

PARÁMETROS ALOMÉTRICOS Y CONTENIDO DE BETALAÍNAS EN ACESIONES DE AYRAMPO (*Airampoa soehrensii*) DEL BANCO DE GERMOPLASMA DEL INIA, PERÚ

Hans Dadther-Huaman¹, Mari C. Hilari-Hilari¹, Haydee Gonzales-Hanco¹, Abraham Jimenez-Paye², Nancy Calla-Cornejo² y Gonzalo A. Pacheco-Lizarraga¹

RESUMEN

El ayrampo es una especie nativa altoandina con alto valor cultural, nutricional y potencial agroindustrial por su contenido de compuestos funcionales, como las betalainas; no obstante, a pesar de su relevancia, existe escasa información científica sobre la caracterización físico-química de sus frutos. Se evaluaron parámetros alométricos, colorimétricos y contenido de betalainas en 13 accesiones de ayrampo conservadas en el Banco de Germoplasma del INIA, en el Centro Experimental Santa Rita (Arequipa), durante la campaña agrícola 2024–2025. Se analizaron el peso de fruto, el peso fresco de pulpa y semilla, el peso seco de pulpa y semilla, la materia seca, coordenadas de color (L^* , a^* , b^*) y la concentración de betacianinas y betaxantinas mediante espectrofotometría UV-VIS. Los datos se sometieron a análisis de varianza, y comparaciones múltiples mediante la prueba de Tukey, análisis de correlación de Pearson, componentes principales y agrupamiento jerárquico. Se evidenció una alta variabilidad fenotípica entre accesiones. El PER018775 presentó el mayor peso seco de pulpa y semilla (2,99 g); el PER018759 destacó en materia seca (38,94 %); el PER018762 mostró los valores más altos de los componentes a^* y b^* ; y el PER018767 tuvo la mayor concentración de betalainas (158,78 mg·100 g⁻¹ de materia seca). El análisis de agrupamiento jerárquico clasificó a las accesiones en tres clústeres diferenciados por rendimiento, colorimetría y contenido de betalainas. El ayrampo mostró un alto potencial como fuente de pigmentos naturales, especialmente betalainas, con potencial aplicación en la industria alimentaria y la farmacéutica.

Palabras clave adicionales: Airampu, Arequipa, betacianinas, betaxantinas, CIELAB

ABSTRACT

Allometric parameters and betalain content in ayrampo (*Airampoa soehrensii*) accessions from the INIA germplasm bank, Peru

Ayrampo is a native high Andean species with high cultural and nutritional value and agro-industrial potential due to its content of functional compounds, such as betalains. Despite its relevance, there is little scientific information on the physical and chemical characterization of its fruits. Allometric and colorimetric parameters and betalain content were evaluated in 13 ayrampo accessions conserved at the INIA Germplasm Bank, at the Santa Rita Experimental Center (Arequipa), during the 2024–2025 agricultural season. Fruit weight, fresh weight of pulp and seed, dry weight of pulp and seed, dry matter, color coordinates (L^* , a^* , b^*), and concentration of betacyanins and betaxanthins were analyzed using UV-Visible spectrophotometry. The data were subjected to analysis of variance, followed by multiple comparisons using Tukey's test, Pearson correlation analysis, principal components, and hierarchical clustering. The results showed high phenotypic variability among accessions. PER018775 presented the highest dry weight of pulp and seed (2.99 g); PER018759 stood out in dry matter (38.94 %); PER018762 showed the highest values of the a^* and b^* components; and PER018767 had the highest concentration of betalains (158.78 mg·100 g⁻¹ dry matter). Hierarchical clustering analysis classified the accessions into three clusters differentiated by yield, colorimetry and betalain content. In conclusion, ayrampo shows high potential as a source of natural pigments, especially betalains, with applications in the food and pharmaceutical industries.

Additional Keywords: Airampu, Arequipa, betacyanins, betaxanthins, CIELAB

Editor Asociado: Dra. Marie Tamara González.

INTRODUCCIÓN

El género *Opuntia* se caracteriza por ser una fuente natural de compuestos con alto valor nutricional y funcional. Contiene vitamina C,

minerales (potasio, calcio, sodio, hierro, magnesio, manganeso y zinc), y ácidos orgánicos como el málico, oxálico, entre otros (Stintzing *et al.*, 2005). También presenta una diversidad de aminoácidos, algunos de ellos en bajas

Recibido: Agosto 20, 2025

Aceptado: Febrero 13, 2026

¹Estación Experimental Agraria Arequipa. Dirección de Recursos Genéticos y Biotecnología. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Arequipa, Perú. e-mail: hdadther@inia.gov.pe (autor de correspondencia); mhilari@inia.gov.pe; haydha.16@gmail.com; gpacheco@inia.gov.pe

²Estación Experimental Agraria Arequipa. Dirección de Servicios Estratégicos Agrarios. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Cerro July, Arequipa, Perú. e-mail: abramsjimenez58@gmail.com; ncalla@inia.gov.pe

concentraciones (Stintzing *et al.*, 2005); posee compuestos antioxidantes como flavonoides, polifenoles (ácido ascórbico y carotenoides y un elevado contenido de azúcares (Rodrigo, 2007).

Opuntia soehrensii Britton & Rose es actualmente tratada como sinónimo de *Airampoa soehrensii* (Britton & Rose) Lodé, de acuerdo con la nomenclatura adoptada por Plants of the World Online (POWO) (Royal Botanic Gardens, Kew, 2026).

Los frutos de ayrampo son bayas carnosas de color rojo, cuyas semillas constituyen una fuente de pigmentos naturales, son de sabor dulce, comestibles y se emplean en la preparación de jugos y helados. Asimismo, de ellos se elabora una bebida fermentada refrescante utilizada en el tratamiento de afecciones médicas en las personas; también se les extrae un colorante natural usado en repostería y para teñir tejidos con tonalidades púrpura-granate (Rodríguez *et al.*, 2018).

Por su parte las betalaínas, se dividen en dos grupos principales: las betacianinas, responsables de tonalidades en el rango del rojo al violeta, y las betaxantinas, con un color amarillo característico (Herbach *et al.*, 2006). Diversos estudios han abordado la problemática de los colorantes sintéticos y las razones para promover el uso de pigmentos naturales en la industria alimentaria (Nabi *et al.*, 2023; Vega *et al.*, 2023).

