéticos imparten un color vibrante deseado, la creciente conciencia de los consumidores sobre sus posibles efectos adversos para la salud ha impulsado una progresiva demanda de alternativas naturales en los productos alimenticios (Fernández-López et al., 2020). Este cambio de paradigma hacia opciones alimentarias más saludables y naturales ha impulsado a los investigadores y fabricantes de alimentos por igual a explorar soluciones de colorantes alternativos que no comprometan ese atractivo visual.

Esta investigación profundiza en el potencial prometedor de reemplazar los colorantes artificiales en las cerezas confitadas con pigmentos naturales derivados de fuentes fácilmente disponibles y sostenibles: rábano, remolacha y gardenia (Nabi et al., 2023). Estos pigmentos naturales, conocidos por sus vibrantes tonos rojos y violáceos, ofrecen una alternativa más segura y potencialmente más inocua a los colorantes sintéticos, en perfecta sintonía con la creciente preferencia de los consumidores por opciones alimentarias naturales y saludables (Abedini et al., 2023).

En este estudio se proporciona una comprensión integral de la viabilidad de utilizar estos pigmentos naturales como sustitutos efectivos de los colorantes artificiales en cerezas confitadas con polialcoholes (González Pacheco & Maldonado, 2024; Maldonado & González Pacheco, 2020, 2022). Para lograrlo, se caracterizó meticulosamente la estabilidad de estos colorantes naturales en una variedad de condiciones físicas relevantes, imitando las que se encuentran durante el proceso de confitado. Factores como las fluctuaciones de temperatura, la exposición a la luz y las variaciones de pH pueden afectar significativamente la estabilidad y la retención del color de los pigmentos naturales. Así mismo, se realizó un enfoque específico en comprender la cinética de la difusión del colorante dentro de la piel y pulpa de la cereza durante el proceso de endulzamiento y coloración, donde se emplearon soluciones de sacarosa y polialcoholes como agentes conservantes principales (Wiktor et al., 2022). El estudio se basa en la hipótesis de que la epidermis y el mesocarpio de la cereza, los tejidos primarios responsables de la textura y el color de la fruta sufren cambios estructurales significativos durante el proceso de endulzamiento. Estas transformaciones, impulsadas por el calentamiento, la deshidratación osmótica y la exposición a soluciones concentradas de azúcares, dan como resultado la creación de una matriz que exhibe una mayor permeabilidad inicial a los solutos (Cichowska-Bogusz et al., 2020). Esta permeabilidad facilita la difusión de los colorantes en los tejidos de la fruta, lo que en última instancia influye en el color final del producto. Se espera que la tasa de transferencia de especies colorantes, expresada como difusividad efectiva (González-Pérez et al., 2022), y el grado de penetración del colorante se vean influenciados por una multitud de factores, incluidos, la temperatura, el pH de la solución osmótica, el tipo de colorante y su concentración, según lo dictamina la segunda ley de difusión de Fick. Así mismo, se pretende desarrollar modelos matemáticos predictivos (1D, 2D and 3D), así como soluciones numéricas (Bchir et al., 2021), acerca del comportamiento de transporte de especies en tejidos alimentarios esféricos, atentos a condiciones de frontera de puramente difusivas, convectivas y combinaciones (Ren et al., 2023).

## Desarrollo

### 1. Materiales

En primer lugar, se adquirió un lote de 10 kg de cerezas de cultivo Bing (*Prunus avium*) de Luján de Cuyo, Mayor Drummond, Mendoza, Argentina (coordenadas en grados decimales: -33.00443364309908; -68.86583423899584). Así

mismo, también se obtuvieron cerezas donadas por las empresas Meridiano S.A. y Establecimiento Frutícola Carleti S.A., Mendoza, Argentina. Además, se utilizaron lactitol en polvo (DuPont Corporation, Wilmington, Delaware, EE. UU.), maltitol en polvo (Shandong Lujian Biological Technology Co. Ltd, China), xilitol cristalino (Shandong Lujian Biological Technology Co. Ltd, China) y combinaciones, así como colorante en polvo de eritrosina (Macsen Labs, N.K Agrawal Group, India), colorante en polvo de rojo rábano (FoodRGB Inc., Chicago, Illinois, EE. UU.), colorante en polvo de betalaínas (FoodRGB Inc., Chicago, Illinois, EE. UU.) y colorante en polvo de gardenia roja (Omya Inc., Cincinnati, Ohio, EE. UU.).

