

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
ESCUELA DE POSGRADO
Programa de Doctorado en Ingeniería en Alimentos



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

**Cinética del orden de reacción y cuantificación por HPLC
de la degradación del ácido ascórbico en jugos de camu
camu (*Myrciaria dubia*) y naranjilla (*Solanum quitoense*)
bajo condiciones térmicas aceleradas**

Tesis para optar el grado de Doctor en Ingeniería de Alimentos

Autora:

M.Sc. Cabrejos Barrios, Aleida Soledad
Código ORCID: 0000-0003-4326-0817

Asesora:

Dra. León Roque, Noemí
DNI. N° 23006439
Código ORCID: 0000-0001-5001-1558

Línea de Investigación:

**Determinación de parámetros funcionales y moleculares predictivos
de la calidad y estabilidad del producto terminado**

Nuevo Chimbote - PERÚ
2026



UNS
POSGRADO

CERTIFICACIÓN DEL ASESOR

Yo, **Dra. León Roque, Noemí**, mediante la presente certifico mi asesoramiento de la tesis titulada: **Cinética del orden de reacción y cuantificación por HPLC de la degradación del ácido ascórbico en jugos de camu camu (*Myrciaria dubia*) y naranjilla (*Solanum quitoense*) bajo condiciones térmicas aceleradas**, elaborado por la **M.Sc. Cabrejos Barrios, Aleida Soledad**, para obtener el grado de Doctor en Ingeniería de Alimentos, en la Escuela de Posgrado.

Nuevo Chimbote, mayo de 2026

Dra. León Roque, Noemí

Asesora

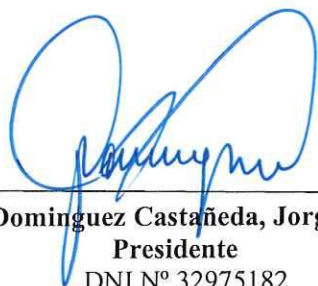
DNI N° 23006439

Código ORCID: 0000-0001-5001-1558

AVAL DE CONFORMIDAD DEL JURADO

Tesis titulada: **Cinética del orden de reacción y cuantificación por HPLC de la degradación del ácido ascórbico en jugos de camu camu (*Myrciaria dubia*) y naranjilla (*Solanum quitoense*) bajo condiciones térmicas aceleradas**, elaborado por la M.Sc. Cabrejos Barrios, Aleida Soledad,

Revisado y Aprobado por el Jurado Evaluador:



Dr. Dominguez Castañeda, Jorge Marino
Presidente
DNI N° 32975182
Código ORCID: 0000-0003-0488-5726



Dr. Sánchez Vaca, Daniel Ángel
Secretario
DNI N° 18146173
Código ORCID 0000-0003-4326-1852



Dra. León Roque, Noemí
Vocal/Asesora
DNI N° 23006439
Código ORCID: 0000-0001-5001-1558



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

A los veintidós días del mes de mayo del año 2026, siendo las 16:0 horas, en el aula P-02 de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador, designados mediante Resolución Directoral N° 209-2026-EPG-UNS de fecha 12.03.2026, conformado por las docentes: Dr. Jorge Marino Dominguez Castañeda (Presidente), Dr. Daniel Ángel Sánchez Vaca (Secretario) y Dra. Noemí León Roque (Vocal); con la finalidad de evaluar la tesis intitulada: **"CINÉTICA DEL ORDEN DE REACCIÓN Y CUANTIFICACIÓN POR HPLC DE LA DEGRADACIÓN DEL ÁCIDO ASCÓRBICO EN JUGOS DE CAMU CAMU (*Myrciaria dubia*) Y NARANJILLA (*Solanum quitoense*) BAJO CONDICIONES TÉRMICAS ACELERADAS"**; presentado por la tesista **Aleida Soledad Cabrejos Barrios**, egresada del programa de **Doctorado en Ingeniería de Alimentos**.

Sustentación autorizada mediante Resolución Directoral N° 385-2026-EPG-UNS de fecha 13 de mayo de 2026.

El presidente del jurado autorizó el inicio del acto académico; producido y concluido el acto de sustentación de tesis, los miembros del jurado procedieron a la evaluación respectiva, haciendo una serie de preguntas y recomendaciones al tesista, quien dio respuestas a las interrogantes y observaciones.

El jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, declara la sustentación como APROBADO, asignándole la calificación de 17.0 (BUENO)

Siendo las 17:30 horas del mismo día se da por finalizado el acto académico, firmando la presente acta en señal de conformidad.

Dr. Jorge Marino Dominguez Castañeda
Presidente

Dr. Daniel Ángel Sánchez Vaca
Secretario

Dra. Noemí León Roque
Vocal/Asesora



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega:	Aleida Cabrejos Barrios
Título del ejercicio:	Quick Submit
Título de la entrega:	CINÉTICA DEL ORDEN DE REACCIÓN Y CUANTIFICACIÓN POR ...
Nombre del archivo:	DE_TESIS_DOCTORADO_Final_-_Cabrejos_Barrios_Aleida_Soled...
Tamaño del archivo:	5.82M
Total páginas:	83
Total de palabras:	18,558
Total de caracteres:	103,436
Fecha de entrega:	28-may-2026 03:40p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega:	2971490354

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA ESCUELA DE POSGRADO PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA DE ALIMENTOS
 UNS UNIVERSIDAD POSGRADO
"CINÉTICA DEL ORDEN DE REACCIÓN Y CUANTIFICACIÓN POR HPLC DE LA DEGRADACIÓN DEL ÁCIDO ASCÓRBICO EN JUGOS DE CAMU CAMU (<i>Myrciaria dubia</i>) Y NARANJILLA (<i>Solanum quitoense</i>) BAJO CONDICIONES TÉRMICAS ACELERADAS"
Informe de Tesis para optar el grado académico de Doctor en Ingeniería de Alimentos
Autora: M.Sc. Aleida Soledad Cabrejos Barrios Código ORCID: 0000-0003-4326-0817
Asesora: Dra. Noemí León Roque DNI N° 23006439 Código ORCID: 0000-0001-5001-1558
Línea de Investigación Determinación de parámetros funcionales y moleculares predictivos de la calidad y estabilidad del producto terminado
NUEVO CHIMBOTE - PERÚ

CINÉTICA DEL ORDEN DE REACCIÓN Y CUANTIFICACIÓN POR HPLC DE LA DEGRADACIÓN DEL ÁCIDO ASCÓRBICO EN JUGOS DE CAMU CAMU (*Myrciaria dubia*) Y NARANJILLA (*Solanum quitoense*) BAJO CONDICIONES TÉRMICAS AC

INFORME DE ORIGINALIDAD

5%

INDICE DE SIMILITUD

%

FUENTES DE INTERNET

%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

Submitted to Universidad Nacional de Trujillo

Trabajo del estudiante

1%

2

Submitted to Universidad Nacional del Centro
del Peru

Trabajo del estudiante

1%

3

Submitted to Universidad Nacional de San
Cristóbal de Huamanga

Trabajo del estudiante

<1%

4

Submitted to uncedu

Trabajo del estudiante

<1%

5

Submitted to Universidad Nacional de
Cajamarca

Trabajo del estudiante

<1%

6

Submitted to Universidad Politécnica Estatal
de Carchi

Trabajo del estudiante

<1%

DEDICATORIA

A Dios, por sostenerme en cada paso de este camino y regalarme la fortaleza necesaria para culminar este sueño.

A mi ángel protector en el cielo, mi amado papá, José Orlando, cuya memoria ha sido mi guía constante. Aunque su presencia física ya no me acompaña, su amor, sus enseñanzas y su ejemplo viven en mí cada día.

A mi ángel en la tierra, mi mamá Esperanza, fuente inagotable de amor, sacrificio y fe. Gracias por ser mi sostén, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, y por enseñarme que la perseverancia y la humildad abren todos los caminos.

AGRADECIMIENTO

Mi profundo agradecimiento para la Dra. Noemí León Roque por su acompañamiento en el transcurso de la investigación, a la Universidad Nacional del Santa que a través de la Escuela de Posgrado propició la actitud de investigador, al Dr. Frank Fernández Rosillo por brindar sus valiosos aportes que afirmaron las bases de la presente investigación.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN DEL ASESOR.....	ii
AVAL DE JURADO EVALUADOR.....	iii
RESUMEN	viii
ABSTRACT.....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. Descripción del problema de investigación	10
1.2. Formulación del problema de investigación	14
1.3. Objetivo de investigación	14
1.4. Formulación de la hipótesis de investigación	15
1.5. Justificación e importancia de investigación	15
II. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1. Antecedentes	17
2.2. Marco conceptual	19
III. METODOLOGÍA	24
3.1. Método de investigación	24
3.2. Diseño de investigación.....	24
3.3. Población y muestra	24
3.4. Operacionalización de las variables de estudio	24
3.5. Técnicas e instrumento de recolección de datos	26
3.5.1. Elaboración de jugo tropical.....	26
a. Evaluación fisicoquímica	32
3.5.2. Contenido de vitamina C por cromatografía.....	33
a. Preparación de la muestra.....	33
b. Preparación de la curva estándar de vitamina C	34
c. Análisis cromatográfico.....	34
3.5.3. Determinación del orden de reacción	34
a. Modelo de cinética química	34
b. Modelo Weibull – log logístico	35
3.5.4. Vida útil de jugos tropical.....	35
a. Cálculo de la energía de activación (E_a) y del factor pre exponencial (b_0).....	36
b. Estimación del tiempo de vida útil de retención de vitamina C	36

3.6. Técnicas de análisis de resultados	36
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1. Resultados	38
4.1.1. Cuantificación de ácido ascórbico.....	38
4.1.2. Determinación del orden de reacción	45
4.1.3. Constantes cinéticas de degradación (k) a cada temperatura evaluada. ..	45
a. Modelamiento Weibull y log-logístico	45
4.1.4. Modelamiento tipo Arrhenius para Weibull.....	51
4.1.5. Estimación del tiempo de vida útil de retención de ácido ascórbico	52
a. Predicción del tiempo de vida útil de retención de ácido ascórbico.....	52
4.1.6. Análisis fisicoquímico.....	54
4.2. Discusión	59
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	61
5.1. Conclusiones	61
5.2. Recomendaciones.....	62
VI. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	64
VII. ANEXOS	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de las variables	25
Tabla 2 Síntesis de los métodos, técnicas e instrumentos empleados para la recolección de datos.....	26
Tabla 3 Valores de ácido ascórbico durante el almacenamiento para jugo de camu camu.	39
Tabla 4 Valores de ácido ascórbico durante el almacenamiento para el jugo tropical de naranjilla.	40
Tabla 5 Evaluación del modelo cinético (orden 0 y 1) y Weibull	45
Tabla 6 Parámetros de los modelos Weibull y log-logístico para el jugo tropical de camu camu.....	48
Tabla 7 Parámetros de los modelos Weibull y log-logístico para el jugo tropical de Naranjilla	50
Tabla 8 Parámetros del modelo de Arrhenius para Weibull.....	51
Tabla 9 Estimación de vida útil (t_{80}) para la degradación de ácido ascórbico en jugos tropicales.....	52
Tabla 10 Parámetros del ajuste tipo Arrhenius vs t_{80} estimados.....	53
Tabla 11 Predicción de vida útil (t_{80}) para la degradación de ácido ascórbico en jugos tropicales.....	54
Tabla 12 Resultados de la calibración del ácido ascórbico para el jugo tropical de Camu camu	77
Tabla 13 Resultados de la calibración del ácido ascórbico para el jugo tropical de Naranjilla	78
Tabla 14 Resultados del análisis ANOVA bidireccional para el jugo de camu camu	79
Tabla 15 Resultados del ANOVA bidireccional para el jugo de naranjilla	79
Tabla 16 Resultados del análisis ANOVA para el jugo de camu camu	80
Tabla 17 Resultados del ANOVA para el jugo de naranjilla.....	80
Tabla 18 Rendimiento y parámetros finales del jugo tropical de camu camu.....	81
Tabla 19 Rendimiento y parámetros finales del jugo tropical de naranjilla.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de flujo del proceso de elaboración de jugo de camu camu.....	27
Figura 2 Diagrama de flujo del proceso de elaboración de jugo de Naranja 30	30
Figura 3 Curva de calibración de ácido ascórbico.....	38
Figura 4 Cromatograma para el jugo tropical de Camu camu evaluado el día 0, 7, 14, 21 días de almacenamiento a temperatura controlada.	41
Figura 5 Cromatograma para el jugo tropical de Naranja evaluado el día 0, 7, 14, 21 días de almacenamiento a temperatura controlada	43
Figura 6 Modelamiento Weibull de la degradación de vitamina C del jugo tropical de camu camu. (a) 35 °C, (b) 45 °C y (c) 55 °C.....	46
Figura 7 Modelamiento log-logístico de la degradación de vitamina C del jugo tropical de camu camu.....	47
Figura 8 Modelamiento Weibull de la degradación de vitamina C del jugo tropical de Naranja. (a) 35 °C, (b) 45 °C y (c) 55 °C.	49
Figura 9 Modelamiento log-logístico de la degradación de vitamina C del jugo tropical de naranja.....	50
Figura 10 Resultados de acidez en el almacenamiento de jugos tropicales. (a) 35 °C, (b) 45 °C y (c) 55 °C.	55
Figura 11 Resultados de pH en el almacenamiento de jugos tropicales. (a) 35 °C, (b) 45 °C y (c) 55 °C.	56
Figura 12 Resultados de Brix en el almacenamiento de jugos tropicales. (a) 35 °C, (b) 45 °C y (c) 55 °C.	57
Figura 13 Resultado de la calibración del ácido ascórbico para el jugo tropical de Camu camu.....	77
Figura 14 Resultado de la calibración del ácido ascórbico para el jugo tropical de Naranja	78
Figura 15 Elaboración de jugo tropical de camu camu.....	82
Figura 16 Elaboración de jugo tropical de naranja.....	83

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Calibración de la curva de ácido ascórbico	77
Anexo 2 Análisis estadístico ANOVA y Tukey para la degradación de la vitamina C79	
Anexo 3 Resultados del ANOVA para parámetros físico químicos	80
Anexo 4 Cálculos de la elaboración de jugo tropical de camu camu y naranjilla	81
Anexo 5 Galería fotográfica de elaboración de jugo tropical de camu camu y naranjilla.....	82

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo predecir la cinética de degradación de la vitamina C en jugos de camu camu (*Myrciaria dubia*) y naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.) mediante pruebas aceleradas de almacenamiento. Los jugos fueron elaborados bajo condiciones controladas de procesamiento, incluyendo estandarización fisicoquímica, pasteurización (87 °C/10 min) y envasado en caliente en recipientes de vidrio. Posteriormente, se almacenaron a 35, 45 y 55 °C durante 21, 14 y 7 días, respectivamente. El contenido de vitamina C fue cuantificado mediante cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC), evidenciando una disminución progresiva dependiente de la temperatura. Los datos cinéticos se ajustaron a modelos de orden cero, primero y segundo, así como al modelo no lineal de Weibull, siendo este último el que presentó el mejor ajuste estadístico ($R^2 > 0.98$), describiendo adecuadamente la degradación no lineal del ácido ascórbico. La dependencia de la temperatura fue modelada mediante la ecuación de Arrhenius, permitiendo estimar la energía de activación y evidenciando una mayor sensibilidad térmica en el jugo de naranjilla. Asimismo, se determinó la vida útil (t_{80}), observándose una reducción significativa con el incremento de la temperatura. El jugo de camu camu presentó mayor estabilidad a bajas temperaturas, mientras que la naranjilla mostró una respuesta más sensible al aumento térmico. Los parámetros fisicoquímicos (pH, acidez y °Brix) evidenciaron cambios moderados, manteniendo la estabilidad del sistema durante el almacenamiento. Los resultados confirman la aplicabilidad del modelo de Weibull para describir la degradación de vitamina C en matrices complejas y destacan la importancia del control térmico en la conservación de compuestos bioactivos en jugos tropicales.

Palabras clave: Cinética de degradación; vitamina C; Weibull; Arrhenius; vida útil; camu camu; naranjilla; HPLC.

ABSTRACT

The objective of this study was to predict the degradation kinetics of vitamin C in camu camu (*Myrciaria dubia*) and naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.) juices using accelerated storage tests. The juices were produced under controlled processing conditions, including physicochemical standardization, pasteurization (87 °C/10 min), and hot filling into glass containers. They were then stored at 35, 45, and 55 °C for 21, 14, and 7 days, respectively. The vitamin C content was quantified using high-performance liquid chromatography (HPLC), showing a progressive decrease depending on temperature. The kinetic data were fitted to zero-order, first-order, and second-order models, as well as to the nonlinear Weibull model, the latter being the one that presented the best statistical fit ($R^2 > 0.98$), adequately describing the nonlinear degradation of ascorbic acid. Temperature dependence was modeled using the Arrhenius equation, allowing the activation energy to be estimated and revealing greater thermal sensitivity in naranjilla juice. Likewise, shelf life (t_{80}) was determined, with a significant reduction observed as temperature increased. Camu camu juice showed greater stability at low temperatures, while naranjilla showed a more sensitive response to temperature increases. The physicochemical parameters (pH, acidity, and °Brix) showed moderate changes, maintaining the stability of the system during storage. The results confirm the applicability of the Weibull model to describe vitamin C degradation in complex matrices and highlight the importance of thermal control in the preservation of bioactive compounds in tropical juices.

Key words: Degradation kinetics; vitamin C; Weibull; Arrhenius; shelf life; camu camu; naranjilla; HPLC.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción del problema de investigación

El camu camu (*Myrciaria dubia*) y la naranjilla (*Solanum quitoense*) son frutas tropicales con alto potencial agroindustrial debido a sus propiedades sensoriales y nutricionales. El camu camu destaca particularmente por su extraordinaria concentración de ácido ascórbico, considerada una de las más altas entre frutas naturales, mientras que la naranjilla presenta características organolépticas distintivas que favorecen su aceptación en el desarrollo de bebidas funcionales (Chirinos et al., 2010a; García-Chacón et al., 2023). En el contexto peruano, ambas especies representan recursos estratégicos con creciente interés en mercados internacionales, impulsados por la demanda de productos naturales con alto valor antioxidante (García-Chacón et al., 2023; Sabbe et al., 2013).

La vitamina C (ácido ascórbico) es un micronutriente esencial para el ser humano, cuya biodisponibilidad depende exclusivamente de la dieta debido a la incapacidad del organismo para sintetizarla, atribuida a la ausencia de la enzima L-gulonolactona oxidasa (Carr & Maggini, 2017). Sin embargo, se trata de uno de los compuestos más inestables en matrices alimentarias, siendo altamente susceptible a degradación por efecto de factores como temperatura, oxígeno, luz y pH durante el procesamiento y almacenamiento (Feszterová et al., 2023; Lee & Kader, 2000a; Yadav et al., 2023). Esta degradación no solo reduce el valor nutricional, sino que también afecta la calidad sensorial y funcional de los productos derivados.

En jugos de frutas tropicales, la degradación del ácido ascórbico constituye un indicador crítico de calidad y un parámetro clave para la predicción de la vida útil. Diversos estudios han demostrado que esta degradación sigue modelos cinéticos dependientes de la temperatura, frecuentemente descritos mediante cinética de primer orden y modelados a través de la ecuación de Arrhenius, lo que permite estimar parámetros como la energía de activación y constantes cinéticas (Dhuique-Mayer et al., 2007a; Odriozola-Serrano et al., 2009; Van Boekel, 2008). No obstante, la variabilidad en la matriz del alimento, composición química y condiciones de procesamiento genera diferencias significativas en los mecanismos de degradación, lo que justifica estudios específicos para cada tipo de jugo.

Adicionalmente, la degradación del ácido ascórbico está estrechamente relacionada con reacciones de pardeamiento no enzimático, incluyendo la reacción de Maillard y oxidación de compuestos fenólicos, que afectan negativamente la

aceptabilidad del producto (Nath et al., 2022; Pathare et al., 2013). Este fenómeno representa uno de los principales defectos de calidad durante el almacenamiento, especialmente en condiciones de temperatura elevada, lo que incrementa la necesidad de comprender la cinética de estos procesos en sistemas reales.

Desde el punto de vista industrial, los tratamientos térmicos como la pasteurización son esenciales para garantizar la inocuidad microbiológica y prolongar la vida útil de los jugos. Sin embargo, estos tratamientos pueden acelerar la degradación de compuestos bioactivos sensibles, como la vitamina C, generando un compromiso entre seguridad y calidad nutricional (Mandha et al., 2023; Shaik & Chakraborty, 2023). En este contexto, el uso de métodos analíticos avanzados como la cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC) permite una cuantificación precisa del ácido ascórbico, proporcionando datos confiables para el modelamiento cinético y la predicción de vida útil (Kim et al., 2021).

A pesar del creciente interés en bebidas funcionales a base de frutas tropicales, existe una limitada disponibilidad de estudios que integren la determinación del orden de reacción, el modelamiento cinético basado en Arrhenius y la cuantificación analítica precisa mediante HPLC en matrices como el camu camu y la naranjilla. Esta brecha limita la capacidad de la industria para optimizar procesos, diseñar condiciones de almacenamiento adecuadas y garantizar productos con alta calidad nutricional y estabilidad.

En consecuencia, resulta fundamental estudiar la cinética de degradación del ácido ascórbico bajo condiciones térmicas aceleradas, con el fin de generar modelos predictivos robustos que permitan estimar la vida útil y contribuir al desarrollo sostenible de la agroindustria de jugos tropicales.

Entre los antecedentes de estudio destaca:

Akyildiz et al., (2021), el estudio investigó el contenido de ácido ascórbico (AA), hidroximetilfurfural (HMF) y furfural del jugo de naranja (OJ) durante el procesamiento con tratamientos térmicos diferentes y condiciones de almacenamiento. De acuerdo con la cinética de degradación de AA; los tratamientos térmicos a 70, 75, 80, 85 y 90 °C generaron vidas medias que variaron entre 666.5 y 1136.3 segundos. Los valores obtenidos fueron de z (86.32 °C), E_a (26.87 kJ mol⁻¹) y Q_{10} (1.31) para el AA. Las evidencias más resaltantes se observaron durante el almacenamiento a 25 °C para los compuestos en estudio, en consideración a 4 °C. Las muestras de zumo de naranja

procesadas a temperaturas moderadas presentaron una mejor retención de AA, y mostrando una menor formación de HMF y furfural durante su vida útil.