Tanto las betacianinas como las betaxantinas poseen propiedades antioxidantes, lo que ha llevado a asociar su consumo con efectos protectores frente a enfermedades vinculadas al estrés oxidativo (Butera *et al.*, 2002). Investigaciones *in vitro* e *in vivo* respaldan esta actividad antioxidante, mostrando su eficacia en sistemas biológicos como membranas celulares y células (Tesoriere *et al.*, 2004). Además, se ha observado que estos compuestos ejercen efectos antiinflamatorios en células endoteliales y presentan actividad sobre líneas celulares tumorales (Sreekantah *et al.*, 2007).

El Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) desempeña un papel clave en la conservación de la agrobiodiversidad del país, a través de la administración del principal banco de germoplasma nacional. En la Estación Experimental Agraria Arequipa, específicamente en el Centro Experimental Santa Rita, el INIA conserva 36 accesiones de ayrampo (*A. soehrensii*), especie nativa de gran importancia

cultural, nutricional y agronómica en las zonas altoandinas del Perú. Esta labor se enmarca en las funciones de la Subdirección de Recursos Genéticos, responsable de la conservación, caracterización, monitoreo y evaluación de la agrobiodiversidad (INIA, 2024), con el propósito de asegurar su disponibilidad para la investigación científica, el mejoramiento genético y la seguridad alimentaria.

A pesar del valor del ayrampo, existe un vacío científico en la caracterización físico-química de sus frutos, especialmente en lo referente a compuestos bioactivos como las betalaínas. En este contexto, el objetivo fue evaluar parámetros alométricos, características colorimétricas y el contenido de betalaínas (betacianinas y betaxantinas) en 13 accesiones que presentaron fructificación durante la campaña agrícola 2024–2025, con el fin de generar información que contribuya a futuros programas de conservación, aprovechamiento y valorización del germoplasma del ayrampo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. La investigación se realizó en el Centro Experimental Santa Rita de la Estación Experimental Agraria Arequipa del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), ubicada en el distrito de Santa Rita de Siguan, provincia y departamento de Arequipa, Perú, durante los meses de febrero a mayo del 2025. El material genético se ubicó a una altitud de 1292 m.s.n.m., con coordenadas geográficas 16°28'24"S y 72°06'45"W.

El suelo presentó una textura franco arenosa, materia orgánica de 0,7 %, fósforo disponible de 25,5 mg·kg⁻¹ y potasio disponible de 631,1 mg·kg⁻¹ según los resultados del Laboratorio de Suelos, Agua y Foliar (LABSAF) del INIA. El distrito de Santa Rita de Siguan se encuentra en una zona de clima árido y templado (Castro *et al.*, 2021). Durante el periodo de evaluación, se registró una temperatura media de 19,3 °C, humedad relativa promedio de 60,8 % y radiación solar media de 254 W·m⁻². No se reportaron precipitaciones, según los datos meteorológicos proporcionados por la estación Santa Rita del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

Material vegetal y condiciones agronómicas. Las accesiones pertenecieron a la colección de

Dadther et al. Alometría y betalainas en ayrampo del banco de germoplasma del INIA, Perú

ayrampo del Banco de Germoplasma del INIA (Cuadro 1) y fueron colectadas en el año 2013. El material parental fue establecido mediante propagación asexual, utilizando cladodios, con un distanciamiento de 0,5 m entre plantas y 1,0 m entre surcos, y se manejó con fertilización NPK en la proporción 150-100-50 unidades, empleando riego por goteo.

De las 36 accesiones disponibles se seleccionaron 13 que presentaron fructificación para su evaluación. Los frutos fueron colectados de tres plantas por accesión, considerándose cada planta como una repetición, y se evaluaron cuatro

frutos por planta, totalizando doce frutos por accesión. La cosecha se realizó cuando los frutos alcanzaron la madurez comercial, determinada por el cambio de color en la totalidad del fruto, de verde a tonalidades rojas. La recolección se efectuó de forma escalonada, conforme cada accesión alcanzó dicho estado de madurez. Los frutos fueron cosechados de cladodios ubicados en el tercio superior de la planta, que son los que presentaron fructificación, asegurando condiciones homogéneas de exposición a la radiación solar.

Cuadro 1. Código y ubicación de las accesiones de ayrampo colectadas en el Banco de Germoplasma del INIA, Arequipa, Perú.

Código	Departamento	Provincia	Distrito
PER018745	Arequipa	Castilla	Tipan
PER018746	Arequipa	Castilla	Pampacolca
PER018751	Arequipa	Castilla	Machaguay
PER018755	Arequipa	Castilla	Ayo
PER018758	Arequipa	Castilla	Chachas
PER018759	Arequipa	Castilla	Andagua
PER018761	Arequipa	Castilla	Chachas-Andagua
PER018762	Arequipa	Castilla	Andagua
PER018765	Arequipa	Castilla	Andagua
PER018767	Arequipa	Castilla	Andagua
PER018774	Arequipa	Condesuyos	Chuquibamba
PER018775	Arequipa	Condesuyos	Chuquibamba
PER018778	Arequipa	Condesuyos	Aplao

Evaluaciones en el fruto. Para la evaluación, cada fruto fue pesado individualmente para determinar el peso fresco del fruto, utilizando una balanza analítica Kern (PLJ 6200-2AM). Posteriormente, los frutos fueron abiertos mediante un corte sagital longitudinal, separándose manualmente la cáscara y el conjunto pulpa-semillas, y fueron pesados para obtener el peso fresco de pulpa y semillas.

Para la determinación del peso seco, las muestras de pulpa y semillas se colocaron en placas Petri y se introdujeron en una estufa Ecocell (EC 55 ECP, MMM) a una temperatura de 40 °C hasta alcanzar peso constante. Finalmente, el contenido de materia seca se calculó como el porcentaje de la relación entre el peso seco y el peso fresco del conjunto pulpa-semillas.

Mediciones de color. Para determinar el color de las muestras frescas de pulpa y semillas, se

utilizó un colorímetro (Chroma Meter CR-400, Konica Minolta). Las mediciones se realizaron en el espacio de color CIELAB, recomendado por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE), el cual permite el análisis estadístico independiente de sus coordenadas (L^* , a^* y b^*) (León *et al.*, 2023).