## 2. Métodos

### 2.1. Puesta a punto de colorantes

El estudio comenzó examinando cómo los tintes se disuelven y se mantienen en agua a diferentes temperaturas y niveles de pH (González Pacheco et al., 2022). Los tintes estudiados fueron eritrosina, betalaínas, rojo gardenia y rojo rábano. Para evaluar la estabilidad de los tintes, se probó su comportamiento en entornos ácidos y alcalinos ajustando el pH de 1-14 utilizando ácido clorhídrico e hidróxido de sodio de grado alimenticio. Las muestras de los tintes se probaron a temperaturas que oscilaron entre 0 y 160 °C, se almacenaron en varias condiciones y se expusieron a diferentes condiciones de luz durante 10 días. La absorbancia de las muestras se midió utilizando espectrofotometría UV-VIS y el espacio de color CIELAB (luminosidad "L", rojo o verde "a\*" y azul o amarillo "b\*") mediante colorímetro Minolta CR-400, D65 (luz natural), mientras que también se crearon escalas de pH utilizando ácido cítrico o NaHCO<sub>3</sub> para encontrar el rango de pH donde se produce una ligera precipitación del tinte (Azwanida et al., 2015).

### 2.2. Proceso de impregnaciones y coloración

Las muestras de cerezas calibradas (27 mm), descarozadas y desulfitadas (anhídrido sulfuroso a 1500 ppm) se sumergieron en baños de agua corriente a temperatura ambiente durante 24 h, con renovación de agua cada 4 h (Fig. 1. i.). Previo al proceso de impregnación, se prepararon 18 formulaciones con sacarosa y polioles como lactitol, maltitol y xilitol (Fig. 1. j). Se eligió usar la formulación "F8", sacarosa 50% - xilitol 50% por no presentar precipitaciones ni cristalizaciones (Fig. 1. k). Las formulaciones se replicaron para confirmar los resultados y garantizar que no se produjeran cristalizaciones en las formulaciones a usar (Fig. 1. l). Las soluciones se prepararon disolviendo la cantidad correcta de polioles en agua destilada utilizando un agitador magnético de temperatura estable (modelo PIOWAY 78HW-1, BioSmartest, Norces, Argentina) a 60°C y 220 rpm para lograr una sustitución total o parcial de la sacarosa en la solución. Para elaborar las cerezas candeadas, se adoptó un método "Lento o Frances" para impregnar los frutos con soluciones edulcorantes (González Pacheco & Maldonado, 2024; Maldonado & González Pacheco, 2022). La fruta se coloreó cuando la solución alcanzó 35 Bx, utilizando solamente eritrosina y rojo de gardenia a 119, 238 y 357 ppm (dado que los colorantes rojo rábano y betalaínas habían perdido título necesario para teñir), a temperaturas de 40, 50 y 60°C, y luego se dejó reposar en la solución durante 24 horas antes de continuar con la siguiente impregnación (Fig. 1. m). Los parámetros L\*, a\* y b\* del espacio de color CIELAB se midieron en las cerezas en tres puntos específicos (Taghinezhad et al., 2023), con el fin de determinar la variación de a\* con respecto a la posición (Fig. 1. n-o). Además, se desarrolló un modelo matemático relativo al fenómeno de difusión de estas especies colorantes con una frontera de difusión doble. Para determinar la cinética de salida del colorante (Fig. 1. p), se añadió 1 ml de NaHCO<sub>3</sub> al 10% (p/v) para elevar el pH entre 5,5 y 6 en la solución original de 35 Bx sin colorante. Así, el equilibrio de las concentraciones del pigmento en el interior de la cereza y la solución edulcorante se alcanzó después de aproximadamente 6 h a temperatura ambiente de 20 ± 2 °C. Las muestras se midieron mediante espectrofotómetro UV-VIS Perkin Elmer Lambda 35 a 530 nm. Se presenta a modo de visualización un diagrama esquemático que resume la metodología antes mencionada (Fig. 1. q).