Nakilcioğlu-Taş y Ötleş, (2020), generaron el modelado cinético de pérdidas de vitamina C en jugos cítricos (mandarina, toronja, naranja y lima) por un espacio de cuatro horas de almacenamiento a temperaturas de 4 y 25 °C bajo diferentes condiciones controladas de luz y oxígeno. La pérdida de vitamina C para cada una de las muestras siguió el modelo cinético de primer orden. La vida media de la vitamina C osciló de 137.586 a 467.486 min para la mandarina; 105.444 a 203.100 min para la toronja; 365.702 a 1044.668 min para los jugos de naranja y 540.076 a 722.016 min para los jugos de lima. El resultado denota retenciones más altas y más bajas de vitamina C para los jugos de naranja y toronja respectivamente durante el almacenamiento. Además, el tiempo de almacenamiento, la penetración de la luz y la presencia de oxígeno fueron los factores más efectivos en la degradación de la vitamina C, mientras que la temperatura de almacenamiento no reveló un efecto significativo en el contenido de vitamina C

Zhang et al., (2016), En el estudio para determinar la cinética de degradación de la vitamina C en naranja y zumo de naranja durante el almacenamiento a temperaturas diferentes, se modeló reacciones de orden cero y de primer orden. La vitamina C (Vc) de la naranja y los jugos de naranja se debe a la inestabilidad térmica durante el almacenamiento, disminuyendo significativamente con el incremento del tiempo y la temperatura de almacenamiento. En relación con el orden cero, la cinética de degradación se ajustó mejor al modelo de reacción de primer orden tanto para la naranja como para el jugo de naranja. Siguiendo el modelo cinético de primer orden, la constante de velocidad de reacción (k) de la Vc aumentó de 0.0396 a 0.3573/d con el aumento de la temperatura de 5 a 37 °C para la naranja, mientras que la k osciló entre 0.0460 y 0.2617/d para el jugo de naranja. Los resultados indicaron que la temperatura tuvo una gran influencia en la degradación de la Vc en naranja y jugo de naranja

Oliveira et al., (2013), Este estudio investigó la cinética de degradación del jugo entero de mango Ubá mediante pruebas aceleradas y la estimación de su vida útil a 25 °C. La metodología basó en someter el producto a almacenaron en incubadoras (DBO) a 25, 35 y 45 °C, con luminosidad por 24 horas (650 lux). Los resultados indicaron que el color (L* y E*) y la concentración de vitamina C influyeron en la calidad de la bebida. El cambio de color siguió un modelo cinético de orden cero, prevaleciendo el oscurecimiento en jugos mantenidos a 35 °C y 45 °C, en contraste,

la degradación de la vitamina C expresó modelo de primer orden. Concluyendo la existencia de una correlación significativa entre la concentración de vitamina C y los valores de L^* y E^* ($P < 0,01$), además, la vida útil estimada fue de 190 días para el jugo puro de mango a 25 °C.

Derossi et al., (2010), evaluaron la degradación de la cinética de la vitamina C del jugo de fresa que sufre daño a causa de las vacilaciones de temperatura reduciendo significativamente la vida útil. Se utilizó el modelo weibulian, el orden de cinética fue de 1 siendo el que mejor se ajustó a la degradación del ácido ascórbico en condiciones isotérmicas. Las temperaturas de estudio arrojaron una retención del 46.8% y el 42.7%, respectivamente, y confirmados después de 15 días. Asimismo, se mostró una disminución significativa de la vida útil (alrededor de 5 días) para las muestras expuestas a vacilaciones de temperatura en contraste con las muestras expuestas temperatura constante.

Acevedo y Montiel, (2004), estudiaron la cinética de la degradación de la actividad antioxidante hidrosoluble de jugos cítricos por tratamiento térmico a temperatura de 70, 80 y 90 °C en jugos de naranja (*Citrus sinensis*), mandarina (*Citrus reticulata*), limón (*Citrus limon*), pomelo (*Citrus paradisi*) y lima Rangpur (*Citrus limonia Osbeck*). Para determinar la actividad antioxidante se empleó el test del DPPH. La degradación de la Actividad Antioxidante sigue una cinética de orden cero.

Fellers, (1988), evaluó la vida útil y calidad del jugo de naranja y pomelo de Florida produciendo jugos recién exprimidos, embotellados en polietileno sin pasteurizar. Los jugos fueron almacenados a -1.7 °C (20-23 días); 1.1 °C (16-22 días); 4.4 °C (10-16 días); y 7.8 °C (5-8 días). Los resultados arrojaron la prevalencia del sabor a rancio como característica restrictiva de la vida útil a bajas temperaturas. Pasada las dos semanas de análisis, el ácido ascórbico a las temperaturas de almacenamiento fue de 91 a 93 % para dos jugos de naranja y 86 a 88 % para el jugo de pomelo.

El objetivo del presente estudio fue predecir la cinética de degradación del ácido ascórbico en jugos de camu camu (*Myrciaria dubia*) y naranjilla (*Solanum quitoense*) sometidos a condiciones térmicas aceleradas (35, 45 y 55 °C), mediante la identificación del orden de reacción, el modelamiento cinético basado en Arrhenius y su cuantificación por HPLC, con el fin de predecir su vida útil.

1.2. Formulación del problema de investigación

¿Cómo se comporta la cinética de degradación del ácido ascórbico en jugos de camu camu (*Myrciaria dubia*) y naranjilla (*Solanum quitoense*) sometidos a condiciones térmicas aceleradas (35, 45 y 55 °C), en términos del orden de reacción, las constantes cinéticas y su dependencia con la temperatura, determinada mediante cuantificación por HPLC y modelamiento con la ecuación de Arrhenius, para la predicción de su vida útil?

1.3. Objetivo de investigación

Objetivo general

- Predecir Determinar la cinética de degradación del ácido ascórbico en jugos de camu camu (*Myrciaria dubia*) y naranjilla (*Solanum quitoense*) sometidos a condiciones térmicas aceleradas (35, 45 y 55 °C), mediante la identificación del orden de reacción, el modelamiento cinético basado en Arrhenius y su cuantificación por HPLC, con el fin de predecir su vida útil.

Objetivos específicos

- Cuantificar el contenido de ácido ascórbico en jugos de camu camu y naranjilla durante el almacenamiento a 35, 45 y 55 °C utilizando cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC).
- Determinar el orden de reacción de la degradación del ácido ascórbico en ambos jugos mediante el ajuste de modelos cinéticos (orden cero, primero y segundo).
- Calcular las constantes cinéticas de degradación (k) a cada temperatura evaluada.
- Modelar el efecto de la temperatura sobre la degradación del ácido ascórbico utilizando la ecuación de Arrhenius, estimando la energía de activación (Ea).
- Estimar la vida útil de los jugos en función de la pérdida de vitamina C bajo diferentes condiciones de almacenamiento.
- Evaluar la evolución de parámetros fisicoquímicos (pH, acidez titulable y °Brix) durante el almacenamiento y su relación con la degradación del ácido ascórbico.

1.4. Formulación de la hipótesis de investigación

La degradación del ácido ascórbico en jugos de camu camu (*Myrciaria dubia*) y naranjilla (*Solanum quitoense*) bajo condiciones térmicas aceleradas (35, 45 y 55 °C) sigue un modelo cinético dependiente de la temperatura, ajustado a un orden de reacción definido, cuyas constantes cinéticas aumentan significativamente con la temperatura y pueden describirse mediante la ecuación de Arrhenius, permitiendo predecir su vida útil.

1.5. Justificación e importancia de investigación

En el contexto actual de la industria alimentaria, existe una creciente demanda por parte de los consumidores hacia productos que no solo garanticen inocuidad y estabilidad durante el almacenamiento, sino que además conserven un alto valor nutricional y atributos sensoriales similares a los de los alimentos frescos. Esta tendencia ha impulsado el desarrollo de bebidas funcionales y jugos de frutas tropicales, los cuales representan una alternativa estratégica para la valorización de materias primas altamente perecibles (Lisboa et al., 2024; Pinto et al., 2022). Sin embargo, la baja estabilidad poscosecha de las frutas tropicales limita su comercialización en fresco, haciendo necesario su procesamiento para extender su vida útil y facilitar su inserción en mercados nacionales e internacionales (García-Chacón et al., 2023; Sabbe et al., 2013).

El procesamiento térmico, particularmente la pasteurización, es una operación indispensable para garantizar la seguridad microbiológica de los jugos; no obstante, este tratamiento puede inducir cambios significativos en la calidad del producto, incluyendo la degradación de compuestos bioactivos sensibles como la vitamina C (ácido ascórbico), así como alteraciones en el color, sabor y propiedades fisicoquímicas (Shaik & Chakraborty, 2023). La vitamina C es uno de los principales indicadores de calidad nutricional en jugos de frutas, no solo por su papel esencial en la salud humana, sino también por su contribución a la capacidad antioxidante total del alimento, asociada a la prevención de enfermedades crónicas (Ambigaipalan et al., 2015; Carr & Maggini, 2017).

Desde el punto de vista científico y tecnológico, la degradación del ácido ascórbico durante el procesamiento y almacenamiento está influenciada por múltiples factores como la temperatura, el oxígeno, el pH y la composición de la matriz alimentaria, lo que genera una alta variabilidad en su comportamiento cinético (Lee & Kader, 2000a; Van Boekel, 2008). En este sentido, el estudio de la cinética de

degradación, mediante la determinación del orden de reacción, las constantes cinéticas y su dependencia con la temperatura a través del modelo de Arrhenius, constituye una herramienta fundamental para comprender los mecanismos de deterioro y desarrollar modelos predictivos de vida útil (Dhuique-Mayer et al., 2007a; Odriozola-Serrano et al., 2009).

Asimismo, el uso de técnicas analíticas avanzadas como la cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC) permite una cuantificación precisa y confiable del ácido ascórbico, superando las limitaciones de métodos tradicionales y proporcionando datos robustos para el modelamiento cinético (Kim et al., 2021). Esta precisión es clave para estudios de alto impacto, donde la calidad de los datos experimentales determina la validez de los modelos predictivos.

La relevancia de esta investigación radica en que permitirá generar información científica aplicable para la optimización de procesos térmicos y condiciones de almacenamiento en la agroindustria de jugos tropicales, contribuyendo a mejorar la retención de nutrientes y la calidad del producto final. Los principales beneficiarios incluyen la industria alimentaria, que podrá diseñar estrategias más eficientes de procesamiento y conservación; los productores agrícolas, al incrementar el valor agregado de sus cultivos; y los consumidores, quienes accederán a productos con mayor calidad nutricional y estabilidad.

A pesar del avance en el estudio de la degradación de vitamina C en diferentes matrices alimentarias, existe un vacío significativo de conocimiento en relación con la caracterización cinética integral del ácido ascórbico en jugos de frutas tropicales específicas como el camu camu (*Myrciaria dubia*) y la naranjilla (*Solanum quitoense*), particularmente bajo condiciones térmicas aceleradas que permitan la predicción de vida útil. Además, son limitados los estudios que integran simultáneamente la determinación del orden de reacción, el modelamiento mediante la ecuación de Arrhenius y la cuantificación precisa por HPLC en estas matrices complejas.

En este contexto, la presente investigación es necesaria porque aborda de manera integral esta brecha científica, proporcionando modelos cinéticos robustos y aplicables que permitirán predecir la estabilidad del ácido ascórbico y, por ende, la vida útil de jugos de frutas tropicales, contribuyendo al desarrollo sostenible y competitivo de la agroindustria.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

A continuación, se mencionan estudios como antecedentes del estudio:

Riera y Gómez, (2019), estudiaron como influyó la temperatura (8 y 28°C) como condición de almacenamiento por ocho horas en la pérdida del ácido ascórbico, en jugos frescos elaborados a base de pitahaya, grosella, maracuyá y limón. con y sin adición de azúcar. Como resultados obtuvieron que a 8 y 28°C, los jugos de maracuyá y pitahaya con azúcar se comportaron con una cinética de orden de reacción cero y de primer orden sin azúcar, no obstante, los jugos de limón y grosella, se comportaron con una cinética de primer orden en las 2 temperaturas. A 28°C la velocidad de reacción incrementó en los jugos que no contenían azúcar. Estimaron la vida útil promedio en 4.14 horas y entre un 40 y 80 % de disminución del contenido de vitamina C, donde la pitahaya evidenció una concentración mayor a lo largo del tiempo.

Zhang et al., (2016), determinaron la pérdida del ácido ascórbico en la naranja y el zumo de naranja durante el almacenamiento a diferentes temperaturas. Modelaron la cinética de degradación de la vitamina C mediante una reacción de orden cero y de primer orden. Los resultados mostraron que, para el modelo cinético de primer orden, la constante de velocidad de reacción (k) aumentó de 0.0396 a 0.3573/d con el aumento de la temperatura de 5 a 37°C para la naranja, mientras que la k osciló entre 0.0460 y 0.2617/d para el zumo de naranja. Concluyeron indicando que la temperatura tuvo una gran influencia en la degradación de la vitamina C en la naranja y el zumo de naranja y que en comparación con el orden cero, la cinética de degradación tuvo un mejor ajuste al modelo de reacción de primer orden en la naranja y zumo de naranja.

Mendoza-Corvis et al., (2017), estudiaron en un producto en polvo a base de pulpa de mango (*Mangifera indica* L. var. Hilacha) y lactisoro la disminución de la vitamina C durante el almacenamiento a 4 y 28 °C. Cuantificaron la vitamina C por el método AOAC 967.21/90, con 2.6-diclorofenol indofenol. El producto almacenado a 4 °C obtuvo mayor estabilidad, con valores de concentración en la octava semana de 13.94 ± 1.2 mg/100 g, además presentó una reacción de primer orden con valores k1 de 0.014 y 0.041 mg/100 g/por semana para las temperaturas de 4 °C y 28 °C, respectivamente.

Remini et al., (2015), investigaron la estabilidad de la vitamina C y la intensidad del color en el zumo de naranja sanguina (*Citrus sinensis* [L.] Osbeck) pasteurizado durante un mes de almacenamiento a 4-37 °C. Determinaron los efectos del

enriquecimiento con ácido ascórbico (a 100, 200 mg L⁻¹) y de la desgasificación, la temperatura y el tiempo de almacenamiento sobre el comportamiento cinético. El ácido ascórbico lo cuantificaron mediante HPLC-DAD y la intensidad del color mediante mediciones espectrofotométricas.

La cinética de degradación fue de primer orden tanto para el ácido ascórbico como para la intensidad del color. Utilizaron tres modelos (Arrhenius, Eyring y Ball) para evaluar la degradación dependiente de la temperatura. Según el modelo de Arrhenius, las energías de activación oscilaron entre 51 y 135 kJ mol⁻¹ para el ácido ascórbico y entre 49 y 99 kJ mol⁻¹ para la intensidad del color.

Sapei y Hwa, (2014), estudiaron la pérdida del ácido ascórbico, a diferentes temperaturas como condiciones de almacenamiento y la adición de azúcar en zumos de fresa frescos. Evaluaron cuatro tipos de zumos de fresa frescos A, B, C y D. Los zumos A y C se almacenaron a 28°C, mientras que las muestras B y D se almacenaron a 8°C. Los zumos A y B los prepararon sin adición de azúcar, mientras que a los zumos C y D les añadieron azúcar. La concentración de vitamina C la determinación mediante el método de valoración yodimétrica. Monitorearon cada hora durante 8 horas. Los resultados que obtuvieron mostraron una reacción de orden cero para la pérdida de la vitamina C en todos los tipos de zumos. Los valores de las constantes de velocidad de reacción de degradación para los zumos A, B, C y D fueron 4.42; 3.63; 2.32; y 1.85 mg de vitamina C/(100 ml. h), respectivamente. La energía de activación para la degradación de la vitamina C en los zumos de fresa frescos con azúcar y sin adición de azúcar se estimó en 1.90 kcal/ mol y 1.65 kcal/ mol, respectivamente y concluyeron que el almacenamiento a una temperatura más baja, combinado con la adición de azúcar, podría ralentizar eficazmente la tasa de degradación de la vitamina C

Burdurlu et al., (2006), investigaron la cinética de degradación del ácido ascórbico en concentrados de zumo de frutas tropicales (naranja, limón, pomelo y mandarina) durante un almacenamiento de ocho semanas a 28, 37 y 45°C y también estudiaron la formación del hidroximetilfurfural (HMF) como compuesto de descomposición de la degradación del ácido ascórbico. Los resultados que obtuvieron mostraron que la pérdida de ácido ascórbico a cada temperatura siguió un modelo cinético de primer orden. La energía de activación tuvo un rango de 12.7 ± 0.97 a 25.39 ± 1.98 kcal mol⁻¹ y la retención de ácido ascórbico tras el almacenamiento a 28, 37 y 45 °C fue de aproximadamente 54.5 - 83.7 %, 23.6 - 27 % y 15.1 - 20.0 %, respectivamente. La acumulación de HMF se ajustó a un modelo cinético de orden cero y la energía de activación osciló entre 43.41 ± 0.67 y 80.02 ± 0.07 kcal mol⁻¹.

Concluyeron que existe una correlación significativa entre la acumulación de HMF y la pérdida de ácido ascórbico a todas las temperaturas de almacenamiento en todos los concentrados de zumo de frutas tropicales

2.2. Marco conceptual

2.2.1. Vida útil

“La vida útil es un periodo de tiempo finito, tras la fabricación y el envasado, durante el cual el producto alimentario conserva un nivel de calidad requerido y aceptable para el consumo” (Nicolí, 2012), que está directamente relacionado con el nivel de tecnología utilizado para obtener el producto y del sistema envase, alimento y medio ambiente (Atencia, 1996). Representa un parámetro importante en el procesamiento de alimentos frescos, semi procesados y procesados, más aún, que se estima mediante pruebas experimentales y por simulación; implicando el conocimiento por cada miembro de la cadena alimentaria. Debido a que el deterioro de la calidad de algunos alimentos se produce con bastante lentitud en condiciones reales de almacenamiento, por tanto, se adoptan metodologías de ensayo para determinar la vida útil en condiciones de almacenamiento acelerado; esta metodología se denomina ensayo de vida útil acelerada (ASLT) y permite reducir el tiempo necesario para estimar la vida útil del producto (Calligaris et al., 2019). La capacidad de predecir la vida útil del producto en diferentes materiales puede ayudar a seleccionar el envase óptimo (Witik et al., 2019).

2.2.2. Pruebas aceleradas

Son métodos que aceleran la vida útil de los productos para prologar su degradación, el objetivo es tener datos de forma rápida y que modelados y evaluados adecuadamente brinden información necesaria sobre el tiempo de envejecimiento de un alimento bajo condiciones normales de uso (Jiménez y López, 2009). Para ello, los alimentos se someten a condiciones de almacenamiento variables, en el que se trabajan con variaciones de presión parcial de oxígeno, elevadas temperaturas y humedad relativa. El monitoreo y la evaluación del comportamiento se realiza mediante parámetros fisicoquímicos, sensoriales o microbiológicos y a través del uso de modelos matemáticos como el de Arrhenius, se puede describir el efecto de las reacciones de deterioro del alimento (Ragnarsson y Labuza, 1977).

2.2.3. Camu Camu

a. Generalidades

El fruto nativo Camu-camu (*Myrciaria dubia*) proviene de la Amazonía (Akter et al., 2011), posee un gran contenido de vitamina C, que lo diferencia a nivel mundial (Fracassetti et al., 2013). Su ubicación geográfica comprende la distribución en los países de Venezuela, Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Brasil (Borges et al., 2014). El fruto se desarrolla con mayor preponderancia desde la cuenca superior del río Orinoco hasta el estado de Rondonia (Brasil) (Ortiz y Romero, 2017), no obstante, en la región de la Amazonía peruana (Pucallpa y Pevas) se evidencia el mayor cultivo de camu camu (Ortiz y Romero, 2017; Rivero et al., 2009).

La vitamina C presente en el camu camu tiene un potencial enorme, esta se concentra en mayor proporción en la cáscara del fruto maduro y sobre maduro (Imán et al., 2011). El Camu camu dentro de su composición tiene una fuente relevante de antioxidantes, vitaminas C y β -caroteno (Chirinos et al., 2010b).

Las aplicaciones en el rubro alimentario de esta fruta y sus derivados muestran un potencial importante debido a su alto contenido de vitamina C. La pulpa, extracto y jugo de Camu camu vienen siendo exportados a Asia (Japón) y a Europea (Correa et al., 2011). El interés que ha generado el fruto en la comunidad internacional y en los mercados locales está repercutiendo considerablemente en el cultivo y procesamiento, abriendo nuevos mercados y generando el interés de importantes países importadores (Japón, Francia y Estados Unidos) (Akter et al., 2011).

b. Composición química

Posee 2780 mg/100 g de vitamina C (Reyes et al., 2017). Contiene 20 veces más vitamina C que la acerola y 100 veces más que el limón (Myoda et al., 2010; Vidigal et al., 2011). La vitamina C se encuentra entre 1410 y 2780 mg/100g de pulpa según reportes académicos. También contiene dentro de su composición minerales (sodio, potasio, calcio, zinc, magnesio, manganeso y cobre) (Akachi et al., 2010), aminoácidos, (serina, valina y leucina) (Akter et al., 2011). En su composición también encontramos pectina y almidón en pequeñas concentraciones. Además los azúcares principales son la glucosa y la fructosa (Zapata y Dufour, 1993).

Algunos reportes señalan que el Camu camu contiene entre 2000 mg de ácido ascórbico/100 g de pulpa y 3000 mg por 100 g de pulpa, equivalente a 30 veces el de la pulpa de algunos de frutas tropicales (naranja, limón, mandarina) (Correa et al.,

2011). Asimismo en otros reportes investigativos, consideran 1889 mg de ácido ascórbico/100 g de pulpa (Gonçalves et al., 2014).

Existe una variación significativa en la concentración de vitamina C en la pupa de frutos verdes y maduros. Los frutos verdes contienen 1.6 a 1.8 g de vitamina C/100 g de pulpa y los frutos maduros de 1.2 a 1.6 g de vitamina C/100 g de pulpa (Castro et al., 2013). Asimismo da Silva et al., (2012) reportaron que el contenido de vitamina C en el jugo de Camu camu constituye 52.5 mg vitamina C/100 ml de jugo, además indican que la vitamina C es termo sensible, produciéndose una disminución de su contenido por acción del calor durante el procesamiento.

2.2.4. Naranjilla

a. Generalidades

La naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.) es oriunda de los Andes, geográficamente cultivada y consumida con mayor relevancia en Colombia, Ecuador y América Central. El árbol crece mejor entre 1200 y 2300 m sobre el nivel del mar (msnm); no es una planta tropical ni templada (Acosta et al., 2009). La morfología del fruto considera una forma redonda donde la cáscara está cubierta de pelos quebradizos. En el proceso de madurez el fruto pasa del color verde al naranja, considerándose climatérico, con una tasa de respiración relativamente baja (Arango et al., 1999). Aunque la fruta se consume y procesa a veces en etapas tempranas de madurez (debido al atractivo color verdoso de la pulpa), los sólidos solubles totales aumentan con la madurez, generándose una pulpa más dulce mientras avanza la maduración en cambio el pH no varía significativamente (Casierra-Posada et al., 2004).

El fruto está dividido en cuatro compartimentos, distribuidos en tabiques membranosos y llenos de pulpa, con un sabor ligeramente ácido, agradable y un aroma suave. Además, posee numerosas semillas duras y planas. Con respecto al sabor se describe como dulce, en símil a una mezcla de plátano, piña y fresa (Brunke et al., 2002).

b. Composición química

La naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.) es una fruta andina climatérica, que contiene vitamina C, fenoles y una resaltante capacidad antioxidante. Por sus características exóticas de sabor y color es requerida en los mercados nacionales e internacionales (Andrade-Cuvi et al., 2015).

