

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

ESCUELA DE POSGRADO



UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS

VETERINARIAS

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

TESIS:

**EFFECTO DE LA TEMPERATURA Y pH SOBRE LA ESTABILIDAD DE
BETALAINAS EXTRAÍDAS DE *Opuntia ficus-indica* “tuna”**

Para optar el Grado Académico de

MAESTRO EN CIENCIAS

MENCIÓN: CIENCIAS ALIMENTARIAS

Presentada por:

EBOLI MADELEINE PRADO CHÁVARRI

Asesor:

Dr. EDGAR DAVID ZAVALETAS VERDE

Cajamarca, Perú

2025



CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:
EBOLI MADELEINE PRADO CHÁVARRI
DNI: 45370404
Escuela Profesional/Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Veterinarias. Programa de Maestría en Ciencias, Mención: Ciencias Alimentarias
2. Asesora: Dr. Edgar David Zavaleta Verde
3. Grado académico o título profesional
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
4. Tipo de Investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:
Efecto de la temperatura y pH sobre la estabilidad de betalainas extraídas de *Opuntia ficus-indica* "tuna"
6. Fecha de evaluación: **22/12/2025**
7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 19%
9. Código Documento: **3117:542715854**
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: **22/12/2025**

Firma y/o Sello
Emisor Constancia

Dr. Edgar David Zavaleta Verde
DNI: 43506585

Dr. Gilberto Fernández Idrogo
DNI: 26600483

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023

COPYRIGHT © 2025 BY
EBOLI MADELEINE PRADO CHÁVARRI
Todos los derechos reservados



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
LICENCIADA CON RESOLUCIÓN DE CONSEJO DIRECTIVO N° 080-2018-SUNEDU/CD
ESCUELA DE POSGRADO
CAJAMARCA - PERU
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 11:05... horas, del día 20 de Noviembre de dos mil veinticinco, reunidos en el **Aula 1Q-206 de la Escuela de Posgrado** de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Jurado Evaluador presidido por el **DR. JOSÉ ANTONIO NIÑO RAMOS, DR. JIMY FRANK OBLITAS CRUZ, M. CS. CRISANTO JUAN VILLANUEVA DE LA CRUZ** y en calidad de Asesor el **DR. EDGAR DAVID ZAVALETAS VERDE**. Actuando de conformidad con el Reglamento Interno y el Reglamento de Tesis de Maestrías y Doctorados de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, se inició la Sustentación de la TESIS titulada: **“EFECTO DE LA TEMPERATURA Y pH SOBRE LA ESTABILIDAD DE BETALAINAS EXTRAÍDAS DE Opuntia ficus-indica “tuna” ”**, presentada por la bachiller en Industrias Alimentarias **EBOLI MADELEINE PRADO CHÁVARRI**.

Realizada la exposición de la TESIS y absueltas las preguntas formuladas por el Jurado Evaluador, y luego de la deliberación, se acordó*aprobación*..... con la calificación de*dieciséis (16)*..... la mencionada TESIS; en tal virtud, la bachiller en Industrias Alimentarias, **EBOLI MADELEINE PRADO CHÁVARRI**, se encuentra apta para recibir en ceremonia especial el Diploma que la acredita como **MAESTRO EN CIENCIAS**, de la Unidad de Posgrado de la Facultad de **CIENCIAS VETERINARIAS**, con mención en **CIENCIAS ALIMENTARIAS**.

Siendo las 12:25... horas del mismo día, se dio por concluido el acto.

.....
E. Zavaleta
Dr. Edgar David Zavaleta Verde
Asesor

.....
J. A. Niño Ramos
Dr. José Antonio Niño Ramos
Jurado Evaluador

.....
J. Frank Oblitas
Dr. Jimy Frank Oblitas Cruz
Jurado Evaluador

.....
C. J. Villanueva
M. Cs. Crisanto Juan Villanueva de la Cruz
Jurado Evaluador

DEDICATORIA

Agradezco a Dios, mi sustento inquebrantable, por su constante guía durante este trayecto académico y por la fortaleza que me permitió perseverar. Le doy gracias por ser la fuente de mi entendimiento y por hacer posible este logro.

A mis padres, Wilder y Haydeé, por haber creído en mí en todo momento. Este fruto de mi esfuerzo es, en realidad, un testimonio de su sacrificio y del cariño inagotable con el que me han criado. Guardo una gratitud eterna por los valores que me inculcaron; esta dedicatoria es apenas un reflejo de la profunda admiración que les profeso.

A ti, Hito Alarcón, por tu paciencia infinita y tu compañía inquebrantable, que fue fundamental en cada paso de este camino. Gracias por ser impulso e inspiración constante con tu amor incondicional.

A mis hermanas Gardenia y Massiel, por su constante apoyo, por su voz de aliento, y respaldarme en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi asesor, Edgar David Zavaleta Verde, por su invaluable paciencia y el tiempo dedicado a hacer realidad esta investigación. Su persistente apoyo y guía fueron fundamentales a lo largo de todo el ciclo de investigación, iniciando con el diseño del protocolo hasta culminar en la edición final de este informe.

Deseo reconocer el papel fundamental de mi familia, quienes con su confianza plena y compañía permanente hicieron posible la culminación de este proyecto.

Este logro académico es también el resultado del apoyo brindado por numerosas personas cuyas contribuciones, en distintas capacidades y momentos, hicieron posible el desarrollo de la presente investigación.

La ciencia de los alimentos, un puente entre la naturaleza y la nutrición humana

-Nicolas Appert

CONTENIDO

| | |
|---|------|
| DEDICATORIA..... | v |
| AGRADECIMIENTOS | vi |
| PREFACIO | xi |
| LISTA DE ABREVIATURAS..... | xiii |
| GLOSARIO..... | xiv |
| RESUMEN | xv |
| ABSTRACT | xvi |
| CAPITULO I..... | 1 |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Objetivos de la investigación | 4 |
| CAPÍTULO II | 5 |
| MARCO TEÓRICO | 5 |
| 2.1.1 <i>Opuntia ficus-indica</i> (tuna) | 9 |
| a. Variedades de tuna. | 11 |
| - Blanca:..... | 11 |
| - Amarilla: | 11 |
| - Colorada: | 12 |
| - Morada:..... | 12 |
| b. Composición química..... | 12 |
| c. Usos potenciales | 13 |
| 2.1.2 Colorantes alimenticios..... | 14 |
| 2.1.2.1 Clasificación de los colorantes según su origen..... | 16 |
| A. Colorantes Sintéticos | 16 |
| B. Colorantes Naturales | 17 |
| 2.1.3 Betaláínas | 18 |
| 2.1.3.1 Clasificación de las betalaínas | 19 |
| A. Betacianinas | 19 |
| B. Betaxantinas | 20 |
| 2.1.3.2 Estabilidad de las betalaínas..... | 22 |
| A. Factores que afectan la estabilidad de las betalaínas | 23 |
| - pH (Sarango, 2024) | 23 |
| - Temperatura (Sarango, 2024) | 24 |
| - Luz (Sarango, 2024) | 24 |

| | |
|--|-----------|
| - Oxígeno (Jaramillo, 2023)..... | 25 |
| - Actividad de agua (Aw) (Jaramillo, 2023) | 26 |
| - Efecto de los cationes metálicos (Sarango, 2024) | 27 |
| - Efecto de antioxidantes (Jaramillo, 2023)..... | 27 |
| - Efecto de secuestrantes (Calva, 2021) | 28 |
| 2.1.3.3 Extracción de betalaínas | 28 |
| A. Extracción sólido - líquido discontinuo..... | 29 |
| 2.1.3.4 Uso de las betalaínas | 30 |
| CAPITULO III: | 32 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 32 |
| 3.1. Hipótesis..... | 32 |
| 3.2. Diseño Metodológico..... | 32 |
| 3.3. Localización del estudio..... | 32 |
| 3.4. Población, muestra y unidad de análisis | 32 |
| 3.5. Diseño metodológico | 33 |
| 3.5.1. Metodología..... | 33 |
| 3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos..... | 35 |
| CAPÍTULO IV | 36 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 36 |
| CAPÍTULO V | 52 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 52 |
| LISTA DE REFERENCIAS | 54 |
| ANEXOS | 62 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Análisis estadístico descriptivo del efecto de la temperatura y pH sobre la estabilidad de betalaínas extraídas de <i>Opuntia ficus-indica</i> (tuna)..... | 62 |
| Tabla 2. Prueba de esfericidad de Mauchlya del efecto de la temperatura y pH sobre la estabilidad de betalaínas extraídas de <i>Opuntia ficus-indica</i> (tuna)..... | 63 |
| Tabla 3. Prueba de esfericidad de Mauchlya del efecto de la temperatura y pH sobre la estabilidad de betalainas extraídas de <i>Opuntia ficus-indica</i> (tuna)..... | 63 |
| Tabla 4. Prueba de Análisis de varianza del efecto de la temperatura, pH y tiempo sobre la estabilidad de betalainas extraídas de <i>Opuntia ficus-indica</i> (tuna)..... | 64 |
| Tabla 5. Prueba de Análisis de varianza del efecto de la temperatura y pH sobre la estabilidad de Betalainas extraídas de <i>Opuntia ficus-indica</i> (tuna), según tiempo de 24 horas..... | 64 |
| Tabla 6. Prueba post hot de Duncan del efecto de la temperatura y pH sobre la estabilidad de Betalainas extraídas de <i>Opuntia ficus-indica</i> (tuna), según tiempo de 24 horas..... | 65 |
| Tabla 7. Prueba de Análisis de varianza del efecto de la temperatura y pH sobre la estabilidad de betalainas extraídas de <i>Opuntia ficus-indica</i> (tuna), según tiempo de 72 horas..... | 64 |
| Tabla 8. Prueba post hot de Duncan del efecto de la temperatura y pH sobre la estabilidad de Betalainas extraídas de <i>Opuntia ficus-indica</i> (tuna), según tiempo de 72 horas..... | 66 |
| Tabla 9. Concentración de betalainas obtenidas a las 0, 24 y 72 horas en cada tratamiento usado..... | 67 |

PREFACIO

La presente investigación fue desarrollada como parte de los estudios de Maestría en Ciencia con mención en Ciencias Alimentarias en la Universidad Nacional de Cajamarca. Surgió del interés por aportar a la industria de alimentos alternativas sostenibles y saludables, mediante el uso de colorantes naturales extraídos de frutas subvaloradas como la tuna (*Opuntia ficus-indica*). Este estudio busca contribuir al conocimiento científico sobre la estabilidad de pigmentos naturales y su aplicación en matrices alimentarias como los helados artesanales. Agradezco a mi asesor, a la universidad y a mi familia por el respaldo brindado a lo largo de este proceso académico.

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|-----------------|---|
| UNC | Universidad Nacional de Cajamarca |
| pH | Potencial de hidrógeno (grado de acidez o alcalinidad) |
| °C | Grado Celsius |
| nm | Nanómetro (unidad de longitud usada para medir longitudes de onda) |
| mL | Mililitro |
| g | Gramo |
| UV-Vis | Espectroscopía ultravioleta-visible |
| FD | Factor de Dilución |
| PM | Peso Molecular |
| ϵ | Coeficiente de extinción molar |
| SPSS | Statistical Package for the Social Sciences (software estadístico) |
| MS | Materia seca |
| ECM | Extracto crudo por maceración |
| ECU | Extracto crudo por ultrasonido |
| EPM | Extracto purificado |
| HPLC | Cromatografía líquida de alta eficiencia |
| h^*_{ab} | Tono o matiz |
| L^*_{ab} | Luminosidad |
| C^*_{ab} | Croma |
| mmHg | Milímetros de mercurio |
| mg GAE/100 g MS | Miligramos equivalentes de ácido gálico por cada 100 gramos de Materia Seca |
| μ M Trolox | Micromoles de Trolox. El Trolox es un análogo sintético de la Vitamina E |

GLOSARIO

Betalaínas: Pigmentos naturales de origen vegetal que se dividen en betacianinas (rojas violetas) y betaxantinas (amarillas anaranjadas), con propiedades antioxidantes, usadas como colorantes naturales en alimentos.

Estabilidad: Capacidad de un compuesto, como las betalaínas, de mantener sus propiedades físicas y químicas frente a factores externos como luz, oxígeno, temperatura y pH.

pH: Medida de acidez o alcalinidad de una solución. Influye en la estructura y estabilidad de compuestos bioactivos.

Temperatura: Factor físico que afecta la conservación de pigmentos naturales; temperaturas altas pueden acelerar su degradación.

***Opuntia ficus-indica*:** Planta conocida como “tuna”, rica en compuestos funcionales como las betalaínas, que puede ser aprovechada para la elaboración de productos alimentarios con valor agregado.

RESUMEN

Este trabajo tuvo como finalidad primordial evaluar cómo influyen los factores de temperatura y pH en la estabilidad de las betalaínas. Estos pigmentos fueron extraídos de la tuna amarilla (*Opuntia ficus-indica*), la cual se perfila como un insumo viable para la extracción de colorantes orgánicos con aplicaciones directas en el procesamiento de alimentos.

La obtención de la materia prima tuvo lugar en el centro poblado de Agocucho, ubicado geográficamente en la provincia y región de Cajamarca. La extracción se realizó mediante el método sólido-líquido. La estabilidad de los extractos acuosos se determinó midiendo la absorbancia (λ 538 y 583 nm) bajo condiciones controladas de pH (4, 5 y 6, ajustados con HCl 0.25 N) y temperatura (1, 5 y 10 °C).

Tras el procesamiento de las muestras, se observó que el comportamiento estable de estos pigmentos (betalaina) está vinculado principalmente al tiempo de almacenamiento; su concentración disminuye a medida que este avanza. La temperatura es un factor modulador crucial: las condiciones frías preservan el pigmento, mientras que el calor acelera su descomposición. En cuanto al pH (en el rango de 4 a 6), este tiene una influencia secundaria, favoreciendo ligeramente las condiciones ácidas (pH 4). Desde un punto de vista estadístico, el tiempo y la temperatura son los impulsores clave de la degradación, minimizando el impacto del pH en el rango evaluado. Específicamente, los tratamientos a 1°C-pH6 y 5°C-pH 6 presentaron la mayor estabilidad promedio de betalaínas durante las primeras 24 horas. Sin embargo, al extender el periodo de observación a 72 horas, el tratamiento 1°C-pH4 demostró una estabilidad superior. Se concluye que la combinación de 1°C y pH 4 optimiza la estabilidad de las betalaínas a largo plazo.

Palabras clave: Betalaínas, *Opuntia ficus*, temperatura, pH.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the effect of temperature and pH on the stability of betalains extracted from *Opuntia ficus-indica* (prickly pear). These betalains were obtained from the yellow prickly pear and represent a promising source of natural colorant for food applications.

The raw material was collected in the town of Agocucho, Cajamarca district, Cajamarca province, Cajamarca region, Peru. Extraction was performed using the solid-liquid method. The stability of the aqueous extracts was determined by measuring absorbance (λ 538 and 583 nm) under controlled pH (4, 5, and 6, adjusted with 0.25 N HCl) and temperature (1, 5, and 10 °C) conditions.

The results obtained indicated that the stability of betalains is primarily determined by storage time; their concentration decreases as storage progresses. Temperature is a crucial modulating factor: cool conditions preserve the pigment, while heat accelerates its decomposition. pH (in the range of 4 to 6) has a secondary influence, slightly favoring acidic conditions (pH 4). From a statistical standpoint, time and temperature are the key drivers of degradation, minimizing the impact of pH within the evaluated range. Specifically, the 1°C-pH 6 and 5°C-pH 6 treatments exhibited the greatest average betalain stability during the first 24 hours. However, when the observation period was extended to 72 hours, the 1°C-pH 4 treatment demonstrated superior stability. It is concluded that the combination of 1°C and pH 4 optimizes the long-term stability of betalains.

Keywords: Betalains, *Opuntia ficus-indica*, temperature, pH.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Durante muchos años, la industria alimentaria empleó colorantes artificiales; no obstante, el número de estos aditivos autorizados está decreciendo debido a preocupaciones sobre su alta toxicidad para la salud del consumidor. Como resultado, las empresas productoras de dichos colorantes han experimentado un impacto significativo, esto se evidencia en el decreciente interés comercial por los pigmentos sintéticos dentro del proceso de manufactura de alimentos para el consumo humano.

Esta tendencia ha impulsado la promoción y utilización de pigmentos naturales, como las betalaínas. Estos pigmentos naturales no solo ofrecen excelentes capacidades antioxidantes y conservantes, sino que también mejoran las propiedades organolépticas de la presentación final, logrando que el producto destaque visualmente y genere una respuesta positiva en el comprador.