### 2.3. Modelo matemático

Se realizó un análisis matemático durante el proceso de coloración y deshidratación osmótica en soluciones azucaradas. Este proceso implicó el ajuste a una ecuación diferencial que rige la difusión molecular a través de la matriz cereza considerada como una esfera sólida, hueca y porosa, con el parámetro a\*, utilizando el método de mínimos cuadrados con un enfoque lineal. Esto permitió obtener una correlación que ajustó los datos experimentales de a\* con la ecuación general que rige el transporte de especies. Finalmente, se obtuvo una serie infinita, Eq. (1), que representa la evolución del parámetro volumétrico adimensional  $a_v^*(\Theta)$  en relación con el tiempo adimensional  $\Theta$ , obtenida por González Pacheco & Maldonado (2024):

$$a_v^*(\Theta) = \frac{3}{(1-A^3)} \sum_1^{\infty} \left\{ \frac{1}{b} \left[ \int_A^1 R^2 \Phi_{n(R)} dR \right]^2 - \frac{WA_0}{\lambda_n^2 - A_1} \left[ e^{(\lambda_n^2 - A_1)\Theta} - 1 \right] \int_A^1 R^2 \Phi_{n(R)} dR \right\} e^{-\lambda_n^2 \Theta} \quad (1)$$

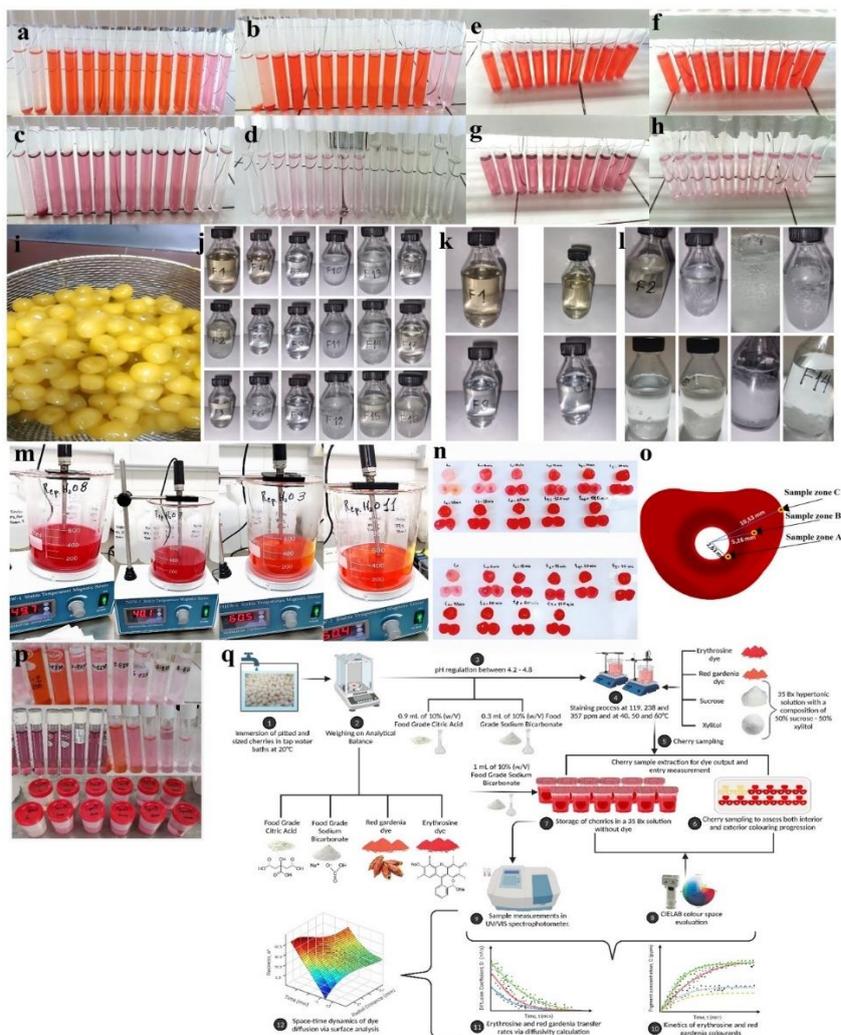


Fig. 1. a-q. Escalas de pH de 1-14 puntos para eritrosina (a), rojo gardenia (b), rojo rábano (c) y betalainas (d). Escalas de pH de 4 a 5 puntos para eritrosina (e), rojo gardenia (f), rojo rábano (g) y betalainas (h). Cerezas desulfitadas tras 24 h en baños de agua (i). Ilustración de las formulaciones preparadas a base de soluciones de sacarosa y polioles (j). Soluciones de sacarosa y xilitol seleccionadas para impregnar los frutos (k). Precipitación y formación de cristales de soluciones hipertónicas luego de 6 meses de almacenamiento (l). Ensayos de tinción de cerezas variando temperatura, colorantes y concentración (m). Muestra de cerezas extraídas regularmente antes de medir los parámetros L, a y b del espacio de color CIELAB (n). Espaciamiento de muestreos por triplicado de los parámetros L, a y b del espacio de color CIELAB en cerezas (o). Muestras de cerezas recolectadas para medir la producción de tinte mediante espectrofotometría UV-VIS (p). Diagrama esquemático que delinea el proceso de coloración de la cereza, que comprende los siguientes pasos: toma de muestra, análisis de color, espectrofotometría UV/VIS, determinación de difusividades efectivas, cinética de entrada y salida del colorante, así como la generación de gráficos de superficie y perfiles de concentración dentro del fruto. Creado con BioRender.com, licencia de publicación: IJ26X22SH1 (q).