2.2.5. Cinética de la degradación de los alimentos

La cinética de degradación de alimentos estudia la velocidad a la que ocurren cambios químicos, físicos o bioquímicos que afectan la calidad del producto. Estas transformaciones incluyen reacciones de oxidación, pardeamiento, pérdida de nutrientes y cambios estructurales, y pueden describirse matemáticamente mediante modelos cinéticos (Van Boekel, 2008).

El modelo general de cinética química en alimentos se expresa en la ecuación 1:

$$\frac{d}{dt} = -kC^n \quad (1)$$

donde C es la concentración del compuesto, k la constante de velocidad y n el orden de reacción. En sistemas alimentarios, las reacciones de deterioro suelen seguir modelos de orden cero o primer orden, dependiendo de la naturaleza del alimento y del mecanismo involucrado (Labuza & Saltmarch, 1982; Van Boekel, 2008).

La temperatura es uno de los factores más influyentes en la velocidad de degradación. Su efecto se describe comúnmente mediante la ecuación de Arrhenius (2):

$$k = A e^{-\frac{E_a}{R}} \quad (2)$$

donde E_a representa la energía de activación, A el factor preexponencial, R la constante de los gases y T la temperatura absoluta. Este modelo permite cuantificar la sensibilidad de una reacción a la temperatura y es ampliamente utilizado en la predicción de vida útil de alimentos (Dermesonlouoglou et al., 2016; Van Boekel, 2008).

El uso de modelos cinéticos no solo permite describir el comportamiento de deterioro, sino también comparar la estabilidad entre diferentes productos y optimizar condiciones de procesamiento y almacenamiento.

2.2.6. Cinética de la degradación de ácido ascórbico

El ácido ascórbico (vitamina C) es uno de los compuestos más estudiados en cinética de degradación debido a su alta sensibilidad a factores ambientales como temperatura, oxígeno, luz y pH. Su degradación ocurre principalmente por

mecanismos de oxidación, transformándose en ácido dehidroascórbico y posteriormente en compuestos inactivos (Lee & Kader, 2000a).

En matrices líquidas como jugos de frutas, la degradación de la vitamina C suele seguir una cinética de primer orden (ecuación 03), lo que implica que la velocidad de degradación es proporcional a su concentración:

$$ln C_t = ln C_0 - kt \quad (3)$$

Diversos estudios han confirmado este comportamiento en jugos cítricos y tropicales, aunque pueden presentarse desviaciones dependiendo de la composición de la matriz y las condiciones de almacenamiento (Dhuique-Mayer et al., 2007a; Odriozola-Serrano et al., 2009).

La temperatura tiene un efecto determinante en la degradación del ácido ascórbico, incrementando la constante cinética y reduciendo la vida útil del producto. La aplicación del modelo de Arrhenius ha permitido estimar valores de energía de activación para esta reacción en diferentes sistemas alimentarios, evidenciando una alta sensibilidad térmica (Van Boekel, 2008).

Además, la degradación del ácido ascórbico está estrechamente relacionada con reacciones de pardeamiento no enzimático, lo que contribuye a cambios en el color y la calidad sensorial de los jugos (Pathare et al., 2013). Por esta razón, su seguimiento no solo es relevante desde el punto de vista nutricional, sino también como indicador integral de calidad.

El uso de técnicas analíticas avanzadas como la cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC) permite una cuantificación precisa del ácido ascórbico, mejorando la exactitud de los modelos cinéticos y fortaleciendo la validez de los estudios de vida útil (Kim et al., 2021).

III. METODOLOGÍA

3.1. Método de investigación

El método de la investigación es aplicada, experimental y cuantitativa.

3.2. Diseño de investigación

El diseño del estudio es de tipo experimental y de enfoque cuantitativo.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

La población está constituida por todos los jugos de frutas tropicales elaborados a partir de camu camu (*Myrciaria dubia*) y naranjilla (*Solanum quitoense*), susceptibles de experimentar degradación del ácido ascórbico bajo condiciones de almacenamiento térmico, procesado en el mes de agosto de 2025.

3.3.2. Muestreo

No probabilístico por conveniencia

3.3.3. Muestra

La muestra es el subconjunto experimental real de jugos de camu camu (*Myrciaria dubia*) y naranjilla (*Solanum quitoense*) elaborados a partir de fruta fresca en estado de maduración organoléptica, envasados en botellas de vidrio (250 mL, con tapa twist-off) y sometidos a condiciones térmicas controladas de 35, 45 y 55 °C durante el periodo experimental.

3.4. Operacionalización de las variables de estudio

La operacionalización se basa en la definición conceptual y operacional de las variables de estudio como también su dimensionamiento e indicadores.

Tabla 1*Operacionalización de las variables*

Variable		Definición conceptual	Dimensión	Definición operacional	Indicador
Independiente	Temperaturas de almacenamiento	Grado térmico del ambiente o de la atmósfera de estudio (Espinosa-Cruz et al., 2014)	Condición ambiental	Almacenamiento como test acelerado a 3 diferentes temperaturas	Temperaturas: 35 °C, 45 °C 55 °C
	Días de almacenamiento	Periodo finito establecido como condición de almacenamiento (Torregrosa et al., 2006)	Condición ambiental	Tiempo definido de 21 días para la evaluación	35 °C → 0, 3, 6, 9, 12, 15, 21 días 45 °C → 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 días 55 °C → 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 días
Dependiente	Contenido de vitamina C	Cantidad de AA que contiene el jugo tropical en su Composición (Quillimamani Soncco et al., 2022)	Composición química	Evaluación de la degradación del AA en el tiempo de almacenamiento	Gramos de ácido ascórbico/L de tropical.
	Vida útil	Periodo de tiempo finito, en donde el producto alimentario conserva un nivel de calidad requerida y aceptable para el consumo (Carrillo Inungaray & Reyes, 2013)	Tiempo	Tiempo en días en que los jugos de frutas tropicales mantienen el contenido de AA hasta su límite de aceptabilidad	Días

3.5. Técnicas e instrumento de recolección de datos

Para la recolección de datos se utilizarán técnicas de evaluación e instrumentales.

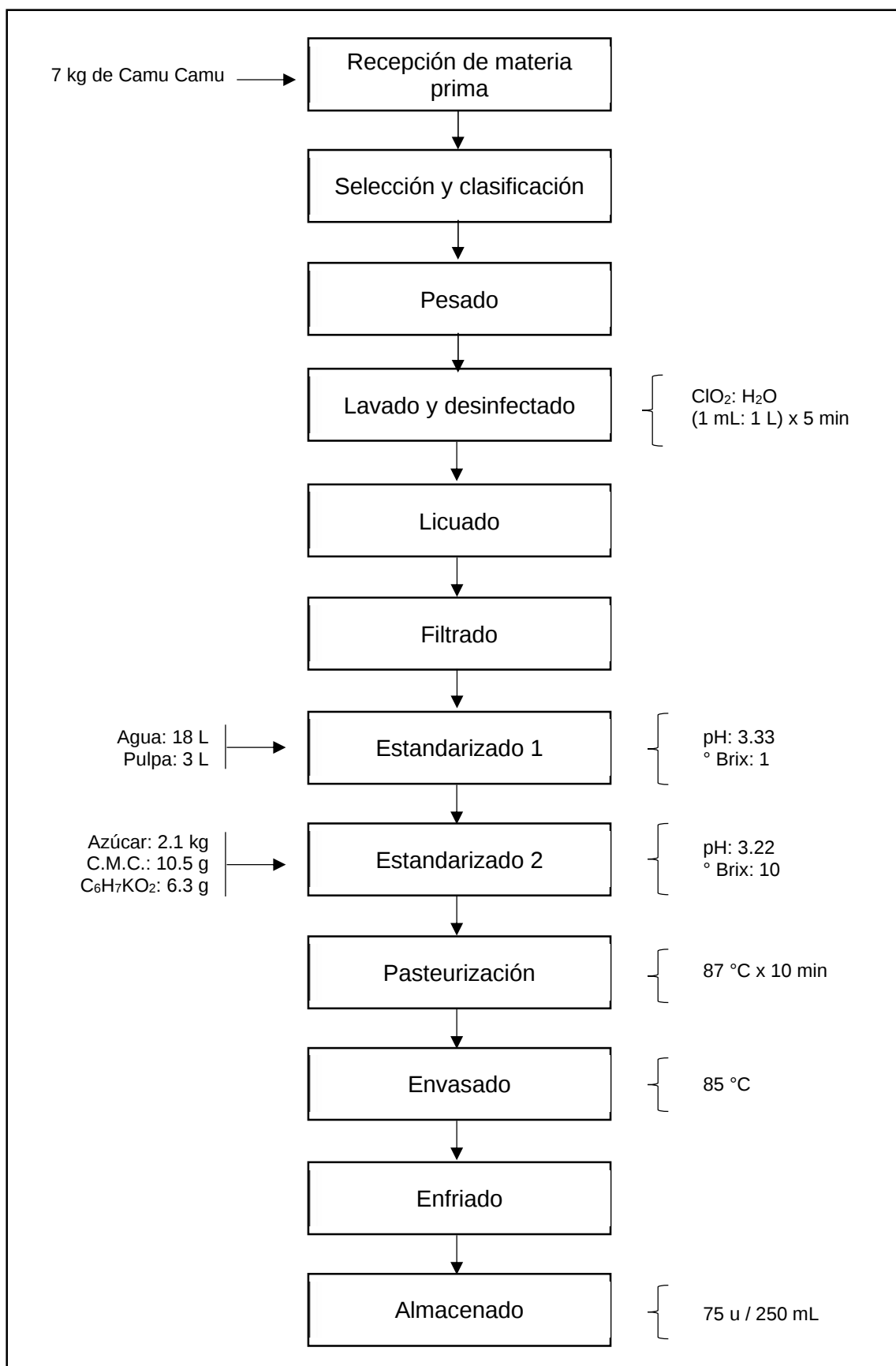
Tabla 2

Síntesis de los métodos, técnicas e instrumentos empleados para la recolección de datos

Evaluación	Método	Técnica	Instrumento
Obtención de muestra	Aleatorio simple	Inspección visual	Proceso productivo
Análisis fisicoquímico	Ensayo potencial de hidrógeno, acidez, solidos solubles, colorimetría	Análisis químico	pH-metro, refractómetro,
Determinación de vitamina C	Cromatográfico	Cromatograma líquido	Cromatograma

3.5.1. Elaboración de jugo tropical

Las frutas tropicales se obtuvieron de proveedores de fruta tropical del oriente peruano, El camu camu procedió de Yurimaguas y la naranjilla de Jaén, para la elaboración de jugo tropical se consideró el siguiente procedimiento:

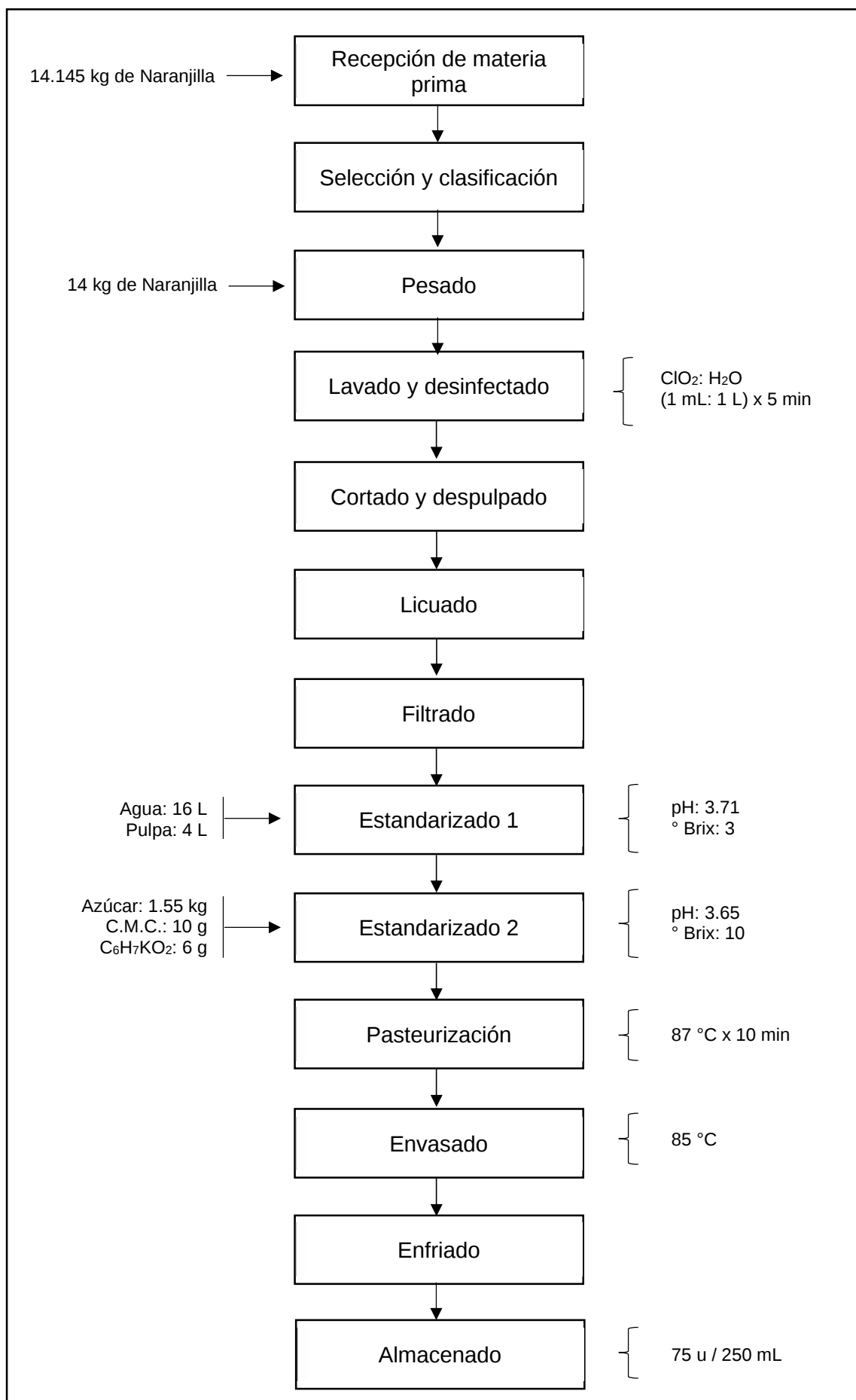
Figura 1*Diagrama de flujo del proceso de elaboración de jugo de camu camu*

Descripción del proceso de obtención de jugo tropical de Camu camu

- Recepción de materia prima. En el laboratorio de Tecnología de Alimentos de la Universidad Nacional de Jaén se recibió 7 Kg de frutos de Camu camu (*Myrciaria dubia*) en estado de madurez organoléptica, se procedió con la inspección visual para descartar frutos con daños mecánicos.
- Selección y clasificación. Los frutos fueron sometidos a una selección manual, separando aquellos que no cumplían con los parámetros de calidad establecidos (magullado, podrido o dañado), y se clasificó considerando el estado de madurez comercial.
- Pesado. Se determinó la masa neta de la fruta seleccionada mediante una balanza digital de precisión (T-Scale, TB, Taiwán), a fin de estandarizar la dosificación de insumos y ajustar la formulación final. De este proceso se obtuvo un peso útil de 6.189 Kg de fruta apta para procesamiento.
- Lavado y desinfección. Los frutos fueron lavados con agua potable a fin de remover suciedad superficial y cuerpos extraños. Se procedió con la desinfección por inmersión en una solución acuosa de dióxido de cloro (1 mL/L) durante 5 minutos, con agitación suave para asegurar el contacto superficial total.
- Licuado. Los frutos desinfectados fueron sometidos a disgregación mecánica en una licuadora industrial (SKYMSEN, LAR-25, Arequipa-Perú), obteniéndose una suspensión homogénea de pulpa, jugo y componentes sólidos de la fruta.
- Filtrado. La suspensión obtenida se sometió a un proceso de separación de sólidos mediante un tamiz de 1 mm de malla, lo que permitió retener semillas, fragmentos de epicarpio y fibras gruesas. El resultado fue una pulpa refinada apta para estandarización.
- Estandarización 1. Se tomaron 3 L de pulpa refinada y se mezclaron con 18 L de agua potable, ajustando las características fisicoquímicas a 3.3 pH a través de un potenciómetro de sobremesa (Hanna, HI6221, Lima-Perú) y 1 °Brix a través de un refractómetro digital (Milwaukee, MA871, Lima-Perú), con el objetivo de homogeneizar la acidez y dilución inicial.
- Estandarización 2. Se adicionaron los siguientes insumos para lograr el perfil sensorial y estabilidad requeridos: Azúcar refinada: 2.1 kg (edulcorante y corrector de sólidos solubles). Carboximetil Celulosa (0.05 %): 10.5 g (estabilizante coloidal).

Sorbato de potasio (0.03 %): 6.3 g (agente antimicrobiano). Posteriormente, el sistema fue ajustado a pH 3.22 y °Brix 10.

- Pasteurización. Se pasteurizó por método convencional (LTLT - Low Temperature Long Time), el jugo fue sometido a un tratamiento térmico a 87 °C durante 10 minutos, con el fin de inactivar microorganismos patógenos y enzimas deteriorantes.
- Envasado. El producto caliente (aproximadamente 85 °C) fue dosificado en envases de vidrio de 250 ml con tapa twist off previamente sanitizados, utilizando llenado en caliente para prevenir contaminación secundarios.
- Enfriado (shock térmico y vacío). Los envases sellados fueron sometidos a enfriamiento rápido por inmersión en agua fría (shock térmico), lo que generó una disminución brusca de temperatura y provocó una contracción del vapor interno, generando vacío parcial en el envase.
- Almacenado. Se almacenó un lote final compuesto por 75 unidades de 250 mL de capacidad en tres estufas digitales de laboratorio (FAITHFUL, GX45BE, Lima-Perú) (25 muestras por estufa) a temperatura de 35, 45 y 55 °C durante 21, 14 y 7 días respectivamente. En cada estufa se almacenó 25 muestras

Figura 2*Diagrama de flujo del proceso de elaboración de jugo de Naranja*

Descripción del proceso de obtención de jugo tropical de Naranja

- Recepción de materia prima. En el laboratorio de Tecnología de Alimentos de la Universidad Nacional de Jaén se recibió 14.145 kg de frutos frescos de Naranja (*Solanum quitoense* Lam.). En esta etapa se efectuó una inspección visual para identificar y descartar frutos con daños mecánicos.
- Selección y clasificación. Los frutos fueron sometidos a una selección manual, separando aquellos que no cumplían con los parámetros de calidad establecidos (magullado, podrido o dañado).
- Pesado. La masa neta de la fruta seleccionada fue determinada mediante una balanza digital de precisión (T-Scale, TB, Taiwán), asegurando la estandarización en la dosificación de insumos y ajustes posteriores en la formulación. Tras este proceso se obtuvo un lote útil de 14 kg de fruta apta para procesamiento.
- Lavado y desinfección. Los frutos fueron lavados con agua potable para remover la suciedad superficial. Posteriormente, se realizó la desinfección por inmersión en una solución acuosa de dióxido de cloro (1 mL/L) durante 5 minutos, con agitación suave para garantizar un contacto uniforme.
- Cortado y despulpado. Los frutos desinfectados fueron cortados manualmente y sometidos a un proceso mecánico de despulpado de frutas (BOXA DFA-50B, Lima-Perú), separando la pulpa de las cáscaras.
- Licuado. La pulpa obtenida fue procesada en una licuadora industrial (SKYMSEN, LAR-25, Arequipa-Perú), logrando una suspensión homogénea de jugo, pulpa y sólidos finos.
- Filtrado. La suspensión fue pasada por un tamiz de 1 mm de malla, reteniendo semillas residuales, fragmentos de epicarpio y fibras gruesas. El resultado fue una pulpa refinada apta para la estandarización.
- Estandarización 1. Se tomaron 4 L de pulpa refinada y se mezclaron con 16 L de agua potable, ajustando el pH a 3.71 con un potenciómetro de sobremesa (Hanna, HI6221, Lima-Perú) y los sólidos solubles a 3 °Brix con un refractómetro digital (Milwaukee, MA871, Lima-Perú), logrando una dilución inicial uniforme.
- Estandarización 2. Se adicionaron los siguientes insumos para alcanzar el perfil sensorial y la estabilidad del producto: Azúcar refinada: 1.55 kg (edulcorante y corrector de sólidos solubles). Carboximetil Celulosa (0.05 %): 10 g (estabilizante

coloidal). Sorbato de potasio (0.03%): 6 g (conservante antimicrobiano). Posteriormente, el sistema fue ajustado a pH 3.65 y 10 °Brix.

- Pasteurización. Se pasteurizó por método convencional (LTLT - Low Temperature Long Time), el jugo fue sometido a un tratamiento térmico de 87 °C durante 10 minutos, para inactivar microorganismos patógenos y enzimas responsables de la degradación.

- Envasado. El producto caliente (aproximadamente 85 °C) fue envasado en botellas de vidrio con tapa twist off previamente higienizadas, utilizando la técnica de llenado en caliente para prevenir contaminación secundaria.

- Enfriado (shock térmico y vacío). Los envases sellados fueron enfriados rápidamente mediante inmersión en agua fría (shock térmico), lo que ocasionó una contracción del vapor interno y la generación de vacío parcial en el envase.

- Almacenado. El lote final, compuesto por 71 unidades de 250 mL cada una en tres estufas digitales de laboratorio (FAITHFUL, GX45BE, Lima-Perú) (25 muestras por estufa) a temperatura de 35, 45 y 55 °C durante 21, 14 y 7 días respectivamente.

a. Evaluación fisicoquímica

A los jugos de frutas obtenidos del proceso anterior (camu camu y naranjilla), se les sometió a los siguientes análisis fisicoquímicos:

- Potencial de hidrógeno

El método basado en el protocolo AOAC 981.12 para jugos concentrados, adaptado a jugos de frutas:

Para la preparación de la muestra se homogenizó el jugo tropical de Camu camu, la dilución se realizó en proporción jugo tropical en agua (10 mL:100 mL). Para la obtención del valor de pH se tomó el electrodo del pH-metro (APERA, PH700, Shanghái, China) calibrado, se sumergió en la muestra diluida y se procedió con la toma de la medición, este procedimiento se repitió para cada una de las muestras sometidas a temperaturas de almacenamiento (35, 45 y 55°C) y por triplicado. Para la muestra de jugo de naranjilla se siguió el mismo procedimiento por triplicado.

- Grados Brix

Se consideró el protocolo AOAC 932.12 para Sólidos Solubles en Frutas y Productos de Frutas, adaptado a jugos de frutas:

La preparación de la muestra requirió diluir el jugo tropical de Camu camu en agua en proporción adecuada (10 mL:100 mL). Posteriormente se colocó una pequeña

muestra sobre el prisma del refractómetro digital (MILWAUKEE, MA871, Carolina del Norte, EE. UU) calibrado a 20°C, con este procedimiento se obtuvo la lectura de los sólidos solubles presentes en el jugo diluido, el procedimiento se repitió para cada una de las muestras sometidas a temperatura de almacenamiento (35, 45 y 55°C) y por triplicado. El procedimiento se repite para el jugo tropical de naranjilla, por triplicado.

