



Estabilidad fisicoquímica y calidad del liofilizado de *Tectona grandis* L. para uso fitosanitario*

Physicochemical stability and quality of freeze-dried *Tectona grandis* L. for phytosanitary use

Sting Brayan Luna-Fox¹, Luis Ramón Bravo-Sánchez², Jannys Liseth Rivera-Barreto²,
José Guillermo Guamán-Castillo², Abdel Bermúdez del Sol³

* Recepción: 1 de agosto, 2025. Aceptación: 16 de febrero, 2026. Este trabajo fue parte de un proyecto de investigación de la Universidad Estatal Amazónica, Ecuador.

¹ Universidad Nacional de Mar del Plata. Mar del Plata, Argentina. sting@fi.mdp.edu.ar (<https://orcid.org/0000-0001-6058-7024>).

² Universidad Estatal Amazónica, Departamento de Matemáticas y Ciencias Físicas. Puyo, Ecuador. lbravo@uea.edu.ec (autor para correspondencia; <https://orcid.org/0000-0001-5756-6628>); jl.riverab@uea.edu.ec (<https://orcid.org/0009-0009-2172-0529>); joseguamanc@gmail.com (<https://orcid.org/0009-0002-1811-7461>).

³ Universidad Regional Autónoma de los Andes, Facultad de Ciencias Médicas. Ambato, Ecuador. ua.abdelbermudez@uniandes.edu.ec (<https://orcid.org/0000-0002-0777-7635>).

Resumen

Introducción. El desarrollo de productos fitosanitarios a partir de extractos vegetales requiere establecer criterios de calidad y estabilidad para garantizar su eficacia y seguridad. **Objetivo.** Determinar las especificaciones para el control de calidad fisicoquímica de un producto fitosanitario a partir de un extracto acuoso liofilizado de hojas de *Tectona grandis* y evaluar la estabilidad en condiciones aceleradas por temperatura que permitan establecer su período de vida útil. **Materiales y métodos.** La investigación se realizó en la provincia de Pastaza, Ecuador, en el periodo de enero a mayo de 2024. Se recolectaron hojas maduras de *T. grandis*, se secaron, pulverizaron y se sometieron a extracción asistida por ultrasonido. El extracto acuoso se liofilizó y se evaluaron los parámetros de pH, conductividad eléctrica, humedad, cenizas totales, contenido de polifenoles totales y actividad antioxidante. Se aplicó el método de Bowker para establecer límites de especificación con siete réplicas y un 95 % de confianza. La estabilidad se evaluó mediante la pérdida de actividad antioxidante en almacenamiento acelerado (30, 40 y 50 °C), usando modelos cinéticos (orden cero, primero y segundo) y la ecuación de Arrhenius para proyectar la vida útil a 4, 15 y 20 °C. **Resultados.** El producto presentó un pH de 5,46-5,48; conductividad de 5,1-5,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$; humedad de 13,4-14,9 %; cenizas totales de 12,83-13,25 %; polifenoles totales de 55,33-57,93 mg EAG/100 g y una actividad antioxidante de 17 895,4-16 526,2 mg ET/100 g. Los tres modelos cinéticos permitieron predecir adecuadamente la vida útil. **Conclusiones.** Se definieron las especificaciones de calidad y estabilidad del extracto liofilizado de *T. grandis*, lo cual confirma su potencial como producto fitosanitario natural.

Palabras clave: teca, fungicida agrícola, antioxidante, estabilidad acelerada, Arrhenius, Bowker.