Cuantificación de betalainas. El contenido de betalainas se determinó en la materia seca. Para el análisis se emplearon 2 g de muestra, previamente secada en estufa (Castellar *et al.*, 2006); se modificó la concentración del etanol a 50 % porque las betalainas son solubles en el agua donde el etanol actúa como cosolvente para facilitar la liberación de pigmentos desde las células vegetales (Chua y Chou, 2003). Se usó un pH de 4 para mejorar la estabilidad, el color y la precisión de la lectura (Gengatharan *et al.*, 2015). Se evaluaron el contenido de betacianinas y

betaxantinas según el método de Cai y Corke (2006), donde el extracto se diluyó a un volumen de 10 ml con la solución McIlvaine (McIlvaine, 1921).

Las betacianinas se observaron a una longitud de onda de 537 nm y las betaxantinas a 483 nm en un espectrofotómetro UV visible (Thermo Fisher Scientific, Genesys™ 150). Para ello se tomó 1 ml de muestra y 9 ml de solución de McIlvaine, y como blanco se empleó 1 ml de etanol al 50 % y 9 ml de solución de McIlvaine (Chua y Chou, 2003).

El cálculo de las betalaínas totales se realizó a partir de las concentraciones individuales de betacianinas y betaxantinas, porque su cuantificación es más precisa al utilizar distintos procedimientos y longitudes de onda específicas, de acuerdo con la ecuación de Lambert-Beer (Khatabi *et al.*, 2016). Los resultados se expresaron como miligramos de betalaínas por 100 g de materia seca ($\text{mg}\cdot 100 \text{ g}^{-1}$) de fruto de ayrampo.

$$c = \frac{A \times DF \times 1000}{\epsilon \times l}$$

- *c*: Concentración de la pigmentación ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
- *A*: Absorbancia a la longitud de onda correspondiente
- *DF*: Factor de dilución
- 1000: Factor de conversión para expresar el resultado en mg/L
- ϵ : Coeficiente de extinción molar en $\text{L} \times \text{mol}^{-1} \times \text{cm}^{-1}$
- *l*: longitud de la celda del espectrómetro (1 cm)

Para el cálculo se utilizaron los coeficientes de extinción molar $\epsilon = 60\,000 \text{ L} \times \text{mol}^{-1} \times \text{cm}^{-1}$ para betacianinas ($\lambda = 537 \text{ nm}$) y $\epsilon = 48\,000 \text{ L} \times \text{mol}^{-1} \times \text{cm}^{-1}$ para betaxantinas ($\lambda = 483 \text{ nm}$), de acuerdo con Cai y Corke (2006).

Posteriormente, el contenido de pigmentos se expresó en función de la materia seca de la muestra mediante la siguiente ecuación:

$$\text{mg/kg de materia seca} = \frac{c \times V}{m}$$

- *c*: es la concentración del analito en el extracto ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
- *V*: es el volumen total del extracto (L), correspondiente a 0,02 L
- *m*: es la masa de la muestra seca (kg), correspondiente a 0,002 kg

Finalmente, los resultados se convirtieron a $\text{mg}\cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de materia seca utilizando la relación:

$$\text{mg}\cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ de materia seca} = \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1} \times 0,1$$

Análisis estadístico. Se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Bartlett, respectivamente. Posteriormente, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), seguido de la prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0,05$), con el fin de detectar diferencias entre accesiones. Dado que la coordenada *b** del espacio de color CIELAB no cumplió con los supuestos paramétricos, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis y comparaciones múltiples mediante la prueba de Holm ($p \leq 0,05$).

Adicionalmente, se realizaron análisis de correlación de Pearson utilizando los valores originales. Para los análisis de componentes principales y el agrupamiento jerárquico, los datos fueron previamente estandarizados con el fin de evitar el efecto de las diferentes magnitudes y unidades de medida de las variables. El agrupamiento jerárquico se efectuó utilizando como medida de disimilitud la distancia euclidiana y el método de enlace Ward.D2, mientras que el método de la silueta se empleó para la determinación del número óptimo de grupos. Todos los análisis estadísticos se efectuaron en el programa R versión 4.4.2 (R Core Team, 2024).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluaciones en fruto. El mayor peso de fruto fue registrado por la accesión PER018775, con 27,66 g, siendo significativamente superior al del resto de accesiones ($p \leq 0,05$) (Cuadro 2). Le siguieron el PER018745 y el PER018774, con 23,75 g y 23,38 g, respectivamente. Por su parte, la accesión PER018755 presentó el menor peso, con 6,40 g. Respecto al peso fresco de pulpa y semilla, el PER018775 también obtuvo el valor más alto (12,01 g), significativamente diferente a las demás accesiones ($p \leq 0,05$). Le siguieron el PER018745 (10,00 g), el PER018774 (8,88 g) y el PER018746 (8,78 g). La accesión PER018755 registró el valor más bajo.

En cuanto al peso seco de pulpa y semilla, el PER018775 presentó el mayor valor con 2,99 g, significativamente diferente al resto ($p \leq 0,05$),

Dadther et al. Alometría y betalainas en ayrampo del banco de germoplasma del INIA, Perú

seguida por el PER018745 con 2,52 g. El menor valor fue registrado por el PER018755, con 0,70 g. En el contenido de materia seca, el valor más alto se observó en la accesión PER018759 (38,94 %), seguida del PER018758 (36,18 %). Por su parte, cuatro accesiones presentaron los valores más bajos, siendo significativamente diferentes del resto ($p \leq 0,05$): PER018746 (25,93 %), PER018774 (25,80 %), PER018745 (25,31 %) y PER018775 (25,00 %).

No se han encontrado referencias de investigaciones científicas sobre la caracterización agromorfológica de *Opuntia soehrensii*. Sin embargo, Jorge y Troncoso (2016) reportaron que el peso promedio del fruto de *Opuntia apurimacensis* fue de $15,9 \pm 0,5$ g, mientras que en *Opuntia ficus-indica* fue de $155,9 \pm 4,4$ g. Esto sugiere que los pesos en este estudio se asemejan más a los de *O. apurimacensis*. Si bien la accesión PER018775 presentó los valores más altos en peso de fruto, peso fresco y peso seco de pulpa y semillas, también mostró la mayor pérdida de humedad tras el secado en estufa, a diferencia de lo observado en la accesión PER018759.