- **Acidez titulable**

El método basado en el protocolo AOAC 942.15 para acidez titulable, adaptable a jugos de frutas:

Para la preparación de la muestra se realizó la dilución de jugo tropical de Camu camu y agua (10 mL:100 mL), se tomó 10 mL de la dilución, se le añadió 3 gotas de indicador fenolftaleína y agitó suavemente. Para la titulación se requirió una solución de NaOH 0.1 N que desde la bureta comenzó a añadirse constantemente sobre la muestra preparada, agitando la misma constantemente hasta que vire a una coloración rosa pálido persistente. Se procedió a anotar la lectura del gasto exacto de NaOH (V). El procedimiento se repitió para cada una de las muestras sometidas a temperaturas de almacenamiento (35, 45 y 55°C) y por triplicado. Para el jugo de naranjilla se consideró el mismo procedimiento y por triplicado.

El cálculo de la acidez como porcentaje de Ácido Ascórbico se expresa en % de ácido ascórbico o g/100 mL, se determinó considerando la ecuación 4:

$$\% A \quad (\text{ácido ascórbico}) = \frac{V \times N \times P}{V_i \quad d \quad m \quad (m)} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

V : Volumen de NaOH gastado (mL)

N : Normalidad del NaOH (0.1N)

P : Peso equivalente del ácido ascórbico ($\frac{176.12 \text{ g/mol}}{2} = 88.06 \text{ g/e}$)

3.5.2. Contenido de vitamina C por cromatografía

Se consideró la metodología de (Oruña-Concha et al., 1998) con algunas adaptaciones:

a. Preparación de la muestra

Para la preparación de la muestra se requirió 15 mL de jugo tropical de naranjilla en tubos de centrifuga ISOLAB, estos pasaron a la centrífuga a 6000 rpm por 5 min, posteriormente el sobrenadante obtenido se pasó por un filtro de jeringa de 0.22 µm.

Las muestras de jugo tropical de Camu Camú fue diluida en agua considerando la relación 1:3, por triplicado.

b. Preparación de la curva estándar de vitamina C

Se tomó la referencia de (Doner & Hicks, 1981) con algunas modificaciones. La elaboración de la curva de calibración del ácido ascórbico para lo cual se acondicionó una solución madre de 2000 ppm, de ella se tomaron los puntos de calibración de 1000 ppm, 500 ppm, 250 ppm, 125 ppm, 50 ppm, 25 ppm.

c. Análisis cromatográfico

La identificación y cuantificación de vitamina C en los jugos de fruta de camu camu y de naranjilla se realizaron por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) para lo cual se utilizó un cromatógrafo líquido (DGL-20A3R, Shimadzu, Kioto, Japón).

Las concentraciones fueron preparadas con agua ultra pura, la muestra inyectada en el sistema cromatográfico que al momento del análisis contaba con una columna RESTEK Ultra C18 (150x4.6mm); de tamaño de partícula de 5 µm; con una fase móvil de ácido fosfórico 0.05M (Isocrático), el volumen de inyección (SIL-30AC) fue de 1 µL cuyo caudal registrado fue 1.32 mL/min, la temperatura del horno (CTO-20AC) marcó 30 °C y un detector de diodos (ARRAY DETECTOR SPD-M30A), la detección se realizó a 245 nm

3.5.3. Determinación del orden de reacción

a. Modelo de cinética química

Se evaluó el orden de reacción de la cinética química (orden cero y uno) para pérdida de compuestos deseables (ecuaciones (5) y (6)), según el resultado definido por el mayor valor del coeficiente de determinación (R^2) de la regresión construida con los datos obtenidos del decaimiento de la vitamina C frente al tiempo, para cada temperatura de almacenamiento y tipo de jugo tropical.

$$\text{Orden 0} \quad \frac{d[C_A]}{dt} = -k[C_A]^n \quad (5a)$$

$$C_A - C_{A_0} = -kt \quad (5b)$$

$$\text{Orden 1} \quad \frac{d[C_A]}{dt} = -k[C_A] \quad (6a)$$

$$[C_A] = [C_{A_0}]e^{-kt} \quad (6b)$$

Donde C_A y C_{A_0} son el contenido de vitamina C (mg/100 mL) en un tiempo determinado e inicial respectivamente, t es el tiempo (s) y n es el orden de la reacción (0 y 1).

Las ecuaciones (5b) y (6b) se linealizaron y, se trazaron gráficos para $[C_A]$ frente a t (ecuación (7)) y $\ln [C_A]$ frente a t (ecuación (8)), las constantes de velocidad k (1 o 2) se determinó a partir de las pendientes de los gráficos lineales:

$$\text{Orden 0} \quad C_A = C_{A_0} - k_1 t \quad (7)$$

$$\text{Orden 1} \quad \ln [C_A] = \ln [C_{A_0}] - k_2 t \quad (8)$$

b. Modelo Weibull – log logístico

También el ajuste de los datos de degradación isotérmica de vitamina C se realizó con el modelo weibuliano (ecuación (9)) propuesto por (Corradini y Peleg, 2006)

$$Y(t) = \frac{C(t)}{C_0} = e^{(-b(T)t^{n(T)})} \quad (9)$$

Donde $Y(t)$ es la tasa de supervivencia, $C(t)$ y C_0 son las concentraciones de vitamina C en un momento dado e inicial, respectivamente, y $b(T)$ y $n(T)$ son coeficientes del modelo de Weibull dependientes de la temperatura. El parámetro de velocidad $b(T)$ viene dada por el modelo log-logístico (ecuación 10) (Corradini & Peleg, 2005, 2006)

$$b(T) = k_3 \{1 + \exp[k_3(T - T_c)]\} \quad (10)$$

donde k_3 y T_c son los coeficientes de degradación y T la temperatura.

3.5.4. Vida útil de jugos tropical

La vida útil de los jugos de camu camu (*Myrciaria dubia*) y naranjilla (*Solanum quitoense*) se determinó mediante un modelo cinético basado en la degradación del ácido ascórbico, considerado como descriptor de calidad. Se empleó un ensayo de almacenamiento acelerado, utilizando temperaturas elevadas (35, 45 y 55 °C) para incrementar la velocidad de degradación y permitir la predicción a condiciones normales de almacenamiento.

El ensayo de almacenamiento acelerado se basó en someter las muestras a temperatura de 35, 45, 55 °C durante periodos definidos de (0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21) (0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14) (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7) respectivamente. En cada punto de

muestreo se determinó el contenido de ácido ascórbico mediante cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC).

Para la determinación del modelo cinético, los datos experimentales de concentración de vitamina C (C) en función del tiempo (t) se ajustaron a modelos cinéticos de orden 0 y 1.

a. Cálculo de la energía de activación (E_a) y del factor pre exponencial (b_0)

Con el modelo que mejor ajuste de los datos de pérdida de vitamina C exhibió ($>R^2$) se estimó el valor de la E_a (kJ/mol) y el factor pre exponencial b_0 (mg/100 mL) utilizando un ajuste tipo Arrhenius mediante la ecuación (11), construida con las pendientes de las gráficas de la línea recta entre el $\ln(b(T))$ y la $(1/(T + 273.15))$ para cada temperatura y empaque del estudio, donde R es la constante universal de los gases (8.31446 J/mol K) y T la temperatura constante del aire en el almacenamiento ($^{\circ}\text{C}$).

$$b(T) = b_0 e^{\left[-\left(\frac{E_a}{R}\right)\frac{1}{(T+273.15)}\right]} \quad (11a)$$

$$\ln [b(T)] = \ln \left[b_0 e^{\left[-\left(\frac{E_a}{R}\right)\frac{1}{(T+273.15)}\right]} \right] \quad (11b)$$

$$\ln [b(T)] = \ln [b_0] - \left[\left(\frac{E_a}{R} \right) \frac{1}{(T + 273.15)} \right] \quad (11c)$$

b. Estimación del tiempo de vida útil de retención de vitamina C

Usando la ecuación (12) se calculó el tiempo de vida útil de retención del 80% de vitamina C (t_{80}) en las muestras de jugo tropical de camu camu y naranjilla, con un ajuste weibuliano. Donde $C_{A\ 8}$ es la concentración de vitamina C (mg/100 mL) donde se pierde el 20% de la concentración inicial ($C_{A\ 0} \times 0.80$).

$$\text{Weibull} \quad t_{80} = \left[\frac{-\ln [0.80]}{b} \right]^{1/n} \quad (12)$$

3.6. Técnicas de análisis de resultados

Todas las mediciones fisicoquímicas se realizaron por triplicado y los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar. El análisis estadístico de los datos experimentales se realizó mediante un análisis de varianza factorial de dos vías (ANOVA), considerando como factores la temperatura de almacenamiento y el tiempo,

con el objetivo de evaluar su efecto sobre la degradación del ácido ascórbico en los jugos tropicales estudiados. Cuando se detectaron diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$), se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey (HSD) para identificar diferencias estadísticas entre los distintos tiempos de almacenamiento dentro de cada nivel de temperatura. Los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar de tres repeticiones independientes. El nivel de significancia estadística se estableció en $p < 0.05$.

La cinética de degradación isotérmica de la vitamina C se modeló utilizando ecuaciones de orden cero, de primer orden y de Weibull. Se aplicó un análisis de regresión no lineal para estimar los parámetros de Weibull $b(T)$ y $n(T)$ de acuerdo con el modelo propuesto por Corradini y Peleg (2006). El rendimiento del modelo se evaluó utilizando el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (MSE) y el error cuadrático medio de la raíz (RMSE). La dependencia de la temperatura del parámetro de velocidad de Weibull $b(T)$ se describió con mayor detalle utilizando tanto el modelo secundario de Arrhenius como la relación log-logística. Los valores de la energía de activación (E_a) se estimaron a partir de la ecuación de Arrhenius linealizada mediante la regresión de $\ln(b)$ frente a la temperatura absoluta recíproca ($1/T$). Los valores de vida útil correspondientes a una retención del 80 % de vitamina C (t_{80}) se calcularon a partir de los parámetros de Weibull y, posteriormente, se extrapolaron a temperaturas de almacenamiento más bajas utilizando relaciones de tipo Arrhenius. El modelado cinético no lineal y la estimación de parámetros se realizaron utilizando Python (versión 3.11; Python Software Foundation, Wilmington, DE, EE. UU.) con rutinas de optimización de mínimos cuadrados implementadas en la biblioteca SciPy. Los análisis estadísticos y los modelos de regresión se complementaron con OriginPro 2023 (OriginLab Corp., Northampton, MA, EE. UU.) para el ajuste gráfico y la validación de las relaciones cinéticas.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

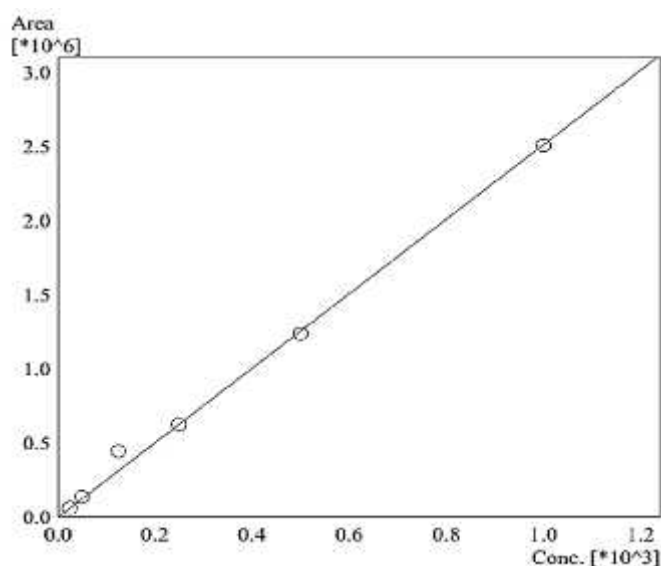
4.1. Resultados

4.1.1. Cuantificación de ácido ascórbico

En la Figura 3 se observa la curva de calibración de vitamina C, estableciendo el modelo de regresión $y = 2460.9x + 35708$ con un R^2 de 0.9967470. (Anexo 1)

Figura 3

Curva de calibración de ácido ascórbico



En las Tablas 3 y 4 se presentan los resultados de la degradación de la vitamina C en el almacenamiento acelerado de jugos tropicales de camu camu y naranjilla respectivamente.

El ANOVA bidireccional reveló que el tiempo de almacenamiento, la temperatura y su interacción afectaban significativamente a la degradación de la vitamina C en el zumo de camu camu ($p < 0,001$) (Tabla 3). Los resultados indican una reducción progresiva del contenido de ácido ascórbico a lo largo del almacenamiento en todas las condiciones de temperatura evaluadas.

Según la prueba de comparaciones múltiples de Tukey, se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre la mayoría de los intervalos de almacenamiento en cada nivel de temperatura (Tabla S3). A 35 °C, el contenido de vitamina C disminuyó de 1090.17 mg/100 ml el día 0 a 863.54 mg/100 ml tras 21 días, con agrupaciones estadísticamente distintas a lo largo de los periodos de almacenamiento. Se observó un comportamiento similar a 45 °C y 55 °C, aunque la degradación se produjo más rápidamente a medida que aumentaba la temperatura.

A 55 °C, la reducción de la concentración de vitamina C ya era significativa tras el primer día de almacenamiento, lo que indica una cinética de degradación acelerada en comparación con temperaturas más bajas. El efecto de interacción entre la temperatura y el tiempo confirmó que la temperatura de almacenamiento intensificaba la tasa de pérdida de ácido ascórbico con el paso del tiempo.

Tabla 3

Valores de ácido ascórbico durante el almacenamiento para jugo de camu camu.

Contenido total de ácido ascórbico (mg/100 mL)					
35 °C		45 °C		55 °C	
Tiempo (días)	Vit. C (mg/100 mL)	Tiempo (días)	Vit. C (mg/100 mL)	Tiempo (días)	Vit. C (mg/100 mL)
0	1090.17±5.63 ^a	0	1090.17±5.63 ^a	0	1090.17±5.63 ^a
3	975.59±6.70 ^b	2	920.56±2.66 ^b	1	918.19±3.18 ^b
6	947.95±2.97 ^c	4	910.59±2.76 ^c	2	892.90±0.76 ^c
9	901.85±0.81 ^d	6	891.21±1.66 ^d	3	880.84±1.81 ^d
12	901.80±6.94 ^d	8	869.23±5.46 ^e	4	864.30±0.38 ^e
15	888.45±3.52 ^e	10	867.84±1.13 ^e	5	841.51±1.48 ^f
18	881.43±5.02 ^e	12	856.88±1.25 ^f	6	814.64±1.13 ^g
21	863.54±6.51 ^f	14	843.40±2.02 ^g	7	806.13±8.79 ^h

Nota. Vita C: Contenido de ácido ascórbico en mg/100 mL. ±: Desviación Estándar Media para 3 repeticiones. Las letras minúsculas diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas entre los tiempos de almacenamiento a la misma temperatura, según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

El ANOVA bidireccional mostró que el tiempo de almacenamiento y la temperatura influían significativamente en la degradación de la vitamina C en el zumo de naranjilla, con una interacción significativa entre ambos factores ($p < 0,001$) (Tabla 4). Sin embargo, la magnitud de la degradación fue menor que la observada en el zumo de camu camu.

La prueba de Tukey indicó diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos de almacenamiento a cada nivel de temperatura ($p < 0,05$). A 35 °C, el contenido de vitamina C disminuyó gradualmente de 43.47 mg/100 ml el día 0 a 37.15 mg/100 ml tras 21 días. Las diferencias entre los primeros tiempos de almacenamiento fueron menos pronunciadas, pero se hicieron significativas durante las etapas posteriores de almacenamiento.

A temperaturas más altas (45 °C y 55 °C), la degradación se produjo más rápidamente, detectándose reducciones significativas en los primeros días de almacenamiento. La interacción estadística entre la temperatura y el tiempo confirmó

que el aumento de la temperatura aceleraba el proceso de degradación a lo largo de todo el período de almacenamiento.

Tabla 4

Valores de ácido ascórbico durante el almacenamiento para el jugo tropical de naranjilla.

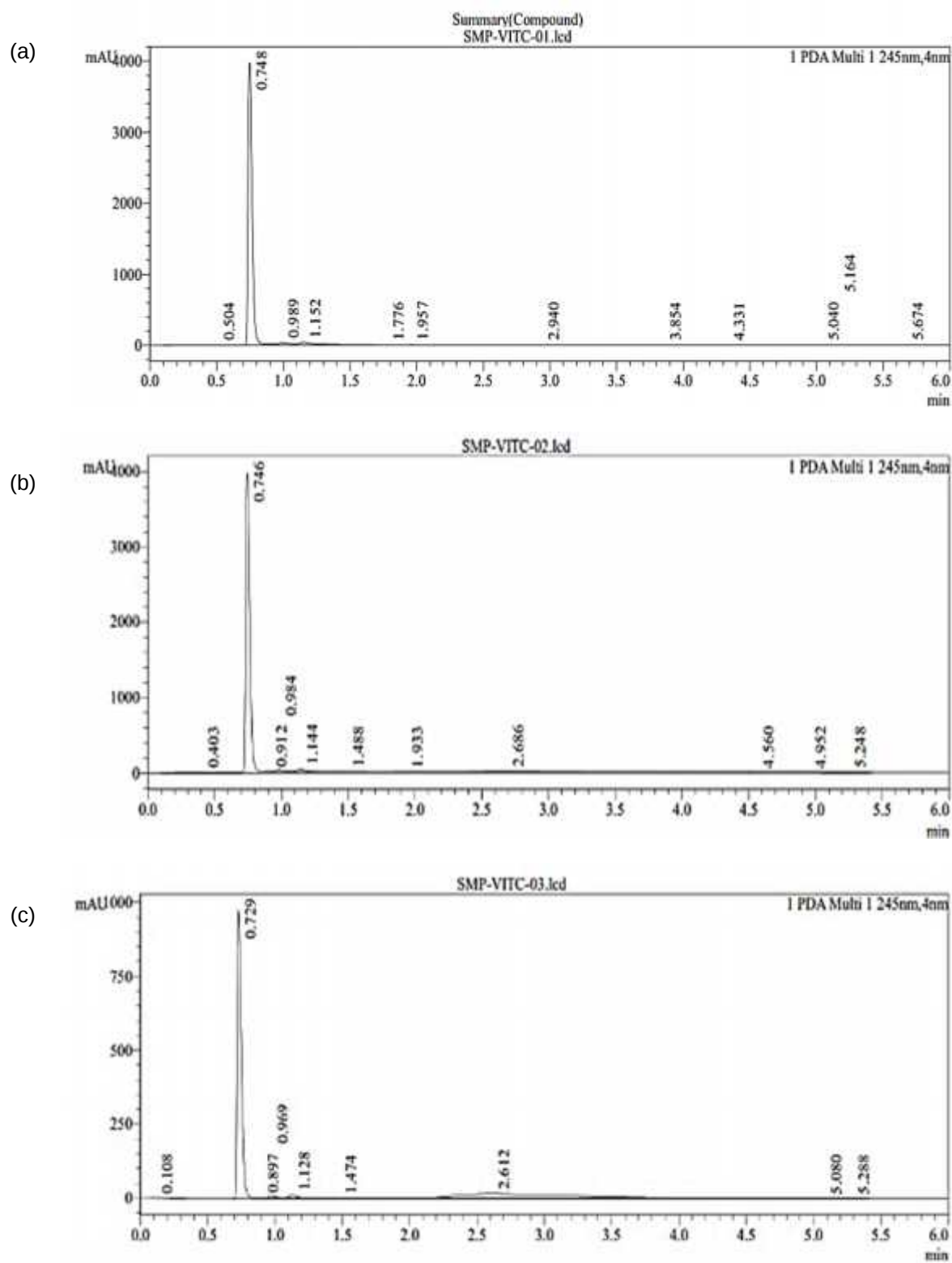
Contenido total de ácido ascórbico (mg/100 mL)					
35 °C		45 °C		55 °C	
Tiempo (días)	Vit. C (mg/100 mL)	Tiempo (días)	Vit. C (mg/100 mL)	Tiempo (días)	Vit. C (mg/100 mL)
0	43.47±2.02 ^a	0	43.47±2.02 ^a	0	43.47±2.02 ^a
3	42.32±0.64 ^{ab}	2	40.33±1.57 ^b	1	37.91±2.77 ^b
6	41.94±7.08 ^{ab}	4	39.05±0.68 ^c	2	37.15±5.82 ^b
9	40.08±0.96 ^{bc}	6	38.87±0.11 ^c	3	36.67±0.78 ^{bc}
12	39.99±0.56 ^{bc}	8	37.78±0.84 ^d	4	36.52±0.53 ^{bc}
15	39.00±0.47 ^{cd}	10	37.68±0.22 ^d	5	35.68±0.15 ^{cd}
18	38.30±0.18 ^d	12	36.25±0.32 ^e	6	35.65±0.14 ^{cd}
21	37.15±0.12 ^e	14	35.00±0.51 ^f	7	34.84±0.15 ^d

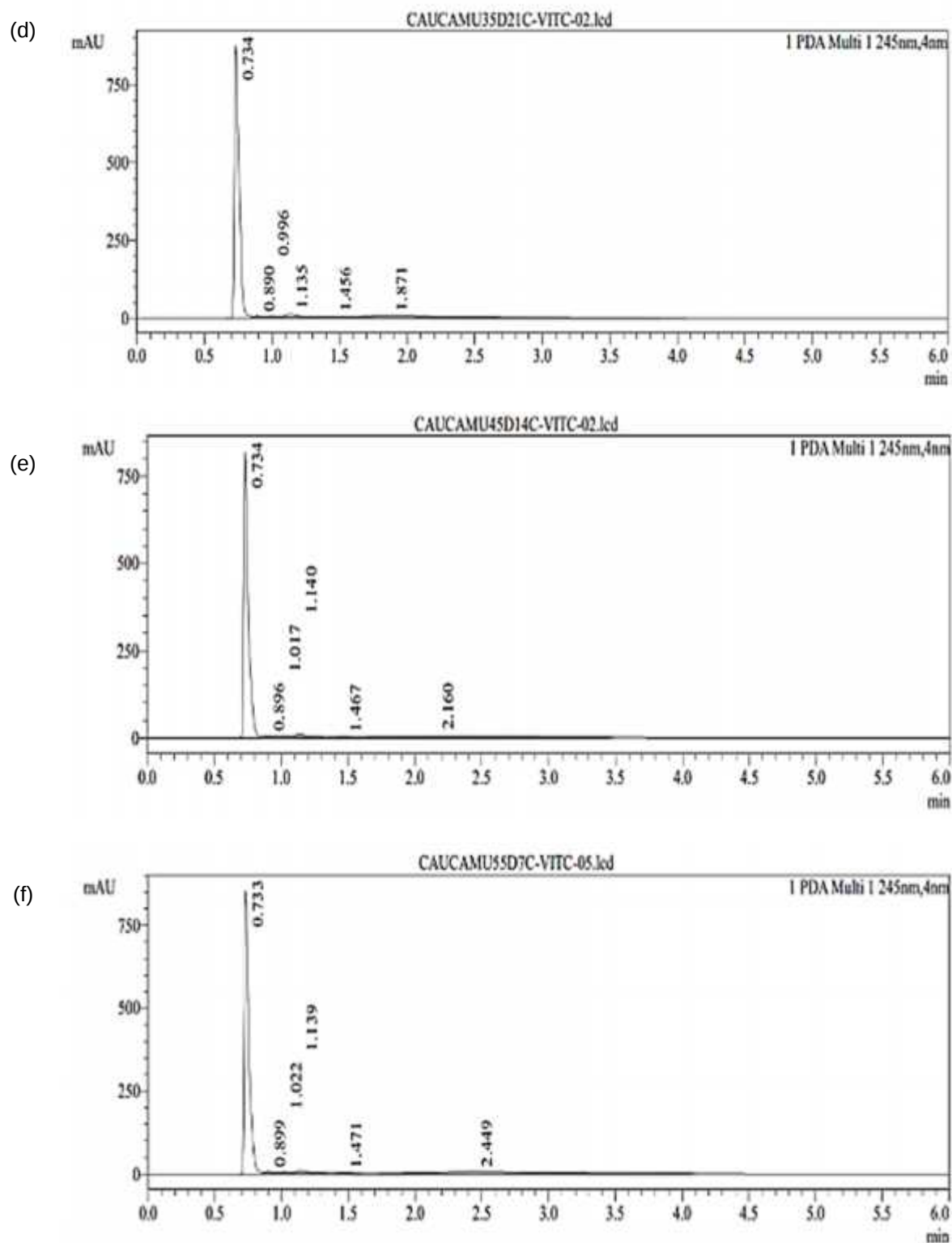
Nota. Vita C: Contenido de ácido ascórbico en mg/100 ml. ±: Desviación Estándar Media para 3 repeticiones. Las letras minúsculas diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas entre los tiempos de almacenamiento a la misma temperatura, según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Además, el ANOVA bidireccional (Anexo 2) reveló efectos significativos del tiempo de almacenamiento, la temperatura y su interacción sobre la degradación de la vitamina C en ambos zumos ($p < 0,001$). El efecto fue más pronunciado en el zumo de camu camu, lo que indica una mayor sensibilidad de la degradación del ácido ascórbico a las condiciones de almacenamiento en comparación con el zumo de naranjilla.