Abstract

Introduction. The development of phytosanitary products from plant extracts requires the establishment of quality and stability criteria to guarantee their efficacy and safety. **Objective.** To determine the specifications for the physicochemical quality control of a phytosanitary product based on a lyophilized aqueous extract of *Tectona grandis* leaves and to evaluate the stability under temperature-accelerated conditions to establish its shelf life. **Materials and methods.** The research was conducted in the province of Pastaza, Ecuador, from January to May, 2024. Mature leaves of *T. grandis* were collected, dried, pulverized and subjected to ultrasound-assisted extraction. The aqueous extract was freeze-dried and evaluated for pH, electrical conductivity, moisture, total ash, total polyphenol content and antioxidant activity. Bowker's method was applied to establish specification limits with seven replicates and 95 % confidence. Stability was evaluated by monitoring the loss of antioxidant activity in accelerated storage (30, 40 and 50 °C), using kinetic models (zero, first and second order) and the Arrhenius equation to project shelf life at 4, 15 and 20 °C. **Results.** The product showed a pH of 5.46-5.48; conductivity of 5.1-5.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$; moisture of 13.4-14.9 %; total ash of 12.83-13.25 %; total polyphenols of 55.33-57.93 mg ET/100, and an antioxidant activity of 17895.4-16526.2 mg Eq. Trolox/100g. The three kinetic models allowed for an adequate prediction of the shelf life. **Conclusions.** The quality and stability specifications of the lyophilized extract of *T. grandis* were defined, confirming its potential as a natural phytosanitary product.

Keywords: teak, agricultural fungicide, antioxidant, accelerated stability, Arrhenius, Bowker.

Introducción

La agricultura sostenible y ecológica promueve sistemas de producción que priorizan la armonía con el medioambiente, evitando el uso de insumos sintéticos. Este enfoque integra prácticas como el manejo agroecológico de plagas, que combina conocimientos tradicionales con innovación científica para garantizar cultivos saludables y rentables. Ante el aumento de la resistencia a fungicidas químicos y sus efectos adversos en la biodiversidad y la salud pública, se ha intensificado la investigación de alternativas basadas en extractos vegetales (Yang et al., 2024). Estas soluciones naturales no solo reducen la contaminación ambiental, sino que también preservan la eficacia a largo plazo en el control de patógenos.

El desarrollo de nuevos productos de origen natural para el control de plagas y enfermedades en la agricultura permite reemplazar los agroquímicos que tienen un impacto negativo sobre el ambiente. Se ha informado que los extractos acuosos o hidroalcohólicos de hojas o corteza de varias especies forestales, que se generan como residuos de la industria maderera, han mostrado resultados prometedores en el control de patógenos, dada su composición metabólica característica, rica en compuestos bioactivos que interfieren con los mecanismos de infección microbiana (Lyubenova et al., 2023; Ahmed et al., 2023).

Dentro de las especies forestales más estudiadas se encuentra *Tectona grandis* L. (teca), cuya madera es muy apreciada en la fabricación de muebles, quedando el follaje como el principal residuo (Charoensit et al., 2021). Dado que se ha demostrado que los extractos acuosos obtenidos a partir de las hojas de teca son ricos en taninos y flavonoides, que exhiben actividad inhibitoria contra importantes hongos fitopatógenos, como *Fusarium oxysporum* y *Colletotrichum gloeosporioides* (Han et al., 2023), obtener un producto fitosanitario a partir de dichos extractos sería una forma de aprovechamiento de ese residuo.

Una manera adecuada de obtener y preservar extractos acuosos puede ser en forma seca liofilizada. El proceso de liofilización se ha convertido en una de las técnicas más adecuadas para preservar la actividad biológica de los compuestos termolábiles. Estudios previos han demostrado que los extractos liofilizados mantienen su

estabilidad fisicoquímica y actividad antifúngica por períodos más prolongados en comparación con otras formas de conservación (Jurčević Šangut et al., 2024; Laureanti et al., 2023). Esta ventaja se debe a que la liofilización conserva la estructura molecular de los metabolitos secundarios, minimizando su degradación. Sin embargo, la transición de estos extractos desde el laboratorio hasta su aplicación comercial enfrenta un obstáculo crítico, que es la falta de protocolos estandarizados para evaluar su calidad y estabilidad a lo largo del tiempo.