Mediciones de color. Los valores de los parámetros de color permiten establecer diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre las accesiones evaluadas, evidenciando una marcada variabilidad fenotípica en la coloración del fruto. La accesión PER018775 presentó la mayor luminosidad (L^*), con un valor de 6,43, lo que indica una superficie del fruto más clara o brillante en comparación con las demás accesiones. En contraste, la accesión PER018767 mostró el valor más bajo (1,81), asociado a una apariencia más oscura.

Respecto al componente a^* , que refleja la intensidad del color rojo, la accesión PER018762 registró el valor más alto (23,22), lo que indica una fuerte tonalidad rojiza. Por el contrario, el PER018775 mostró el valor más bajo (6,16), aunque ambos se mantienen en el rango positivo, lo que confirmó una tendencia general hacia la coloración roja en los frutos.

En cuanto al componente b^* , relacionado con la tonalidad amarilla, el PER018762 también destacó con el valor más alto (4,97), mientras que el PER018775 registró el más bajo (2,00). Aunque todos los valores fueron positivos, lo que indicó presencia de amarillo en la coloración del fruto, la accesión PER018762 mostró una mayor

saturación de este tono. La combinación de valores elevados en los componentes a^* y b^* en esta accesión sugiere una coloración más intensa y posiblemente más atractiva desde el punto de vista comercial.

Resultados similares han sido reportados por González et al. (2021) en frutos rojos de *Opuntia ficus-indica*, quienes obtuvieron un valor promedio para el componente a^* de $6,2 \pm 2,5$, comparable con los valores más bajos observados en las accesiones de ayrampo. En cambio, el componente b^* alcanzó un valor promedio de $9,3 \pm 3$, superior a los valores registrados en este estudio.

Cuantificación de betalainas. La accesión PER018767 presentó el mayor contenido de betacianinas, con $99,06 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, valor significativamente superior al del resto de accesiones ($p \leq 0,05$) (Cuadro 2). Le siguieron el PER018759 ($87,78 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de materia seca), el PER018765 ($85,56 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de materia seca) y el PER018751 ($81,89 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de materia seca). El valor más bajo fue registrado por el PER018778, con $8,09 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de materia seca. En cuanto a las betaxantinas, la accesión PER018751 alcanzó el mayor valor, con $76,53 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de materia seca, siendo significativamente diferente ($p \leq 0,05$) a las demás. Le siguió PER018767 con $59,72 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de materia seca, mientras que PER018778 presentó el menor contenido, con $5,37 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de materia seca.

Al evaluar las betalainas, consideradas como la suma de betacianinas y betaxantinas, se observó que las accesiones PER018767 y PER018751 presentaron los valores más altos con $158,78 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de materia seca y $158,42 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de materia seca, respectivamente, siendo significativamente superiores ($p \leq 0,05$) al resto de accesiones. En contraste, la accesión PER018778 registró el valor más bajo, con $13,46 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de materia seca.

Aunque se esperaría una correlación directa entre el contenido de betacianinas, pigmentos responsables de tonalidades rojo a violeta y el componente cromático a^* , así como entre el contenido de betaxantinas, asociadas al color amarillo (Herbach et al., 2006), y el componente b^* , los resultados no evidenciaron una correspondencia clara. La accesión PER018767, con la mayor concentración de betacianinas

(99,06 mg·100 g⁻¹ de materia seca), no presentó el valor más alto en a*, mientras que el PER018751, con el mayor contenido de betaxantinas (76,53 mg·100 g⁻¹ de materia seca), tampoco destacó en b*. Esto sugiere que el color observado en los frutos de ayrampo no depende exclusivamente de la concentración de betalaínas, sino también de la interacción de diversos factores estructurales y bioquímicos.

Stintzing *et al.* (2005) en *Opuntia* spp., reportaron mayores concentraciones de betacianinas en frutos de color rojo (120 mg·L⁻¹) y púrpura (431 mg·L⁻¹) en comparación con los de color verde y naranja. Asimismo, las betaxantinas alcanzaron valores más altos en frutos naranjas (76,3 mg·L⁻¹) y púrpuras (195,8 mg·L⁻¹). En comparación, los frutos de ayrampo evaluados presentaron concentraciones menores de betacianinas (entre 8,09 y 99,06 mg·100 g⁻¹ de materia seca), pero con amplia variabilidad entre accesiones. En el caso de las betaxantinas, la accesión PER018751 mostró un valor (76,53 mg·100 g⁻¹ de materia seca) comparable al de frutos naranjas de *Opuntia* spp., lo que refuerza su potencial como fuente de pigmentos funcionales.

La importancia del ayrampo como alternativa de colorante natural queda respaldada por el aprovechamiento de betalaínas en la industria alimentaria, como lo señalaron Stintzing *et al.* (2005), y por su aplicación exitosa en productos lácteos como el yogur (Caldas *et al.*, 2016). Por su parte, León (2017) reportó valores elevados de betacianinas (254 y 110 mg·100 g⁻¹) y betaxantinas (85,4 y 79,1 mg·100 g⁻¹) en frutos de *Opuntia robusta* de color púrpura y naranja, respectivamente, resaltando la capacidad del género para producir estos compuestos. En contraste, Castellanos y Yahia (2008) informaron mayores niveles de betacianinas (4,98–5,01 mg·100 g⁻¹ pulpa seca) y un rango más amplio de betaxantinas (0,11–2,56 mg·g⁻¹ pulpa seca) en accesiones de *Opuntia* spp. de México.

Correlación de Pearson. La Figura 1 muestra la correlación entre diez variables evaluadas. Como era de esperar, los pesos seco y fresco del fruto tuvo una alta correlación con los pesos de pulpa y semilla (0,99*** y 0,96***), lo que evidenció la presencia de multicolinealidad. En este contexto, y considerando que el peso seco de pulpa y semilla resulta más relevante por su relación directa con la concentración de

pigmentos, el peso de fruto y el peso fresco de pulpa y semilla no fueron incluidos en el análisis de componentes principales, con el fin de evitar la redundancia de información asociada a coeficientes de correlación superiores al 90 %, de acuerdo con lo recomendado por Dormann *et al.* (2013). Por su parte, las betalaínas tuvieron una alta correlación con las betacianinas (0,99***) y las betaxantinas (0,98***); como fue de interés conocer el contenido de las clases de betalaínas por separado, no se consideró en el análisis de componentes principales a las betalaínas para evitar distorsionar los resultados estadísticos.