Los coeficientes de difusión efectivos y los valores propios  $\lambda_n$  se determinaron utilizando un método iterativo de regresión no lineal que emplea el método de mínimos cuadrados junto con el software *GraphPad PRISM*® (V9.5.1, MA, EE. UU.), usando los primeros 220 términos de la solución analítica para geometría esférica (W. P. da Silva et al., 2009, 2018).

## 2.4. Análisis Estadístico

Se usó la prueba de comparaciones múltiples HSD de Tukey-Kramer y la prueba de Scheffe para tener en cuenta los tamaños de muestra desiguales al determinar las difusividades y la cinética de los colorantes. También se aplicó el método de chi-cuadrado mínimo para realizar los ajustes de las curvas obtenidas del modelo matemático, de cinética de ingreso y salida de colorantes. Se usó ANOVA de una vía con la prueba de Tukey ( $N > 30$ ) cuando estaba presente una distribución normal (verificada por prueba de Shapiro-Wilk), y la prueba de Kruskal-Wallis con prueba de Dunn ( $27 < N < 30$ ) para distribución no normal. Para desviaciones estándar desiguales, empleamos ANOVA unidireccional de Welch con la prueba de Games-Howell. Además, para experimentos agrupados por concentración o tipo de colorante ( $93 < N < 105$ ), se usó ANOVA de dos vías con la prueba de Tukey ( $N = 294$ ). Se usó, con  $p < 0,05$ , el software *BioRender Graph 2024*® (*Science Suite Inc., Canadá*).

## 2.5. Solución numérica

Para predecir los perfiles de concentración y visualizar la entrada gradual de ambos colorantes se utilizó el software *MATLAB® R2017a (V9.2, The MathWorks Inc., MA, USA)*, el cual se configuró con *MATLAB® PDE Solver*, basado en coordenadas esféricas y simetrías angulares para ajustar las expresiones y condiciones de borde. El problema se resolvió mediante el método de elementos finitos con una malla de 15 puntos igualmente espaciados en el intervalo espacial [0,12] y un intervalo de tiempo de [0,60].