Sin embargo, los colorantes naturales como las betalaínas presentan una susceptibilidad a la degradación por la acción de diversos parámetros fisicoquímicos; entre ellos, la incidencia de la radiación luminosa, el factor cronológico y la presencia de agentes oxidantes. El comportamiento del sistema se encuentra condicionado primordialmente por los valores de temperatura y la concentración de iones de hidrógeno (pH); si estos parámetros no se controlan adecuadamente, el producto manufacturado puede resultar inadecuado y ser rechazado por el consumidor final. Adicionalmente, el bajo nivel de tinción y la limitada estabilidad de algunos colorantes naturales en comparación con los sintéticos podrían implicar costos adicionales para los fabricantes (García et al., 2019).

Por consiguiente, la estabilidad de las betalaínas adquiere una importancia crucial, dado que el color y la apariencia que proporcionan son la primera sensación percibida en los alimentos, y a menudo el atributo inicial actuando como el factor decisivo para la respuesta del mercado y el grado de satisfacción del usuario final. Mantener la estabilidad de estos colorantes naturales es esencial, ya que la cantidad requerida en un proceso productivo y la correcta tinción del alimento dependen directamente de la retención del color del pigmento (Pino & Vergara, 2022).

Las betalaínas solo pueden ser extraídas principalmente de 10 familias del orden *Centrospermae* (ahora *Caryophyllales*), dentro de los cuales se encuentra la *Opuntia ficus-indica* (tuna), caracterizada por presentar frutos dulces, jugosos, de diversos colores (púrpura, rojo, naranja o amarillo), abundante pulpa, numerosas semillas y generalmente cáscara delgada cubierta de pequeñas espinas (Betancourt, 2015).

La tuna (*Opuntia ficus-indica*) representa un recurso frutícola de gran escala en el Perú; en este contexto, Cajamarca se posiciona como una de las zonas geográficas con mayores niveles de cosecha a nivel nacional. Sin embargo, su consumo se limita principalmente al fruto fresco, comercializándose a precios bajos en mercados locales. Esta situación impide que los productores locales le otorguen un valor adecuado o incentiven una mayor producción. La tuna posee un potencial significativo para la extracción del pigmento betalaína, lo que generaría un uso alternativo y daría valor agregado a su producción, incentivando así su cultivo y beneficiando la economía de los agricultores.

La extracción de betalaínas de *Opuntia ficus-indica* local se perfila como una solución demandada para la manufactura de alimentos en la región, aportando valor agregado a la producción de yogur, manjares tradicionales, néctares frutales y helados, entre otros, ya

que servirían como colorantes naturales, logrando productos más atractivos para el consumidor.

Por ello, se buscó determinar el comportamiento estable de los pigmentos extraídos de *Opuntia ficus-indica* (variedad amarilla) tras aplicar un proceso de extracción por solvente empleando agua destilada como fase líquida. Considerando que la estabilidad cromática de las betalainas depende de factores externos, se establecieron tratamientos con temperaturas de 1, 5 y 10 °C, bajo entornos controlados de pH 4, 5 y 6. Adicionalmente, se buscó encontrar la combinación óptima de estos factores que garantice la estabilidad del pigmento, con la intención de aportar al conocimiento para su posterior industrialización en el país. El aprovechamiento de estos recursos representa una coyuntura positiva que vincula a los procesadores de pigmentos, a las industrias manufactureras de bienes de consumo y a los productores locales de tuna.

La investigación se desarrolló en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.

Por consiguiente, se plantea las siguientes interrogantes: Interrogante general: ¿Cómo influye la temperatura y el pH en la estabilidad de las betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna)? y las interrogantes específicas: ¿Qué efecto tienen las combinaciones entre temperaturas (1 °C, 5 °C y 10 °C) y niveles de pH (4, 5 y 6) en la estabilidad de las betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna) y ¿Cuál es la combinación de temperatura y pH que garantiza una mayor estabilidad de las betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna)?

1.1.Objetivos de la investigación

1.1.1. Objetivo general

Determinar el efecto de la temperatura y pH en la estabilidad de las betalaínas extraídas de *Opuntia ficus- indica* (tuna)

1.1.2. Objetivo específico

- Analizar la estabilidad de las betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna) durante 24 horas, a combinación entre temperaturas de 1, 5 y 10 °C y valores de pH de 4, 5 y 6.
- Analizar la estabilidad de las betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna) durante 72 horas, a combinación entre temperaturas de 1, 5 y 10 °C y valores de pH de 4, 5 y 6.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Antecedentes teóricos de la investigación

La investigación realizada por Nayhua (2017) tuvo como objetivo obtener betalaínas (colorante natural) a partir de las cáscaras de tuna, utilizando el método de extracción sólido-líquido para su aplicación en la industria alimentaria. En la evaluación fisicoquímica preliminar, se determinó que la cáscara representa aproximadamente el 46,82 % del peso total del fruto, con un pH promedio de 5,39, 5,02 °Brix de sólidos solubles y un 85,17 % de humedad. Para la optimización del proceso de extracción, se empleó un diseño experimental Box-Behnken, variando la concentración de etanol (30-90 %), el tiempo (30-120 min) y la cantidad de materia prima (5-15 g). La concentración de betalaínas se cuantificó mediante espectrofotometría UV/VIS. Las condiciones óptimas obtenidas fueron: 75 % de concentración de etanol, un tiempo de 90 minutos y 11,2 g de materia prima, lo que permitió alcanzar una concentración de 0,285 mg de betalaínas con un rendimiento del 83 %. El pigmento extraído se utilizó con éxito como colorante natural en la elaboración de yogur y helado

Jojoa (2022) estudió El estudio evaluó la estabilidad del color de las betalaínas presentes en el fruto (pulpa y cáscara) de la cactácea *Opuntia ficus-indica*. Se compararon dos métodos de extracción: maceración química (ECM) y extracción con ultrasonido (ECU). El diseño experimental simple, que utilizó el contenido total de betalaínas como variable respuesta, reveló diferencias estadísticamente significativas entre ambos métodos, siendo la maceración química más eficiente (51,47 mg/100g) que la extracción por ultrasonido (39,15 mg/100g). Posteriormente, el extracto

purificado (EPM) obtenido por maceración fue fraccionado, aislando una fracción amarilla (FA) enriquecida en betaxantinas (específicamente indicaxantina, identificada como el compuesto mayoritario mediante HPLC analítica) y una fracción roja (FR) rica en betacianinas (betanina). Mediante la colorimetría triestímulo se determinó el efecto del pH (3,5 y 7) y la temperatura (4 °C, 80 °C y T° ambiente) sobre el color del ECM y EPM, el color inicial de los extractos cambió de anaranjado ($h^*_{ab} \sim 48$) a tonos más amarillos ($h^*_{ab} \sim 60$), más claros (mayor L^*) y menos saturados (menor C^*_{ab}) cuando se sometieron a diferentes condiciones de almacenamiento, sin embargo, se comprobó que estas variaciones solo se hacen perceptibles al ojo humano después de 20 días en el almacenamiento y que la condiciones más adecuadas para conservar el color anaranjado inicial son pH 5 y temperatura de 4°C.

La extracción de betalaínas de la cáscara de pitahaya roja (*Hylocereus guatemalensis*) según Cervantes (2023), mediante ultrasonido, optimiza la obtención de estos compuestos bioactivos, destacando su eficiencia y carácter ecoamigable. Las betalaínas, pigmentos con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, tienen aplicaciones relevantes en las industrias alimentaria y farmacéutica. Mediante un diseño experimental Box-Behnken, en el marco de la metodología de superficie de respuesta, se establecieron las condiciones óptimas de extracción: una amplitud del 50 %, un ciclo de 0.75 s^{-1} y un tiempo de 10 minutos. Con la aplicación de estos parámetros, se logró obtener 81.70 mg/100g MS de betalaínas, 422.86 mgGAE/100g de materia seca de fenoles totales y una actividad antioxidante de 282.71 μTrolox . Además, el extracto optimizado presentó un 35.78 % de inhibición de la hialuronidasa a una concentración de 27.78 $\mu\text{g/mL}$, evidenciando su potencial antiinflamatorio. La tecnología ultrasónica se consolida, así como una herramienta

prometedora en la valorización de subproductos agrícolas y en la extracción de compuestos bioactivos.

Así mismo, según Huamán (2023), las betalaínas se encuentran en la betarraga (*Beta vulgaris*), donde desempeñan un papel esencial en su estabilidad y funcionalidad. La extracción y conservación de estas moléculas dependen de diversos factores, siendo la temperatura un parámetro crítico. En este estudio, se evaluó el efecto de la temperatura en la estabilidad de las betalaínas y betaxantinas, utilizando espectrofotometría UV-VIS y el método de Castellanos & Yahia (2008) para su cuantificación. Los resultados indicaron que la mayor concentración de betalaínas se obtuvo el primer día de almacenamiento a 4 °C, con un valor de 0,1637 mg/g, mientras que, a 60 °C, al séptimo día, la concentración fue nula (0,000 mg/g), evidenciando una degradación completa. Se concluye que el almacenamiento a baja temperatura y sin exposición a la luz favorece la conservación de las betalaínas, lo que resulta clave para su aplicación en la industria alimentaria y farmacéutica.

Jaramillo (2023) centró su investigación en establecer las condiciones adecuadas de extracción de betalaínas a partir de las hojas de remolacha (*Beta vulgaris*), mediante el proceso de extracción sólido-líquido, para lo cual empleó un diseño completamente al azar con arreglo factorial A x B. Concluyó que los factores de extracción (temperatura y relación disolvente/soluto) tienen un efecto positivo en los resultados, obteniendo así un rendimiento del 45 % con respecto al de la remolacha que se encuentra en un 95 % de concentración de betalaína, siendo la relación disolvente/soluto (3:1) la más influyente. Cabe destacar que las betalaínas obtenidas bajo las condiciones óptimas se utilizaron para elaborar un dulce tipo gomita. Un panel no entrenado de 30 consumidores evaluó los resultados mediante una prueba

discriminativa de comparaciones múltiples. Dicha evaluación determinó que el tratamiento T5 fue bien aceptado por los consumidores en términos de color, sabor, aroma y aceptabilidad general, mostrando resultados favorables en comparación con el colorante de referencia E-162.

Del mismo modo, Mejía (2023) determinó la concentración de betalaínas y betaxantinas en tunas (*Opuntia ficus-indica*) de diferentes coloraciones, evaluadas a dos temperaturas cada 4 días por 28 días. La materia prima utilizada fue la tuna (*Opuntia ficus-indica*) en dos coloraciones, roja y amarilla, de las que se extrajo el colorante mediante un disolvente (metanol al 98 %) en una proporción de 1:10. Las muestras, rotuladas por color y temperatura 4°C y 20°C, se almacenaron en alícuotas de 40 mL. Las absorbancias obtenidas en el espectrofotómetro se utilizaron para determinar la concentración de betalaínas y betaxantinas. Se determinó una mayor concentración de betalaínas y betaxantinas en la tuna de color rojo, con valores de 77,3234 mg/g y 30,0514 mg/g respectivamente, mientras que la tuna amarilla obtuvo 22,0891 mg/g y 21,0324 mg/g respectivamente. Se observó que la temperatura ideal para determinar la concentración inicial era de 4°C, registrando valores más altos que a 20°C. Durante el almacenamiento, las concentraciones disminuyeron progresivamente con el tiempo. Las muestras almacenadas a 4°C mostraron una mayor estabilidad tanto para las betalaínas como para las betaxantinas en comparación con las almacenadas a 20°C. Estos resultados confirman que las betacianinas son más estables que las betaxantinas.

Por otra parte, Acevedo (2024) indica que la extracción asistida por ultrasonido es una alternativa eficiente para obtener betalaínas de la cáscara de tuna, optimizando tiempo y rendimiento. En este estudio, se evaluaron factores como dilución, pH y

potencia, determinando condiciones óptimas para maximizar la extracción. Para la cáscara morada, la mejor condición fue pH 4,0, dilución 1:4, tiempo 6 min y 50 % de potencia, logrando 199,674 mg/g de betalaínas totales. En la cáscara amarilla, el pH óptimo fue 5,0, con la misma dilución, tiempo de 5 min y 50 % de potencia, obteniendo 86,22 mg/g. Se observó que las tunas moradas requieren un pH más ácido, mientras que las amarillas necesitan condiciones más alcalinas. La microencapsulación se presenta como una estrategia viable para mejorar la estabilidad de estos pigmentos, permitiendo su aplicación en productos funcionales. Así, el ultrasonido y la encapsulación garantizan altas concentraciones de betalaínas en menos tiempo, favoreciendo su conservación y uso industrial.

Bases teóricas

2.1.1 *Opuntia ficus-indica* (tuna)

La *Opuntia ficus-indica*, según la UNAM (2025), conocida como nopal de castilla o tuna mansa, es una especie originaria posiblemente de México y ampliamente distribuida en diversas regiones. Su estructura arborescente puede alcanzar hasta 5 metros de altura, con un tallo leñoso y cladodios grandes de tonalidad verde opaca. Sus frutos, de forma ovada, presentan una variedad de colores, desde amarillo hasta púrpura, y son comestibles junto con sus pencas. La tuna se distingue por su adaptabilidad y ausencia de espinas en la mayoría de los casos, lo que facilita su manejo y consumo. Su floración, con tonos que van del amarillo al anaranjado, contribuye a su importancia ecológica y agrícola, consolidándola como una fuente de alimento y pigmentos naturales.

La tuna prospera en terrenos con escasez de agua, con temperaturas que oscilan entre los 6°C y 26°C, y niveles de humedad relativa entre el 55 % y el 85 %. por lo que se le considera una planta xerofítica. En cuanto a su altura, se

desarrolla bien hasta los 2000 metros y para su adecuada producción, esta fruta debe presentar un buen balance de temperatura del día a la noche, buena iluminación durante el día, así como, la lluvia o los riegos deben ser muy moderados (Edvan, *et al.*, 2020)

Según Coyla y Peña (2021) la *Opuntia ficus-indica* es una especie adaptativa capaz de desarrollarse en diversos nichos ecológicos. Posee un tallo leñoso con cladodios oblicuos, alcanzando hasta 5 m de altura. Sus pencas, de color verde opaco, miden entre 30 y 50 cm de ancho y presentan espinas frágiles amarillas o blancas. Su flor es delicada, mientras que su fruto es una baya con variedades rojizas, anaranjadas o amarillas. Destaca por su capacidad de crecimiento en suelos de baja fertilidad y poca humedad, requiriendo cuidados mínimos. Sin embargo, la disminución de temperatura afecta su desarrollo, lo que puede comprometer su resistencia y productividad.

Según el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (2021), el Perú presenta la mayor producción mundial de tuna, con 62 000 toneladas. En los Andes peruanos existen cultivos de tunas, con una alta producción silvestre concentrada en los valles interandinos de regiones como Ayacucho, Huancavelica, Apurímac, Arequipa, Áncash, Lima, Moquegua y Cajamarca, entre otras.

A diferencia de otros países productores, el Perú es reconocido mundialmente como el mayor productor y exportador de tuna, ya que esta especie, al igual que otras de los géneros *Opuntia* y *Nopalea*, se cultiva con el propósito de hospedar a la cochinilla grana. Este insecto es utilizado para producir tinturas rojas y púrpura, las cuales alcanzan un grado de pureza de ácido carmínico de entre 18 y 20 %; esta práctica data de la época precolombina. Además, el contenido de azúcares y

proteínas que poseen sus frutos ofrece la oportunidad de industrialización (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2021).

a. Variedades de tuna.

Según Huamani (2023), las variedades de tuna en el Perú, se diferencian por la pigmentación del fruto y por la presencia de espinas; a continuación, se detallan cada una de estas.

- Blanca:

La planta tiene una altura de 1.50 – 2.50 m, el diámetro de la penca es grande y suculenta, sus flores son amarillo-claro. El fruto se caracteriza por tener una forma oblonga, con una pulpa muy consistente, jugosa, aromática, de un color verde cristalino y escasas semillas. Estas cualidades organolépticas le confieren una mayor aceptación, siendo por ello la variedad más comercializada para consumo en fresco.

- Amarilla:

La planta tiene una altura de 2,00–3,00 m, el diámetro de la penca es mediano y suculenta, sus flores son amarillo-claro. Son frutos de excelente calidad, caracterizados por su pulpa amarilla, jugosa, dulce y de sabor agradable, aunque contienen una gran cantidad de semillas. Esta tuna presenta tres variedades principales: Amarilla de Huerta, Amarilla de Monte (ambas cultivadas en la sierra) y la Amarilla Costeña. En función de la calidad del fruto, las variedades de huerta y costeña son las de mayor preferencia y las más apropiadas para el transporte, gozando de mejor aceptación en el mercado.

- **Colorada:**

La planta tiene una altura de 1.80 – 2.50 m, el diámetro de la penca es mediano y sus flores son amarillo-violáceas. El fruto es de gran tamaño y forma redonda, pero posee una cáscara delgada, lo que provoca una acelerada sobre maduración. Además, su pulpa es de color rojo intenso, de textura arenosa y contiene numerosas semillas, factores que en conjunto la hacen menos comercial en el mercado.