Se observó una alta correlación entre betacianinas y betaxantinas (0,95***), valor similar, aunque ligeramente superior al reportado por Stintzing *et al.* (2005), quienes encontraron una correlación de 0,926 entre ambos grupos de pigmentos en frutos de *Opuntia* spp. Esta fuerte asociación indica una estrecha relación en la acumulación de ambos pigmentos en las accesiones de ayrampo analizadas.

Ramírez *et al.* (2015) destacaron el potencial del género *Opuntia* para la industrialización de frutos de alto valor, capaces de generar ventajas competitivas y beneficios económicos para los productores. Si bien el género *Opuntia* ha sido objeto de creciente interés por su contenido de betalaínas, el ayrampo emerge como una alternativa prometedora en este contexto, tanto por sus pigmentos como por su diversidad genética.

Análisis de componentes principales. La primera dimensión explicó el 59 % de la varianza total, estando conformada principalmente por las betacianinas (19,06 %), la materia seca (18,98 %), betaxantinas (16,34 %) y el peso seco de pulpa y semilla (15,66 %). Por su parte, la segunda dimensión expresó el 24,5 %, y estuvo esencialmente constituida por el componente b* (35,42 %), la luminosidad (L*) (23,5 %) y el componente a* (21,48 %). En conjunto, ambas dimensiones explicaron un elevado 83,5 % de la varianza total (Figura 2).

En cuanto a la distribución de las accesiones en el espacio multivariado, se observó una mayor proximidad del PER018775 hacia el peso seco de pulpa y semilla, del PER018759 a la materia seca, del PER018767 a las betaxantinas, del PER018751 a las betacianinas, y del PER018762 a los componentes a* y b* (Figura 2).

Dadther et al. Alometría y betalainas en ayrampo del banco de germoplasma del INIA, Perú**Cuadro 2.** Variables cuantitativas evaluadas en frutos de ayrampo del Banco de Germoplasma del INIA, Arequipa, Perú.

CODBAN	PF	PFPS	PSPS	MS	L*	a*	b*	BTC	BTX	BTL
PER018745	23,75 ab	10,00 ab	2,52 ab	25,31 c	4,72 ab	7,33 de	2,25 b	16,68 e	13,03 f	29,71 e
PER018746	20,69 b	8,78 ab	2,28 abc	25,93 c	4,07 ab	6,84 de	2,29 ab	14,32 e	13,42 f	27,74 e
PER018751	8,80 d	3,47 ef	1,20 e	34,77 ab	3,23 ab	13,23 abcd	2,83 ab	81,89 ab	76,53 a	158,42 a
PER018755	6,40 e	2,78 f	0,70 f	25,41 c	4,25 ab	14,71 abc	3,20 ab	48,50 cd	34,38 d	82,88 c
PER018758	11,99 cd	4,52 cde	1,66 bcde	36,18 a	3,09 ab	15,90 abc	3,30 ab	73,94 b	44,44 c	118,39 b
PER018759	10,34 cd	3,96 def	1,54 cde	38,94 a	3,27 ab	19,09 ab	3,98 ab	87,78 ab	53,96 bc	141,74 ab
PER018761	11,79 cd	5,42 cd	1,84 bcde	34,07 ab	3,55 ab	19,23 ab	3,87 ab	52,11 c	29,03 d	81,14 c
PER018762	11,44 cd	4,33 de	1,50 cde	34,70 ab	4,81 ab	23,22 a	4,97 a	38,22 d	21,18 e	59,41 d
PER018765	12,32 c	4,84 cde	1,64 bcde	33,77 ab	1,96 ab	12,59 abcd	2,42 ab	85,56 ab	58,06 b	143,61 ab
PER018767	11,27 cd	4,16 def	1,34 de	32,00 ab	1,81 b	9,99 bcde	2,10 b	99,06 a	59,72 ab	158,78 a
PER018774	23,38 ab	8,88 ab	2,27 abc	25,80 c	2,33 ab	7,48 de	2,61 ab	13,54 e	13,02 f	26,56 e
PER018775	27,66 a	12,01 a	2,99 a	25,00 c	6,43 a	6,16 e	2,00 b	16,01 e	13,68 f	29,69 e
PER018778	19,19 b	6,83 bc	2,01 abcd	29,34 bc	3,14 ab	8,20 cde	2,28 b	8,09 f	5,37 g	13,46 f
Promedio	15,31	6,15	1,81	30,86	3,59	12,61	2,93	48,90	33,52	82,42
CV %	42	45	32	15	34	42	29	66	66	65

CODBAN: Código de banco; PF: peso de fruto (g); PFPS: peso fresco de pulpa y semilla (g); PSPS: peso seco de pulpa y semilla (g); MS: materia seca (%); L*: luminosidad (CIELAB); a*: componente a* (CIELAB); b*: componente b* (CIELAB); BTC: betacianinas (mg·100 g⁻¹ de materia seca); BTX: betaxantinas (mg·100 g⁻¹ de materia seca); BTL: betalainas (mg·100 g⁻¹ de materia seca); CV%: coeficiente de variación. Valores con letras distintas difieren significativamente ($p \leq 0,05$); se usó la prueba de Tukey, excepto para el componente b*, donde se aplicó la prueba de Holm. ($p \leq 0,05$).