## Resultados

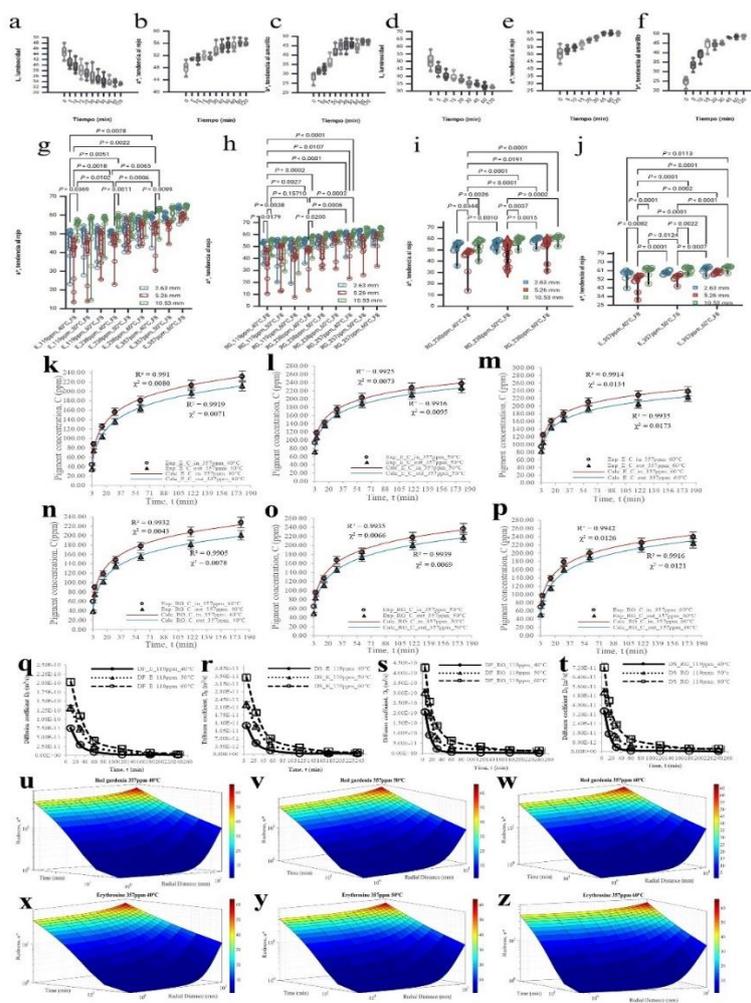


Fig. 2. a-z. Descriptivos de la variación temporal del espacio de color CIELAB (L, a y b) en cerezas, en coloraciones realizadas con eritrosina y rojo de gardenia a 357 ppm y 40°C, en solución edulcorante de composición 50% sacarosa/50% xilitol de 35 Bx (a, b, c, d, e, f). Variación de los valores a\* (enrojecimiento) de eritrosina (E) y gardenia roja (RG) a 2,63, 5,26 y 19,53 mm (10<n<12) dentro de cerezas luego de ser sumergidas en solución de sacarosa/xilitol (F8) durante ensayos con concentraciones de 119, 238 y 357 ppm y temperaturas de 40, 50 y 60°C (30<n<36).

Los valores de p significativos ( $p < 0,05$ ) se identificaron con ANOVA de dos vías con la prueba de Tukey a 40°C (N=294) (g, h). Análisis estadístico de la variabilidad de los valores de a\* en cerezas sumergidas en una solución de sacarosa/xilitol (F8) en zonas de muestreo ubicadas a 2,63, 5,26 y 19,53 mm (10<n<12) medidas desde el centro, en el interior de la cereza, durante ensayos con eritrosina (E) a 357 ppm y gardenia roja (RG) a 238 ppm y temperaturas de 40, 50 y 60°C (30<n<36). Las diferencias significativas de a\* se presentan mediante ANOVA de dos factores con la prueba de Tukey, con  $p < 0,05$  significativos (90<N<108) (i, j). Variaciones en función del tiempo de las concentraciones de entrada (in) y salida (out) de los colorantes eritrosina (E) y gardenia roja (RG) a 357 ppm y temperaturas de 40, 50 y 60°C, ajustadas al modelo analítico utilizando 220 términos de la serie infinita. Los concentraciones obtenidas a través del modelo de esfera hueca fueron ajustados, resultando en coeficientes de determinación ( $R^2$ ) mayores al 99% y valores mínimos de chi-cuadrado ( $\chi^2$ ) en todos los casos (k, l, m, n, o, p). Evolución dependiente del tiempo de difusividades efectivas para los colorantes eritrosina (E) y gardenia roja (RG) en la piel (DS) y pulpa (DF) de cereza a 119 ppm y 40, 50 y 60 °C (q, r, s, t). Gráficos de superficie que representan la variación de los perfiles de concentración para eritrosina y gardenia roja a 357 ppm, expresados como enrojecimiento a\*, en función del tiempo y la distancia radial dentro de cerezas a 40, 50 y 60 °C (u, v, w, x, y, z).