- **Morada:**

La planta alcanza una altura de entre 2,00 y 3,00 metros, con pencas de diámetro mediano y forma redonda. Sus flores son de color amarillo-violáceo y sus frutos, de forma alargada, presentan una cáscara delicada con pequeñas espinas. Los frutos son jugosos, dulces y varían de un color rojo claro a oscuro, por lo que se consideran de buena calidad. En función de estas características, se diferencian dos variedades: la morada de huerta y la morada simple.

b. Composición química.

Según Paucara (2023), la composición del fruto de la tuna varía de acuerdo a las prácticas agronómicas. Desde el punto de vista nutricional, la tuna se considera un fruto de fácil digestión, con un 54 % de pulpa comestible. Posee un buen porcentaje de azúcares reductores fácilmente aprovechables por el organismo, proporcionando una cantidad significativa de calorías (56 a 66 cal/100 g), aunque presenta un menor contenido de proteína, grasa y fibra. A su vez, destaca su elevado valor nutricional en vitaminas como la niacina, tiamina, riboflavina y vitamina C, siendo estas dos últimas las que se encuentran en mayor concentración. En cuanto al contenido de minerales,

sobresalen el calcio y el fósforo, mientras que el potasio, magnesio y sodio se encuentran en cantidades admisibles. Por otro lado, se reportan un 6,75 % de componentes y colorantes orgánicos en su mayoría de color rojo y amarillo. Dentro de los componentes volátiles del fruto destacan: alcoholes, cetonas, ésteres, hidrocarburos.

c. Usos potenciales

Según De Jesús (2021), la tuna tiene un mayor consumo en México, ya que presentan tecnologías de procesamiento; tal es así que a partir de la tuna se pueden hacer algunos usos potenciales (mermeladas, jaleas, jugos, néctares, licores, fruta en almíbar) y subproductos derivados (Encurtidos, harinas para consumo humano y animal, y como verdura en guisos y ensaladas, forrajes entre otros), ampliando una variedad de posibilidades de transformación, teniendo en cuenta sus características y propiedades químicas. Prueba de este aprovechamiento son los procesos tradicionales empleados en la elaboración de derivados como el colonche, la melcocha y el queso de tuna. Además, investigaciones recientes han explorado y desarrollado nuevas opciones de procesamiento para esta fruta.

La transformación del producto, en cualquiera de sus modalidades, soluciona diversas limitaciones actuales, permitiendo un aprovechamiento integral, la reducción del riesgo de pérdidas debido a la estacionalidad del producto y la incorporación de valor agregado. Entre las alternativas agroindustriales de la tuna se encuentran la elaboración de queso de tuna, mermelada, vino, harina, néctar, fruta en almíbar y tunas cristalizadas. Asimismo, es posible obtener fructosa, otros azúcares como glucosa y galactamato, así como ácido ascórbico y pectina. Adicionalmente, se extrae

aceite de las semillas de la tuna o se emplean las cáscaras como parte de la alimentación ganadera. Otro uso es la obtención de un colorante natural del tipo de las betacianinas extraídas de forma experimental a partir de la pulpa de las tunas rojas como la tuna tapona (*O. robusta*), pero principalmente la cardona (*O. streptacantha*), el cual puede ser usado en alimentos, medicinas y cosméticos (Andreu-Coll et al., 2019).

Actualmente, de forma industrial, esta fruta aún no es aprovechada, se conocen escasas tecnologías de transformación de la tuna; sin embargo, existe interés desde la perspectiva de obtención de alimentos para consumo humano, así como de productos medicinales y otros (según su composición química), siendo de gran atractivo tanto para los productores como para las empresas agroindustriales. En la alimentación humana rural cumple un rol importante, exclusivamente en los ambientes áridos con escasos recursos naturales, donde las pencas tiernas son consumidas en forma de ensalada, debido a su alto contenido de proteínas y minerales, además de su gran valor medicinal. Por otra parte, es usado como purificador de agua turbia, siendo considerado como floculante, además de ser el huésped de la cochinilla del carmín, de quien se obtienen tintes y colorantes de gran valor en el mercado internacional (Inglese, et al., 2018)

2.1.2 Colorantes alimenticios

Según Salazar (2022), el uso de colorantes influye directamente en la percepción de calidad y frescura de los productos, convirtiéndose en un factor clave en la decisión de compra del consumidor. Aunque su aplicación se remonta al 3000 a. C., hoy en día su presencia es masiva en la industria alimentaria. Con

el objetivo de mejorar la apariencia de los productos, se emplea una amplia gama de colorantes que se clasifican principalmente en dos tipos: naturales y sintéticos.

Sin embargo, existe preocupación sobre los efectos adversos de los colorantes sintéticos, cuyo consumo excesivo puede ocasionar problemas de salud como alergias y afectaciones al sistema nervioso, contrastando con los beneficios potenciales de los colorantes naturales (Ortiz, 2021).

Los estudios revelan que los colorantes sintéticos, aunque funcionales y de bajo costo, pueden generar problemas de salud, mientras que los naturales pueden ofrecer propiedades antioxidantes y beneficios cardiovasculares (Moya, 2024).

Según Moya (2024), la preferencia por los colorantes sintéticos responde a sus ventajas industriales, mayor estabilidad y costos accesibles. No obstante, su impacto en la salud debe ser considerado, ya que ciertos compuestos utilizados en estos aditivos pueden tener efectos perjudiciales. Frente a ello, los colorantes naturales surgen como una alternativa viable, con beneficios adicionales, aunque su aplicación industrial aún enfrenta desafíos debido a su estabilidad y disponibilidad.

Ante estos hallazgos, es crucial generar conciencia sobre el consumo de colorantes en los alimentos y su impacto en la salud. La regulación y educación sobre el uso de aditivos pueden ayudar a mitigar los riesgos asociados a los colorantes sintéticos, promoviendo alternativas naturales más seguras. Informar a la población sobre los productos que consume y sus efectos es fundamental para fomentar hábitos alimentarios responsables y saludables.

2.1.2.1 Clasificación de los colorantes según su origen

A. Colorantes Sintéticos

Según Gavilán (2021), son aquellos colorantes procesados químicamente a escala industrial. Existe una gran cantidad de ellos por sus ventajas, a diferencia de los colorantes naturales; sin embargo, debido a su relación con la toxicidad o inocuidad, solo algunos están aprobados para su uso en alimentos, por lo cual requieren de una certificación, incluyendo sustancias químicas con alto grado de pureza.

Algunos estudios han calificado a ciertos colorantes sintéticos como posibles agentes cancerígenos, lo que ha llevado a una reducción progresiva de su uso; por ejemplo, están prohibidos en los países nórdicos, y su autorización difiere entre Estados Unidos y Europa. A pesar de que estos colorantes son más resistentes que los naturales, presentan desafíos técnicos: en bebidas enriquecidas con ácido ascórbico (vitamina C), tienden a decolorarse debido al efecto antioxidante de este compuesto (Cotte et al., 2020).

Según Ortiz (2021), la dosificación de los colorantes sintéticos es un punto importante, por ello su compleja aplicación de dosis recomendadas (concentración en ppm o partes por millón) tiene por finalidad conseguir productos más atractivos (dosis más altas logran colores más brillantes y sugestivos para la vista), provocando que las industrias puedan fallar en la incorporación de estos compuestos o, indebidamente, exagerar las dosis permitidas.

Además, según Hidalgo (2022), los colorantes sintéticos son menos degradables que los naturales debido a su procedencia, a partir de reacciones

sintéticas no enzimáticas, provocando dificultad en su degradación por medios químicos o biológicos.

B. Colorantes Naturales

Según Alarcón y Lucas (2020), los colorantes naturales han sido utilizados desde tiempos antiguos debido a su capacidad de proporcionar tonalidades vibrantes y sostenibles. En la actualidad, la investigación se centra en la extracción de pigmentos a partir de plantas endémicas, con el objetivo de reducir el uso de colorantes sintéticos en la industria alimentaria. Especies como *Coreopsis senaria*, *Berberis buceronis* y *Caesalpinia spinosa* han demostrado potencial tintóreo, destacando por su estabilidad y variedad cromática. La extracción de estos pigmentos puede realizarse mediante métodos tradicionales como el remojo y Soxhlet, aunque su eficiencia y estabilidad presentan limitaciones en la producción industrial

Para mejorar la extracción y estabilidad de los colorantes naturales, se han desarrollado métodos modernos como la extracción supercrítica y las técnicas de radiación (gamma, plasma, microondas y ultrasonido). Estas tecnologías no solo mejoran el rendimiento de los pigmentos, sino que también modifican la superficie de los tejidos, optimizando la fijación del color con un menor impacto ambiental. En particular, el uso de ultrasonidos y microondas ha permitido acelerar el proceso de extracción sin comprometer la calidad del tinte, lo que favorece su aplicación más sostenible (Jácome et al., 2023).

Según Ortiz (2021), la caracterización de los alimentos teñidos con colorantes naturales es fundamental para determinar su durabilidad y resistencia. Las pruebas de solidez, exposición a la luz y estabilidad química permiten evaluar la

permanencia del color en diversas condiciones. Estos estudios han demostrado que, si bien los colorantes naturales pueden ser menos estables que sus contrapartes sintéticas, su uso combinado con tecnologías de encapsulación y fijación mejora significativamente su rendimiento y durabilidad. Esto refuerza su potencial como alternativa ecológica en la industria.

La adopción de colorantes naturales en la manufactura no solo responde a la creciente demanda de productos sostenibles, sino que también contribuye a la conservación de especies vegetales con propiedades tintóreas (Sarango, 2024). La investigación en esta área sigue avanzando, explorando nuevas fuentes y métodos de extracción que permitan maximizar el rendimiento de los pigmentos naturales. Con una adecuada regulación y desarrollo tecnológico, estos colorantes pueden convertirse en una solución viable para reducir el impacto ambiental y mejorar la calidad de los productos.

2.1.3 Betalaínas

Según Jerz (2021), las betalaínas son pigmentos naturales nitrogenados que se encuentran exclusivamente en plantas del orden *Caryophyllales*. Estos pigmentos se clasifican en dos grupos principales: betacianinas que Producen colores que van del rojo a la púrpura y betaxantinas esponsables de las tonalidades amarillas y anaranjadas. A diferencia de las antocianinas, las betalaínas no dependen del pH para su estabilidad en alimentos, lo que las hace atractivas para la industria alimentaria como colorantes naturales.

Estos pigmentos desempeñan funciones esenciales en las plantas, como la atracción de polinizadores y la protección contra el estrés ambiental. Además, han demostrado poseer propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, lo que ha

despertado interés en su aplicación en productos funcionales y farmacéuticos. Su capacidad para neutralizar radicales libres y proteger las células del daño oxidativo refuerza su potencial en la prevención de enfermedades crónicas (Jácome et al., 2023).

La estabilidad de las betalaínas es un desafío, ya que son sensibles a la luz, el oxígeno y la temperatura. Para mejorar su conservación, se han desarrollado técnicas como la microencapsulación y la extracción asistida por ultrasonido, que permiten prolongar su vida útil y mantener su actividad biológica. Estas estrategias han facilitado su incorporación en alimentos y suplementos con beneficios para la salud (Corrêa et al., 2019).

En estudios recientes, se ha observado que las betalaínas pueden ser absorbidas en el intestino humano y transportadas en el torrente sanguíneo, donde se incorporan a las lipoproteínas y membranas celulares (Martínez, 2022). Esto sugiere que su consumo podría contribuir a la protección contra el estrés oxidativo y la degeneración celular, consolidando su importancia en la nutrición y la medicina.

2.1.3.1 Clasificación de las betalaínas

A. Betacianinas

Según Jerz (2021), las betacianinas son un grupo de pigmentos naturales pertenecientes a las betalaínas, responsables de los tonos rojizos y púrpuras en plantas como la remolacha (*Beta vulgaris*) y la tuna (*Opuntia ficus-indica*). Su estructura química se basa en la condensación del ácido betalámico con diferentes compuestos nitrogenados, lo que les confiere estabilidad en un rango de pH más amplio que otros pigmentos naturales.

A diferencia de las antocianinas, las betacianinas no dependen del pH para su coloración, lo que las hace atractivas para aplicaciones en la industria alimentaria y farmacéutica.

Según Sarango (2024), estos pigmentos poseen propiedades antioxidantes significativas, ayudando a neutralizar radicales libres y protegiendo las células del daño oxidativo. Además, estudios han demostrado que las betacianinas pueden tener efectos antiinflamatorios y anticancerígenos, lo que refuerza su potencial en la prevención de enfermedades crónicas. Su capacidad para modular respuestas inflamatorias y mejorar la salud cardiovascular ha despertado interés en su uso en suplementos y alimentos funcionales.

Sin embargo, la estabilidad de las betacianinas es un desafío, ya que son sensibles a la luz, el oxígeno y la temperatura. Para mejorar su conservación, se han desarrollado técnicas como la microencapsulación y la extracción asistida por ultrasonido, que permiten prolongar su vida útil y mantener su actividad biológica (Melgar, 2019). Estas estrategias han facilitado su incorporación en productos comerciales, asegurando su efectividad y estabilidad en diversas aplicaciones.

B. Betaxantinas

Igualmente, según Jerz (2021), las betaxantinas son un grupo de pigmentos naturales pertenecientes a las betalaínas, responsables de los tonos amarillos y anaranjados en diversas especies vegetales como la tuna (*Opuntia ficus-indica*) y la remolacha (*Beta vulgaris*). Su estructura química se basa en la condensación del ácido betalámico con diferentes

aminoácidos, lo que les confiere estabilidad en un rango de pH más amplio en comparación con otros pigmentos naturales. Debido a su solubilidad en agua y su capacidad para resistir variaciones de pH, las betaxantinas han despertado interés en la industria alimentaria como colorantes naturales.

Estos pigmentos no solo cumplen una función estética en los alimentos, sino que también poseen propiedades antioxidantes y antiinflamatorias. Se ha demostrado que las betaxantinas pueden neutralizar radicales libres, reduciendo el daño celular y el envejecimiento prematuro. Además, su capacidad para modular respuestas inflamatorias las hace prometedoras en la prevención de enfermedades crónicas. Su aplicación en productos funcionales y suplementos nutricionales ha sido objeto de estudio debido a sus beneficios para la salud (Sarango, 2024).

Sin embargo, según Melgar (2019), la estabilidad de las betaxantinas es un desafío, ya que son sensibles a la luz, el oxígeno y la temperatura. Para mejorar su conservación, se han desarrollado técnicas como la microencapsulación y la extracción asistida por ultrasonido, que permiten prolongar su vida útil y mantener su actividad biológica. Estas estrategias han facilitado su incorporación en productos comerciales, asegurando su efectividad y estabilidad en diversas aplicaciones industriales.

Estudios recientes han demostrado que las betaxantinas pueden ser absorbidas en el intestino humano y transportadas en el torrente sanguíneo, donde se incorporan a las lipoproteínas y membranas celulares (Martínez, 2022). Esto sugiere que su consumo podría contribuir a la protección contra el estrés oxidativo y la degeneración celular, consolidando su

importancia en la nutrición y la medicina. Su potencial como colorante natural y compuesto bioactivo sigue siendo explorado, con el objetivo de mejorar su estabilidad y ampliar sus aplicaciones en la industria.

2.1.3.2 Estabilidad de las betalaínas

Según Calva (2021), las betalaínas son compuestos relativamente inestables frente a ciertas condiciones ambientales. Su descomposición puede ser acelerada por factores como el pH, la luz, la temperatura, el oxígeno, la presencia de metales y la actividad del agua. La pérdida de color o degradación estructural puede comprometer su funcionalidad en productos procesados. Por ello, es crucial comprender las variables que influyen en su estabilidad para optimizar su uso en diversas aplicaciones tecnológicas.

La inestabilidad de las betalaínas se debe en parte a su estructura química, rica en grupos fenólicos y enlaces insaturados susceptibles a reacciones de oxidación y descomposición térmica. Además, su entorno químico y físico, como la presencia de oxígeno o cationes metálicos, puede catalizar reacciones indeseables que afectan su integridad. Estudios han demostrado que el almacenamiento prolongado o el procesamiento térmico inadecuado pueden reducir significativamente su vida útil. Asimismo, las betalaínas son sensibles a la fotodegradación, lo que limita su aplicación en productos expuestos a la luz. Por estas razones, se han explorado estrategias como el uso de antioxidantes, agentes quelantes, microencapsulación y ajuste del pH como mecanismos de protección (Sarango, 2024). Conocer estos parámetros permite desarrollar

formulaciones más estables, manteniendo el atractivo sensorial y los beneficios funcionales de estos pigmentos naturales.