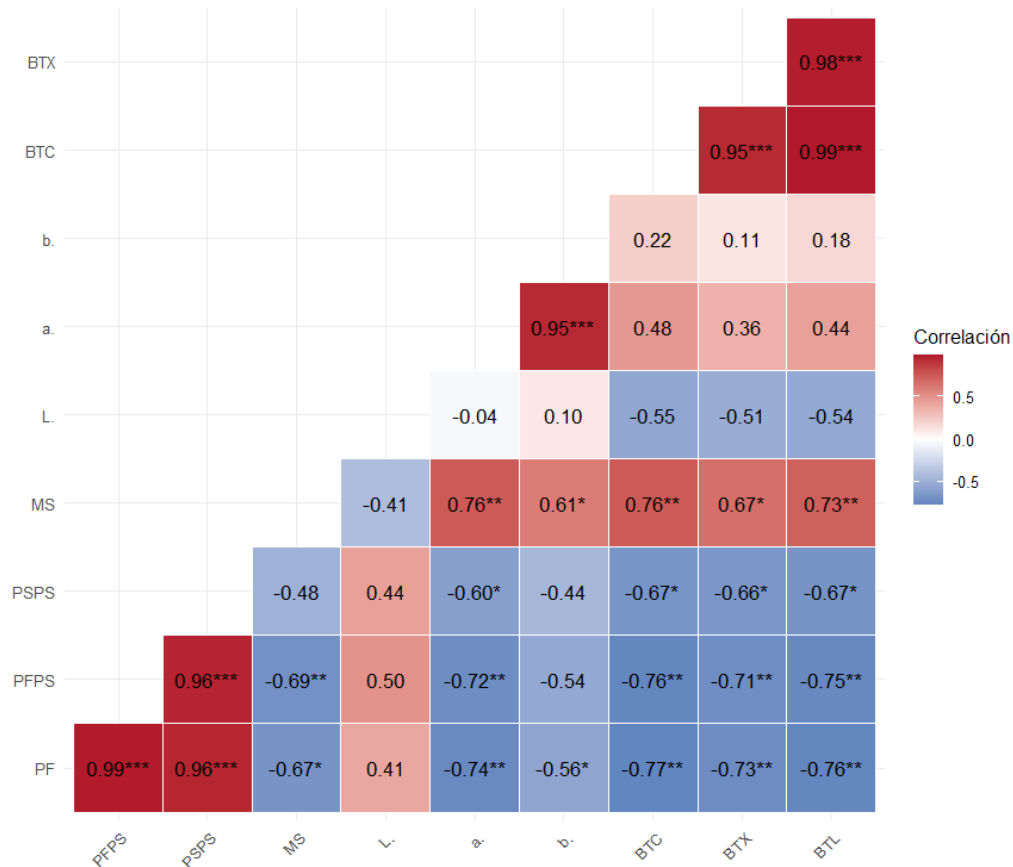


Figura 1. Matriz de coeficiente de correlación de Pearson de variables cuantitativas evaluadas en ayrampo del Banco de Germoplasma del INIA, Arequipa, Perú. PF: peso de fruto; PFPS: peso fresco de pulpa y semilla; PSPS: peso seco de pulpa y semilla; MS: materia seca; L.: luminosidad; a.: componente a*; b.: componente b*; BTC: betacianinas; BTX: betaxantinas; BTL: betalaínas. *, ** y ***: coeficientes significativos ($p \leq 0,05$, $p \leq 0,01$ y $p \leq 0,001$).

Aunque no se encontró información de *Opuntia soehrensii* en relación con parámetros alométricos, colorimetría y contenido de betalaínas para realizar la comparación del análisis de componentes principales, se puede mencionar que los pigmentos, particularmente betalaínas, se encuentran en la pulpa y en la cáscara del fruto en algunas especies y variedades de *Opuntia*; en su mayoría, como betacianinas y betaxantinas (Zrýd y Christinet, 2004). Estos pigmentos muestran una importante actividad antioxidante y un uso potencial como colorantes naturales (Sumaya *et al.*, 2011).

Análisis de agrupamiento jerárquico. El índice de silueta alcanzó su valor máximo con dos grupos (0,45); no obstante, se optó por una

partición en tres grupos (valor = 0,40), porque esta clasificación permitió una mejor diferenciación de las accesiones en función de los parámetros alométricos, características colorimétricas y contenido de betalaínas.

El Grupo A estuvo conformado por las accesiones PER018775, PER018745, PER018746, PER018774 y PER018778, las cuales presentaron los promedios más altos en peso seco de pulpa y semilla (2,41 g) y luminosidad (L^*) (4,14) (Figura 3). Por su parte, el Grupo B incluyó las accesiones PER018751, PER018765 y PER018767, caracterizadas por los mayores contenidos promedio de betacianinas (88,83 $\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de materia seca) y betaxantinas (64,77 $\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de materia seca) (Figura 3). Finalmente, el Grupo C

Dadther *et al.* Alometría y betalainas en ayrampo del banco de germoplasma del INIA, Perú

estuvo integrado por PER018755, PER018762, PER018761, PER018758 y PER018759, destacando por presentar los valores promedio

más elevados en materia seca (33,86 %), componente a* (18,43) y componente b* (3,86) (Figura 3).