La falta de estandarización en los bioplaguicidas derivados de *T. grandis* constituye un obstáculo importante para su implementación a gran escala. A diferencia de los fungicidas sintéticos, que disponen de protocolos bien establecidos para el control de calidad y la evaluación de la estabilidad, los productos naturales carecen de normativas claras, lo que dificulta su registro y comercialización (Goda, 2022; Khursheed et al., 2022). Esto resulta relevante cuando se considera que, aunque existe evidencia científica sólida sobre la eficacia antifúngica de estos extractos, su aplicación práctica en el campo agrícola sigue siendo escasa.

La problemática se agrava con los desafíos actuales de la agricultura. El cambio climático está favoreciendo la aparición de nuevas cepas de patógenos más agresivas, mientras que la demanda de alimentos libres de residuos tóxicos crece constantemente (Lahlali et al., 2024). En este escenario, la necesidad de contar con alternativas fungicidas efectivas, sostenibles y estandarizadas se vuelve cada vez más urgente. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue determinar las especificaciones para el control de calidad fisicoquímica de un producto fitosanitario a partir de un extracto acuoso liofilizado de hojas de *Tectona grandis* y evaluar la estabilidad en condiciones aceleradas por temperatura que permitan establecer su período de vida útil.

Materiales y métodos

Recolección y preparación de la muestra

La investigación se desarrolló en la provincia de Pastaza, Ecuador, entre enero y mayo de 2024. Se recolectaron hojas maduras de *T. grandis* procedentes de la parte media del dosel vegetal para garantizar un contenido óptimo de compuestos bioactivos y reducir el estrés oxidativo causado por la exposición solar directa. Las hojas fueron lavadas con agua destilada, seguido de un secado natural bajo sombra durante 2 h, con volteos manuales cada 30 min para garantizar un secado uniforme. Después, se sometieron a un secado en estufa a 50 °C por 24 h. El material foliar seco se pulverizó en un molino de cuchillas con una malla de aberturas de 0,5 mm a nivel 3 de velocidad.

Preparación del extracto acuoso

Se aplicó la extracción asistida por ultrasonido mediante un baño termostático con 6 L de capacidad en el tanque. Se mezclaron 75 g de sólido pulverulento de hojas de *T. grandis* con 500 mL (150 g/L) de agua destilada en un recipiente de vidrio, y la extracción se realizó durante 30 min a 60 °C y 100 % de amplitud ultrasónica. Finalmente, el extracto obtenido se filtró con papel Whatman n.º 4.

Liofilización del extracto acuoso

Se realizó en un sistema de secado por congelación, a 0,105 Torr de presión y una temperatura en el condensador de -110 °C. El proceso de liofilizado duró 4 días, 15 h y 42 min. El producto liofilizado se recogió en un recipiente de vidrio ámbar y los análisis posteriores se llevaron a cabo de inmediato.

Evaluación de la calidad del producto liofilizado

Se determinó el pH, la conductividad eléctrica, la humedad, las cenizas totales y el contenido de polifenoles totales. La selección de estos parámetros se realizó a partir de la revisión de numerosas normativas y literatura científica reciente sobre estándares aplicables a productos fitosanitarios naturales, formulaciones liofilizadas y extractos vegetales bioactivos. Se priorizaron aquellos indicadores que evalúan tanto la estabilidad fisicoquímica como la actividad biológica potencial del producto final.

Determinación del pH

Se pesó 1 g del extracto liofilizado en un vaso de precipitación de 100 mL y se disolvió en 20 mL de agua destilada. Posteriormente, se midió el pH de la disolución utilizando un pHmetro equipado con un electrodo previamente calibrado con soluciones búfer estándar (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013).