A. Factores que afectan la estabilidad de las betalaínas

- pH (Sarango, 2024)

El pH es uno de los factores más determinantes en la estabilidad de las betalaínas. Estas moléculas son más estables en medios ligeramente ácidos, especialmente en el rango de pH 4 a 6. En estas condiciones, mantienen su estructura y coloración característica. A medida que el pH se aleja de este rango óptimo, especialmente hacia condiciones alcalinas ($\text{pH} > 7$), las betalaínas tienden a descomponerse rápidamente, lo que provoca decoloración y pérdida de actividad funcional. En ambientes muy ácidos ($\text{pH} < 3$), aunque se mantiene la coloración, puede ocurrir la hidrólisis de enlaces específicos, lo que también afecta la estabilidad a largo plazo.

La desestabilización por pH se relaciona con la ionización de grupos funcionales en la estructura de las betalaínas, que altera la conformación molecular y facilita su oxidación. Además, el pH también puede afectar la interacción con otras moléculas presentes en el medio, como proteínas o azúcares, generando reacciones no deseadas. Por ello, durante el procesamiento de alimentos o formulación de productos cosméticos y farmacéuticos que contienen betalaínas, se recomienda mantener el pH dentro del rango óptimo. Algunos estudios también han propuesto el uso de tampones para controlar el pH y minimizar su efecto desestabilizante.

- **Temperatura (Sarango, 2024)**

Las betalaínas son sensibles al calor, y su estabilidad disminuye conforme aumenta la temperatura. Exposiciones prolongadas a temperaturas superiores a 50 °C suelen provocar degradación térmica, alterando tanto su color como su capacidad antioxidante. La pérdida de color es uno de los primeros indicadores de inestabilidad térmica, y puede ser acelerada durante procesos como la pasteurización, cocción o secado. Esta degradación es atribuida a la ruptura de la estructura química y a reacciones de descomposición oxidativa, que son exacerbadas por la presencia de oxígeno y luz.

Sin embargo, la sensibilidad térmica de las betalaínas puede variar según su tipo y matriz alimentaria. Por ejemplo, las betacianinas de la remolacha muestran mayor estabilidad que algunas betaxantinas. El control de la temperatura durante la extracción y almacenamiento es fundamental para preservar su funcionalidad. Se han ensayado estrategias como el uso de atmósferas controladas y la encapsulación para minimizar el impacto del calor. Además, métodos de secado a bajas temperaturas, como la liofilización, han demostrado ser eficaces para conservar la integridad de las betalaínas en productos deshidratados.

- **Luz (Sarango, 2024)**

La luz, especialmente la radiación ultravioleta y visible, tiene un efecto directo en la degradación de las betalaínas. La exposición prolongada a fuentes de luz provoca la fotodegradación de estos pigmentos, reduciendo significativamente su intensidad colorante y actividad antioxidante. Esta fotodegradación implica reacciones

fotoquímicas que rompen enlaces en la estructura de las betalaínas, generando compuestos incoloros o marrones. Por ello, es común observar decoloración en productos que contienen betalaínas y son almacenados en envases transparentes.

La sensibilidad a la luz puede ser mitigada mediante el uso de envases opacos o que bloqueen la radiación UV, así como con la incorporación de antioxidantes que actúan como fotoprotectores. Además, la combinación con otros compuestos fenólicos o matrices alimentarias ricas en proteínas puede retardar el efecto de la luz. En estudios experimentales, la exposición a la luz blanca continua ha demostrado reducir la concentración de betalaínas en un 50% en menos de 24 horas, lo que subraya la necesidad de proteger los productos que las contienen desde su elaboración hasta su consumo.

- Oxígeno (Jaramillo, 2023)

El oxígeno es otro agente que acelera la degradación de las betalaínas por medio de reacciones de oxidación. La presencia de oxígeno atmosférico, especialmente en combinación con luz o temperatura elevada, promueve la formación de radicales libres que atacan la estructura de las betalaínas. Estas reacciones generan productos de oxidación que no solo afectan el color, sino que también disminuyen la capacidad antioxidante de los pigmentos. Por eso, la exposición al aire durante el procesamiento y almacenamiento puede comprometer la calidad del producto final.

Para contrarrestar este efecto, se utilizan técnicas de envasado en atmósferas modificadas o al vacío, que reducen la disponibilidad de oxígeno. Asimismo, el uso de antioxidantes naturales o sintéticos ayuda a neutralizar los radicales libres generados. Algunas investigaciones también sugieren que la encapsulación de betalaínas en matrices poliméricas o lipídicas puede formar una barrera física contra el oxígeno, aumentando su estabilidad. Estas estrategias son clave en el diseño de productos funcionales o colorantes naturales de alta vida útil.

- **Actividad de agua (Aw) (Jaramillo, 2023)**

La actividad del agua (Aw) influye considerablemente en la estabilidad de las betalaínas, especialmente en productos en polvo o concentrados. En niveles de (Aw) intermedios (0.3–0.6), puede favorecerse la movilidad molecular y la aparición de reacciones de degradación, como la hidrólisis o la oxidación. Por el contrario, en condiciones de baja humedad ($Aw < 0.2$), las betalaínas suelen ser más estables debido a la limitada actividad enzimática y menor disponibilidad de agua para reacciones químicas. Sin embargo, un ambiente demasiado seco puede afectar su solubilidad y funcionalidad al momento de reconstituir el producto.

El control del contenido de agua es especialmente importante durante procesos de secado o almacenamiento. Técnicas como la liofilización permiten conservar las betalaínas en estado seco sin someterlas a altas temperaturas, lo cual mejora su estabilidad. Además, el uso de agentes estabilizantes o materiales portadores como maltodextrina ayuda a reducir la (Aw) y proteger los pigmentos. La

elección del método de conservación debe considerar tanto la estabilidad deseada como las condiciones de uso del producto final.

- **Efecto de los cationes metálicos (Sarango, 2024)**

Los cationes metálicos como el hierro (Fe^{2+}/Fe^{3+}) y el cobre (Cu^{2+}) pueden catalizar la degradación oxidativa de las betalaínas al participar en reacciones tipo Fenton. Estas reacciones generan radicales libres altamente reactivos que rompen la estructura molecular de los pigmentos. Incluso en bajas concentraciones, estos iones metálicos pueden acelerar la pérdida de color y disminuir las propiedades funcionales de las betalaínas. Por ello, es esencial controlar la presencia de estos cationes en formulaciones que emplean estos pigmentos.

Una estrategia eficaz es el uso de agentes quelantes o secuestrantes de metales, como el EDTA o el ácido cítrico, que forman complejos con los iones metálicos e inhiben su actividad catalítica. Además, la calidad del agua y los ingredientes utilizados en la formulación deben ser cuidadosamente monitoreados para evitar la introducción de metales. En el procesamiento industrial, también se recomienda evitar el contacto con superficies metálicas reactivas, optando por materiales inertes como el vidrio o polímeros. Estas medidas ayudan a preservar la estabilidad de las betalaínas a lo largo del ciclo de vida del producto.

- **Efecto de antioxidantes (Jaramillo, 2023)**

Los antioxidantes son compuestos que retrasan o inhiben la oxidación, siendo aliados fundamentales en la estabilización de betalaínas. Sustancias como el ácido ascórbico, el ácido cítrico y los

polifenoles naturales actúan como donadores de electrones, neutralizando radicales libres y evitando la degradación oxidativa. Estos compuestos pueden añadirse durante la extracción o formulación para mejorar la resistencia de las betalaínas frente a factores como el oxígeno, la luz y los metales. Además, algunos antioxidantes también funcionan como sinergistas, potenciando la acción de otros compuestos protectores.

- **Efecto de secuestrantes (Calva, 2021)**

Por su parte, los agentes secuestrantes o quelantes, como el EDTA, forman complejos con iones metálicos, evitando que participen en reacciones oxidativas. Esta doble acción —antioxidante y secuestrante— puede mejorar significativamente la vida útil de productos que contienen betalaínas. Sin embargo, es importante elegir estos aditivos en función del tipo de matriz y su compatibilidad con otros ingredientes. En aplicaciones alimentarias, se prefiere el uso de compuestos naturales que no alteren el sabor ni la percepción sensorial del producto. El diseño de sistemas multifuncionales que combinen varios mecanismos de protección representa una estrategia prometedora para preservar la funcionalidad y el color de las betalaínas.

2.1.3.3 Extracción de betalaínas

Según Sarango (2024), La extracción de betalaínas, pigmentos naturales presentes en la remolacha (*Beta vulgaris*), enfrenta desafíos inherentes a la variabilidad del color y la estabilidad de los compuestos. Existen varios métodos de extracción, cada uno con sus propias ventajas y limitaciones. La maceración con agua es un procedimiento tradicional que permite obtener colorantes

concentrados mediante remojo y cocción. Por otro lado, la extracción que evita el uso de solventes químicos emplea mordientes naturales, como el alumbre y el jugo de lima, para conseguir pigmentos con tonalidades más brillantes. Métodos más avanzados incluyen el uso de solventes orgánicos y microondas, donde el etanol, hexano o isopropanol mejoran la eficiencia mediante irradiación controlada. La estabilidad del colorante se optimiza con fijadores como cloruro de sodio o bicarbonato de sodio, que ayudan a prolongar la vida útil del pigmento. Sin embargo, según Martínez (2022), las betalaínas son sensibles a la luz, el pH y la temperatura, lo que puede afectar su intensidad y durabilidad en aplicaciones industriales.

Las nuevas tecnologías buscan mejorar la extracción y preservación de las betalaínas, utilizando técnicas como la extracción asistida por ultrasonidos y fluidos supercríticos, que incrementan el rendimiento y reducen la degradación del pigmento. La espectrofotometría se emplea para evaluar la estabilidad y concentración de los compuestos extraídos, determinando su viabilidad en distintos productos. Además, se han desarrollado protocolos experimentales para optimizar la extracción mediante ajustes en pH, tiempo y tipo de solvente, permitiendo obtener pigmentos más estables y de mejor calidad (Sarango, 2024). Estas mejoras en el proceso de extracción contribuyen a la sustitución de colorantes sintéticos, promoviendo el uso de betalaínas naturales en la industria alimentaria, textil y farmacéutica, con beneficios ecológicos y saludables.

A. Extracción sólido - líquido discontinuo.

La extracción sólida-líquido discontinuo (también conocida como extracción por lotes o maceración por ciclos) consiste en poner en contacto la muestra sólida (por ejemplo, pulpa o cáscara de fruto) con un

solvente específico durante un período determinado, retirarlo y, opcionalmente, repetir el proceso en nuevos ciclos. Este método facilita la transferencia de compuestos (como betalaínas o polifenoles) del sólido hacia el líquido, aprovechando fenómenos como la difusión y, en algunos casos, la presión diferencial (Hernández-Aguirre et al., 2021).

2.1.3.4 Uso de las betalaínas

Según Flores et al. (2019), su uso ha cobrado importancia debido a su potencial sustitución de colorantes sintéticos, ofreciendo además beneficios antioxidantes y propiedades saludables. Se emplean en productos como bebidas, yogures y productos procesados, aprovechando su estabilidad en ciertos rangos de pH y temperatura. Sin embargo, su aplicación ha sido limitada por su sensibilidad a factores externos como luz, presencia de oxígeno y metales, lo que puede afectar su estabilidad y calidad cromática.

Para garantizar su estabilidad, se han desarrollado diversas estrategias de encapsulación y métodos de extracción que mejoran su rendimiento en matrices alimentarias. Procesos como la microencapsulación con goma arábiga o maltodextrina han demostrado preservar sus características funcionales, permitiendo su integración en una variedad de productos. Además, la combinación de técnicas de extracción asistidas por ultrasonido ha optimizado su obtención desde fuentes vegetales como la remolacha, la pitahaya y la tuna. Estas innovaciones han incrementado la viabilidad de las betalaínas en aplicaciones comerciales, fortaleciendo su papel en la industria alimentaria (Carmona et al., 2021).

Más allá de su función como colorantes, las betalaínas han sido estudiadas por sus beneficios en la salud, incluyendo su actividad antioxidante, antiinflamatoria y potenciales efectos anticancerígenos. Su capacidad para neutralizar radicales libres ha generado interés en su aplicación en productos funcionales y suplementos. Sin embargo, aún persisten retos en su estabilidad estructural y su respuesta a distintos entornos de almacenamiento (Moya, 2024). La investigación continúa explorando nuevas formas de mejorar su resistencia y ampliar sus aplicaciones en el mercado global de ingredientes naturales

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Hipótesis

General

La estabilidad de las betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna) se ve afectada por la temperatura y el pH

Especificas

Las betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna) presentan una estabilidad óptima cuando se mantienen a 1°C y pH 6 durante 24 horas

Las betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna) presentan una estabilidad óptima cuando se mantienen a 1°C y pH 4 durante 72 horas

3.2. Diseño Metodológico

El estudio tiene un diseño experimental.

3.3. Localización del estudio

Provincia: Cajamarca

Distrito : Cajamarca

Los experimentos se llevaron a cabo en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de Cajamarca.

3.4. Población, muestra y unidad de análisis

Población muestral: Plantas de *Opuntia ficus-indica* (tuna) del centro poblado Agocucho, distrito de Cajamarca, provincia de Cajamarca, Cajamarca-Perú.

Muestra: 10 kg del fruto de *Opuntia ficus-indica* del centro poblado Agocucho.

Unidad de análisis: Betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica*.

3.5. Diseño metodológico

Se realizó un diseño experimental con nueve tratamientos, según lo siguiente:

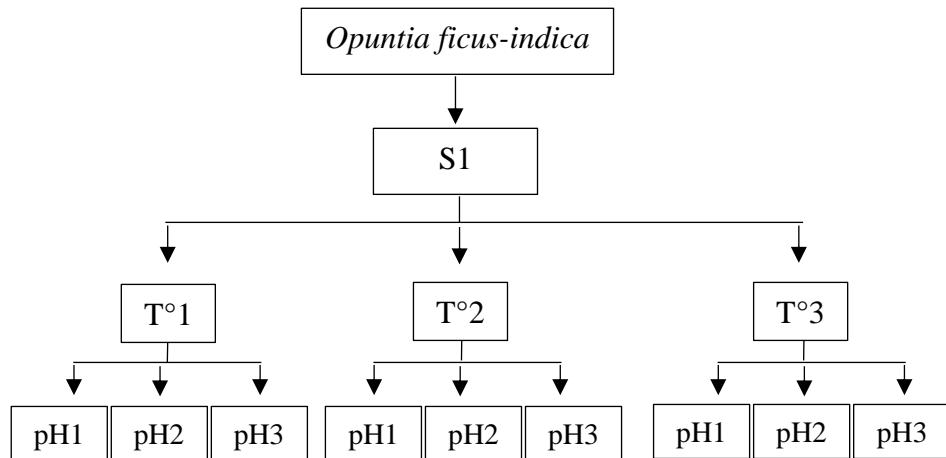


Figura. Diagrama del diseño experimental de la investigación

S1: Solvente – agua destilada

T°1 = 1°C **T°2 = 5°C** **T°3 = 10°C**

pH1 = 4 **pH2 = 5** **pH3 = 6**

Las evaluaciones se realizaron a las 0, 24 y 72 horas.

3.5.1. Metodología

1. Elección y recolección de la variedad de *Opuntia ficus-indica* (tuna)

La muestra utilizada correspondió a la variedad amarilla de *Opuntia ficus-indica* (tuna), cultivada en el centro poblado de Agocucho (Cajamarca, Perú).

Se recolectaron 10 kg de frutos, seleccionando únicamente aquellos con buen estado fisiológico y excluyendo los que mostraban signos de enfermedad o daño mecánico.

2. Limpieza, escaldado y licuado del fruto de *Opuntia ficus-indica* (tuna)

Se procedió a lavar los frutos con agua estéril y a separar la pulpa de la cáscara. El escaldado se realizó a través de una autoclave bajo una presión de 535 mmHg durante 10 minutos a una temperatura de 50 °C (Benites, 2019).

El licuado del fruto se realizó con agua destilada estéril en una proporción de 1:5 (100 g de tuna y 500 mL del solvente) (Ferreira et al. 2022).

3. Método de sólido – líquido para extracción de betalaínas de *Opuntia ficus-indica* (Benites, 2019)

Del licuado obtenido se extrajo 50 mL y se dejó macerar por 24 horas a temperatura ambiente, en ese tiempo el pigmento (betalaína) migró hacia el agua destilada llevándose a cabo la extracción sólido-líquido discontinua. Al transcurrir las 24 horas, se filtró al vacío el extracto acuoso utilizando papel filtro Whatman # 4, eliminando la parte sólida (componentes no deseables) y dejando solo el extracto.

El extracto obtenido se centrifugó a 6000 rpm para los sólidos que se filtraron obteniéndose así un extracto más limpio. El extracto obtenido libre de sobrenadante final se almacenó para su posterior evaluación.