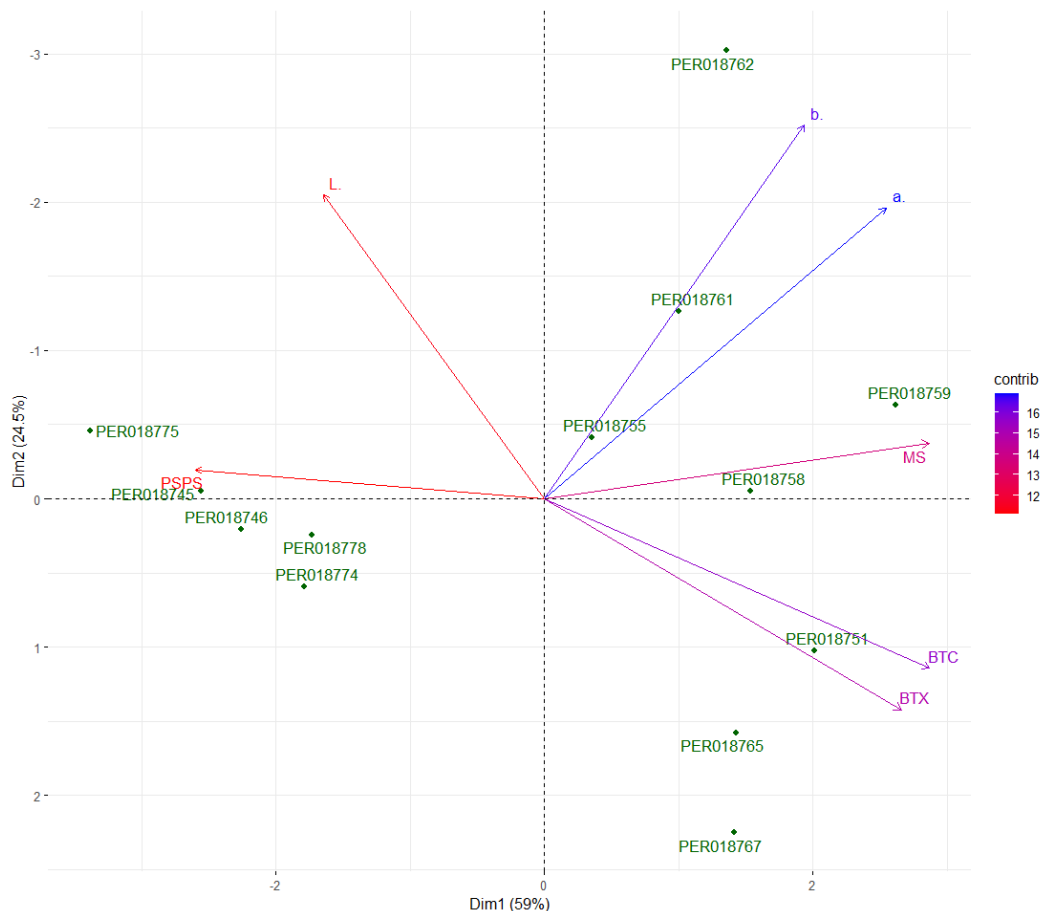


Figura 2. Análisis de componentes principales de variables cuantitativas evaluadas en ayrampo del Banco de Germoplasma del INIA, Arequipa, Perú. Dim1: primera dimensión; Dim2: segunda dimensión; Contrib: contribución; PPS: peso seco de pulpa y semilla; MS: materia seca; L.: luminosidad; a.: componente a*; b.: componente b*; BTC: betacianinas; BTX: betaxantinas.

El ayrampo presenta un notable potencial para el consumo humano, como lo evidenciaron los grupos formados en función de los parámetros alométricos y del contenido de betalainas. Estos pigmentos son apreciados como ingredientes nutraceuticos por ser promotores de la salud y por contribuir a la prevención de enfermedades mediante la disminución del estrés oxidativo en

humanos (Livrea y Tesoriere, 2006). En todas las accesiones evaluadas, el contenido de betacianinas fue superior al de betaxantinas, lo cual se relacionó con la tonalidad rojiza a violácea de los frutos; resultados similares fueron los de Ramírez *et al.* (2015) en frutos de *Opuntia* sp. Asimismo, el componente a* fue mayor que el componente b* en todas las accesiones (Cuadro 2).

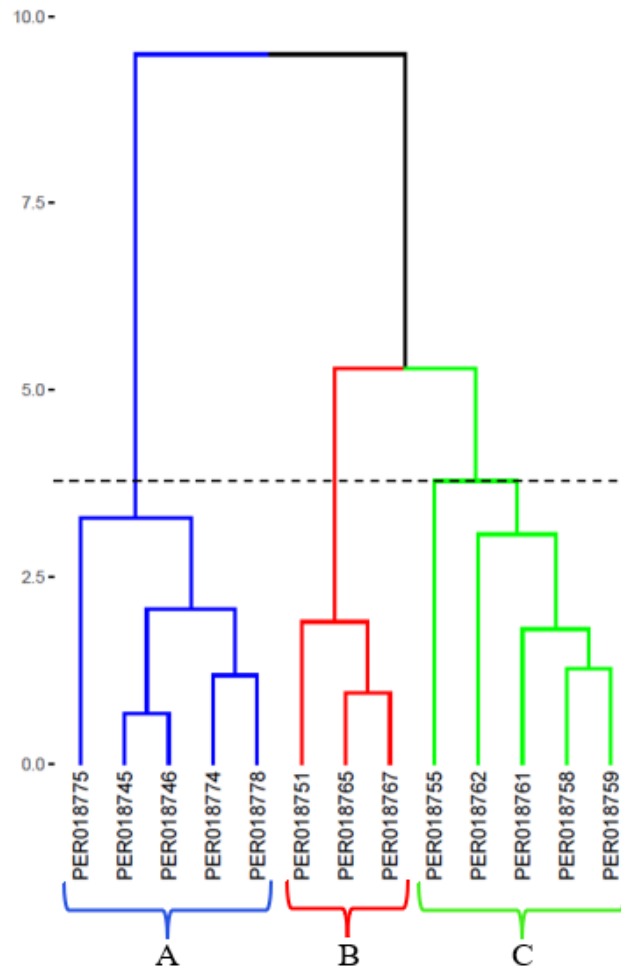


Figura 3. Agrupamiento jerárquico con distancia euclidiana para 13 accesiones de ayrampo del Banco de Germoplasma del INIA, Arequipa, Perú. Grupos: A, B y C.

CONCLUSIONES

Se evidenció una variabilidad fenotípica entre las 13 accesiones de ayrampo evaluadas del Banco de Germoplasma del INIA. La accesión PER018775 presentó el mayor peso seco de pulpa y semilla, mientras que el PER018759 destacó por el mayor porcentaje de materia seca. Por su parte, el PER018762 registró los valores más altos para los componentes a^* y b^* del espacio de color CIELAB, en tanto que el PER018767 mostró la mayor concentración de betalaínas.

Los resultados mostraron que la relación entre el contenido de betalaínas y los parámetros colorimétricos no siempre es directa.

LITERATURA CITADA

- Butera, D., L. Tesoriere, F. Di Gaudio, A. Bongiorno, M. Allegra A.M. Pintaudi *et al.* 2002. Antioxidant activities of sicilian prickly pear (*Opuntia ficus indica*) fruit extracts and reducing properties of its betalains: Betanin and indicaxanthin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50: 6895-6901.
- Cai, Y.Z. y H. Corke. 2006. Production and Properties of Spray-dried Amaranthus Betacyanin Pigments. *Journal of Food Science* 65(7): 1248-1252.
- Caldas-Cueva, J.P., P. Morales, F. Ludeña, I. Betalleluz-Pallardel, R. Chirinos, G. Noratto *et al.* 2016. Stability of betacyanin pigments and antioxidants in ayrampo (*Opuntia*