Conductividad eléctrica

Se tomó como referencia el método de Palmkron et al. (2023), para lo cual se preparó una disolución acuosa de 50 g/L del producto liofilizado y se realizó la medición de la conductividad mediante un conductímetro de mesa ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

Contenido de humedad

Se pesó 1 g del producto liofilizado en crisoles de porcelana previamente tarados. Las muestras se secaron en una estufa a 105 °C durante 4 h. Posteriormente, se retiraron y se enfriaron en un desecador antes de registrar su peso. Este proceso se repitió hasta alcanzar un peso constante. El contenido de humedad se determinó por diferencia de peso (ecuación 1).

$$\% H = 100 - \frac{C_{ms} - C}{C_{mf} - C} \cdot 100 \quad (1)$$

Donde C_{ms} representa la masa del crisol más la muestra seca (g), C indica la masa del crisol vacío (g) y C_{mf} es la masa del crisol más la muestra antes del proceso de secado (g).

Cenizas totales

En un crisol previamente tarado, se depositó 1 g del producto liofilizado. Las muestras se calcinaron durante 10 min sobre una plancha de calentamiento y, posteriormente, se introdujeron en una mufla a 550 °C por 4 h. Una vez finalizado el proceso, las muestras se retiraron y se dejaron enfriar en un desecador. Finalmente, se registró el peso obtenido y se calculó el contenido de cenizas (ecuación 2).

$$\% CE = \frac{C_c - C}{C_m - C} \cdot 100 \quad (2)$$

Donde C_c es la masa del crisol más la ceniza (g), C indica la masa del crisol vacío (g) y C_m la masa del crisol más la muestra antes de ser calcinada (g).

Compuestos polifenoles totales

El contenido de polifenoles totales se determinó mediante el método de Folin-Ciocalteu (Luna-Fox et al., 2023). Se preparó una disolución de 5 g/L del producto liofilizado, de la cual se tomó 1 mL y se mezcló con 0,5 mL de reactivo Folin-Ciocalteu. Esta mezcla se dejó en reposo durante 10 min a temperatura ambiente. Luego, se añadieron 0,5 mL de Na_2CO_3 (20 % p/v) y se aforó a 10 mL con agua destilada.

Las muestras se mantuvieron en oscuridad durante 2 h. La absorbancia se midió a 765 nm en un espectrofotómetro UV-Vis. La concentración de polifenoles totales se determinó mediante una curva de calibración ($R = 0,9949$) de ácido gálico (ecuación 3), y los resultados se expresaron en mg equivalentes de ácido gálico por 100 g de muestra (mg EAG/100 g).

$$A = 0,0734C - 0,0028 \quad (3)$$

Donde A representa la absorbancia y C la concentración de polifenoles totales (mg/L).

Cálculo de límites de especificaciones de calidad

Se empleó el método de Bowker para el cálculo estadístico de límites de especificación, el cual permite determinar los límites unilaterales y bilaterales (Beh et al., 2022). Se empleó como referencia un lote patrón homogéneo, elaborado bajo condiciones controladas de laboratorio. Para cada parámetro de calidad se realizaron siete réplicas analíticas, calculándose la media aritmética ($\bar{X}$) y la desviación estándar (DE).

Los límites de especificación se establecieron con un nivel de confianza del 95 % y un porcentaje de unidades conformes (100Q) del 98 %, donde Q representa la proporción esperada de elementos dentro de los límites de especificación. Los límites para las especificaciones bilaterales simétricas se calcularon a través de las expresiones matemáticas: LSE = $\bar{X} + ks$ (límite superior de especificación) y LIE = $\bar{X} - ks$ (límite inferior de especificación). El valor de k se calculó según la ecuación 4.

$$k = Z_p \left[1 + \frac{Z_\alpha}{\sqrt{2n}} + \frac{(5Z_\alpha^2 + 10)}{12n} \right] \quad (4)$$

Donde Z_p es el valor Z de la distribución normal para un área $Q/2$; Z_α es el valor Z de la distribución normal para un área $\alpha - 0,5$, y n es el número de repeticiones.