4. Determinación de la estabilidad de betalaínas de la *Opuntia ficus indica*

El contenido de betalaínas presentes en el extracto acuoso del fruto de *Opuntia ficus-indica*, se cuantificó según lo descrito por Castellanos y Yahia (2008). Se midió la absorbancia de los extractos regulados a pH 4; 5 y 6 con HCl 0,25 N y a temperaturas de 1°C, 5°C y 10°C respectivamente. La cuantificación

se realizó en un espectrofotómetro Shimatzu UV/Vis a 538 y 583 nm. Para la conversión de las unidades de absorbancia en unidades de concentración se utilizó la expresión:

$$B \text{ (mg/g)} = (A * FD * PM * V) / (\epsilon * P * L)$$

Dónde:

- B = contenido de betalaínas.
- A = absorbancia.
- FD = factor de dilución.
- PM = peso molecular de betalaína (teórico)
- V = volumen del extracto
- ϵ = coeficiente de extinción molar.
- L = anchura de la cubeta del espectrofotómetro.

3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

El ensayo se llevó a cabo por triplicado y los resultados obtenidos fueron sometidos a un análisis estadístico descriptivo, mediante la estimación t student al 95.0% de confianza; se usó también el estadístico Greenhouse-Geisser para verificar la igual de medias. Para evaluar diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos se realizó prueba de Análisis de Varianza (ANOVA), y para determinar el mejor tratamiento se usó la Prueba post hoc de Duncan. Se utilizó el software RStudio.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

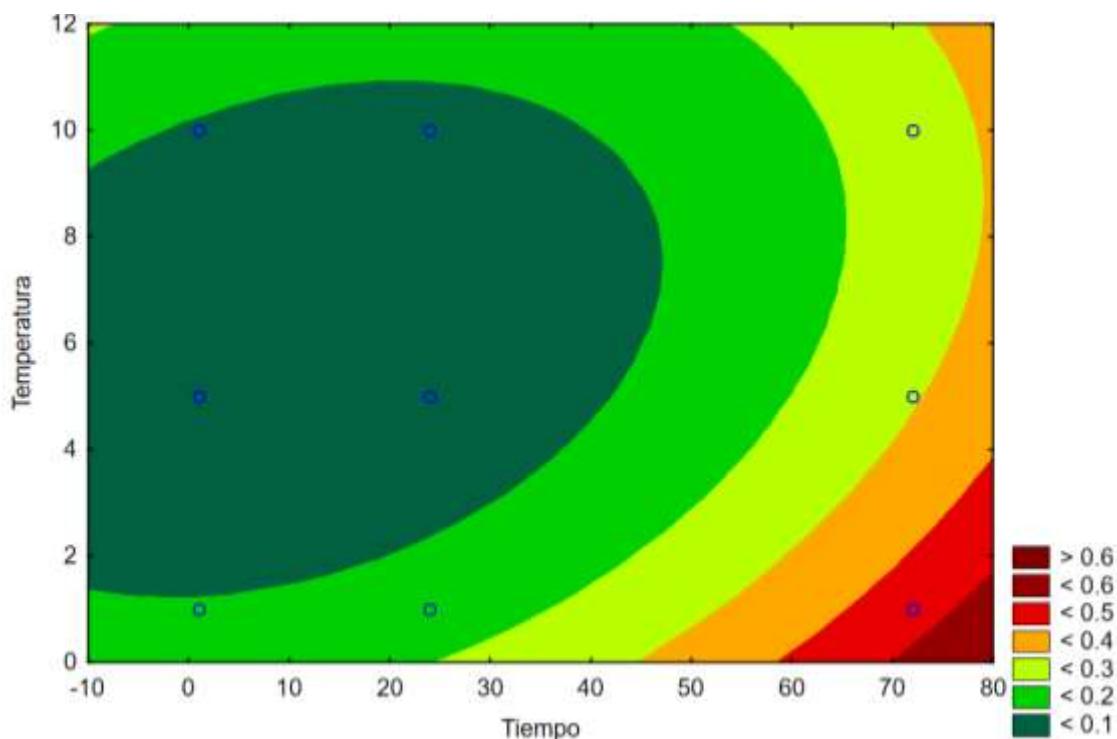


Figura 1. Efecto combinado del tiempo de almacenamiento y la temperatura (1–10 °C) sobre la estabilidad de betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (Tuna).

Donde. Los colores representan niveles de concentración de betalaínas (mg/g): Rojo–naranja: concentraciones altas (>0.4 – 0.6 mg/g), verde–azul oscuro: concentraciones bajas (<0.1 – 0.2 mg/g) y centro verde oscuro/gris: punto de mínima concentración en la superficie.

La Figura 1 muestra la superficie de respuesta ajustada para la variable concentración de betalaínas (mg/g), obtenida en función del tiempo de almacenamiento (0–72 h) y la temperatura (1–10 °C). El modelo incluye tres factores y se basa en 81 corridas experimentales, alcanzando un error residual bajo (MS Residual = 0.0159244), lo cual indica un ajuste adecuado del modelo a los datos experimentales.

Se observa una clara tendencia a la disminución progresiva de la concentración de betalaínas a medida que se incrementa el tiempo de almacenamiento. Este comportamiento concuerda con la cinética de degradación térmica y oxidativa típica de las betalaínas. Durante las primeras horas de almacenamiento (0–20 h), el descenso es moderado y las concentraciones se mantienen en el rango intermedio del mapa (zonas verdes). Sin embargo, a partir de las 40–50 horas, la degradación se intensifica significativamente. Los valores más bajos (<0.1 mg/g) se registran entre las 60 y 80 horas, especialmente bajo la influencia de temperaturas elevadas.

En relación con el efecto de la temperatura, la superficie de respuesta refleja un patrón consistente con los principios de estabilidad térmica de las betalaínas. A temperaturas bajas (1–2 °C), las concentraciones de pigmento permanecen relativamente elevadas, incluso tras periodos prolongados de almacenamiento. Por el contrario, a temperaturas superiores a 8–10 °C, la cinética de degradación se acelera notablemente, resultando en un amplio sector de la superficie con valores reducidos de betalaínas. Este comportamiento confirma que la temperatura es un factor determinante en la conservación del pigmento, y que incluso variaciones menores dentro del rango estudiado pueden tener un impacto significativo en su estabilidad.

La interacción sinérgica entre ambos factores (temperatura y tiempo) exhibe un comportamiento no lineal. En la región central del gráfico (aproximadamente entre 20–40 horas y 6–10 °C), se identifica una zona de mínimo relativo en las concentraciones de betalaínas. Este fenómeno podría explicarse por los efectos combinados de la cinética de degradación y posibles interacciones con variables (pH o disponibilidad de oxígeno residual) no representadas explícitamente en la figura 1. Con todo, la tendencia principal evidencia que la degradación más severa ocurre bajo la combinación de tiempos de

almacenamiento prolongados y temperaturas elevadas, mientras que las condiciones óptimas de conservación se sitúan en el extremo opuesto: tiempos reducidos y temperaturas próximas a 1 °C.

En conjunto, la superficie de respuesta confirma que la estabilidad de las betalaínas de *Opuntia ficus-indica* (tuna) es altamente dependiente de las condiciones de almacenamiento evaluadas. Los resultados obtenidos indican que la máxima concentración de betalaínas se preserva bajo condiciones de temperaturas próximas a 1–2 °C y limitando el tiempo de conservación a menos de 20 horas. Por el contrario, se observó que temperaturas superiores a 8 °C y tiempos de almacenamiento que exceden las 50 horas generan una disminución significativa del compuesto, reflejando su notable sensibilidad térmica y temporal.

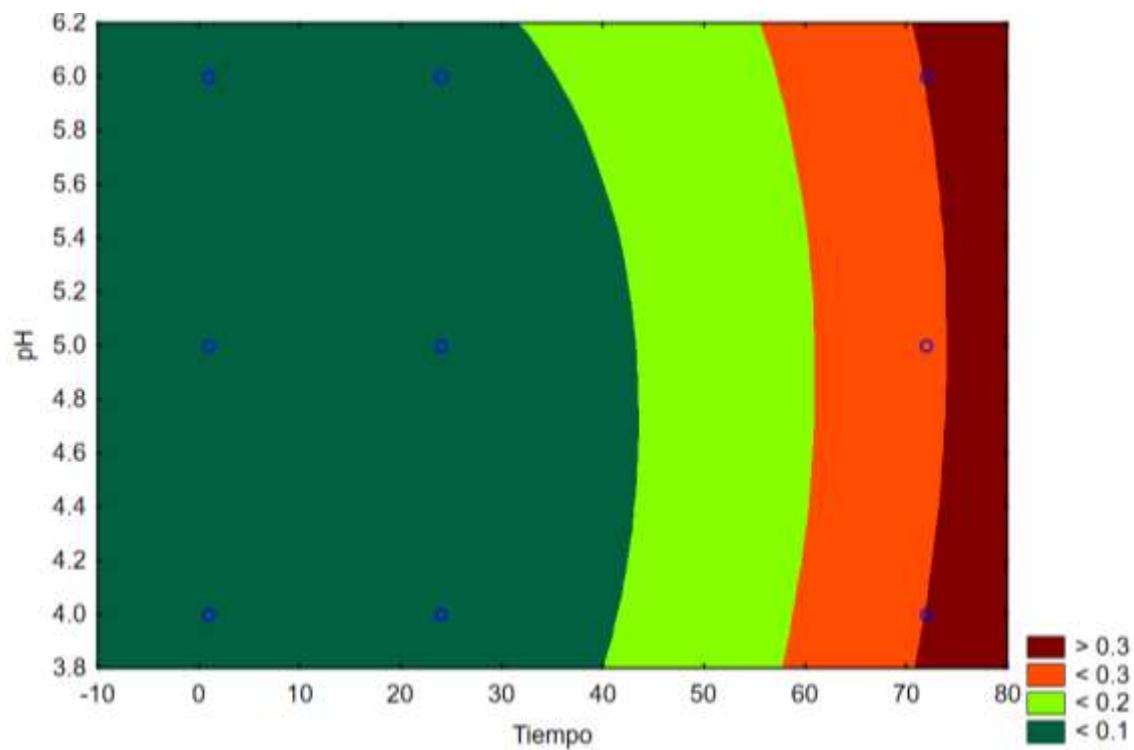


Figura 2. Efecto combinado del tiempo de almacenamiento y pH (4–6) sobre la estabilidad de betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (Tuna).

Donde. Los colores representan niveles de concentración de betalaínas (mg/g): Rojo-naranja: concentraciones altas (>0.3 mg/g), verde oscuro: concentraciones bajas (<0.1 mg/g).

La Figura 2 muestra la superficie de respuesta que describe la variación de la concentración de betalaínas (mg/g) en función del tiempo de almacenamiento (0–72 h) y el pH (4–6), manteniendo la temperatura del sistema constante. El modelo demuestra que, sin importar el nivel de pH dentro del rango estudiado (4, 5 y 6), la estabilidad de las betalaínas decrece a medida que pasa el tiempo. Este patrón concuerda con la inherente susceptibilidad de las betalaínas a la degradación por oxidación y calor.

En términos del efecto del pH, la superficie de respuesta muestra una ligera tendencia hacia una mayor estabilidad en valores próximos a pH 5.5–6.0 durante las primeras horas. Sin embargo, esta ventaja se vuelve marginal a medida que el tiempo se acerca a las 72 horas.

Además, los colores más oscuros del mapa de calor (valores < 0.1 mg/g) se concentran en el cuadrante izquierdo de la figura, correspondiente a los tiempos iniciales (0–20 h). Esto sugiere una estabilidad relativa en las primeras horas antes de un descenso acusado. En contraste, las zonas en tonalidades anaranjadas y rojas (que indican un aumento en la degradación, con valores > 0.2–0.3 mg/g de pérdida) se intensifican hacia las 72 horas, reflejando una pérdida acelerada del pigmento independientemente del pH evaluado.

Los resultados obtenidos demuestran que, bajo las condiciones estudiadas, la estabilidad de las betalaínas es limitada incluso a temperaturas bajas. Se confirma que, aunque el pH ejerce un efecto modulador, el tiempo es el principal determinante del nivel de degradación. Esta evidencia respalda la importancia de minimizar los períodos de almacenamiento pos-extracción. Además, sugiere que futuras formulaciones o matrices que busquen prolongar la estabilidad deben centrarse en mecanismos adicionales de

protección (como antioxidantes, encapsulación o atmósferas controladas), más que en el ajuste del pH como única medida.

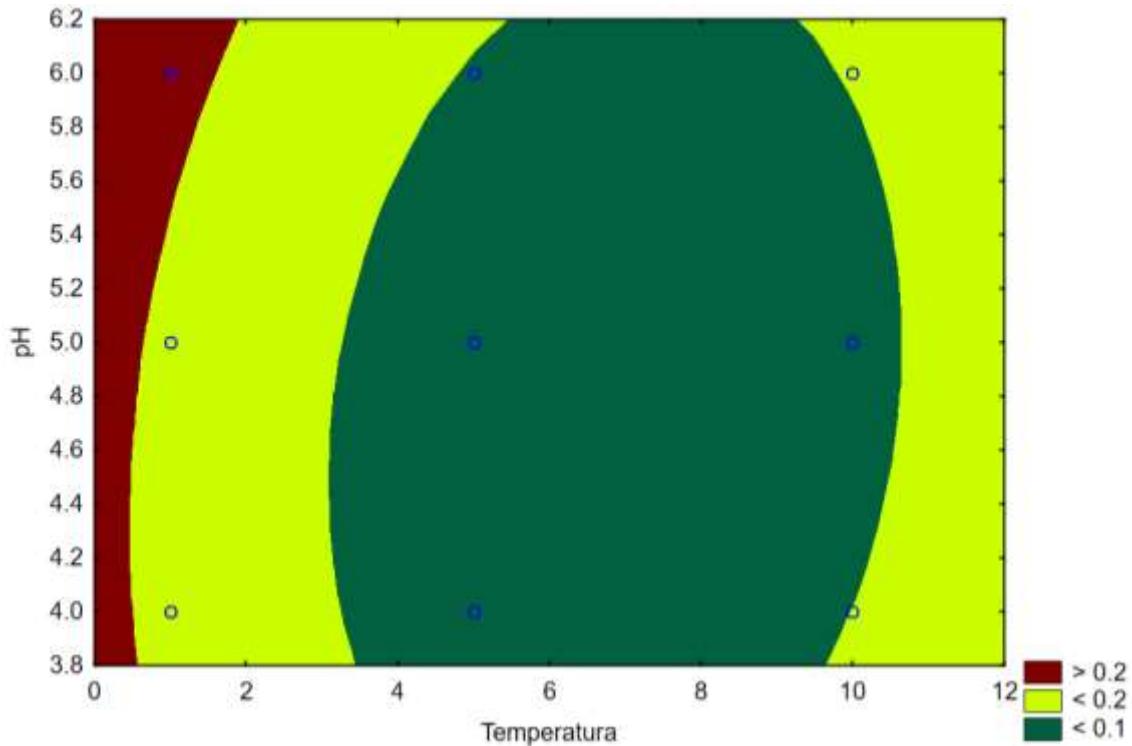


Figura 3. Efecto combinado de la temperatura (1-10 °C) y pH (4-6) sobre la estabilidad de betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (Tuna).

Donde. Los colores representan niveles de concentración de betalaínas (mg/g): Rojo-naranja: concentraciones altas (>0.2 mg/g), verde oscuro: concentraciones bajas (<0.1 mg/g).

La superficie de respuesta mostrada en la Figura 3, que relaciona la temperatura (1-10 °C) y el pH (4-6), demuestra que la estabilidad de las betalaínas presenta una fuerte dependencia de la temperatura. En contraste, el pH ejerce un efecto secundario y menos determinante dentro del rango evaluado. Las zonas en tonalidades verde oscuro (correspondientes a concentraciones inferiores a 0.1 mg/g) ocupan la mayor parte del gráfico, lo cual sugiere que, en condiciones generales, la concentración del pigmento se mantiene baja y relativamente estable.

No obstante, se observa una zona crítica en el cuadrante izquierdo de la figura, donde la temperatura se aproxima a 1 °C y los valores de pH son superiores a 5.8. En este sector aparecen tonalidades rojizas, que representan concentraciones mayores a 0.2 mg/g. Esto indica que la interacción entre temperaturas muy bajas y valores de pH cercanos a la neutralidad podría generar una mayor degradación o una respuesta no lineal en la estabilidad del pigmento. Este comportamiento sugiere que el sistema es más sensible en condiciones extremas de pH alto dentro del rango evaluado.

A medida que la temperatura se incrementa hacia el rango de 6–10 °C, la gráfica muestra una transición hacia tonos verde oscuro, lo que indica una mayor uniformidad y una menor variabilidad en las concentraciones de betalaínas. Esto sugiere que, en este rango de temperatura, la estabilidad del pigmento es más predecible, sin una influencia notable del pH. Asimismo, el patrón casi simétrico observado a lo largo del eje vertical sugiere que el pH no genera cambios abruptos en los niveles de betalaínas, sino que su influencia es moderada y subordinada al comportamiento térmico dominante.