Figura 4

Cromatograma para el jugo tropical de Camu camu evaluado el día 0, 7, 14, 21 días de almacenamiento a temperatura controlada.

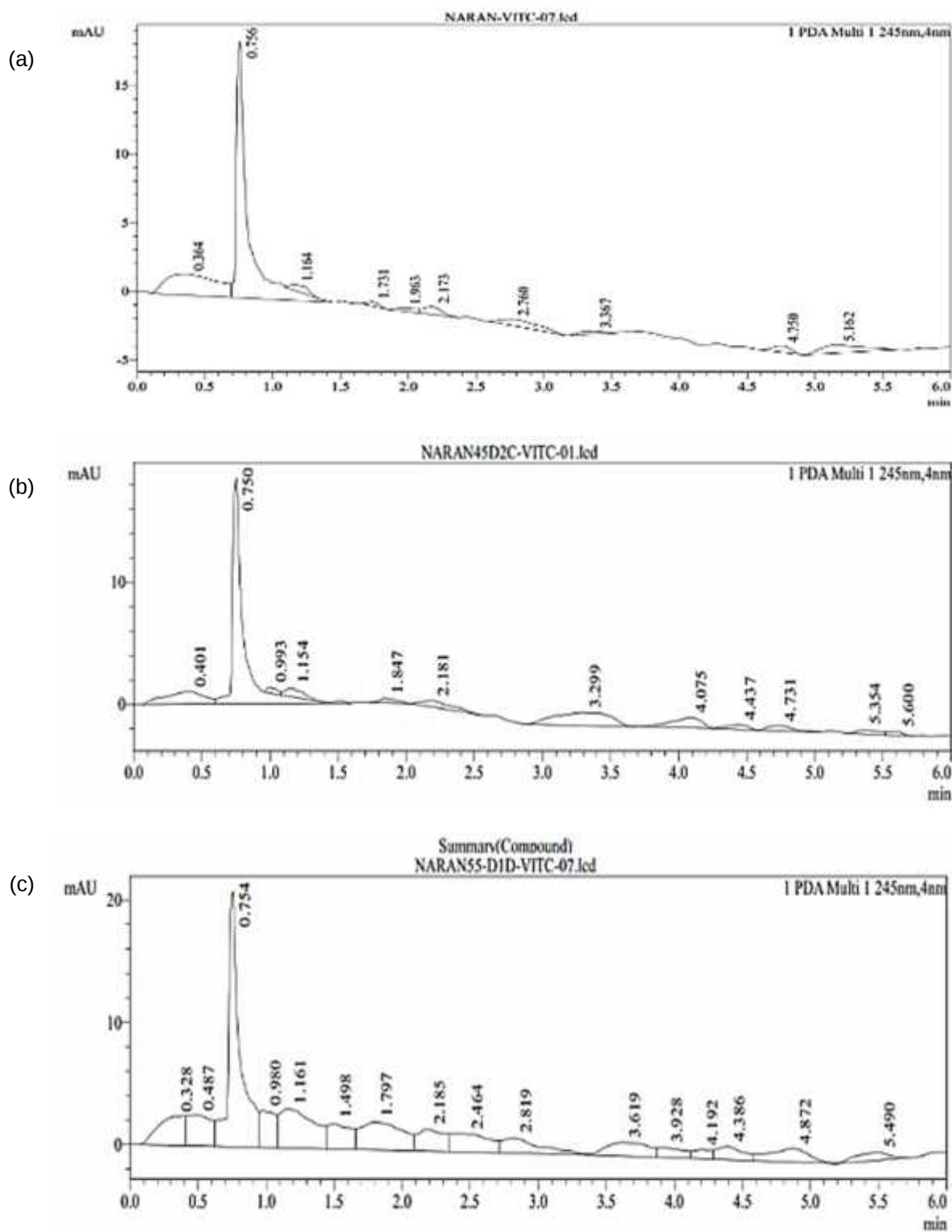


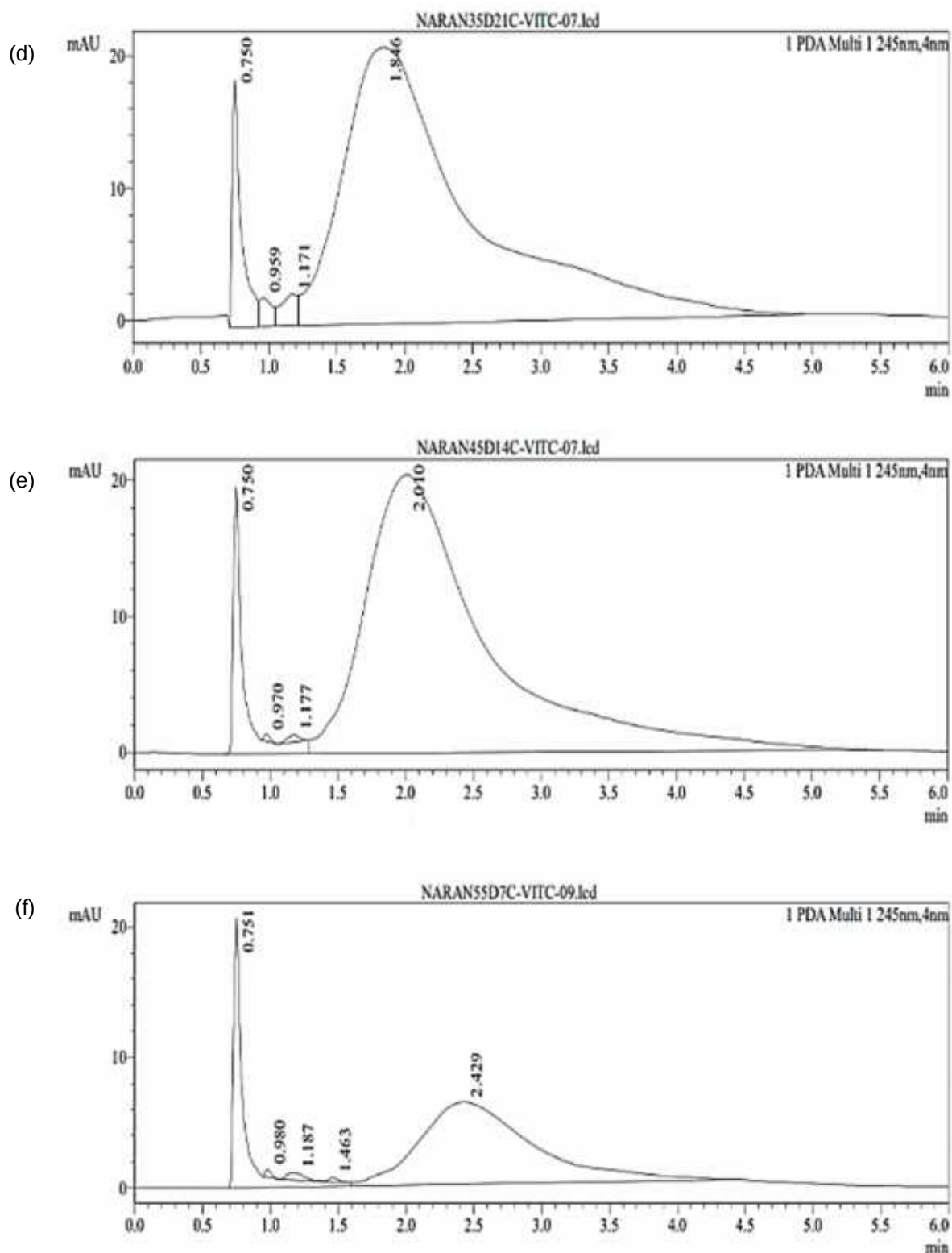


Nota. Las figuras (a), (b), (c) reflejan el cromatograma de las muestras analizadas el día 0. Las figuras (d), (e), (f) detallan el cromatograma de las muestras tomada en el último día de evaluación, día 21 para muestras almacenadas a 35 °C, día 14 para muestras almacenadas a 45 °C, día 7 para muestras almacenadas a 55 °C respectivamente.

Figura 5

Cromatograma para el jugo tropical de Naranjilla evaluado el día 0, 7, 14, 21 días de almacenamiento a temperatura controlada





Nota. Las figuras (a), (b), (c) reflejan el cromatograma de las muestras analizadas el día 0. Las figuras (d), (e), (f) detallan el cromatograma de las muestras tomada en el último día de evaluación, día 21 para muestras almacenadas a 35 °C, día 14 para muestras almacenadas a 45 °C, día 7 para muestras almacenadas a 55 °C respectivamente.

4.1.2. Determinación del orden de reacción

En la Tabla 5 se muestra la comparación de las regresiones y el R^2 determinadas para la cinética de deterioro del ácido ascórbico para orden cero, uno y Weibull de las muestras de jugos tropicales en las distintas condiciones de almacenamiento, con lo cual se definió que el modelo que mejor ajustó la pérdida de la vitamina C para los jugos tropicales estudiados exhibe un comportamiento weibuliano.

Tabla 5

Evaluación del modelo cinético (orden 0 y 1) y Weibull

Jugo tropical	Modelo	Temperatura			Selección
		35 °C	45 °C	55 °C	
		Función (R^2)	Función (R^2)	Función (R^2)	
Camu camu	Orden 0	$y = -8.8722x + 1024.5$ (0.7803)	$y = -13.072x + 997.74$ (0.6597)	$y = -31.866x + 1000.1$ (0.7526)	Weibull
	Orden 1	$y = -0.0093x + 6.9313$ (0.8051)	$y = -0.0138x + 6.9031$ (0.691)	$y = -0.0346x + 6.9067$ (0.7914)	
	Weibull	$y = e^{(-0.07695t^{0.3})}$ (0.9895)	$y = e^{(-0.1377t^{0.2})}$ (0.9954)	$y = e^{(-0.16037t^{0.3})}$ (0.9905)	
Naranjilla	Orden 0	$y = -0.2908x + 43.334$ (0.9807)	$y = -0.5053x + 42.091$ (0.9133)	$y = -0.9083x + 40.416$ (0.6816)	Weibull
	Orden 1	$y = -0.0072x + 3.7704$ (0.9815)	$y = -0.013x + 3.7412$ (0.926)	$y = -0.0236x + 3.6978$ (0.7087)	
	Weibull	$y = e^{(-0.00804t^{0.9})}$ (0.9812)	$y = e^{(-0.04493t^{0.5})}$ (0.9678)	$y = e^{(-0.1325t^{0.2})}$ (0.9931)	

Nota. Selección: modelo que obtuvo mayor ajuste con respecto al R^2 .

4.1.3. Constantes cinéticas de degradación (k) a cada temperatura evaluada.

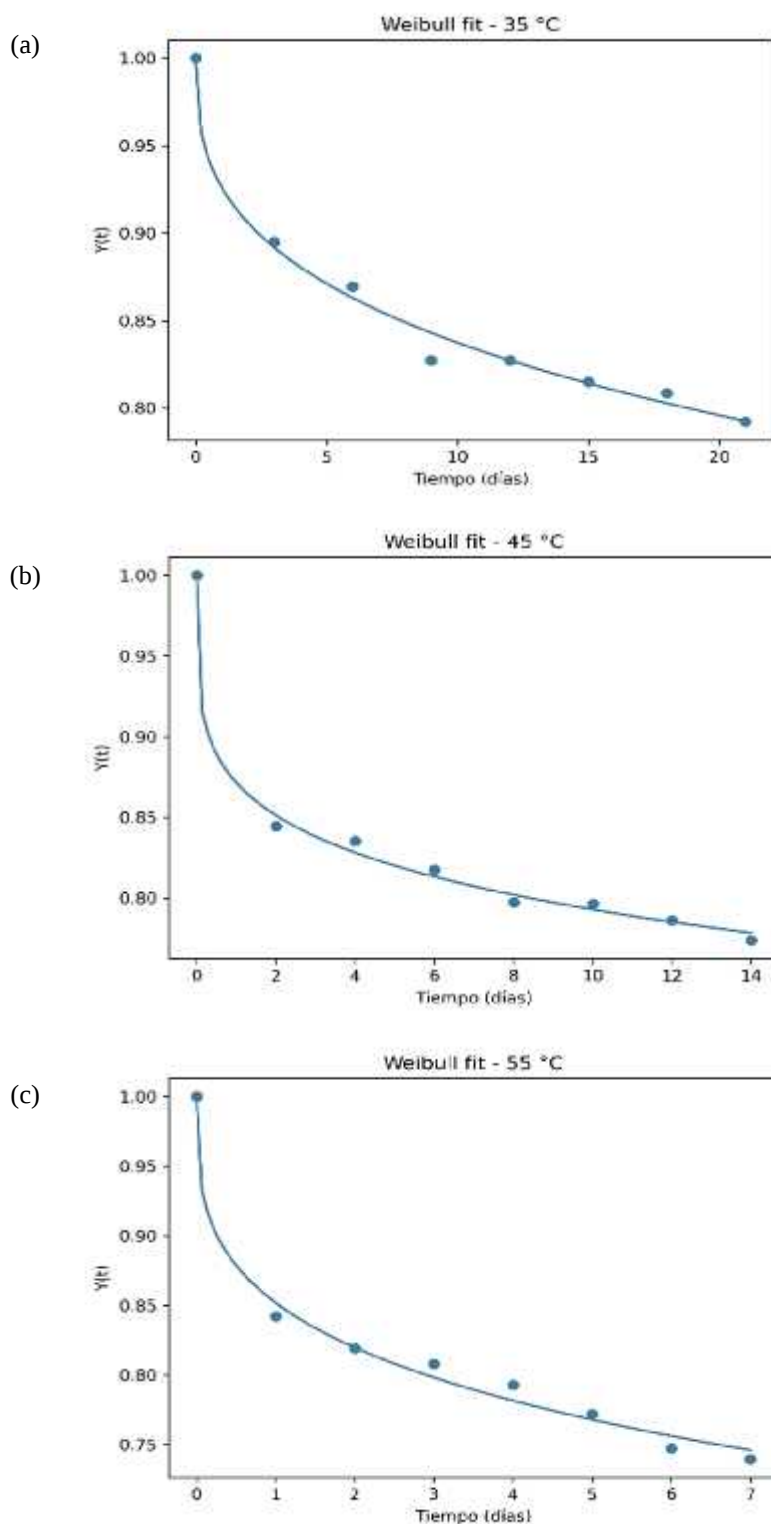
a. Modelamiento Weibull y log-logístico

Camu camu

La degradación de la vitamina C en el jugo tropical de camu camu almacenado a 35, 45 y 55 °C fue descrita mediante el modelo de Weibull propuesto por (Corradini & Peleg, 2006) (Figuras 6 y 7). Los resultados obtenidos evidenciaron un excelente ajuste del modelo en todas las condiciones evaluadas, con coeficientes de determinación superiores a 0.98 (Tabla 6). Estos resultados confirman la idoneidad del modelo Weibull para describir cinéticas de degradación no lineales en matrices alimentarias complejas.

Figura 6

Modelamiento Weibull de la degradación de vitamina C del jugo tropical de camu camu. (a) 35 °C, (b) 45 °C y (c) 55 °C.

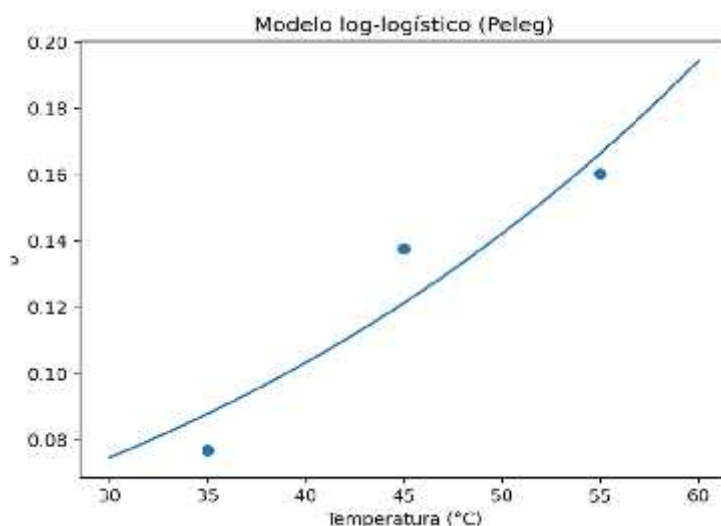


El parámetro de velocidad b aumentó progresivamente con la temperatura, pasando de 0.07695 a 0.16037 entre 35 y 55 °C, lo cual evidencia una aceleración de

la degradación térmica de la vitamina C. Este comportamiento es consistente con la naturaleza termolábil del ácido ascórbico y ha sido ampliamente documentado en la literatura (Dhuique-Mayer et al., 2007b). Por otro lado, el parámetro de forma n presentó valores inferiores a la unidad en todos los casos (0.22 - 0.36), indicando una cinética no exponencial caracterizada por una rápida degradación inicial seguida de una fase de desaceleración. Este fenómeno, conocido como tailing effect, es común en sistemas donde la disponibilidad de oxígeno disminuye con el tiempo o donde existen compuestos antioxidantes que modulan la velocidad de reacción (Van Bree et al., 2012).

Figura 7

Modelamiento log-logístico de la degradación de vitamina C del jugo tropical de camu camu.



Además, en la Fig. 7 el modelo log-logístico propuesto por (Corradini & Peleg, 2006) permitió describir la dependencia térmica del parámetro de velocidad b en función de la temperatura. Los parámetros obtenidos fueron $k = 0.03386$ y $T_c = 105.46$ °C, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.8858$. El valor relativamente alto de T_c sugiere que no se alcanza una transición térmica abrupta en el rango evaluado, mientras que el valor de k indica una moderada sensibilidad del sistema a la temperatura.

Tabla 6

Parámetros de los modelos Weibull y log-logístico para el jugo tropical de camu camu

Modelo Weibull					
$Y(t) = \frac{C(t)}{C_0} = e^{(-b(T)t^{n(T)})}$					
Temperatura	$b(T)$	$n(T)$	R^2	MSE	RMSE
35 °C	0.07695	0.36305	0.9895	0.000042	0.00648
45 °C	0.1377	0.22699	0.9954	0.000021	0.00461
55 °C	0.16037	0.30987	0.9905	0.000057	0.00752
Modelo Log-logístico					
$b(T) = k_3 \{1 + \exp[k_3(T - T_c)]\}$					
$b(T)$ vs T	k_3	T_c	R^2	MSE	RMSE
Weibull	0.03386	105.46 °C	0.8858	0.000142	0.01190

Nota. b: parámetro. n: parámetro. R^2 : coeficiente de bondad de ajuste. MSE: coeficiente. RMSE: coeficiente. k: constante. T_c : temperatura crítica.

Naranja

El modelo de Weibull describió adecuadamente la degradación de vitamina C en el jugo de naranja, con coeficientes de determinación superiores a 0.96 en todas las temperaturas evaluadas.

Figura 8

Modelamiento Weibull de la degradación de vitamina C del jugo tropical de Naranja.

(a) 35 °C, (b) 45 °C y (c) 55 °C.