Al inicio, las cerezas poseían una pequeña cantidad de colorante, por lo que mostraban colores más claros (desulfitado). A medida que el colorante penetró en las cerezas, sus colores se volvieron más oscuros y estables. El aumento de la temperatura y la concentración del colorante redujo el tiempo de impregnación y coloración, por lo tanto, estas variables tienen un efecto sinérgico en la penetración y saturación de las cerezas (Fig. 2. a-f). Acorde a la Fig. 2. g-j, al incrementar la temperatura, también aumentaron los valores  $a^*$ . Se observó que los valores  $a^*$  medidos a 2,63 mm y 10,53 mm eran consistentemente más altos que los obtenidos a 5,26 mm. Se dedujo que la medición a 5,26 mm sería la más pequeña debido a la resistencia al transporte que experimenta el colorante y su distancia recorrida antes de llegar al punto de medición. Se obtuvieron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en los valores  $a^*$  proporcionando una comprensión completa de los resultados, evidenciando mayor ingreso por los extremos y más a 10,53 mm, donde se propuso la doble frontera de difusión (Fig. 2. g-j). Por otro lado, con respecto a la Fig. 2. k-p, cuando la temperatura aumentó, ambos colorantes penetraron más, lo que resultó en mayores concentraciones de colorante. Una vez determinada la cinética de entrada de pigmentos, se midió la salida de los mismos, cuando la estructura de la fruta estaba completamente saturada (patrón constante después de períodos de proceso más largos de 60 a 70 min). Por último, se ajustaron los valores de concentración generados por el modelo, lo que resultó en coeficientes  $R^2$  superiores al 99% en todos los casos y valores mínimos de  $\chi^2$  (Fig. 2. k-p). En la Fig. 2. q-t, se presentan las difusividades para eritrosina (E) y rojo gardenia (RG) a 119 ppm en piel y pulpa del fruto a 40, 50 y 60°C. Las difusividades fueron significativamente mayores en pulpa, mientras que mucho menores en piel, posiblemente debido a la resistencia al transporte de especies que ofrece la piel de la cereza. Las curvas de entrada y salida del colorante (Fig. 2. k-p) se alinearon con las difusividades obtenidas. Las difusividades más altas se observaron al comienzo del ensayo cuando había mayor entrada o salida del colorante. Mientras que en la Fig. 2. u-z, se muestran los gráficos de superficie para eritrosina (E) y rojo de gardenia (RG) a 357 ppm y a 40, 50 y 60°C. Se observa el aumento progresivo de color con la posición radial y el tiempo de exposición al colorante, siendo mayor en la periferia, a 12 mm, donde se estableció la existencia de doble frontera de difusión.