La figura evidencia que la temperatura es el factor principal que define el perfil de estabilidad de las betalainas, mientras que el pH modula el comportamiento del pigmento en zonas específicas, especialmente en valores altos del rango evaluado. Los resultados obtenidos coinciden con reportes previos, donde la estabilidad de las betalaínas se relaciona más estrechamente con la temperatura que con el pH en rangos ligeramente ácidos. De este modo, el análisis confirma que la estabilidad óptima de las betalaínas se encuentra en condiciones de temperaturas intermedias (6–10 °C) y pH moderadamente ácido (4.0–5.2).

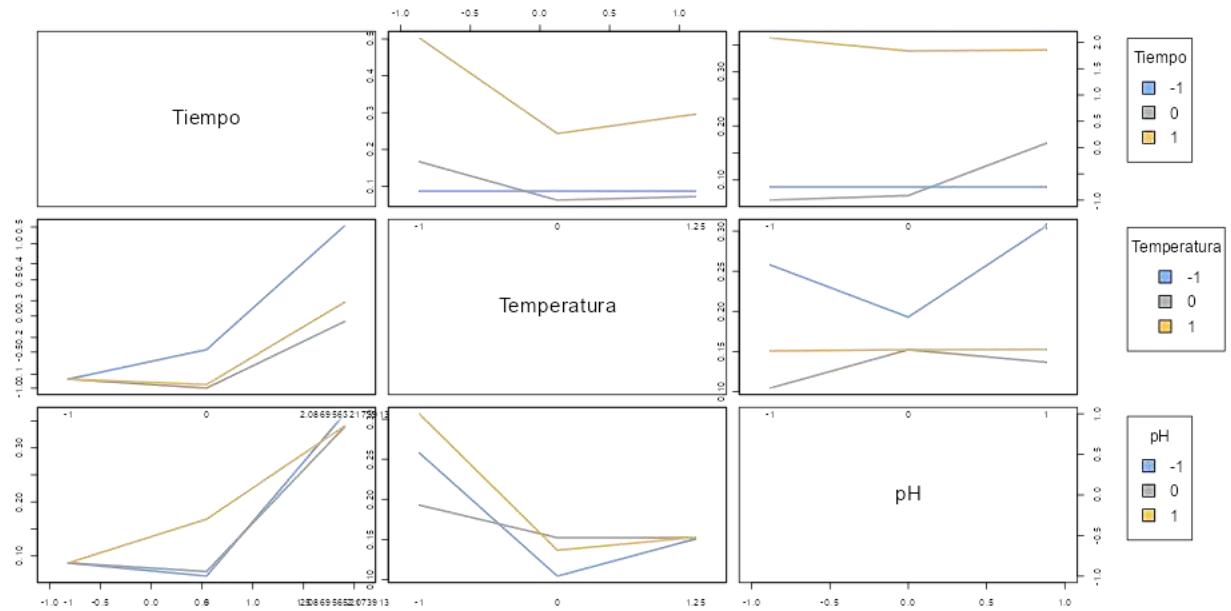


Figura 4. Tendencias de las respuestas experimentales según los niveles de pH, temperatura y tiempo.

En la figura 4 se presenta la variación temporal de la concentración de betalaínas bajo diferentes combinaciones de pH (4, 5 y 6) y temperatura (1, 5 y 10 °C) revela patrones consistentes con el comportamiento característico de las betalaínas frente a las condiciones de almacenamiento. En términos generales, los resultados confirmaron que el tiempo de almacenamiento constituye el factor de mayor impacto, dado que en la mayoría de las curvas se observan cambios notorios entre las 0 y 72 horas, independientemente del pH y la temperatura. Este comportamiento refleja la naturaleza progresiva de la degradación o transformación de las betalaínas a lo largo del tiempo.

En cuanto al efecto del pH, los resultados muestran una mayor estabilidad en condiciones ácidas (pH 4). En este nivel, las curvas exhiben variaciones moderadas y ausencia de descensos abruptos, especialmente a temperaturas de 1 y 5 °C. En contraste, al incrementar el pH hacia valores cercanos a la neutralidad (pH 6), las curvas presentan

una mayor heterogeneidad y una tendencia más pronunciada a la disminución, lo que evidencia una menor resistencia de las betalaínas en estas condiciones.

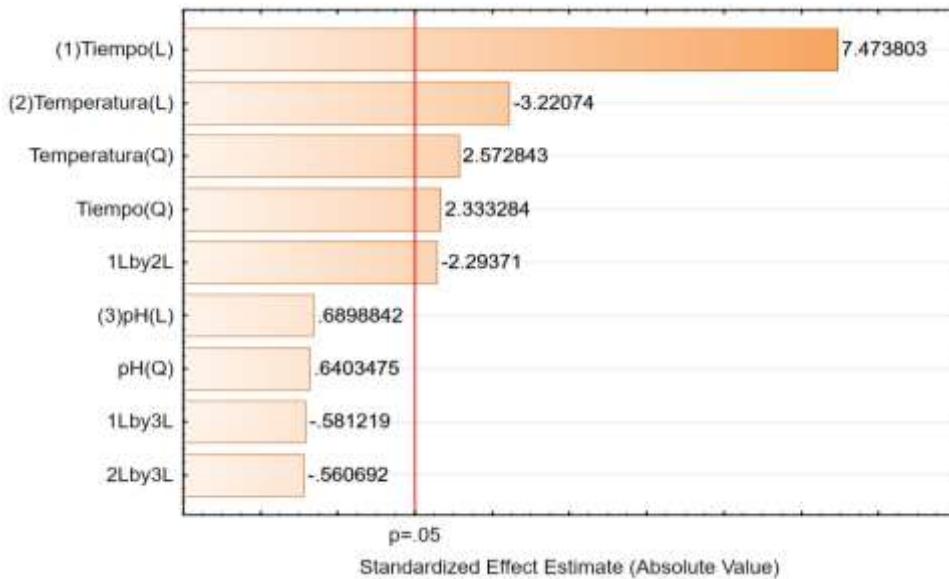
Respecto a la temperatura, se observa que su influencia es notoria, pero secundaria frente al efecto dominante del tiempo de almacenamiento. En la mayoría de los paneles, las curvas correspondientes a 10 °C tienden a presentar las mayores variaciones, ya sea en forma de incrementos o descensos pronunciados y a temperaturas más bajas, particularmente 1 °C, tienden a mantener curvas más estables, lo que sugiere un efecto protector frente a la degradación térmica.

Resulta especialmente interesante observar la interacción entre el pH y la temperatura. Por ejemplo, a pH 5, las curvas exhiben comportamientos con mayor irregularidad, lo que sugiere que este valor podría representar una zona de transición donde el pigmento es más susceptible a los cambios de temperatura. A pH 6, la degradación tiende a ser marcada en condiciones de baja temperatura, lo cual concuerda con la menor estabilidad de las betalaínas cerca de la neutralidad, incluso bajo temperaturas de refrigeración.

Los resultados reafirman los patrones identificados en las superficies de respuesta analizadas previamente. El tiempo de almacenamiento se posiciona como el factor determinante en la estabilidad del pigmento, dado que la mayoría de las tendencias de degradación observadas están directamente asociadas a su progresión. Por otro lado, la temperatura ejerce un efecto modulador sobre estos cambios; las temperaturas más elevadas aceleran la degradación, mientras que mantener el entorno cercano a 1 °C reduce significativamente la variabilidad y preserva mejor el compuesto. Por último, el pH

influye de manera moderada en la resistencia del pigmento: el rango ácido (específicamente pH 4) es el más favorable para preservar la estabilidad de las betalaínas, mientras que los valores cercanos a la neutralidad comprometen su integridad y resistencia.

Estos hallazgos coinciden con reportes previos (Lazcano et al., 2023) sobre el comportamiento térmico y químico de las betalaínas, y aportan evidencia adicional sobre las condiciones óptimas para su conservación. En particular, sugieren que el almacenamiento del extracto de *Opuntia ficus-indica* debe realizarse preferentemente en condiciones de baja temperatura y pH ácido, especialmente cuando se requiere mantener la estabilidad del pigmento durante períodos prolongados.



1 bloque; 81 corridas; MS residual =0,0159244;

Figura 5: Diagrama de Pareto de los efectos de 3 factores (temperatura, tiempo y pH) en la concentración de betalaínas (mg/g) extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna).

Al realizar la evaluación de los tres factores (temperatura, tiempo y pH) con el diagrama de Pareto en la Figura 5 se visualiza que el efecto lineal del tiempo (7.47) y el efecto lineal de la temperatura (3.22) poseen la mayor magnitud estandarizada, lo que los convierte en los principales impulsores de la variabilidad de la estabilidad de las betalaínas, por otro lado los efectos cuadráticos de la temperatura (2.57) y el tiempo (2.33), así como la interacción lineal tiempo por temperatura (1L by 2L, 2.29), también cruzan la línea de referencia, indicando una contribución real aunque menor que los efectos lineales principales. Es por ello que seis de los nueve términos del modelo mostrados son estadísticamente significativos a un nivel ($\alpha=0.05$). Los términos relacionados con el pH (lineal y cuadrático) y sus interacciones con los otros factores (1L by 3L y 2L by 3L) tienen efectos estandarizados muy bajos y no superan el umbral de significancia, por lo que se consideran triviales en este análisis.

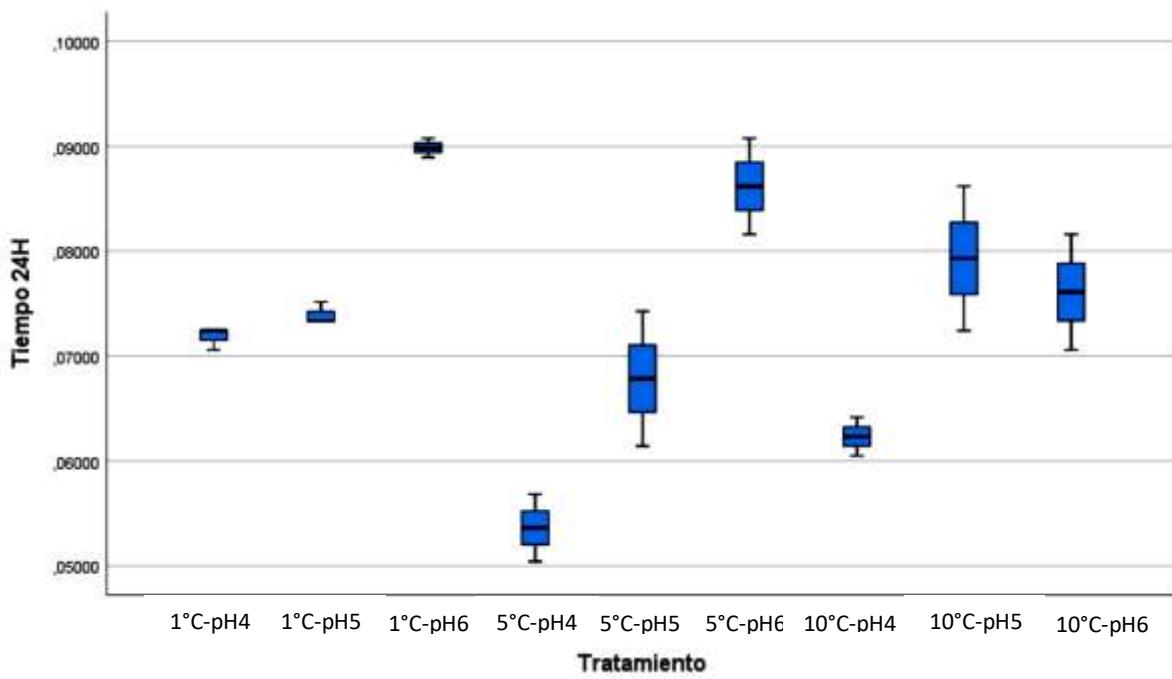


Figura 2: Diagrama de Boxplot efecto de la temperatura y pH sobre la concentración de Betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna), según el tiempo de observación de 24 horas

El diagrama de Boxplot, para la variable concentración de betalaínas, mostrado en la figura 2, indica que existe diferencia significativa ($p=0.000<0.05$) entre los tratamientos (Tabla 4), siendo, los tratamientos $1^{\circ}\text{C}\text{-pH}6$ y $5^{\circ}\text{C}\text{-pH}6$, los que presentaron los mayores promedios de concentración de betalaínas, mientras que el tratamiento $5^{\circ}\text{C}\text{-pH}4$, fue el que presentó el menor promedio de estabilidad de betalaínas.

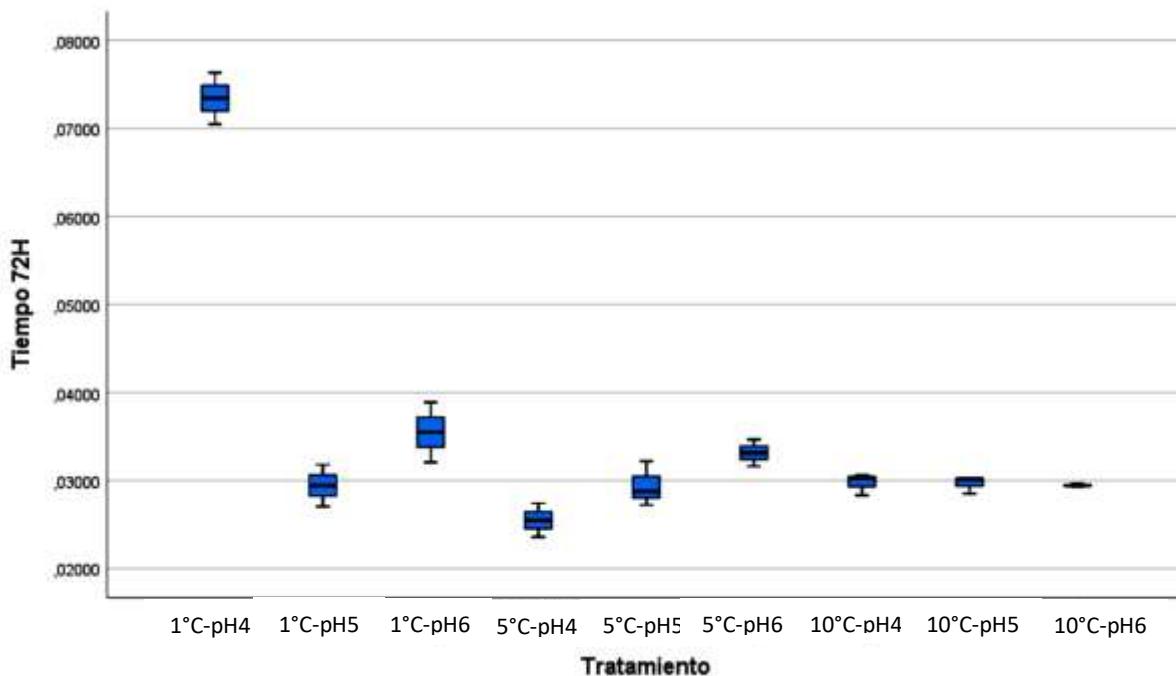


Figura 3: Diagrama de Boxplot efecto de la temperatura y pH sobre la concentración de betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna), según el tiempo de observación de 72 horas

El diagrama de Boxplot, para la variable concentración de betalaínas, mostrado en la figura 3, indica que existe diferencia significativa ($p<0.05$) entre los tratamientos (Tabla 3). Los tratamientos $5^{\circ}\text{C}\text{-pH}4$ y el tratamiento $1^{\circ}\text{C}\text{-pH}4$, mostraron diferencia significativa con respecto a los demás tratamientos, siendo el tratamiento $1^{\circ}\text{C}\text{-pH}4$, quien presentó el mayor promedio en la variable concentración de betalainas.

4.2. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos a partir de las superficies de respuesta y los gráficos de evolución temporal permiten comprender de manera integral el comportamiento de las betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna) frente a los factores tiempo, temperatura y pH. En conjunto, los hallazgos evidencian que la estabilidad de las betalaínas responde a un modelo multivariable donde el tiempo constituye el principal determinante, seguido de la temperatura y, en menor medida, del pH. Esta jerarquía de factores concuerda ampliamente con los principios de degradación cinética de las betalaínas reportados en la literatura científica (Sangoquisa, 2023). La predominancia del factor tiempo, observada en nuestros datos, es un fenómeno común en la degradación de compuestos naturales y subraya que las reacciones de oxidación y degradación térmica son procesos progresivos e inevitables que ocurren a lo largo del almacenamiento. Aunque la temperatura es un factor conocido por acelerar estas reacciones, la cinética de primer orden que siguen las betalaínas (Flores, 2019) hace que la duración de la exposición sea el factor más crítico en el rango estudiado

Las superficies de respuesta y los gráficos de evolución temporal muestran que la mayor estabilidad de las betalaínas se concentra en regiones caracterizadas por tiempos cortos (0–24 h) y temperaturas intermedias a bajas (1–6 °C), particularmente en condiciones de pH ácido (4–5). Estas zonas, representadas mayormente en tonos verde oscuro, indican concentraciones homogéneas y escasa variabilidad del pigmento, lo que revela una menor susceptibilidad a la degradación en estas condiciones. Esta tendencia coincide con lo observado en estudios previos por Lukitasari et al. (2024) y refuerza la comprensión del comportamiento térmico y químico de las betalaínas. La literatura científica indica consistentemente que el rango de pH 4 a 5 es el óptimo para la estabilidad

de las betalaínas de *Opuntia ficus-indica* (Acevedo, 2024)), y que las bajas temperaturas son cruciales para ralentizar su degradación. La menor susceptibilidad a la degradación observada en estas condiciones confirma que la combinación de un ambiente ácido y baja energía térmica es eficaz para inhibir parcialmente los mecanismos de degradación oxidativa y enzimática. Este hallazgo es fundamental para la optimización de los procesos de almacenamiento y sugiere que el mantenimiento de estas condiciones es vital para preservar las propiedades funcionales y cromáticas del extracto.