Actividad antioxidante

La actividad antioxidante se evaluó mediante el ensayo Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) según el procedimiento descrito por Arteaga-Crespo et al. (2020). Se tomaron 500 μL de una disolución de 50 g/L del producto liofilizado, los cuales se mezclaron con 5 mL de reactivo FRAP preparado con 2,4,6-piridil-s-triazina (TPTZ), cloruro de hierro III y tampón de acetato. El volumen se aforó a 10 mL con agua destilada, y la mezcla se incubó durante 30 min a 37 °C protegida de la luz.

La absorbancia se midió a 593 nm en un espectrofotómetro UV-Vis. La cuantificación de la actividad antioxidante se realizó mediante una curva de calibración de Trolox, y para el cálculo se utilizó el modelo matemático descrito en la ecuación 5 ($R = 0,9899$). Los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de Trolox por cada 100 gramos de muestra (mg ET/100 g).

$$C = \frac{A}{0,1879} \quad (5)$$

Donde A es la absorbancia de la muestra y C la concentración (mg/L)

Estabilidad del extracto liofilizado

Se evaluó la estabilidad del extracto mediante un estudio acelerado a 30, 40 y 50 °C en estufas, utilizando la actividad antioxidante como parámetro indicador; se realizaron tres réplicas para cada uno de los experimentos, y se utilizó el valor promedio. Las muestras del extracto liofilizado se almacenaron en frascos de vidrio herméticos, con suficientes unidades para evitar reposiciones posteriores al análisis, garantizando así la integridad del estudio. Las mediciones de actividad antioxidante se realizaron a los 0, 4, 7, 18 y 30 días, considerando que el extracto pierde su viabilidad cuando la actividad antioxidante disminuye un 30 %. Esta metodología se seleccionó debido a que los compuestos bioactivos responsables de la acción fungicida (taninos y flavonoides) presentan actividad antioxidante. El tiempo de vida útil se determinó a 4, 15 y 20 °C (ecuación 6).

$$-\frac{dA}{dt} = kA^n \quad (6)$$

Donde $-\frac{dA}{dt}$ representa la velocidad con la que se degrada la actividad antioxidante respecto al tiempo; k es la constante de velocidad que depende de la temperatura y de la actividad antioxidante; A indica la concentración de actividad antioxidante, y n representa el orden de la reacción.

La constante de velocidad se determinó mediante la ecuación de Arrhenius linealizada (ecuación 7), la cual establece una relación entre el logaritmo decimal de la constante de velocidad y el inverso de la temperatura absoluta.

$$\log k = \log k_0 - \left(\frac{E_a}{2,303R} \right) \cdot \frac{1}{T} \quad (7)$$

Donde E_a es la energía de activación (kJ/mol) y R es la constante universal de los gases (8,314 J/mol K).

Para determinar el orden de la reacción (n) que gobierna la degradación de la actividad antioxidante (ecuaciones 8, 9 y 10), se analizó la cinética de degradación mediante tres modelos matemáticos que resultaron de resolver la ecuación 6.

Orden cero

$$A = A_0 - kt \quad (8)$$

Primer orden

$$\ln(A) = \ln(A_0) - kt \quad (9)$$

Segundo orden

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_0} + kt \quad (10)$$

Resultados

Parámetros de calidad del producto fitosanitario liofilizado

Los resultados de los parámetros de calidad (Cuadro 1) indicaron que el pH mostró la menor variación con valores entre 5,46 y 5,48 y un coeficiente de variación (CV) de 0,11 %. La conductividad eléctrica varió entre 5,1 y

Cuadro 1. Mediciones de los parámetros de calidad fisicoquímica del extracto liofilizado de hojas de *Tectona grandis*, evaluados en siete réplicas. Puyo, Pastaza, Ecuador. Enero-mayo, 2024.

Table 1. Measurements of the physicochemical quality parameters of the freeze-dried extract of *Tectona grandis* leaves, evaluated in seven replicates. Puyo, Pastaza, Ecuador. January-May, 2024.