- soehrensii* britton and rose) seed extracts and as a yogurt natural colorant. *Journal of Food Processing and Preservation* 40(3): 541-549.
4. Castellanos-Santiago, E. y E.M. Yahia. 2008. Identification and quantification of betalains from the fruits of 10 Mexican prickly pear cultivars by high-performance liquid chromatography and electrospray ionization mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56(14): 5758-5764.
 5. Castellar, M.R., J.M. Obón y J.A. Fernández-López. 2006. The isolation and properties of a concentrated red-purple betacyanin food colourant from *Opuntia stricta* fruits. *J. Sci. Food Agric.* 86: 122-128.
 6. Castro, A., C. Dávila, W. Laura, F. Cubas, G. Ávalos, O. López *et al.* 2021. Climas del Perú: mapa de clasificación climática nacional. Lima, SENAMHI. <https://n9.cl/8qb5l>
 7. Chua, K.J. y S.K. Chou. 2003. Low-cost drying methods for developing countries. *Trends in Food Science & Technology* 14(12): 519-528.
 8. Dormann, C.F., J. Elith, S. Bacher, C. Buchmann, G. Carl, G. Carré *et al.* 2013. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography* 36(1): 27-46.
 9. Gengatharan, A., Dykes, G.A. y W.S. Choo. 2015. Betalains: Natural plant pigments with potential application in functional foods. *LWT-Food Science and Technology* 64(2): 645-649.
 10. González, F.P.H., V.C. Saucedo, R.D. Guerra, E.J. Suarez, HRM. Soto, J.A. Lopez *et al.* 2021. Post-harvest quality and quantification of betalains, phenolic compounds and antioxidant activity in fruits of three cultivars of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L. Mill). *Journal of Horticultural Sciences* 16(1): 91-102.
 11. Herbach, K.M., F.C. Stintzing y R. Carle. 2006. Betalain stability and degradation—Structural and chromatic aspects. *J. Food Sci.* 71: R41-R50.
 12. INIA (Instituto Nacional de Innovación Agraria). 2024. Subdirección de recursos genéticos. <https://www.inia.gob.pe/sdrg/>
 13. Jorge, P. y L. Troncoso. 2016. Capacidad antioxidante del fruto de la *Opuntia apurimacensis* (ayrampo) y de la *Opuntia ficus-indica* (tuna). *Anales de la Facultad de Medicina* 77(2): 105-109.
 14. Khatabi, O., H. Hanine, D. Elothmani y A. Hasib. 2016. Extraction and determination of polyphenols and betalain pigments in the Moroccan Prickly pear fruits (*Opuntia ficus indica*). *Arabian Journal of Chemistry* 9: S278-S281.
 15. León, C.Z. 2017. Determinación de betalainas en la tuna (*Opuntia robusta*). *Ciencia y Tecnología* 22(1): 6-11. <https://n9.cl/9khig>
 16. León-Roque, N., B.M. Romero Guzmán, J.F. Oblitas-Cruz y D.W. Hidalgo-Chávez. 2023. Optimization of total polyphenol extraction and flavonoid screening by mass spectrometry in mango (*Mangifera indica* L.) waste from Peru. *Food Science and Technology* 43: e105322.
 17. Livrea M.A. y L. Tesoriere. 2006. Health benefits and bioactive components of the fruits from *Opuntia ficus-indica* [L.] Mill. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 8:73-90. <https://hdl.handle.net/10447/4237>
 18. Nabi, B.G., K. Mukhtar, W. Ahmed, M.F. Manzoor, M.M.A.N. Ranjha, M. Kieliszek *et al.* 2023. Natural pigments: Anthocyanins, carotenoids, chlorophylls, and betalains as colorants in food products. *Food Bioscience* 52: 102403.
 19. McIlvaine, T.C. 1921. A buffer solution for colorimetric comparison. *Journal of Biological Chemistry* 49(1): 183-186.
 20. Ramírez-Ramos, M., M. García-Mateos, J. Corrales-García, C. Ybarra-Moncada y A.M. Castillo-González. 2015. Compuestos antioxidantes en variedades pigmentadas de tuna (*Opuntia* sp.). *Revista Fitotecnia Mexicana* 38(4): 349-357. <https://n9.cl/0w05w>
 21. R Core Team. 2024. R: A Language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://cran.r-project.org>.
 22. Rodrigo, G. 2007. Actividad Genotóxica de *Opuntia soehrensii*, evaluada por el Test de Mutación y Recombinación Somática en *D. melanogaster*. *Biofarbovol* 15(1): 61-66. <https://n9.cl/n14seq>

23. Rodríguez, R.C. Marticorena, D. Alarcón, C. Baeza, L. Cavieres, V.L. Finot *et al.* 2018. Catálogo de las plantas vasculares de Chile. *Gayana Bot.* 75(1): 1-430.
24. Royal Botanic Gardens, Kew. 2026. Plants of the World Online. <https://n9.cl/5rybz>
25. Sreekantah, D.S., M.K. Arunasree, K.R. Roy, T.C. Reddy, G.V. Reddy y P. Reddanna. 2007. Betanin a betacyanin pigment purified from fruits of *Opuntia ficus--indica* induces apoptosis in human chronic myeloid leukemia cell line-K562. *Phytomedicine* 14: 739-746.
26. Stintzing, F.C., K.M. Herbach, M.R. Mosshammer, R. Carle, W. Yi, S. Sellappan *et al.* 2005. Color, Betalain Pattern, and Antioxidant Properties of Cactus Pear (*Opuntia* spp.) Clones. *J. Agric. Food Chem.* 53: 442-45.
27. Sumaya-Martínez M.T., S. Cruz-Jaime, E. Madrigal-Santillán, J.D. García-Paredes, R. Cariño-Cortés, N. Cruz-Cansino *et al.* 2011. Betalain, acid ascorbic, phenolic contents and antioxidant properties of purple, red, yellow and white cactus pears. *International Journal of Molecular Sciences* 12: 6452-6468.
28. Tesoriere, L., M. Allegra, D. Butera y M.A. Livrea. 2004. Absorption, excretion, and distribution of dietary antioxidant betalains in LDLs: potential health effects of betalains in humans. *The American Journal of Clinical Nutrition* 80: 941-945.
29. Vega, E.N., M. Ciudad-Mulero, V. Fernández -Ruiz, L. Barros y P. Morales. 2023. Natural sources of food colorants as potential substitutes for artificial additives. *Foods* 12(22): 4102.
30. Zrýd, J.P. y L. Christinet. 2004 *Betalains: In: Plant Pigment and Their Manipulation.* CRC Press, Boca Raton, Florida.