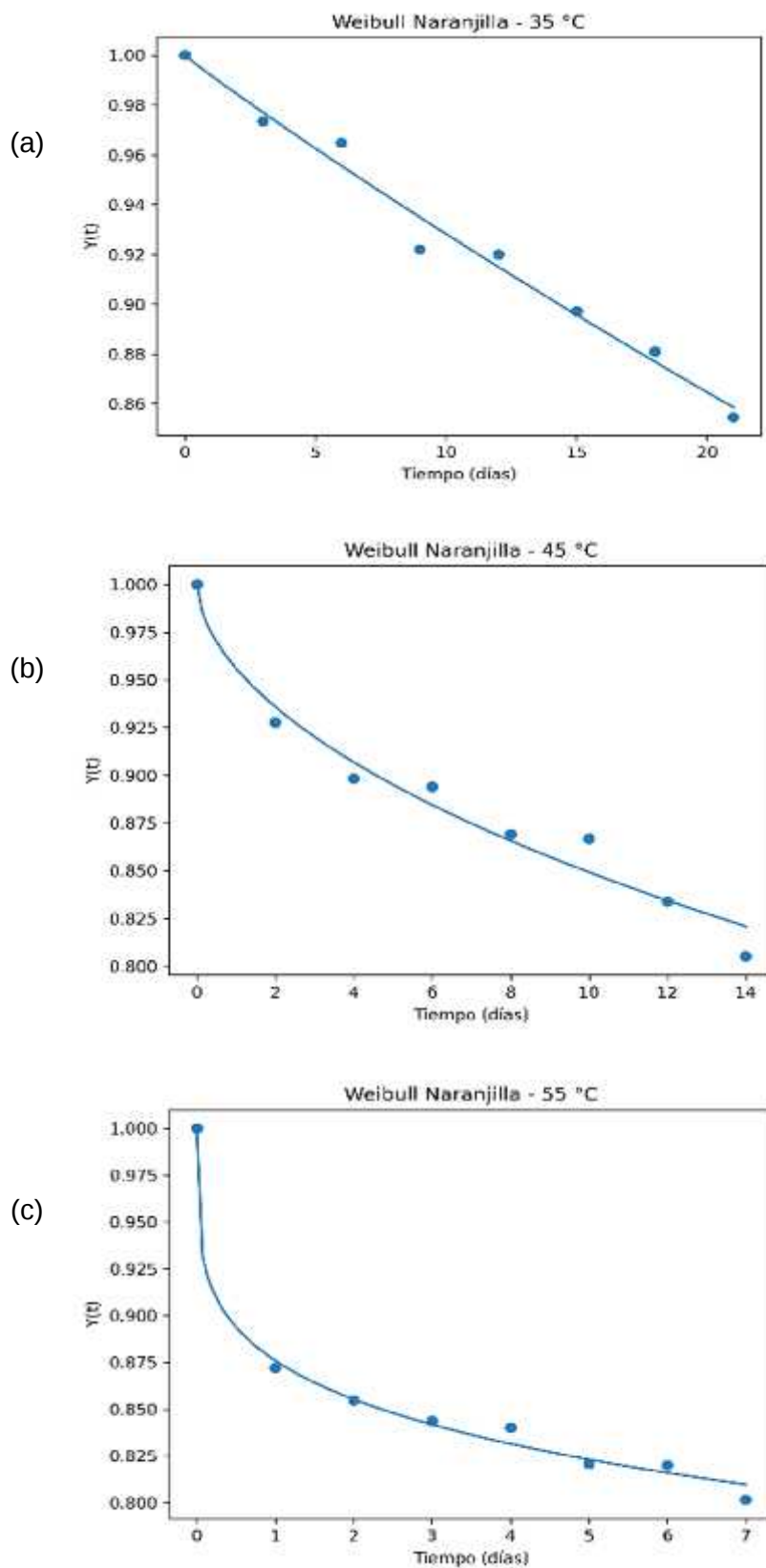
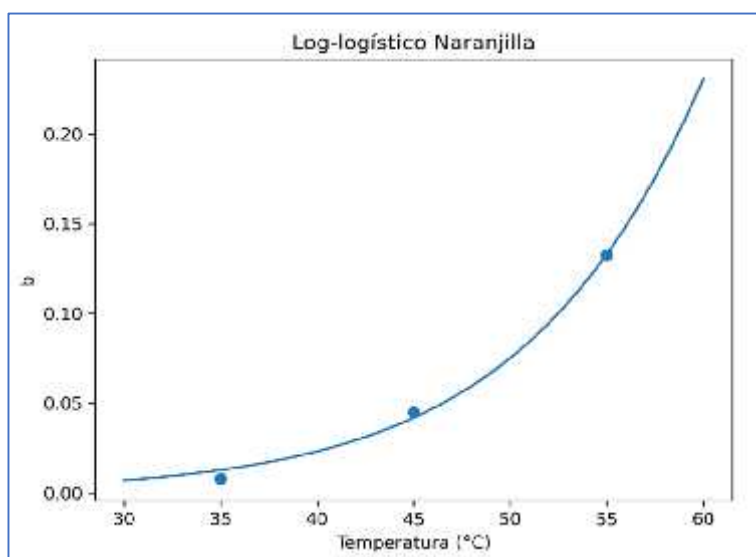


Figura 9

Modelamiento log-logístico de la degradación de vitamina C del jugo tropical de naranjilla.



El parámetro de velocidad (b) mostró un incremento significativo con la temperatura, evidenciando la influencia térmica en la degradación del ácido ascórbico. El parámetro de forma (n) evidenció una transición en el comportamiento cinético, pasando de valores cercanos a la unidad a 35 °C, lo que sugiere una cinética de tipo exponencial, hacia valores significativamente menores a 55 °C, indicando una degradación no lineal con desaceleración progresiva.

Tabla 7

Parámetros de los modelos Weibull y log-logístico para el jugo tropical de Naranjilla

Modelo Weibull					
$Y(t) = \frac{C(t)}{C_0} = e^{(-b(T)t^{n(T)})}$					
Temperatura	$b(T)$	$n(T)$	R^2	MSE	RMSE
35 °C	0.00804	0.96644	0.9812	4.1×10^{-4}	0.00637
45 °C	0.04493	0.56064	0.9678	1.0×10^{-4}	0.01000
55 °C	0.13250	0.23923	0.9931	2.3×10^{-4}	0.00480
Modelo Log-logístico					
$b(T) = \frac{1}{1 + \exp[k_3(T - T_c)]}$					
$b(T)$ vs T	k_3	T_c	R^2	MSE	RMSE
Weibull	0.11997	71.26	0.9961	1.07×10^{-4}	0.00327

Nota. b: parámetro. n: parámetro. R^2 : coeficiente de bondad de ajuste. MSE: coeficiente. RMSE: coeficiente. k: constante. T_c : temperatura crítica.

La dependencia térmica del parámetro b fue adecuadamente descrita mediante el modelo log-logístico de (Corradini & Peleg, 2006) obteniéndose valores de $k = 0.11997$ y $T_c = 71.26$ °C, con un excelente ajuste ($R^2 = 0.996$).

4.1.4. Modelamiento tipo Arrhenius para Weibull

La dependencia del parámetro de velocidad b con la temperatura fue evaluada mediante el modelo secundario de Arrhenius.

En la tabla 8 se muestra la ecuación de Arrhenius determinada para cada muestra de jugo tropical a partir de los valores del factor pre exponencial (b_0) y energía de activación (E_a) calculada del modelo de Weibull.

Tabla 8

Parámetros del modelo de Arrhenius para Weibull

Jugo tropical	E_a (kJ/mol)	b_0	Ec. de Arrhenius determinada	R^2
Camu camu	31.05	1.505×10^4	$b(T) = 1.505 \times 10^4 e^{-\left(\frac{31.05}{R}\right)}$	0.908
Naranja	117.8	1.3×10^{17}	$b(T) = 1.3 \times 10^{17} e^{-\left(\frac{117.8}{R}\right)}$	0.995

El modelo de Arrhenius permitió estimar una energía de activación (E_a) de 31.05 kJ/mol, valor que se encuentra dentro del rango reportado para la degradación de vitamina C en sistemas alimentarios (aproximadamente 30 - 70 kJ/mol) (Dhuique-Mayer et al., 2007b). Este valor relativamente moderado sugiere que, si bien la temperatura influye en la degradación, otros factores como el pH, la disponibilidad de oxígeno y la composición de la matriz también desempeñan un papel determinante.

En este sentido, el jugo de camu camu presenta un pH ácido (>3.2), lo cual contribuye a estabilizar la vitamina C, ya que la degradación del ácido ascórbico es más lenta en medios ácidos en comparación con condiciones cercanas a la neutralidad (Lee & Kader, 2000b). Asimismo, el uso de envases de vidrio, caracterizados por su baja permeabilidad al oxígeno, podría haber limitado la oxidación del ácido ascórbico durante el almacenamiento, generando una cinética de degradación más lenta.

La naranja presenta mayor sensibilidad térmica que el camu camu, la dependencia térmica del parámetro de velocidad b del modelo de Weibull fue descrita mediante la ecuación de Arrhenius, obteniéndose una energía de activación (E_a) de 117.8 kJ/mol. Este valor indica una alta sensibilidad del sistema a la temperatura, evidenciando que pequeños incrementos térmicos generan aumentos significativos en la velocidad de degradación de la vitamina C. En comparación con el jugo de camu

camu, la naranjilla presentó una mayor energía de activación, lo que sugiere una menor estabilidad térmica del ácido ascórbico en esta matriz.

4.1.5. Estimación del tiempo de vida útil de retención de ácido ascórbico

En la Tabla 9 se observa los parámetros calculados del modelo de Weibull y los tiempos de vida útil (t_{80}), siguiendo una cinética química de orden cero, para las muestras de café a las temperaturas de aceleración del estudio (35, 45 y 55 °C) y de conservación cotidiano de los supermercados y hogares (15, 20 y 25 °C).

Tabla 9

Estimación de vida útil (t_{80}) para la degradación de ácido ascórbico en jugos tropicales

Presentación	Temperatura (°C)	b	n	t_{80} Weibull (días)
Camu camu	35	0.07695	0.36305	19
	45	0.1377	0.22699	8
	55	0.16037	0.30987	3
Naranjilla	35	0.00804	0.96644	31
	45	0.04493	0.56064	17
	55	0.13250	0.23923	9

La vida útil del jugo tropical de camu camu fue extrapolada a temperaturas inferiores mediante el modelo de Arrhenius aplicado al tiempo de retención del 80% de vitamina C (t_{80}). Los resultados indicaron que la vida útil se incrementa significativamente a medida que disminuye la temperatura, estimándose valores de 524 a 32 días entre 5 y 30 °C, respectivamente. Para la naranjilla la vida útil fue de 31.15, 17.44 y 8.84 días a 35, 45 y 55 °C, respectivamente, mostrando una reducción progresiva con el incremento de la temperatura.

En comparación con el jugo de camu camu, la naranjilla presentó una mayor estabilidad relativa, lo cual podría atribuirse a su menor concentración inicial de vitamina C y a diferencias en la composición de la matriz

a. Predicción del tiempo de vida útil de retención de ácido ascórbico

En la tabla 11 se observa la predicción de vida útil (t_{80}) de los jugos tropicales para temperaturas de almacenamiento de refrigeración y cotidianas (5, 10, 15, 20, 25 y 30 °C), con un ajuste tipo Arrhenius en función de los t_{80} estimados con Weibull para las temperaturas de estudio (35, 45 y 55 °C) según la ecuación (13).

$$t_{80} = Ae^{\left[-\left(\frac{E_a}{R}\right)\left(\frac{1}{T+273.15}\right)\right]} \quad (13a)$$

$$\ln [t_{80}] = \ln \left[Ae^{\left[-\left(\frac{E_a}{R}\right)\left(\frac{1}{T+273.15}\right)\right]} \right] \quad (13b)$$

$$\ln [t_{80}] = \ln[A] - \left[\left(\frac{E_a}{R}\right) \frac{1}{(T + 273.15)} \right] \quad (13c)$$

Los resultados de las regresiones lineales de la ecuación (13) se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10

Parámetros del ajuste tipo Arrhenius vs t_{80} estimados

Presentación	Regresión	E_a (kJ/mol)	A	R^2
Camu camu	$y = 9420.4x - 27.588$	78.3	1.04422×10^{-12}	0.9907
Naranjilla	$y = 6363.1x - 17.188$	52.9	3.42981×10^{-08}	0.9959

La predicción de la vida útil, definida como el tiempo necesario para alcanzar el 80% de retención de vitamina C (t_{80}), evidenció una marcada dependencia de la temperatura en ambos jugos tropicales, con una reducción exponencial de t_{80} conforme se incrementa la temperatura de almacenamiento. Este comportamiento es consistente con la naturaleza termolábil del ácido ascórbico y con la cinética de degradación dependiente de temperatura descrita ampliamente en matrices alimentarias. En el caso del jugo de camu camu, se observaron valores de vida útil significativamente superiores a bajas temperaturas (524 días a 5 °C), los cuales decrecieron progresivamente hasta 32 días a 30 °C. Por su parte, el jugo de naranjilla mostró valores de t_{80} menores a bajas temperaturas (292 días a 5 °C), pero con una tendencia de convergencia respecto al camu camu conforme aumenta la temperatura, alcanzando incluso valores ligeramente superiores a 25–30 °C (63 vs 54 días y 44 vs 32 días, respectivamente) (Tabla 11). Este comportamiento sugiere que, aunque el camu camu posee una mayor estabilidad inicial atribuida a su elevada concentración de compuestos antioxidantes (principalmente vitamina C y polifenoles), dicha ventaja se reduce a temperaturas más elevadas debido a una mayor sensibilidad térmica del sistema.

Tabla 11*Predicción de vida útil (t_{80}) para la degradación de ácido ascórbico en jugos tropicales*

Temperatura (°C)	t_{80} (días) Weibull	
	Camu camu	Naranja
5	524	292
10	288	195
15	162	132
20	93	91
25	54	63
30	32	44

Los resultados evidencian que la estabilidad de la vitamina C en jugos tropicales no depende únicamente de su concentración inicial, sino también de la interacción entre la matriz y la temperatura, lo cual determina la dinámica de degradación y, en consecuencia, la vida útil del producto.

4.1.6. Análisis fisicoquímico

Los resultados del análisis físico químico de los jugos tropicales de camu camu y naranja a las temperaturas de almacenamiento acelerado se observan en las figuras 10, 11 y 12.

Se aplicó ANOVA de un factor (tiempo) por temperatura para acidez, pH y °Brix, seguido de Tukey ($\alpha=0.05$). En camu camu se observó un efecto significativo del tiempo sobre los tres parámetros a 35, 45 y 55 °C ($p<0.001$ en la mayoría de los casos), con tamaños de efecto elevados (η^2 alto), evidenciando cambios fisicoquímicos dependientes de la temperatura. En naranja, las variaciones fueron de menor magnitud, aunque se identificaron diferencias significativas en puntos específicos del almacenamiento.

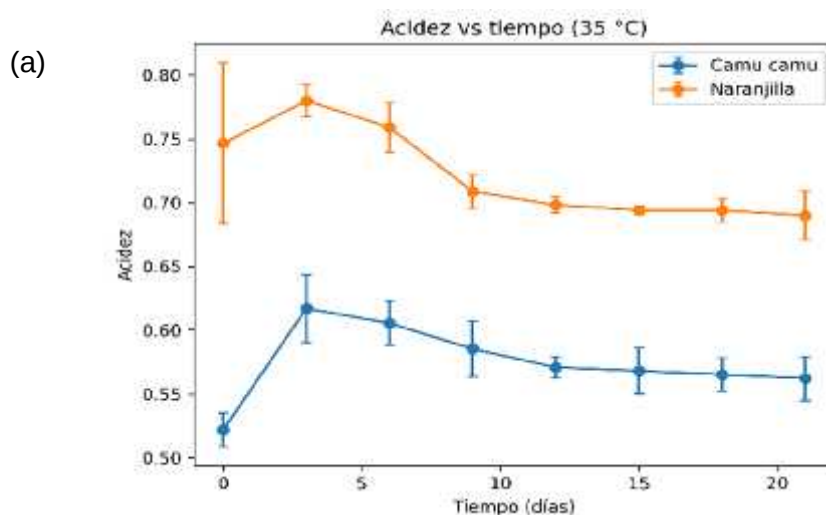
El análisis de las propiedades fisicoquímicas del jugo de camu camu evidenció cambios significativos ($p < 0.05$) en función del tiempo de almacenamiento y la temperatura. La acidez mostró un incremento inicial seguido de una ligera disminución, comportamiento que sugiere la formación y posterior transformación de compuestos orgánicos ácidos. Paralelamente, el pH presentó una tendencia decreciente a lo largo del almacenamiento, especialmente a temperaturas elevadas, lo cual confirma una intensificación del carácter ácido del sistema. En cuanto a los sólidos solubles totales (°Brix), se observó un aumento inicial asociado probablemente a procesos de hidrólisis de carbohidratos, seguido de una reducción atribuida al consumo de azúcares o

reacciones de degradación. Estos resultados, corroborados por el análisis ANOVA y las comparaciones múltiples de Tukey, indican que el jugo de camu camu presenta una alta sensibilidad fisicoquímica frente al almacenamiento térmico, reflejando una matriz altamente reactiva y susceptible a transformaciones durante el tiempo.

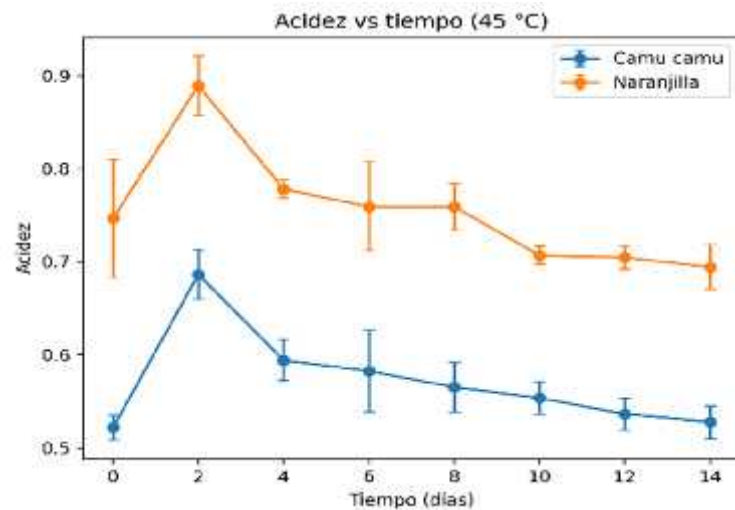
En el jugo de naranjilla, los parámetros fisicoquímicos evaluados mostraron variaciones más moderadas en comparación con el camu camu, aunque con diferencias significativas ($p < 0.05$) en determinados puntos del almacenamiento. La acidez presentó una tendencia ligeramente decreciente, indicando una relativa estabilidad del sistema y una menor generación de compuestos ácidos durante el tiempo. De manera consistente, el pH mostró cambios leves con una ligera disminución, manteniéndose dentro de un rango ácido estable.

Figura 10

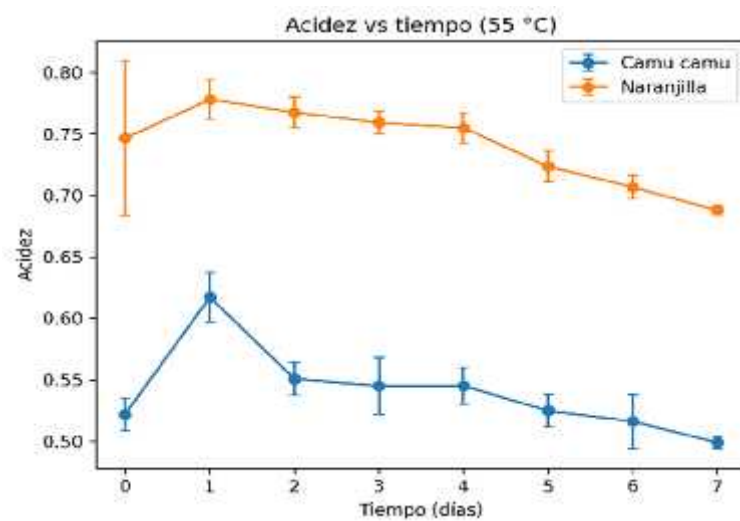
Resultados de acidez en el almacenamiento de jugos tropicales. (a) 35 °C, (b) 45 °C y (c) 55 °C.



(b)

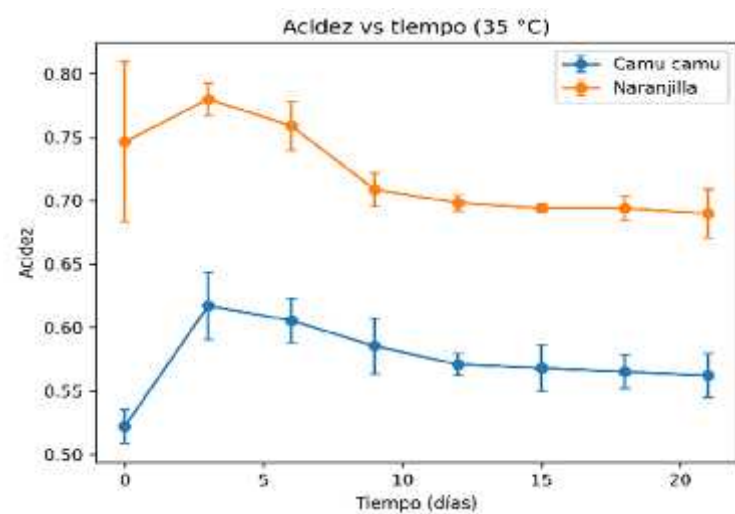


(c)

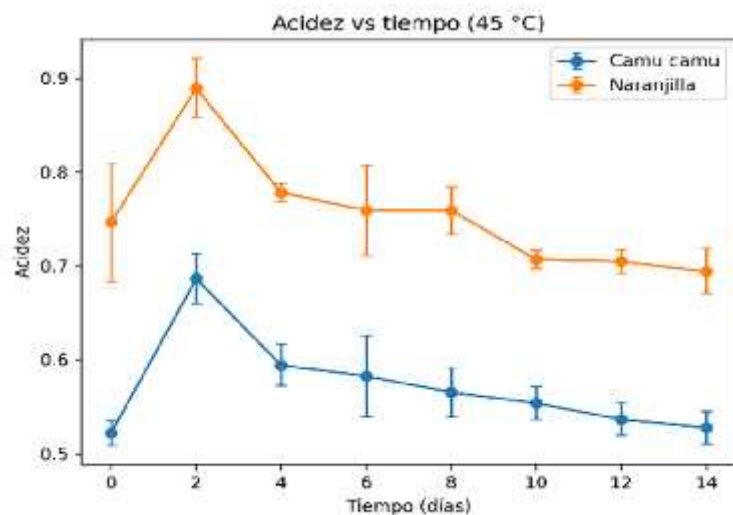
**Figura 11**

Resultados de pH en el almacenamiento de jugos tropicales. (a) 35 °C, (b) 45 °C y (c) 55 °C.

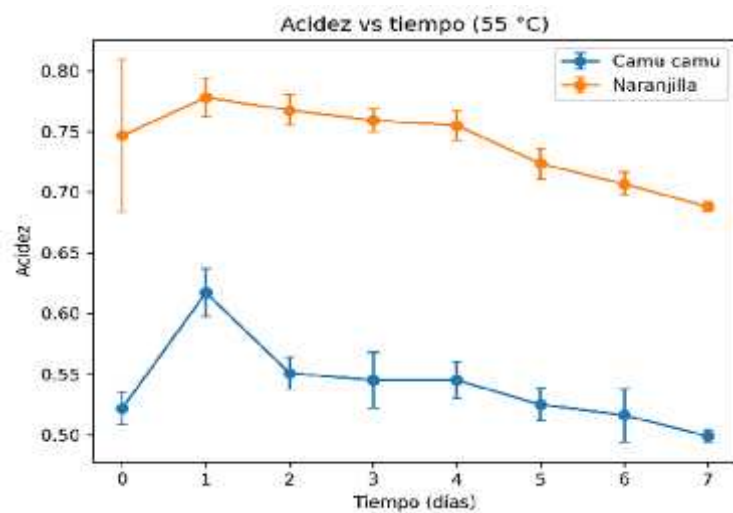
(a)



(b)

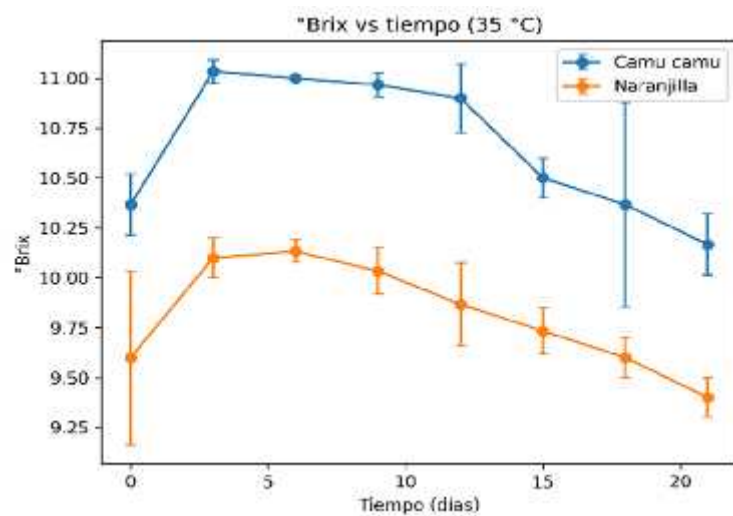


(c)

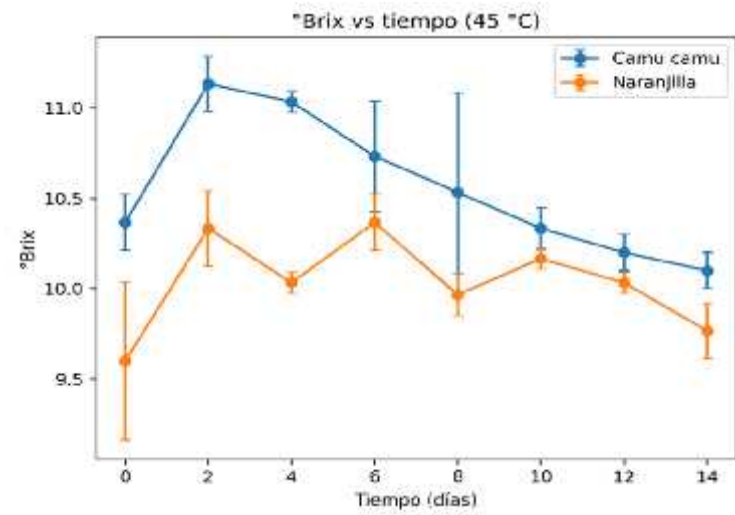
**Figura 12**

Resultados de Brix en el almacenamiento de jugos tropicales. (a) 35 °C, (b) 45 °C y (c) 55 °C.