## Conclusiones

Se proporcionó un análisis exhaustivo de la factibilidad de utilizar pigmentos naturales de rábano, remolacha y gardenia como alternativas a colorantes sintéticos como eritrosina en la producción de cerezas marraschino. Se demostró que la estabilidad de los pigmentos se ve afectada por las condiciones del proceso de confitado. Así mismo, se identificaron condiciones óptimas de procesamiento (temperatura, pH, tiempo) para maximizar la retención del color y minimizar su salida. La cinética de difusión de ambos pigmentos dentro de la cereza se pudo modelar y predecir. El modelo propuesto permite mejorar el proceso de candeado, al lograr la intensidad de color deseada y la distribución uniforme en el producto final. Por esto, este estudio contribuirá significativamente al desarrollo de un proceso de producción de cerezas candeadas más saludable y sostenible. Los hallazgos demuestran que es factible, tecnológicamente, el reemplazo de eritrosina, el cual está cuestionada en su inocuidad, por rojo de gardenia, lo cual es importante para la industria alimentaria, abriendo nuevas posibilidades para la utilización de colorantes naturales en otros productos.

## Referencias

- Abedini, A., Sadighara, P., Alizadeh Sani, M., y McClements, D. J. (2023). The impact of synthetic and natural additives on biogenic amine production in food products. *Food Bioscience*, 56. doi:10.1016/j.fbio.2023.103295
- Azwanida, N. N., Hui, M. S., Afandi, A., Mohamed, S., K, Z. A., Ayob, A., Rusli, N., Rasat, M. S. M., y Mohamed, M. (2015). Color Stability Evaluation of Pigment Extracted from *Hylocereus polyrhizus*, *Clitorea ternatae* and *Pandanus amaryllifolius* as Cosmetic Colorants and Premarket Survey on Customer Acceptance on Natural Cosmetic Product. *Journal of Tropical Resources and Sustainable Science (JTRSS)*, 3(1). doi:10.47253/jtrss.v3i1.690
- Bchir, B., Sebii, H., Danthine, S., Blecker, C., Besbes, S., Attia, H., y Bouaziz, M. A. (2021). Efficiency of osmotic dehydration of pomegranate seeds in polyols solutions using response surface methodology. *Horticulturae*, 7(9). doi:10.3390/HORTICULTURAE7090268
- Cichowska-Bogusz, J., Figiel, A., Carbonell-Barrachina, A. A., Paśławska, M., y Witrowa-Rajchert, D. (2020). Physicochemical properties of dried apple slices: Impact of osmo-dehydration, sonication, and drying methods. *Molecules*, 25(5). doi:10.3390/molecules25051078
- da Silva, D. V. T., dos Santos Baião, D., de Oliveira Silva, F., Alves, G., Perrone, D., Del Aguila, E. M., y Flosi Paschoalin, V. M. (2019). Betanin, a Natural Food Additive: Stability, Bioavailability, Antioxidant and Preservative Ability Assessments. *Molecules*, 24(3). doi:10.3390/MOLECULES24030458
- da Silva, W. P., Nunes, J. S., Gomes, J. P., de Araújo, A. C., y e Silva, C. M. D. P. S. (2018). Description of jambolan (*Syzygium cumini* (L.)) anthocyanin extraction kinetics at different stirring frequencies of the