Réplica	pH	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	Cenizas (%)	Humedad (%)	Polifenoles totales (mg EAG/100 g)
1	5,47	5,40	13,09	14,50	57,40
2	5,47	5,50	12,94	14,90	55,93
3	5,47	5,80	13,10	14,50	56,79
4	5,48	5,50	13,25	14,30	57,91
5	5,47	5,10	12,95	13,90	57,93
6	5,46	5,90	12,83	14,90	55,33
7	5,47	5,90	12,89	13,40	56,93
CV (%)	0,11	5,31	1,12	3,77	1,72

CV: Coeficiente de variación. / **CV:** Coefficient of variation.

5,9 $\mu\text{S/cm}$ y presentó el mayor CV (5,31 %). El resultado más alto de cenizas totales fue de 13,25 % y el más bajo de 12,83 %; además, mostró un CV de 1,12 %. El menor contenido de humedad fue de 13,4 % y el más alto de 14,9 % con un CV de 3,77 %. Finalmente, los polifenoles totales presentaron un CV de 1,72 %, con concentraciones entre 55,33 y 57,93 mg EAG/100 g.

Límites de especificaciones de calidad

Los límites de especificación se establecieron de acuerdo con la distribución estadística de los datos. Para el pH, la conductividad eléctrica y el contenido de polifenoles totales se determinaron límites inferiores y superiores. En contraste, para las cenizas y la humedad solo se definió un límite superior (Cuadro 2).

Cuadro 2. Límites de especificación (superior e inferior) establecidos para los parámetros de calidad fisicoquímica del extracto liofilizado de *Tectona grandis*. Puyo, Pastaza, Ecuador. Enero-mayo, 2024.

Table 2. Specification limits (upper and lower) established for physicochemical quality parameters of the freeze-dried extract of *Tectona grandis*. Puyo, Pastaza, Ecuador. January-May, 2024.

Parámetro de calidad	Promedio (X)	Límite superior (LSE)	Límite inferior (LIE)
pH	5,47	5,49	5,45
Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	5,59	6,76	4,43
Cenizas (%)	13,01	13,59	-
Humedad (%)	14,30	16,50	-
Polifenoles totales (mg EAG/100g)	56,89	60,81	52,96

Actividad antioxidante

El producto fitosanitario presentó inicialmente una actividad antioxidante de 17 895,4 mg ET/100 g. Durante el almacenamiento, se evidenció una disminución progresiva de la actividad antioxidante en todas las temperaturas

evaluadas (Cuadro 3). Los resultados más bajos se observaron a los 30 días, con valores que variaron entre 16 995,8, 16 745,1 y 16 526,2 mg ET/100 g a los 30, 40 y 50 °C, respectivamente.

Cuadro 3. Actividad antioxidante (mg ET/100 g) del extracto liofilizado de *Tectona grandis* en función del tiempo (0-30 días) y la temperatura (30-50 °C) de almacenamiento. Puyo, Pastaza, Ecuador. Enero-mayo, 2024.

Table 3. Antioxidant activity (mg ET/100 g) of the freeze-dried extract of *Tectona grandis* as a function of storage time (0-30 days) and temperature (30 to 50 °C). Puyo, Pastaza, Ecuador. January-May, 2024.