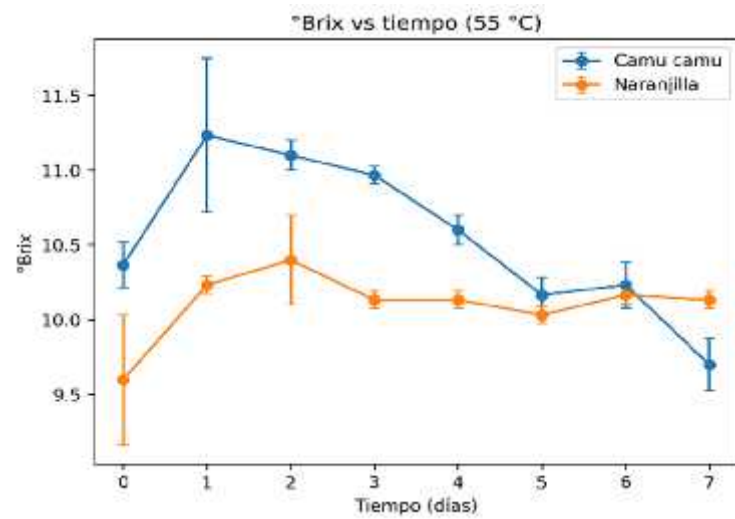
(a)



(b)



(c)



4.2. Discusión

Los resultados obtenidos en el presente estudio evidencian que la degradación del ácido ascórbico en jugos de camu camu (*Myrciaria dubia*) y naranjilla (*Solanum quitoense*) es altamente dependiente de la temperatura, lo cual concuerda con numerosos estudios en matrices alimentarias líquidas. Se ha reportado que el incremento térmico acelera significativamente la pérdida de vitamina C debido a su naturaleza termolábil y su susceptibilidad a procesos oxidativos, especialmente en presencia de oxígeno y condiciones acuosas (Feszterová et al., 2023; Gupta et al., 2026).

En relación con el comportamiento cinético, los resultados del presente estudio muestran que el modelo de Weibull describe con mayor precisión la degradación del ácido ascórbico en comparación con modelos clásicos de orden cero, primero o segundo. Este hallazgo es consistente con investigaciones recientes que señalan que la degradación de vitamina C en sistemas complejos no siempre sigue cinéticas de orden entero, sino que puede presentar comportamientos no lineales o fraccionarios debido a múltiples mecanismos simultáneos de reacción (Remini-Sahraoui et al., 2024; Wang et al., 2017). En particular, el uso de modelos tipo Weibull ha sido recomendado para describir sistemas donde la degradación no es estrictamente exponencial, como ocurre en jugos sometidos a variaciones de temperatura o con matrices heterogéneas. Asimismo, modelos avanzados como Weibull o Log-Logistic han mostrado mayor capacidad predictiva en jugos sometidos a tratamientos térmicos, alcanzando altos valores de ajuste ($R^2 > 0.95$)

No obstante, a pesar del mejor ajuste del modelo de Weibull, la relación entre la constante cinética y la temperatura observada en este estudio fue adecuadamente descrita mediante la ecuación de Arrhenius, lo cual coincide con la mayoría de investigaciones en alimentos. Estudios en jugos de frutas y matrices similares han demostrado que, aunque el mecanismo de degradación pueda ser complejo, la dependencia de la temperatura sigue un comportamiento exponencial clásico, permitiendo estimar parámetros como la energía de activación (Bosch et al., 2013). Este resultado confirma que el modelo de Arrhenius sigue siendo una herramienta robusta para la predicción de estabilidad térmica, incluso cuando el modelo cinético no es estrictamente de primer orden (Remini, Belbahi, et al., 2015).

En cuanto a las diferencias entre matrices, el jugo de camu camu mostró mayor estabilidad relativa frente a la naranjilla, lo cual puede atribuirse a su mayor contenido inicial de vitamina C y otros compuestos antioxidantes. Este comportamiento ha sido

previamente reportado, donde matrices con mayor capacidad antioxidante presentan un efecto protector frente a la degradación oxidativa del ácido ascórbico (Cunha et al., 2025). Asimismo, la literatura señala que la composición del alimento (pH, presencia de metales, compuestos fenólicos) influye significativamente en la cinética de degradación, lo que explica las diferencias observadas entre ambas frutas (Raducan, 2025).

Por otro lado, la disminución de la vida útil con el incremento de la temperatura observada en este estudio es consistente con el enfoque clásico de estabilidad de alimentos. Se ha demostrado que pequeñas variaciones térmicas pueden generar cambios significativos en la velocidad de degradación y, por ende, en la vida útil del producto, lo que resalta la importancia del control de la cadena de frío (Giannakourou & Taoukis, 2025; López et al., 2010). En este sentido, la aplicación de ensayos acelerados combinados con modelamiento cinético constituye una herramienta válida y ampliamente utilizada para la predicción de vida útil en productos alimentarios.

Finalmente, la aplicación de cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC) permitió una cuantificación precisa del ácido ascórbico, lo cual es consistente con estudios recientes que destacan esta técnica como el método de referencia para el seguimiento de compuestos bioactivos en alimentos. La alta sensibilidad y especificidad del método permiten generar datos confiables para el ajuste de modelos cinéticos, fortaleciendo la validez de los resultados obtenidos.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

La cuantificación del ácido ascórbico mediante HPLC evidenció una disminución progresiva de su concentración durante el almacenamiento acelerado en ambos jugos. En el camu camu, el contenido de vitamina C disminuyó de 1090.17 mg/100 mL a 863.54, 843.40 y 806.13 mg/100 mL a 35, 45 y 55 °C, respectivamente; mientras que en la naranjilla se redujo de 43.47 mg/100 mL a 37.15, 35.22 y 34.84 mg/100 mL en las mismas condiciones térmicas. Estos resultados confirman que la degradación del ácido ascórbico es un proceso dependiente de la temperatura.

La evaluación de los modelos cinéticos de orden cero y primer orden mostró que ninguno describió adecuadamente el comportamiento de degradación del ácido ascórbico en los jugos estudiados. El modelo de Weibull presentó el mejor ajuste estadístico, con coeficientes de determinación (R^2) entre 0.9895 y 0.9954 para camu camu y entre 0.9678 y 0.9931 para naranjilla, evidenciando que la degradación sigue una cinética no lineal característica de matrices alimentarias complejas.

Las constantes cinéticas de degradación aumentaron con el incremento de la temperatura, demostrando una aceleración del deterioro del ácido ascórbico bajo condiciones térmicas más severas. Este comportamiento confirma la elevada sensibilidad de la vitamina C al tratamiento térmico y su utilidad como indicador de estabilidad nutricional.

El efecto de la temperatura sobre la degradación del ácido ascórbico fue descrito satisfactoriamente mediante la ecuación de Arrhenius. Se estimaron energías de activación (E_a) de 31.05 kJ/mol para el jugo de camu camu y 117.8 kJ/mol para el jugo de naranjilla, evidenciando diferencias en la sensibilidad térmica entre ambas matrices y confirmando que, además de la temperatura, factores intrínsecos de la composición del alimento influyen en la velocidad de degradación.

La vida útil, definida como el tiempo requerido para alcanzar el 80 % del contenido inicial de vitamina C (t_{80}), disminuyó significativamente con el aumento de la temperatura. El jugo de camu camu presentó una mayor estabilidad, con vidas útiles estimadas entre 524 y 32 días para temperaturas comprendidas entre 5 y 30 °C. En la naranjilla, la vida útil fue de 31.15, 17.44 y 8.84 días a 35, 45 y 55 °C, respectivamente. La combinación de los modelos de Weibull y Arrhenius permitió realizar predicciones confiables del tiempo de conservación de ambos productos.

Los parámetros fisicoquímicos evaluados (pH, acidez titulable y sólidos solubles) se mantuvieron dentro de rangos relativamente estables durante el almacenamiento. El jugo de camu camu presentó valores de acidez entre 0.4930 y 0.7093 %, pH entre 2.511 y 2.661 y °Brix entre 9.5 y 11.8; mientras que la naranjilla registró acidez entre 0.6669 y 0.9185 %, pH entre 2.809 y 2.889 y °Brix entre 9.3 y 10.5. Estas características contribuyeron a la estabilidad de los sistemas estudiados y permitieron interpretar las diferencias observadas en la degradación del ácido ascórbico entre ambas matrices.

En términos generales, la degradación del ácido ascórbico en jugos de camu camu y naranjilla es un fenómeno altamente dependiente de la temperatura y mejor representado mediante modelos cinéticos no lineales. La aplicación conjunta de HPLC, el modelo de Weibull y la ecuación de Arrhenius constituye una herramienta robusta para describir la degradación de la vitamina C y predecir la vida útil de bebidas funcionales elaboradas a partir de frutas tropicales.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda a investigadores del área ampliar el análisis cinético incorporando modelos multicomponentes y enfoques no isotérmicos que permitan describir con mayor precisión la degradación del ácido ascórbico en condiciones dinámicas de almacenamiento y distribución. Asimismo, la integración de modelos predictivos basados en inteligencia artificial o aprendizaje automático podría mejorar la capacidad de predicción en sistemas alimentarios complejos. Investigar con mayor profundidad el efecto protector de la matriz del jugo, particularmente la interacción entre vitamina C, compuestos fenólicos y otros antioxidantes presentes en el camu camu y la naranjilla. Estudios futuros deberían considerar la caracterización de compuestos bioactivos y su contribución sinérgica en la estabilidad oxidativa del sistema.

Se recomienda al sector productivo de jugos evaluar el impacto de diferentes condiciones de procesamiento térmico (pasteurización suave, HTST, tratamientos no térmicos como alta presión hidrostática o pulsos eléctricos) sobre la retención de vitamina C. Esto permitirá identificar tecnologías alternativas que maximicen la conservación de compuestos bioactivos sin comprometer la inocuidad del producto. Asimismo, se sugiere validar los modelos cinéticos desarrollados en condiciones reales de almacenamiento, distribución y comercialización, incluyendo fluctuaciones de temperatura (cadena de frío interrumpida) y exposición a la luz. Esta validación

permitirá fortalecer la aplicabilidad industrial de los modelos propuestos y mejorar la estimación de la vida útil en escenarios reales. Además, se recomienda explorar el uso de tecnologías de encapsulación, adición de antioxidantes naturales o modificación de la formulación (ajuste de pH, reducción de oxígeno disuelto) como estrategias para mejorar la estabilidad de la vitamina C durante el almacenamiento.

Futuras investigaciones deberían integrar otros parámetros de calidad, como color, actividad antioxidante, compuestos fenólicos totales y atributos sensoriales, con el fin de establecer un enfoque integral de vida útil. Esto permitirá correlacionar la degradación de vitamina C con la percepción del consumidor y la aceptabilidad del producto y se sugiere complementar los estudios fisicoquímicos con análisis microbiológicos predictivos, que permitan establecer de manera integral la vida útil del producto, considerando tanto la estabilidad nutricional como la inocuidad alimentaria.

VI. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Acevedo, B., & Montiel, M. (2004). Estudio cinético de la degradación de la actividad antioxidante hidrosolubles de jugos cítricos por tratamiento térmico. 20.
- Acosta, Ó., Pérez, A. M., & Vaillant, F. (2009). Chemical characterization, antioxidant properties, and volatile constituents of naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.) cultivated in Costa Rica. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 59(1), 88-94.
- Akachi, T., Shiina, Y., Kawaguchi, T., Kawagishi, H., Morita, T., & Sugiyama, K. (2010). 1-methylmalate from camu-camu (*Myrciaria dubia*) suppressed D-galactosamine-induced liver injury in rats. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 74(3), 573-578.
- Akter, Mst. S., Oh, S., Eun, J.-B., & Ahmed, M. (2011). Composiciones nutricionales y fitoquímicos promotores de la salud del fruto de camu-camu (*myrciaria dubia*): Una revisión. *Food Research International, Exotic Fruits: their Composition, Nutraceutical and Agroindustrial Potential*, 44(7), 1728-1732.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.03.045>
- Akyildiz, A., Mertoglu, T. S., & Agcam, E. (2021). Kinetic study for ascorbic acid degradation, hydroxymethylfurfural and furfural formations in Orange juice. *Journal of Food Composition and Analysis*, 102, 103996.
<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103996>
- Ambigaipalan, P., Al-Khalifa, A. S., & Shahidi, F. (2015). Antioxidant and angiotensin I converting enzyme (ACE) inhibitory activities of date seed protein hydrolysates prepared using Alcalase, Flavourzyme and Thermolysin. *Journal of Functional Foods*, 18, 1125-1137.
- Andrade-Cuvi, M. J., Moreno-Guerrero, C., Guijarro-Fuertes, M., & Concellón, A. (2015). Caracterización de la naranjilla (*Solanum quitoense*) común en tres estados de madurez. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 16, n.º 2. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/99520>

- Arango, H., Vaillant, F., Vélez, V., Millan, P., UNIVALLE, & CIRAD-FLHOR. (1999). Evaluation of post-harvest performance of naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.) fruits packed under modified atmosphere (MA). *Fruits*, 54(4), Article 4. (COLOMBIE).
- Atencia, E. E. (1996). EVALUACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE LOS ALIMENTOS (SHELF LIFE): EFECTO DE LA TEMPERATURA. *Ciencia & Desarrollo*, (4), Article 4. <https://doi.org/10.33326/26176033.1996.4.83>
- Borges, L. L., Conceição, E. C., & Silveira, D. (2014). Active compounds and medicinal properties of *Myrciaria* genus. *Food chemistry*, 153, 224-233.
- Bosch, V., Cilla, A., García-Llatas, G., Gilabert, V., Boix, R., & Alegría, A. (2013). Kinetics of ascorbic acid degradation in fruit-based infant foods during storage. *Journal of Food Engineering*, 116(2), 298-303. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.12.003>
- Brunke, E. J., Mair, P., & Hammerschmidt, F. J. (2002, mayo 1). Volatiles from naranjilla fruit (*Solanum quitoense* Lam.). GC/MS analysis and sensory evaluation using sniffing GC. American Chemical Society. (world). ACS Publications. <https://doi.org/10.1021/jf00087a038>
- Burdurlu, H. S., Koca, N., & Karadeniz, F. (2006). Degradation of vitamin C in citrus juice concentrates during storage. *Journal of Food Engineering*, 74(2), 211-216. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.03.026>
- Calligaris, S., Manzocco, L., Anese, M., & Nicoli, M. C. (2019). 12—Accelerated shelf life testing. En C. M. Galanakis (Ed.), *Food Quality and Shelf Life* (pp. 359-392). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817190-5.00012-4>
- Carr, A. C., & Maggini, S. (2017). Vitamin C and immune function. *Nutrients*, 9(11), 1211.
- Carrillo Inungaray, M. L., & Reyes, A. (2013). Vida útil de los alimentos. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias: CIBA*, 2(3), 3.

- Casierra-Posada, F., García, E. J., & Lüdders, P. (2004). Determinación del punto óptimo de cosecha en el lulo (*solanum*).
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/31315>
- Castro, G. J. C., Gutiérrez Rodríguez, F., Acuña Amaral, C., Cerdeira Gutiérrez, L. A., Tapullima Pacaya, A., Cobos Ruiz, M., & Imán Correa, S. A. (2013). Variación del contenido de vitamina C y antocianinas en *Myrciaria dubia* «camu camu». *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 79(4), 319-330.
- Chirinos, R., Galarza, J., Betalleluz-Pallardel, I., Pedreschi, R., & Campos, D. (2010a). Antioxidant compounds and antioxidant capacity of Peruvian camu camu (*Myrciaria dubia* (HBK) McVaugh) fruit at different maturity stages. *Food chemistry*, 120(4), 1019-1024.
- Chirinos, R., Galarza, J., Betalleluz-Pallardel, I., Pedreschi, R., & Campos, D. (2010b). Antioxidant compounds and antioxidant capacity of Peruvian camu camu (*Myrciaria dubia* (H.B.K.) McVaugh) fruit at different maturity stages. *Food Chemistry*, 120(4), 1019-1024.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.11.041>
- Chumacero, J. S., Lazo, R., Navarro, E., Quinteros, A., Chumacero, J. S., Lazo, R., Navarro, E., & Quinteros, A. (2022). Preservation of camu camu (*Myrciaria dubia* Kunth McVaugh) by lyophilization. *Información tecnológica*, 33(5), 11-18. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642022000500011>
- Corradini, M. G. (2018). Shelf Life of Food Products: From Open Labeling to Real-Time Measurements. *Annual Review of Food Science and Technology*, 9(Volume 9, 2018), 251-269. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030117-012433>
- Corradini, M. G., & Peleg, M. (2005). Estimating non-isothermal bacterial growth in foods from isothermal experimental data. *Journal of Applied Microbiology*, 99(1), 187-200. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2005.02570.x>

- Corradini, M. G., & Peleg, M. (2006). Prediction of vitamins loss during non-isothermal heat processes and storage with non-linear kinetic models. *Trends in Food Science & Technology*, 17(1), 24-34. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.09.004>
- Correa, S. I., Freyre, S. P., & Aldano, M. M. (2011). Caracterización morfológica y evaluación de la colección nacional de germoplasma de camu camu *Myrciaria dubia* (HBK) Mc Vaugh, del INIA Loreto-Perú. *Scientia Agropecuaria*, 2(4), 189-201.
- Cunha, C. N., dos Anjos Pinto, C. B., da Silva Sad, M. E. L., Stephani, R., Wolfschoon Pombo, A., da Costa, J. de C., & Perrone, Í. T. (2025). Kinetics of Vitamin C degradation and browning index of enriched heat-treated yogurt milk. *International Dairy Journal*, 169, 106349. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2025.106349>
- da Silva, F. C., Arruda, A., Ledel, A., Dauth, C., Romão, N. F., Viana, R. N., Ferraz, A. de B. F., Picada, J. N., & Pereira, P. (2012). Antigenotoxic effect of acute, subacute and chronic treatments with Amazonian camu–camu (*Myrciaria dubia*) juice on mice blood cells. *Food and chemical toxicology*, 50(7), 2275-2281.
- Dermesonlouoglou, E. K., Giannakourou, M., & Taoukis, P. S. (2016). Kinetic study of the effect of the osmotic dehydration pre-treatment with alternative osmotic solutes to the shelf life of frozen strawberry. *Food and Bioproducts Processing*, 99, 212-221. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.05.006>
- Derossi, A., De Pilli, T., & Fiore, A. G. (2010). Vitamin C kinetic degradation of strawberry juice stored under non-isothermal conditions. *LWT - Food Science and Technology*, 43(4), 590-595. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.10.006>
- Dhuique-Mayer, C., Tbatou, M., Carail, M., Caris-Veyrat, C., Dornier, M., & Amiot, M. J. (2007a). Thermal Degradation of Antioxidant Micronutrients in Citrus Juice: Kinetics and Newly Formed Compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(10), 4209-4216. <https://doi.org/10.1021/jf0700529>

- Dhuique-Mayer, C., Tbatou, M., Carail, M., Caris-Veyrat, C., Dornier, M., & Amiot, M. J. (2007b). Thermal Degradation of Antioxidant Micronutrients in Citrus Juice: Kinetics and Newly Formed Compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(10), 4209-4216. <https://doi.org/10.1021/jf0700529>
- Doner, L. W., & Hicks, K. B. (1981). High-performance liquid chromatographic separation of ascorbic acid, erythorbic acid, dehydroascorbic acid, dehydroerythorbic acid, diketogulonic acid, and diketogluconic acid. *Analytical Biochemistry*, 115(1), 225-230. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(81\)90550-9](https://doi.org/10.1016/0003-2697(81)90550-9)
- Espinosa-Cruz, C. C., Valle-Guadarrama, S., Ybarra-Moncada, M. C., & Martínez-Damián, M. T. (2014). Comportamiento postcosecha de frutos de aguacate «Hass» afectado por temperatura y atmósfera modificada con microperforado. *Revista fitotecnia mexicana*, 37(3), 235-242.
- Fellers, P. j. (1988). Shelf Life and Quality of Freshly Squeezed, Unpasteurized, Polyethylene-Bottled Citrus Juice. *Journal of Food Science*, 53(6), 1699-1702. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb07819.x>
- Feszterová, M., Kowalska, M., & Mišáková, M. (2023). Stability of Vitamin C Content in Plant and Vegetable Juices under Different Storing Conditions. *Applied Sciences*, 13(19), 10640. <https://doi.org/10.3390/app131910640>
- Fracassetti, D., Costa, C., Moulay, L., & Tomás-Barberán, F. A. (2013). Ellagic acid derivatives, ellagitannins, proanthocyanidins and other phenolics, vitamin C and antioxidant capacity of two powder products from camu-camu fruit (*Myrciaria dubia*). *Food Chemistry*, 139(1), 578-588. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.01.121>
- Freitas, C. A., Silva, A. S., Alves, C. N., Nascimento, W. M., Lopes, A. S., Lima, M. O., & Müller, R. (2016). Characterization of the fruit pulp of camu-camu (*Myrciaria dubia*) of seven different genotypes and their rankings using statistical methods PCA and HCA. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 27, 1838-1846.