- medium using diffusion models. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 54(11). doi:10.1007/s00231-018-2349-8
- da Silva, W. P., Precker, J. W., e Silva, C. M. D. P. S., y e Silva, D. D. P. S. (2009). Determination of the effective diffusivity via minimization of the objective function by scanning: Application to drying of cowpea. *Journal of Food Engineering*, 95(2). doi:10.1016/j.jfoodeng.2009.05.008
- Fernández-López, J. A., Fernández-Lledó, V., y Angosto, J. M. (2020). New insights into red plant pigments: More than just natural colorants. In *RSC Advances* (Vol. 10, Issue 41). <https://doi.org/10.1039/d0ra03514a>
- Giusti, M. M., y Wrolstad, R. E. (2008). Color quality of maraschino cherries. *ACS Symposium Series*, 983, 43–53. doi:10.1021/BK-2008-0983.CH004
- González-Pérez, J. E., Romo-Hernández, A., Ramírez-Corona, N., y López-Malo, A. (2022). Modeling mass transfer during osmodehydration of apple cubes with sucrose or apple juice concentrate solutions: Equilibrium estimation, diffusion model, and state observer-based approach. *Journal of Food Process Engineering*, 45(10), e14125. doi:10.1111/JFPE.14125
- González Pacheco, J. I., y Maldonado, M. B. (2024). Diffusion in biological media: a comprehensive numerical-analytical study via surface analysis and diffusivities calculation. *Nature. Scientific Reports*, 14(1), 1–18. doi:10.1038/s41598-024-67348-4
- González Pacheco, J. I., Maldonado, M. B., Márquez Agüero, A. F., Condori Laura, E. F., y Giorlando Videla, P. A. (2022). Caracterização de corantes para elaboração de cerejas candeada: eritrosina versus vermelho gardenia. In *Agrárias: Pesquisa e Inovação nas Ciências que Alimentam o Mundo VIII*. doi:10.37572/edart\_26082268210
- Guarco, J., Harmuth, H., y Vollmann, S. (2022). Method for determination of mass transfer coefficients for dissolution of dense ceramics in liquid slags. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 186. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122494
- Hahn, D. W., y Özişik, M. N. (2012). *Heat Conduction: Third Edition*. In John Wiley and Sons. John Wiley and Sons.
- Maldonado, M., Fornasin, E., y González Pacheco, J. (2020). Cerezas en conserva elaboradas con lactitol: una alternativa para reducir su valor calórico. *Revista de Nutrición Clínica y Metabolismo*, 3(2). doi:10.35454/rncm.v3n2.157
- Maldonado, M., y González Pacheco, J. (2020). Shrinkage phenomenon in cherries during osmotic dehydration. *Annals. Food Science and Technology*, 21(1), 19–30. [http://www.afst.valahia.ro/images/documente/2020/I.2\\_Maldonado.pdf](http://www.afst.valahia.ro/images/documente/2020/I.2_Maldonado.pdf)
- Maldonado, M., y González Pacheco, J. (2022). Mathematical modelling of mass transfer phenomena for sucrose and lactitol molecules during osmotic dehydration of cherries. *Heliyon*, 8(1), e08788. doi:10.1016/J.HELİYON.2022.E08788
- Nabi, B. G., Mukhtar, K., Ahmed, W., Manzoor, M. F., Ranjha, M. M. A. N., Kieliszek, M., Bhat, Z. F., y Aadil, R. M. (2023). Natural pigments: Anthocyanins, carotenoids, chlorophylls, and betalains as colorants in food products. In *Food Bioscience* (Vol. 52). doi:10.1016/j.fbio.2023.102403
- Ren, M., Sun, Y., Cong, L., y Gong, H. (2023). A simplified solving method for Fickian diffusion model and its application in simulating moisture distribution in asphalt concrete. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(1). doi:10.1080/10298436.2023.2185240
- Rodríguez-Amaya, D. B. (2018). Natural Food Pigments and Colorants. In *Current Opinion in Food Science*. doi:10.1016/j.cofs.2015.08.004
- Rodríguez-Amaya, D. B. (2019). Natural Food Pigments and Colorants. In *Bioactive Molecules in Food*. doi:10.1007/978-3-319-54528-8\_12-1
- Sigurdson, G. T., Tang, P., y Giusti, M. M. (2017). Natural Colorants: Food Colorants from Natural Sources. *Annual Review of Food Science and Technology*, 8, 261–280. doi:10.1146/annurev-food-030216-025923
- Taghinezhad, E., Kaveh, M., Szumny, A., Figiel, A., y Blasco, J. (2023). Qualitative, energy and environmental aspects of microwave drying of pre-treated apple slices. *Scientific Reports*, 13(1). doi:10.1038/s41598-023-43358-6
- Wiktor, A., Chadzyska, M., Rybak, K., Dadan, M., Witrowa-Rajchert, D., y Nowacka, M. (2022). The Influence of Polyols on the Process Kinetics and Bioactive Substance Content in Osmotic Dehydrated Organic Strawberries. *Molecules*, 27(4). doi:10.3390/molecules27041376

Link Google Drive (papers, capítulos de libro, presentaciones en congresos):

[https://drive.google.com/drive/folders/1GXWMQfHYUMja8r8pzttDf2LyW-vGUunl?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1GXWMQfHYUMja8r8pzttDf2LyW-vGUunl?usp=drive_link)