Las regiones correspondientes a tiempos prolongados (72 h) y temperaturas elevadas dentro del rango evaluado (10 °C) muestran una mayor variabilidad en la concentración de betalaínas, reflejada en zonas amarillas, naranjas y rojas en los mapas de superficie. Este patrón indica que el pigmento experimenta transformaciones más significativas con el transcurso del tiempo. Este comportamiento coincide con el comportamiento esperado de compuestos foto y termo sensibles como las betalaínas. La literatura científica ha establecido firmemente que la temperatura es un factor crítico en la estabilidad de estos pigmentos (Huamán, 2023). Las curvas de los gráficos de líneas bajo estas condiciones confirman esta tendencia, exhibiendo incrementos o descensos marcados según la combinación de pH y temperatura. Dicha variabilidad sugiere la ocurrencia de reacciones simultáneas de degradación, reordenamiento estructural o concentración por pérdida de agua. La cinética de degradación de primer orden de las betalaínas se acelera notablemente a temperaturas más altas, lo que explica la rápida pérdida de color y la heterogeneidad de los resultados en estas condiciones (Sánchez et al., 2013). La interacción compleja de estos factores subraya la importancia de controlar tanto el tiempo como la temperatura para la preservación de la integridad del pigmento.

El análisis de la interacción entre el pH y la temperatura muestra que, si bien el pH ejerce un efecto menos determinante que el tiempo y la temperatura, sí modula la estabilidad del pigmento en regiones específicas. Los valores de pH 6, cercanos a la neutralidad, presentan mayor heterogeneidad en las superficies de respuesta, así como curvas más fluctuantes en los gráficos de líneas. Esto refuerza la teoría ampliamente respaldada de que las betalaínas son más estables en medios ácidos y que su estructura se ve comprometida en ambientes menos ácidos debido a cambios conformacionales y reacciones de oxidación (Castillo, 2013 y Acevedo, 2024). La mayor degradación y variabilidad observada a pH 6 confirma la importancia de mantener un entorno ácido para la conservación de la integridad estructural del cromóforo. Esta susceptibilidad se debe a que, a valores de pH cercanos a la neutralidad, la hidrólisis del enlace glucosídico se acelera, resultando en la pérdida de la actividad biológica y la intensidad del color (Moya, 2024). Por lo tanto, nuestros hallazgos subrayan que, aunque la temperatura y el tiempo son dominantes, el control del pH es un factor crítico para optimizar la estabilidad en aplicaciones industriales.

Por otro lado, la figura que evalúa únicamente la interacción entre temperatura y pH demuestra que, aun en ausencia temporal (condiciones iniciales), la mayor estabilidad se conserva en temperaturas intermedias (6–10 °C) y pH entre 4 y 5. Por el contrario, las condiciones extremas (pH 6 a 1 °C) generan una variabilidad notable e incluso valores elevados interpretados como posibles indicadores de degradación acelerada o inestabilidad química. Esto respalda la importancia de considerar la interacción sinérgica entre factores y no únicamente sus efectos individuales (Carmona et al., 2021). Los resultados obtenidos a partir de las superficies de respuesta y los gráficos de evolución temporal permiten establecer una clara jerarquía en la estabilidad de las betalaínas de *Opuntia ficus-indica* (tuna). El tiempo es el factor más influyente, responsable de la

mayor parte de la variabilidad observada en la concentración del pigmento. Este hallazgo es coherente con la cinética de degradación de primer orden que presentan las betalaínas, un comportamiento ampliamente documentado en la literatura científica (Acevedo, 2024). La temperatura, por su parte, modula la velocidad de degradación; a medida que aumenta la temperatura, especialmente por encima de los 10°C, los cambios se aceleran, confirmando la naturaleza termolábil del compuesto. Finalmente, el pH afecta la estabilidad estructural del pigmento. Los valores ácidos (específicamente alrededor de pH 4) resultan ser los más favorables para prevenir la degradación. Esto concuerda con lo reportado por Lukitasari et al. (2024) que sitúan el rango de pH óptimo para la estabilidad de las betalaínas entre 3 y 7.

Las condiciones óptimas de estabilidad identificadas se ubican en pH 4–5 y temperaturas entre 1–6 °C, particularmente durante las primeras 24 horas de almacenamiento. Estos hallazgos son consistentes con la literatura sobre la estabilidad de betalaínas, la cual indica que estos pigmentos son sensibles al calor, al oxígeno, a la luz y a los cambios de pH (Lazcano et al., 2023). La coherencia entre las superficies de respuesta y los gráficos de líneas aporta robustez a los resultados y permite concluir que la manipulación cuidadosa del pH y la temperatura es fundamental para preservar la estabilidad del pigmento durante su almacenamiento, procesamiento o aplicación en alimentos y productos biotecnológicos.

Durante las primeras 24 horas, los tratamientos 1°C-pH6 y 5°C-pH6 evidenciaron una mayor estabilidad promedio del pigmento, siendo especialmente destacable el tratamiento 5°C-pH6, el cual coincide con los parámetros encontrados en las bases teóricas. No obstante, al evaluar la estabilidad a las 72 horas, el tratamiento 1°C-pH4

mostró el valor más alto y constante, lo que refuerza la conclusión de que la refrigeración y menores valores de pH garantizan la conservación del pigmento en el tiempo.

Se corrobora que tanto la temperatura como el pH influyen significativamente en la estabilidad de las betalaínas, resultado que se alinea con el estudio de Huamán (2023), quien evidenció que a 4°C se mantiene mayor concentración de betalaínas frente a temperaturas bajas. Asimismo, los valores más bajos de estabilidad registrados a 10°C refuerzan la sensibilidad térmica del pigmento, ya reportada por Acevedo (2024) y Flores et al. (2019), quienes destacan que las betalaínas son susceptibles a la degradación por calor y requieren condiciones controladas para su uso industrial.

En cuanto al pH, la estabilidad observada a valores de pH 5 y 6 en las primeras 24 horas coincide con lo señalado por Lukitasari et al. (2024) quienes evaluaron una amplia gama de pH (2–7) durante almacenamiento y observaron que la estabilidad del pigmento de *Beta vulgaris* L. fue significativamente mejor en el rango ácido-moderado, mientras que a pH elevados se produjeron cambios espectrales y degradación notable; como también lo reporta Acevedo (2024) en tunas moradas con mejor respuesta a pH bajos. Estos hallazgos evidencian que la interacción entre temperatura y pH condiciona la estabilidad del pigmento, cumpliéndose el segundo objetivo específico de determinar la mejor combinación para garantizar la conservación del extracto.

Finalmente, se debe destacar que el diseño experimental permitió observar el comportamiento del pigmento a lo largo del tiempo, hallándose que la estabilidad disminuye con las horas de almacenamiento cuando se encuentra en parámetros que no son adecuados para la estabilidad.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- La estabilidad de las betalaínas responde a un modelo multivariable donde el tiempo de almacenamiento es el principal determinante de la degradación, superando la influencia de la temperatura y el pH dentro de los rangos evaluados. La temperatura modula la velocidad de degradación y el pH influye en la estabilidad estructural de las betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna).
- El tiempo de almacenamiento es el factor con mayor impacto en la estabilidad de las betalaínas. Se observó una disminución progresiva de la concentración de betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna) a lo largo de 72 horas.
- Las temperaturas (1–6 °C) ejercen un efecto protector y mantienen una mayor estabilidad de las betalaínas, mientras que la temperatura de 10 °C acelera notablemente las reacciones de degradación y las transformaciones químicas de las betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna).
- El pH modula la estabilidad de las betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna), siendo los valores ácidos (pH 4–5) los más favorables para la conservación de la estructura del cromóforo. Los valores cercanos a la neutralidad (pH 6) generan mayor inestabilidad y variabilidad en la concentración, incluso bajo refrigeración.
- Las condiciones óptimas para preservar la mayor concentración de betalaínas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna) se ubican en un rango de pH 4–5 y temperaturas entre 1–6 °C, limitando el tiempo de almacenamiento a las primeras 24 horas pos-extracción.

- Los tratamientos 1°C-pH6 y 5°C-pH6 presentaron mayor promedio de estabilidad de betalaínas extraída *Opuntia ficus-indica (tuna)* durante el tiempo de observación de 24 horas.
- El tratamiento 1°C-pH4 presentó la mayor estabilidad a 72 horas, indicando que temperaturas bajas combinadas con medios ácidos conservan el pigmento durante más tiempo, lo cual también valida parcialmente las condiciones óptimas propuestas.

Recomendaciones

- Es conveniente evaluar técnicas complementarias de conservación, como la microencapsulación con maltodextrina, goma arábiga u otro producto natural, para mejorar la estabilidad de los pigmentos naturales frente a condiciones ambientales adversas.
- Para aplicaciones industriales, se sugiere utilizar extractos en condiciones de 1°C-pH4 cuando se requiera almacenamiento prolongado, y condiciones de 5°C-pH5 o pH6 para aplicaciones de corto plazo, como en helados artesanales de consumo inmediato.
- Se recomienda explorar otras variedades de tuna, como la roja o morada, tal como propone Acevedo (2024), para identificar si las variaciones en la concentración de betalaínas alteran el patrón de estabilidad observado.

LISTA DE REFERENCIAS

- Acevedo, K. (2024). Extracción asistida por ultrasonido de betalaínas en la cáscara morada y amarilla de la *Opuntia ficus-indica* “tuna”. Huacho: Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión.
- Alarcón, G. (2020). Extracción de colorantes naturales a partir de plantas endémicas del Perú y su aprovechamiento en la industria textil, revisión bibliográfica. Lima: Universidad Cesar Vallejo.
- Andreu-Coll, L., Cano-Lamadrid, M., Sendra, E., Carbonell-Barrachina, Á., Legua, P., & Hernández, F. (2019). Fatty acid profile of fruits (pulp and peel) and cladodes (young and old) of prickly pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.] from six Spanish cultivars. *Journal of Food Composition and Analysis*, 84, 103294. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103294>
- Betancourt, O. (2015). Aislamiento, caracterización, estabilidad del color y capacidad antioxidante in vitro de los pigmentos tipo betalaínas del fruto de *Opuntia dillenii* [Tesis de pregrado, Universidad de Nariño]. Repositorio institucional.
- Benites Quilca, E. S. (2019). Comparación de los solventes agua y etanol en la extracción de betalainas a partir de las brácteas de buganvilla (*Bougainvillea Glabra Ch.*) [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UNCP.
- Calva, A. (2021). Estabilidad de betalaínas (betacianinas y betaxantinas) encapsuladas en emulsiones obtenidas con surfactantes naturales y métodos de alta energía. Chihuahua: Universidad Autónoma de Chihuahua.

Castellanos-Santiago, E., & Yahia, E. M. (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

Castillo, J. I., Arcos, P. A., & Rodríguez, M. V. (2013). Estudio de la estabilidad del colorante natural betalaína proveniente de *Opuntia ficus-indica* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional de la Universidad de Chile.

Carmona, J. C., Robert, P., Vergara, C., & Sáenz, C. (2021). Microparticles of yellow-orange cactus pear pulp (*Opuntia ficus-indica*) with cladode mucilage and maltodextrin as a food coloring in yogurt. *LWT*, 138, 110672.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110672>

Cervantes, E. (2023). Optimización del ciclo, amplitud y tiempo en la extracción de betalaínas a partir de la cáscara de pitahaya roja, asistida por ultrasonido. Huacayo: Universidad Nacional del Centro (UNCP).

Corrêa, R. C. G., Garcia, J. A. A., Correa, V. G., Vieira, T. F., Bracht, A., & Peralta, R. M. (2019). Pigments and vitamins from plants as functional ingredients: Current trends and perspectives. En I. C. F. R. Ferreira & L. Barros (Eds.), *Advances in food and nutrition research* (Vol. 90, pp. 259-303). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2019.02.003>

Coyla, B., Peña, J. (2021). Influencia de la penca de tuna en la calidad del agua cruda de la PTAP Chen Chen – Moquegua. Huacayo: Universidad Continental.

Cotte Urrutia, A. M., Capador, F., & Andrea, N. (2020). Estudio comparativo de colorantes naturales y sintéticos de sustratos tipo clorofila utilizados en la sensibilización del TiO₂ para procesos fotocatalíticos [Proyecto de grado, Universidad de América]. Repositorio Institucional Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8111/1/6151499-2020-IIIQ.pdf>

De Jesús, L. (2021). Uso potencial de las glóquidas de tuna como sustrato para la producción de *Pleurotus sp.* México: Universidad Autónoma Chapingo.

Edvan, R. L., Mota, R. R. M., Dias-Silva, T. P., do Nascimento, R. R., de Sousa, S. V., da Silva, A. L., Araújo, M. J., & Araújo, J. S. (2020). Resilience of cactus pear genotypes in a tropical semi-arid region subject to climatic cultivation restriction. *Scientific reports*, 10(1), 10040. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66972-0>

Ferreira, R. M., Amaral, R. A., Silva, A. M., Cardoso, S. M., & Saraiva, J. A. (2022). Effect of high-pressure and thermal pasteurization on microbial and physico-chemical properties of *Opuntia ficus-indica* juices. *Beverages*, 8(4), 84.

Flores, M; Sánchez M.; Chávez, A. (2019) estructura y estabilidad de las betalaínas. Interciencia Vol 44 N°6. Disponible en https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2019/07/318_6534_A_Chavez_v44n6.pdf

García, V. P. V., Lucero, M. L. B., Mestanza, J. H. S., Carrera, R. L. C., & Moina, H. L. B. (2019). Colorantes naturales para uso alimenticio. *Ciencia Digital*, 3(2.4). <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i2.4.510>

Gavilan, S.; (2021). Optimización de parámetros en la extracción de sólidos de *Opuntia ficus-indica* para su aplicación en alimentos y bebidas. Ayacucho: Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

GLOBAL BIODIVERSITY INFORMATION FACILITY (2019). *Opuntia ficus-indica*

(L.) Mill. Global Biodiversity Information Facility.

<https://www.gbif.org/es/species/101339208>

Hernández-Aguirre, O. A., Muro, C., Hernández-Acosta, E., Alvarado, Y., & Díaz-Nava,

M. d. C. (2021). Extraction and Stabilization of Betalains from Beetroot (*Beta vulgaris*) Wastes Using Deep Eutectic Solvents. *Molecules*, 26(21), 6342.

<https://doi.org/10.3390/molecules26216342>

Hidalgo Olmedo, B. G. (2022). Uso de colorantes alimentarios (artificiales y naturales) y

su impacto en la salud: revisión de la literatura [Tesis de licenciatura, Universidad

Nacional de Chimborazo]. Repositorio Institucional UNACH.

<http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/9714>

Huamán, L. (2023). Determinación del efecto de la temperatura en las betalaínas o

betaxantinas en un extracto de betarraga (*Beta vulgaris*) y almacenado a tres temperaturas por siete días. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca

(UNC).

Huamani, F. (2023) Estudio sobre compuestos fenólicos, capacidad antioxidante y ácidos

orgánicos en tres variedades de tuna de la Comunidad Mutca - Aymaraes.

Apurímac: Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac (UNAMBA).

Inglese, P., Jacobo, C., Nefzaoui, A., & Sáenz, C. (Eds.). (2018). Ecología del cultivo,

manejo y usos del nopal (Vol. 1). Organización de las Naciones Unidas para la

Alimentación y la Agricultura; Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas

en Zonas Áridas. www.fao.org

Jaramillo Viracucha, N. S. (2023). Extracción de betalainas a partir de las hojas de remolacha Beta Vulgaris por Lixiviación [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Recuperado de <http://repositorio.utn.educ.ec/handle/123456789/1363>

Jácome Pilco, C. R., Aucatoma Chico, K. B., Agualongo Sinchipa, S. A., Callan Chela, C. R., & Montero Silva, V. D. (2023). Biotecnología para la extracción de pigmentos vegetales, para uso industrial. LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades.