Tiempo (días)	303 K (30 °C)	313 K (40 °C)	323 K (50 °C)
0	17 895,4	17 895,4	17 895,4
4	17 299,6	17 177,4	17 149,7
7	17 236,4	17 131,3	17 058,5
18	17 119,6	16 929,8	16 803,8
30	16 995,8	16 745,1	16 526,2

Estabilidad del producto fitosanitario

La degradación de la actividad antioxidante en función del tiempo se evaluó mediante el ajuste de los resultados experimentales a tres modelos cinéticos (Figura 1). Los datos obtenidos a las tres temperaturas de almacenamiento

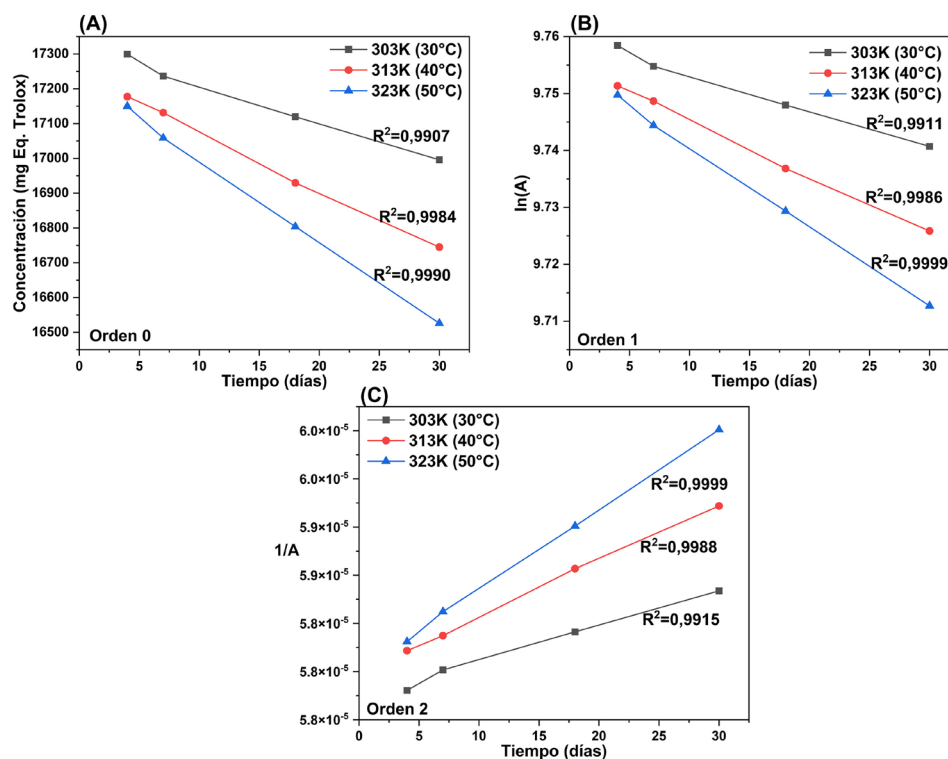


Figura 1. Degradación de la actividad antioxidante del extracto liofilizado de *Tectona grandis* almacenado a 30, 40 y 50 °C. Ajuste a los modelos de orden 0 (A), orden 1 (B) y orden 2 (C). Puyo, Pastaza, Ecuador. Enero-mayo, 2024.

Figure 1. Degradation of antioxidant activity of freeze-dried extract of *Tectona grandis* stored at 30, 40 and 50 °C. Fitted to models of order 0 (A), order 1 (B) and order 2 (C). Puyo, Pastaza, Ecuador. January-May, 2024.

(30, 40 y 50 °C) del extracto liofilizado se adaptaron a los modelos de cero, primer y segundo orden. Los análisis de regresión mostraron coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0,99 en todos los casos.

Las constantes de velocidad (k) se calcularon mediante extrapolación para los tres modelos cinéticos a las temperaturas de 4, 15 y 20 °C. Todos los ajustes a la ecuación de Arrhenius mostraron coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0,99, validando la dependencia térmica de la degradación de la actividad antioxidante en cada caso (Figura 2). El análisis de las constantes cinéticas mostró que, para todos los modelos evaluados, los valores de k aumentaron de manera proporcional con la temperatura.