- García-Chacón, J. M., Marín-Loaiza, J. C., & Osorio, C. (2023). Camu Camu (*Myrciaria dubia* (Kunth) McVaugh): An Amazonian Fruit with Biofunctional Properties—A Review. *ACS Omega*, 8(6), 5169-5183.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07245>
- Georgalis, L., Psaroulaki, A., Aznar, A., Fernández, P. S., & Garre, A. (2022). Different model hypotheses are needed to account for qualitative variability in the response of two strains of *Salmonella* spp. Under dynamic conditions. *Food Research International*, 158, 111477.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111477>
- Giannakourou, M. C., & Taoukis, P. S. (2021). Effect of alternative preservation steps and storage on vitamin C stability in fruit and vegetable products: Critical review and kinetic modelling approaches. *Foods*, 10(11), 2630.
- Giannakourou, M. C., & Taoukis, P. S. (2025). Uncertainty and variability in post-processing kinetic calculations- nutritional quality loss in fruit juice products. *Journal of Food Engineering*, 390, 112403.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112403>
- Gonçalves, A. E. de S. S., Lellis-Santos, C., Curi, R., Lajolo, F. M., & Genovese, M. I. (2014). Frozen pulp extracts of camu-camu (*Myrciaria dubia* McVaugh) attenuate the hyperlipidemia and lipid peroxidation of Type 1 diabetic rats. *Food Research International*, 64, 1-8.
- Gupta, R. K., Manisha, Ali, E. A. E., Areekal, N. N., Patel, J., Pipliya, S., Srivastav, P. P., Wang, C.-K., & Castro-Muñoz, R. (2026). Vitamin C-infused biopolymer films: A multifunctional approach for active food packaging and preservation. *Sustainable Food Technology*, 4(1), 25-50.
<https://doi.org/10.1039/D5FB00282F>
- Herbig, A.-L., & Renard, C. M. G. C. (2017). Factors that impact the stability of vitamin C at intermediate temperatures in a food matrix. *Food Chemistry*, 220, 444-451. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.012>

- Imán, S., Pinedo Freyre, S., & Melchor Aldano, M. (2011). Caracterización morfológica y evaluación de la colección nacional de germoplasma de camu camu *Myrciaria dubia* (H.B.K) Mc Vaugh, del INIA Loreto-Perú. *Scientia Agropecuaria*, 2(4), 189-201.
- Jiménez, J. del C., & López, M. (2009). Pruebas de vida acelerada en confiabilidad. <http://repositorio.utm.mx:8080/jspui/handle/123456789/208>
- Kim, A.-N., Lee, K.-Y., Rahman, M. S., Kim, H.-J., Kerr, W. L., & Choi, S.-G. (2021). Thermal treatment of apple puree under oxygen-free condition: Effect on phenolic compounds, ascorbic acid, antioxidant activities, color, and enzyme activities. *Food Bioscience*, 39, 100802. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100802>
- Labuza, T. P., & Saltmarch, M. (1982). Kinetics of Browning and Protein Quality Loss in Whey Powders During Steady State and Nonsteady State Storage Conditions. *Journal of Food Science*, 47(1), 92-96. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1982.tb11035.x>
- Lee, S. K., & Kader, A. A. (2000a). Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops. *Postharvest biology and technology*, 20(3), 207-220.
- Lee, S. K., & Kader, A. A. (2000b). Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops. *Postharvest biology and technology*, 20(3), 207-220.
- Lisboa, H. M., Pasquali, M. B., dos Anjos, A. I., Sarinho, A. M., de Melo, E. D., Andrade, R., Batista, L., Lima, J., Diniz, Y., & Barros, A. (2024). Innovative and Sustainable Food Preservation Techniques: Enhancing Food Quality, Safety, and Environmental Sustainability. *Sustainability*, 16(18), 8223. <https://doi.org/10.3390/su16188223>
- López, J., Uribe, E., Vega-Galvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Gonzalez, E., & Di Scala, K. (2010). Effect of Air Temperature on Drying Kinetics, Vitamin C,

- Antioxidant Activity, Total Phenolic Content, Non-enzymatic Browning and Firmness of Blueberries Variety O'Neil. *Food and Bioprocess Technology*, 3, 772-777. <https://doi.org/10.1007/s11947-009-0306-8>
- Mandha, J., Shumoy, H., Matemu, A. O., & Raes, K. (2023). Characterization of fruit juices and effect of pasteurization and storage conditions on their microbial, physicochemical, and nutritional quality. *Food Bioscience*, 51, 102335. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102335>
- Manso, M. C., Oliveira, F. A. R., Oliveira, J. C., & Frías, J. M. (2001). Modelling ascorbic acid thermal degradation and browning in orange juice under aerobic conditions. *International Journal of Food Science and Technology*, 36(3), 303-312. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2001.t01-1-00460.x>
- Mendoza-Corvis, F., Arteaga-marquez, M., & Pérez-Sierra, O. (2017). Degradação da vitamina C em um produto de manga (*Mangifera indica* L.) e lactisoro. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0122-87062017000100008&lng=es&nrm=iso&tlng=pt
- Myoda, T., Fujimura, S., Park, B., Nagashima, T., Nakagawa, J., & Nishizawa, M. (2010). Antioxidative and antimicrobial potential of residues of camu-camu juice production. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 8.
- Nakilcioğlu-Taş, E., & Ötleş, S. (2020). Kinetic modelling of vitamin C losses in fresh citrus juices under different storage conditions. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 92, e20190328. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/0001-3765202020190328>
- Nath, P., Pandey, N., Samota, M., Sharma, K., Kale, S., Kannaujia, P., Sethi, S., & Chauhan, O. P. (2022). Browning Reactions in Foods. En O. P. Chauhan (Ed.), *Advances in Food Chemistry: Food Components, Processing and Preservation* (pp. 117-159). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4796-4_4

- Nemirovsky, Y., Zavaleta, N., Villanueva, M. E., Armah, S. M., Iman, S. A., & Reddy, M. B. (2014). Negative Effect of Camu-Camu (*Myrciaria dubia*) Despite High Vitamin C Content on Iron Bioavailability, Using a Caco-2 Cell Model. <https://doi.org/10.2478/v10222-012-0088-y>
- Nicoli, M. C. (2012). Shelf Life Assessment of Food. CRC Press.
- Odriozola-Serrano, I., Soliva-Fortuny, R., & Martín-Belloso, O. (2009). Impact of high-intensity pulsed electric fields variables on vitamin C, anthocyanins and antioxidant capacity of strawberry juice. *LWT - Food Science and Technology*, 42(1), 93-100. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.05.008>
- Oliveira, A. do N., Ramos, A. M., Chaves, J. B. P., & Valente, M. E. R. (2013). Cinética de degradação e vida-de-prateleira de suco integral de manga. *Ciência Rural*, 43, 172-177. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012005000147>
- Ortiz, H. L. A., & Romero, C. Y. (2017). Camu camu (*Myrciaria dubia*) como posible alternativa productiva. *Revista Sistemas de Producción Agroecológicos*, 8(2), 68-90. <https://doi.org/10.22579/22484817.702>
- Oruña-Concha, M. J., Gonzalez-Castro, M. J., Lopez-Hernandez, J., & Simal-Lozano, J. (1998). Monitoring of the vitamin C content of frozen green beans and Padrón peppers by HPLC. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 76(3), 477-480. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199803\)76:3%3C477::AID-JSFA975%3E3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199803)76:3%3C477::AID-JSFA975%3E3.0.CO;2-U)
- Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A.-J. (2013). Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 6(1), 36-60. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>
- Pinto, T., Vilela, A., & Cosme, F. (2022). Chemical and Sensory Characteristics of Fruit Juice and Fruit Fermented Beverages and Their Consumer Acceptance. *Beverages*, 8(2), 33. <https://doi.org/10.3390/beverages8020033>

- Quillimamani Soncco, S. R., Chambi Rodríguez, A. D., & Coaquira Quispe, J. J. (2022). Evaluación de la cinética de degradación térmica de la vitamina C en la pulpa de tumbo (*Passiflora mollissima* b.). *Fides et Ratio - Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 24(24), 145-164.
- Raducan, A. (2025). Degradation kinetics of ascorbic acid in home-made juices. *Journal of the American Romanian Academy of Arts and Sciences*.
<https://doi.org/10.14510/ARAJ.2017.4114>
- Ragnarsson, J. O., & Labuza, T. P. (1977). Accelerated shelf-life testing for oxidative rancidity in foods—A review. *Food Chemistry*, 2(4), 291-308.
[https://doi.org/10.1016/0308-8146\(77\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0308-8146(77)90047-4)
- Remini, H., Belbahi, A., Madani, K., & Dornier, M. (2015). Degradation kinetic modelling of ascorbic acid and colour intensity in pasteurised blood orange juice during storage. *Food Chemistry*.
<https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2014.10.069>
- Remini, H., Mertz, C., Belbahi, A., Achir, N., Dornier, M., & Madani, K. (2015). Degradation kinetic modelling of ascorbic acid and colour intensity in pasteurised blood orange juice during storage. *Food Chemistry*, 173, 665-673.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.069>
- Remini-Sahraoui, Y., Remini, H., Dahmoune, F., Dairi, S., Aoun, O., Belbahi, A., Oukhmanou-Bensidhoum, S., Kadri, N., & Madani, K. (2024). Maximising the stability of anthocyanins and the physicochemical quality in pure blood orange juice using advanced Weibull-Log-Logistic modelling and ascorbic acid fortification during pasteurisation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 95, 103724. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103724>
- Reyes, M. M., Gómez-Sánchez Prieto, I., & Espinoza Barrientos, C. M. (2017). *Tablas peruanas de composición de alimentos*. Instituto Nacional de Salud.
<https://repositorio.ins.gob.pe///handle/20.500.14196/1034>

- Riera, M., & Gómez, Y. (2019). Influencia de las condiciones de almacenamiento en la degradación de vitamina C. *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, 13(2 (julio-diciembre)), 3-11.
- Rivero, C., Vos, V., Llanque, O., & Zonta, A. (2009). PRODUCTOS DEL BOSQUE, Potencial social, natural y financiero en hogares de pequeños productores de la Amazonía. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14549.93920>
- Sabbe, S., Van Damme, P., & Verbeke, W. (2013). EUROPEAN MARKET ENVIRONMENT FOR SELECTED LATIN AMERICAN TROPICAL FRUIT SPECIES. *Acta Horticulturae*, (975), 615-623. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.975.78>
- Sapei, L., & Hwa, L. (2014). Study on the Kinetics of Vitamin C Degradation in Fresh Strawberry Juices. *Procedia Chemistry*, International Conference and Workshop on Chemical Engineering UNPAR 2013 (ICCE UNPAR 2013), 9, 62-68. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.05.008>
- Shaik, L., & Chakraborty, S. (2023). Ultrasound processing of sweet lime juice: Effect of matrix pH on microbial inactivation, enzyme stability, and bioactive retention. *Journal of Food Process Engineering*, 46(6), e14231. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14231>
- Tiwari, B. K., O' Donnell, C. P., Muthukumarappan, K., & Cullen, P. J. (2009). Ascorbic acid degradation kinetics of sonicated orange juice during storage and comparison with thermally pasteurised juice. *LWT - Food Science and Technology*, 42(3), 700-704. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.10.009>
- Torregrosa, F., Esteve, M. J., Frígola, A., & Cortés, C. (2006). Ascorbic acid stability during refrigerated storage of orange–carrot juice treated by high pulsed electric field and comparison with pasteurized juice. *Journal of Food Engineering*, 73(4), 339-345. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.01.034>

- Van Boekel, M. A. J. S. (2008). Kinetic Modeling of Food Quality: A Critical Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 7(1), 144-158.
<https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2007.00036.x>
- Van Bree, I., Baetens, J. M., Samapundo, S., Devlieghere, F., Laleman, R., Vandekinderen, I., Nosedá, B., Xhaferi, R., De Baets, B., & De Meulenaer, B. (2012). Modelling the degradation kinetics of vitamin C in fruit juice in relation to the initial headspace oxygen concentration. *Food Chemistry*, 134(1), 207-214. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.02.096>
- Vidigal, M. C. T. R., Minim, V. P. R., Carvalho, N. B., Milagres, M. P., & Gonçalves, A. C. A. (2011). Efecto de una declaración de propiedades saludables en la aceptación por parte del consumidor de jugos de frutas exóticas brasileñas: Açaí (*Euterpe oleracea* Mart), Camu-camu (*Myrciaria dubia*), Cajá (*Spondias lutea* L) y Umbu (*Spondias tuberosa* Arruda). *Food Research International, Exotic Fruits: their Composition, Nutraceutical and Agroindustrial Potential*, 44(7), 1988-1996. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.11.028>
- Vieira, M. C., Teixeira, A. A., & Silva, C. L. M. (2000). Mathematical modeling of the thermal degradation kinetics of vitamin C in cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) nectar. *Journal of Food Engineering*, 43(1), 1-7.
- Wang, J., Law, C., & Mujumdar, A. (2017). The Degradation Mechanism and Kinetics of Vitamin C in Fruits and Vegetables During Thermal Processing.
- Witik, R., Phouththasak, S., Collet, A., & Wyser, Y. (2019). Shelf life prediction of oxygen-sensitive products: The influence of moisture on prediction accuracy for freeze-dried coffee—Witik—2019—Packaging Technology and Science—Wiley Online Library. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pts.2444>
- Yadav, A., Yadav, K., Ahmad, R., & Abd-Elsalam, K. A. (2023). Emerging Frontiers in Nanotechnology for Precision Agriculture: Advancements, Hurdles and Prospects. *Agrochemicals*, 2(2), 220-256.
<https://doi.org/10.3390/agrochemicals2020016>

- Zapata, S. M., & Dufour, J.-P. (1993). Camu-camu *Myrciaria dubia* (HBK) McVaugh: Chemical composition of fruit. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 61(3), 349-351. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740610310>
- Zhang, J., Han, H., Xia, J., & Gao, M. (2016). Degradation Kinetics of Vitamin C in Orange and Orange Juice during Storage. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 12(10), 555-561. <https://doi.org/10.19026/ajfst.12.3303>

VII. ANEXOS

Anexo 1

Calibración de la curva de ácido ascórbico

Figura 13

Resultado de la calibración del ácido ascórbico para el jugo tropical de Camu camu

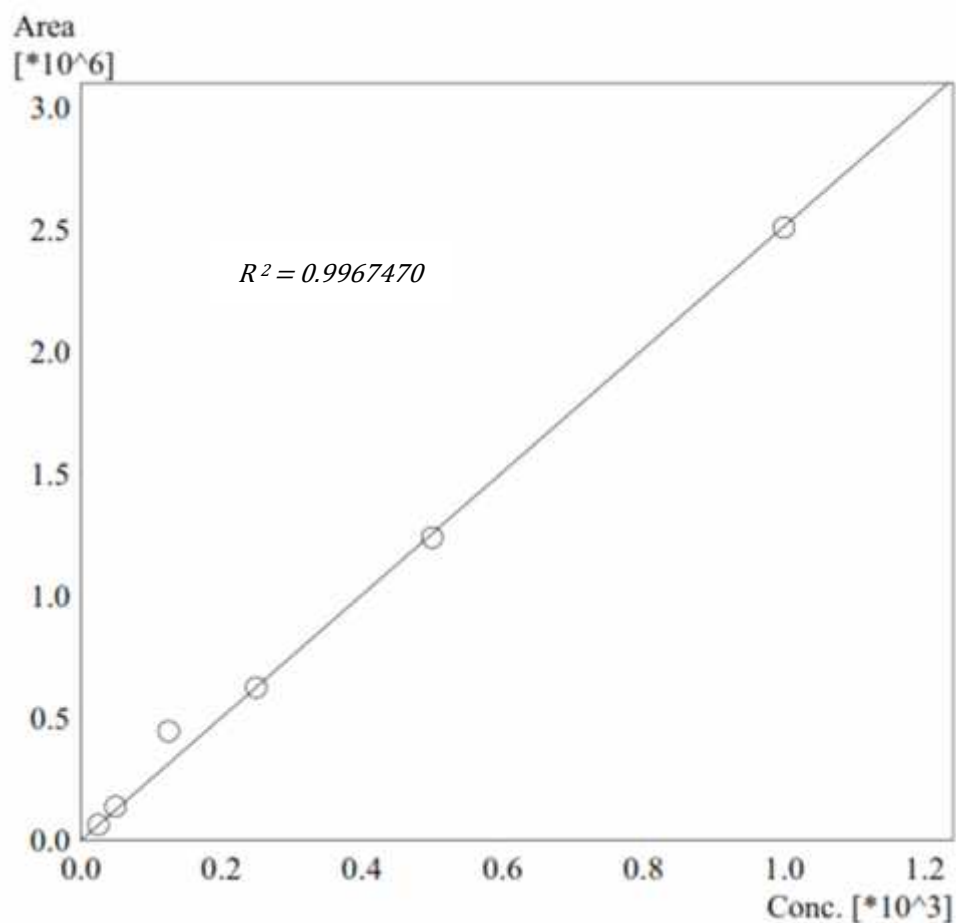


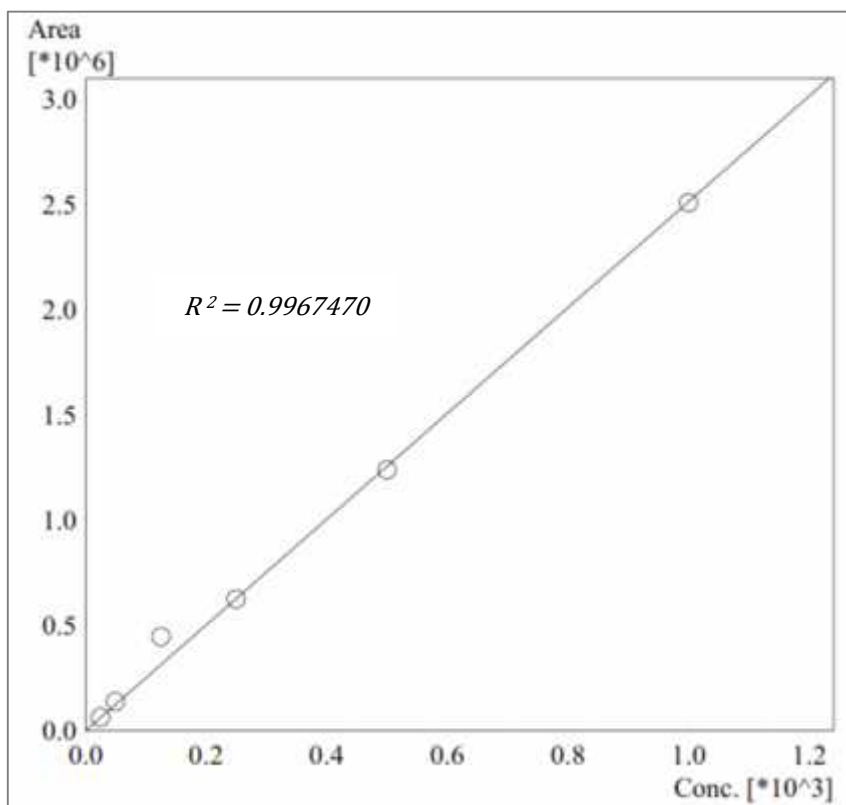
Tabla 12

Resultados de la calibración del ácido ascórbico para el jugo tropical de Camu camu

Nivel	Concentración estándar	Área media	Área
1	25	62703	62703
2	50	136316	136316
3	125	445542	445542
4	250	623948	623948
5	500	1237707	1237707
6	1000	2506784	2506784

Figura 14

Resultado de la calibración del ácido ascórbico para el jugo tropical de Naranja



Nota. R^2 : coeficiente de determinación, mientras más cerca de 1, indica un buen ajuste del modelo lineal

$$R^2 = 0.9967470$$

Tabla 13

Resultados de la calibración del ácido ascórbico para el jugo tropical de Naranja

Nivel	Concentración estándar	Área media	Área
1	25	62703	62703
2	50	136316	136316
3	125	445542	445542
4	250	623948	623948
5	500	1237707	1237707
6	1000	2506784	2506784

Anexo 2

Análisis estadístico ANOVA y Tukey para la degradación de la vitamina C

Tabla 14

Resultados del análisis ANOVA bidireccional para el jugo de camu camu

Source	df	F value	p-value
Temperature	2	812.4	< 0.001
Time	7	1543.2	< 0.001
Temperature × Time	14	97.6	< 0.001
Residual	48	-	-

Tabla 15

Resultados del ANOVA bidireccional para el jugo de naranjilla

Source	df	F value	p-value
Temperature	2	276.8	< 0.001
Time	7	412.6	< 0.001
Temperature × Time	14	31.5	< 0.001
Residual	48	-	-

Anexo 3

Resultados del ANOVA para parámetros físico químicos

Tabla 16

Resultados del análisis ANOVA para el jugo de camu camu

Temperatura	Variable	F	p-valor	η^2	Interpretación
35 °C	Acidez	Alto	< 0.001	Alto	Diferencias significativas
35 °C	pH	Muy alto	< 0.001	Muy alto	Alta variación temporal
35 °C	°Brix	Alto	< 0.001	Alto	Cambios significativos
45 °C	Todas	Alto	< 0.001	Alto	Efecto del tiempo claro
55 °C	Todas	Alto	< 0.001	Alto	Mayor impacto térmico

Tabla 17

Resultados del ANOVA para el jugo de naranjilla

Temperatura	Variable	F	p-valor	η^2	Interpretación
35 °C	Acidez	Moderado	< 0.05	Medio	Cambios leves
35 °C	pH	Bajo-moderado	< 0.05	Bajo	Alta estabilidad
35 °C	°Brix	Bajo	> 0.05	Bajo	No significativo en algunos puntos
45 °C	Todas	Moderado	< 0.05	Medio	Cambios progresivos
55 °C	Todas	Moderado	< 0.05	Medio	Influencia térmica

Anexo 4

Cálculos de la elaboración de jugo tropical de camu camu y naranjilla

De la elaboración de jugo tropical se consolida en la tabla 18 y table 19 el rendimiento y los parámetros finales obtenidos.

Tabla 18

Rendimiento y parámetros finales del jugo tropical de camu camu.

Fruta	Rendimiento	Pulpa obtenida	Pulpa utilizada	° Brix	pH	Dilución (1:6) Pulpa Agua	
Camu camu	58.16%	3.6 L	3 L	10	3.22	3 L	18 L

Tabla 19

Rendimiento y parámetros finales del jugo tropical de naranjilla

Fruta	Rendimiento	Pulpa obtenida	Pulpa utilizada	° Brix	pH	Dilución (1:4) Pulpa Agua	
Naranjilla	28.57%	4 L	4 L	10	3.65	4 L	16 L

Anexo 5**Galería fotográfica de elaboración de jugo tropical de camu camu y naranjilla****Figura 15***Elaboración de jugo tropical de camu camu*

Nota. (a) Preparación de la materia prima (licuado). (b) Tapizado y mezclado del jugo concentrado obtenido. (c) Adición de aditivos alimentarios. (d) Envasado del jugo tropical de camu camu obtenido. (e) Procedimiento previo a la esterilización del producto obtenido. (f) Presentación del producto terminado.

Figura 16

Elaboración de jugo tropical de naranjilla



Nota. (a) Preparación de la materia prima (lavado-desinfección). (b) Obtención de la pulpa de naranjilla. (c) Obtención de jugo tamizado. (d) Adición de insumos y pasterización de la naranjilla. (e) Presentación del producto terminado.