Jerz, G. (2021). National Library of Medicine. Biological Properties and Applications of betalains. Disponible en <https://PMC8123435/>

Jojoa Chamorro, L. M. (2022). Estabilidad del color y actividad antioxidante de las betalaínas de los frutos de *Opuntia ficus indica* (L) Mill., una cactácea silvestre del departamento de Nariño (Tesis de pregrado). Universidad de Nariño.

Lazcano-Hernández, C., Hernández-Hernández, A., García-Curiel, L., Pérez-Escalante, E., Contreras-López, E., & Pérez-Flores, JG (2023). Extracción de compuestos bioactivos a partir de los subproductos de la tuna (*Opuntia ficus-indica* spp.): Tendencias y aplicaciones recientes en alimentos. Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Lukitasari, D. M., Indrawati, R., Chandra, R. D., Heriyanto, Shioi, Y., & Botosudarmo, T. H. P. (2024). pH-dependent stability of major betalains in the encapsulated beetroot extracts (*Beta vulgaris* L.). *Journal of food science*, 89(5), 2761–2773. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17046>

Martínez. Rodríguez, P., Guerrero-Rubio, M. A., Henarejos-Escudero, P., García-Carmona, F., & Gandía-Herrero, F. (2022). Health-promoting potential of

betalains in vivo and their relevance as functional ingredients: A review. Trends in Food Science & Technology, 122, 66-82.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.020>

Mejía, L. (2023). Determinación de la concentración de betalaínas y betaxantinas en tunas (*opuntia ficus-indica*) de diferentes coloraciones evaluados a dos temperaturas. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca (UNC).

Melgar, B., Dias, M. I., Barros, L., Ferreira, I. C. F. R., Rodriguez-Lopez, A. D., & Garcia-Castello, E. M. (2019). Ultrasound and Microwave Assisted Extraction of *Opuntia Fruit Peels* Biocompounds: Optimization and Comparison Using RSM-CCD. Molecules (Basel, Switzerland), 24(19), 3618.
<https://doi.org/10.3390/molecules24193618>

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (2021). Análisis de Mercado Tuna 2015-2021. Unidad de Inteligencia Comercial. Disponible en:
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2848443/An%C3%A1lisis%20de%20Mercado%20Tuna%202015%20-%202021.pdf.pdf>

Moya Vanegas, J. C. (2024). Colorantes naturales y sintéticos en la industria de alimentos (Trabajo de grado/informe de proyecto). Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.

Nayhua, C (2017); Obtención de colorante natural a partir de la cáscara de tuna púrpura (*Opuntia ficus-indica*) por el método de extracción sólido-líquido para su aplicación en la industria de alimentos, fruto proveniente del distrito de San Cristóbal-Moquegua. Moquegua: UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

Ortiz Melo, G. (2021). Consumo de alimentos con rojo 40 como estilo de vida y sus implicaciones en la salud. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
<https://hdl.handle.net/20.500.12371/16024>

Paucara, C. (2021); Caracterización física y química de la tuna (*Opuntia ficus indica*) en el municipio de Luribay, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés. (UMSA).

Pino Q., M. T., & Vergara H., C. (Eds.). (2022). Colorantes y antioxidantes naturales en la industria de alimentos: tecnologías de extracción y materias primas dedicadas (Boletín INIA N° 455). Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
<https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/147806>

Sánchez, J. G., Bernabé, N. S., & Bernabé, P. S. (2013). Efecto de la temperatura y luminosidad sobre la estabilidad de las betalaínas obtenidas de "betarraga". SCIÉNDO, 13(1-2). Recuperado a partir de <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/SCIENDO/article/view/248>

Sarango, Y., Chenche, O. y López, O. M, (2024) Propiedades físicas, químicas y biológicas del pigmento natural Beta vulgaris: revisión y propuesta de un protocolo experimental. Reincisol, 3(6), pp. 3146-3165.
[https://doi.org/10.59282/reincisol.V3\(6\)3146-3165](https://doi.org/10.59282/reincisol.V3(6)3146-3165)

Sangoquisa, D. (2023). Obtención de colorante natural a partir de lacáscara de pitahaya roja aplicado en un yogur. Riobamba. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Universidad Nacional Autónoma de México; (2025) OPUNTIA FICUS-INDICA. Laboratorio de plantas vasculares. Facultad de Ciencias. Disponible en:

http://biologia.fciencias.unam.mx/plantasvasculares/ArbolesArbustosFCiencias/Angiospermas/opuntia_ficus_indica.html

ANEXOS

Tabla 1. Análisis estadístico descriptivo del efecto de la temperatura y pH sobre la estabilidad de betalainas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna)

| Tiempo | Tratamiento | Repetición | Estimación de la media* | Desv. Estándar | CV(%) |
|-----------------|-------------|------------|-------------------------|----------------|-------|
| 0 Horas | 1°C-pH4 | 3 | 0.08708 | 0.00243 | 2.789 |
| | 1°C-pH5 | 3 | 0.08708 | 0.00243 | 2.789 |
| | 1°C-pH6 | 3 | 0.08708 | 0.00243 | 2.789 |
| | 5°C-pH4 | 3 | 0.08708 | 0.00243 | 2.789 |
| | 5°C-pH5 | 3 | 0.08708 | 0.00243 | 2.789 |
| | 5°C-pH6 | 3 | 0.08708 | 0.00243 | 2.789 |
| | 10°C-pH4 | 3 | 0.08708 | 0.00243 | 2.789 |
| | 10°C-pH5 | 3 | 0.08708 | 0.00243 | 2.789 |
| | 10°C-pH6 | 3 | 0.08708 | 0.00243 | 2.789 |
| | | | | | |
| 24 Horas | 1°C-pH4 | 3 | 0.07181 | 0.00106 | 1.479 |
| | 1°C-pH5 | 3 | 0.07394 | 0.00106 | 1.437 |
| | 1°C-pH6 | 3 | 0.08983 | 0.00092 | 1.019 |
| | 5°C-pH4 | 3 | 0.05363 | 0.00321 | 5.977 |
| | 5°C-pH5 | 3 | 0.06784 | 0.00642 | 9.457 |
| | 5°C-pH6 | 3 | 0.08617 | 0.00459 | 5.321 |
| | 10°C-pH4 | 3 | 0.06234 | 0.00184 | 2.944 |
| | 10°C-pH5 | 3 | 0.07930 | 0.00688 | 8.670 |
| | 10°C-pH6 | 3 | 0.07608 | 0.00550 | 7.229 |
| | | | | | |
| 72 Horas | 1°C-pH4 | 3 | 0.07343 | 0.00294 | 3.997 |
| | 1°C-pH5 | 3 | 0.02943 | 0.00239 | 8.105 |
| | 1°C-pH6 | 3 | 0.03548 | 0.00340 | 9.570 |
| | 5°C-pH4 | 3 | 0.02549 | 0.00193 | 7.553 |
| | 5°C-pH5 | 3 | 0.02940 | 0.00253 | 8.613 |
| | 5°C-pH6 | 3 | 0.03314 | 0.00151 | 4.556 |
| | 10°C-pH4 | 3 | 0.02973 | 0.00123 | 4.134 |
| | 10°C-pH5 | 3 | 0.02961 | 0.00095 | 3.217 |
| | 10°C-pH6 | 3 | 0.02946 | 0.00014 | 0.482 |
| | | | | | |

Nota: Des. Est. (Desviación estándar); CV (Coeficiente de variación).

*Estimación t student, al 95.0% de confianza con $\text{Media} \pm 3,182 \times \text{Error estándar de la media}$.

Fuente: Elaboración propia con los resultados del software RStudio

Tabla 2. Prueba de esfericidad de Mauchlya del efecto de la temperatura y pH sobre la estabilidad de betalainas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna)

| Prueba de esfericidad de Mauchly ^a | | | | | | |
|---|-----------|---------------------|----|-------|----------------------|-------|
| Medida: | | | | | | |
| Efecto intra- sujetos | W Mauchly | Aprox. Chi-cuadrado | gl | Sig. | Épsilon ^b | |
| Estabilidad | 0.683 | 6.486 | 2 | 0.039 | 0.759 | 1.000 |

Prueba la hipótesis nula de que la matriz de covarianzas de error de las variables dependientes con transformación ortonormalizada es proporcional a una matriz de identidad.

a. Diseño: Intersección + Tratamiento

Diseño intra-sujetos: Tiempo

b. Se puede utilizar para ajustar los grados de libertad para las pruebas promedio de significación. Las pruebas corregidas se visualizan en la tabla de pruebas de efectos intra-sujetos.

Tabla 3. Prueba de esfericidad de Mauchlya del efecto de la temperatura y pH sobre la estabilidad de betalainas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna)

| Pruebas de efectos intra-sujetos | | | | | | |
|----------------------------------|------------------------|--|--------|---------------------|----------|-------|
| Medida: | | | | | | |
| Origen | | Tipo III de suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
| Tiempo | Greenhouse- Geisser | 0.039 | 1.518 | 0.026 | 1843.610 | 0.000 |
| Tiempo*Tratamiento | Greenhouse- Geisser | 0.005 | 12.147 | 0.000 | 30.355 | 0.000 |
| Error (Tiempo) | Greenhouse- Geisser | 0.000 | 27.331 | 1.406E-05 | | |

a. Se ha calculado utilizando alpha = .05

Tabla 4. Prueba de Análisis de varianza del efecto de la temperatura, pH y tiempo sobre la estabilidad de betalainas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna)

| Factor | SS | df | MS | F | p |
|----------------------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| (1)Tiempo (L) | 0.889499 | 1 | 0.889499 | 55.85773 | 0.000000 |
| Tiempo (Q) | 0.086696 | 1 | 0.086696 | 5.44421 | 0.022470 |
| (2) Temperatura (L) | 0.165186 | 1 | 0.165186 | 10.37316 | 0.001930 |
| Temperatura (Q) | 0.105412 | 1 | 0.105412 | 6.61952 | 0.012178 |
| (3)pH (L) | 0.007579 | 1 | 0.007579 | 0.47594 | 0.492516 |
| pH (Q) | 0.006530 | 1 | 0.006530 | 0.41004 | 0.524008 |
| 1L by 2L | 0.083780 | 1 | 0.083780 | 5.26112 | 0.024770 |
| 1L by 3L | 0.005380 | 1 | 0.005380 | 0.33782 | 0.562933 |
| 2L by 3L | 0.005006 | 1 | 0.005006 | 0.31438 | 0.576772 |
| Error | 1.130630 | 71 | 0.015924 | | |
| Total SS | 2.629993 | 80 | | | |

Tabla 5: Prueba de Análisis de varianza del efecto de la temperatura y pH sobre la estabilidad de Betalainas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna), según tiempo de 24 horas

| ANOVA | | | | | |
|---------------------|-------------------|-----------|------------------|--------|-------|
| Tiempo 24 Horas | | | | | |
| Fuente de Variación | Suma de cuadrados | Gl | Media cuadrática | F | Sig. |
| Entre grupos | 0.003 | 8 | 0.000 | 22.054 | 0.000 |
| Dentro de grupos | 0.000 | 18 | 0.000 | | |
| Total | 0.003 | 26 | | | |

Tabla 6. Prueba post hoc de Duncan del efecto de la temperatura y pH sobre la estabilidad de Betalainas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna), según tiempo de 24 horas

| Tiempo 24 Horas | | | | | | |
|------------------------|----------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Duncan | | | | | | |
| Tratamiento | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 5°C-pH4 | 3 | 0.0536267 | | | | |
| 10°C-pH4 | 3 | | 0.0623367 | | | |
| 5°C-pH5 | 3 | | | 0.0678367 | 0.0678367 | |
| 1°C-pH4 | 3 | | | | 0.0718067 | 0.0718067 |
| 1°C-pH5 | 3 | | | | 0.0739433 | 0.0739433 |
| 10°C-pH6 | 3 | | | | | 0.0760800 |
| 10°C-pH5 | 3 | | | | | 0.0792967 |
| 5°C-pH6 | 3 | | | | | 0.0861667 |
| 1°C-pH6 | 3 | | | | | 0.0898333 |
| Sig. | | 1.000 | 0.124 | 0.105 | 0.057 | 0.059 |
| | | | | | | 0.296 |

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

Tabla 7. Prueba de Análisis de varianza del efecto de la temperatura y pH sobre la estabilidad de betalainas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna), según tiempo de 72 horas.

| ANOVA | | | | | |
|----------------------------|--------------------------|-----------|-------------------------|----------|-------------|
| Tiempo 72 Horas | | | | | |
| Fuente de Variación | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
| Entre grupos | 0.005 | 8 | 0.001 | 142.820 | 0.000 |
| Dentro de grupos | 0.000 | 18 | 0.000 | | |
| Total | 0.005 | 26 | | | |

Tabla 8. Prueba post hot de Duncan del efecto de la temperatura y pH sobre la estabilidad de Betalainas extraídas de *Opuntia ficus-indica* (tuna), según tiempo de 72 horas

| Tiempo 72 Horas | | | | |
|------------------------|----------|-------------------------------------|--------------|--------------|
| Duncan | | | | |
| Tratamiento | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | |
| | | 1 | 2 | 3 |
| 5°C-pH4 | 3 | 0.0254867 | | |
| 5°C-pH5 | 3 | | 0.0293967 | |
| 1°C-pH5 | 3 | | | 0.0294267 |
| 10°C-pH6 | 3 | | | 0.0294567 |
| 10°C-PH5 | 3 | | | 0.0296100 |
| 10°C-pH4 | 3 | | | 0.0297333 |
| 5°C-pH6 | 3 | | 0.0331400 | 0.0331400 |
| 1°C-pH6 | 3 | | | 0.0354767 |
| 1°C-pH4 | 3 | | | 0.0734267 |
| Sig. | | 1.000 | 0.070 | 0.195 |
| | | | | 1.000 |

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

Tabla 9. Concentración de betalainas obtenidas a las 0, 24 y 72 horas en cada tratamiento usado.

| REPETICIONES | TRATAMIENTOS | 0 HORAS | 24 HORAS | 72 HORAS |
|--------------|--------------|---------|----------|----------|
| R1 | 1°C-pH4 | 0.08892 | 0.07242 | 0.07636 |
| R2 | 1°C-pH4 | 0.08800 | 0.07058 | 0.07049 |
| R3 | 1°C-pH4 | 0.08433 | 0.07242 | 0.03401 |
| R1 | 1°C-pH5 | 0.08892 | 0.07517 | 0.02704 |
| R2 | 1°C-pH5 | 0.08800 | 0.07333 | 0.06912 |
| R3 | 1°C-pH5 | 0.08433 | 0.07333 | 0.03181 |
| R1 | 1°C-pH6 | 0.08892 | 0.08892 | 0.03887 |
| R2 | 1°C-pH6 | 0.08800 | 0.06142 | 0.07306 |
| R3 | 1°C-pH6 | 0.08433 | 0.09075 | 0.03208 |
| R1 | 5°C-pH4 | 0.08892 | 0.00275 | 0.02356 |
| R2 | 5°C-pH4 | 0.08800 | 0.05042 | 0.02741 |
| R3 | 5°C-pH4 | 0.08433 | 0.05683 | 0.00578 |
| R1 | 5°C-pH5 | 0.08892 | 0.07425 | 0.02723 |
| R2 | 5°C-pH5 | 0.08800 | 0.09075 | 0.02878 |
| R3 | 5°C-pH5 | 0.08433 | 0.06142 | 0.03218 |
| R1 | 5°C-pH6 | 0.08892 | 0.08158 | 0.00788 |
| R2 | 5°C-pH6 | 0.08800 | 0.05408 | 0.03465 |
| R3 | 5°C-pH6 | 0.08433 | 0.09075 | 0.03163 |
| R1 | 10°C-pH4 | 0.08892 | 0.07792 | 0.03025 |
| R2 | 10°C-pH4 | 0.08800 | 0.06417 | 0.03062 |
| R3 | 10°C-pH4 | 0.08433 | 0.06050 | 0.02833 |
| R1 | 10°C-pH5 | 0.08892 | 0.06142 | 0.03016 |
| R2 | 10°C-pH5 | 0.08800 | 0.07242 | 0.03016 |
| R3 | 10°C-pH5 | 0.08433 | 0.08617 | 0.02851 |
| R1 | 10°C-pH6 | 0.08892 | 0.07058 | 0.02943 |
| R2 | 10°C-pH6 | 0.08800 | 0.08158 | 0.02961 |
| R3 | 10°C-pH6 | 0.08433 | 0.07608 | 0.02933 |

Concentración de betalainas (mg/g):

$$B \text{ (mg/g)} = (A * FD * PM * V) / (\epsilon * P * L)$$

Donde:

A: Absorbancia

FD: 1

PM: 550 g/mol

V: 1000 ml

ϵ : 60000

L/mol.cm

P: 1000 g

L: 1 cm