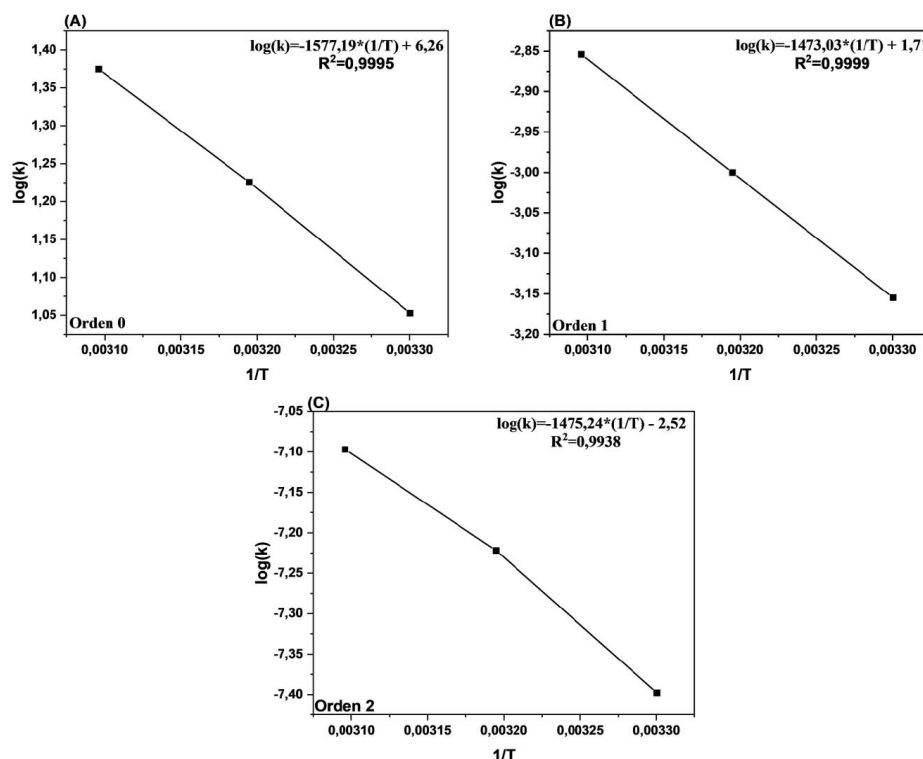


Figura 2. Determinación de la constante de velocidad (k) a partir de la ecuación linealizada de Arrhenius para estimar la vida útil del extracto liofilizado de *Tectona grandis* a diferentes temperaturas de almacenamiento (4, 15 y 20 °C). Puyo, Pastaza, Ecuador. Enero-mayo, 2024.

Figure 2. Determination of the rate constant (k) from the linearized Arrhenius equation to estimate the shelf life of the freeze-dried extract of *Tectona grandis* at different storage temperatures (4, 15 and 20 °C). Puyo, Pastaza, Ecuador. January-May, 2024.

Los tres modelos cinéticos evaluados permitieron estimar de manera adecuada la vida útil del producto fitosanitario, con resultados consistentes en las tres temperaturas analizadas (Cuadro 4). A 4 °C, el modelo de orden dos estimó la mayor estabilidad (4,75 años), seguido por los modelos de orden uno (4,13 años) y orden cero (4,05 años). A 15 °C, las estimaciones fueron muy similares entre modelos, con valores entre 2,45 y 2,54 años. Finalmente, a 20 °C, el modelo de orden dos nuevamente presentó la mayor vida útil (2,38 años), frente a 2,06 años para el modelo de orden uno y 1,98 años para el de orden cero.

Cuadro 4. Estimación de la vida útil del producto fitosanitario según los modelos cinéticos de orden 0, 1 y 2 a diferentes temperaturas de almacenamiento. Puyo, Pastaza, Ecuador. Enero-mayo, 2024.

Table 4. Estimation of the phytosanitary product shelf life according to kinetic models of order 0, 1 and 2 at different storage temperatures. Puyo, Pastaza, Ecuador. January-May, 2024.

	293 K (20 °C)	288 K (15 °C)	277 K (4 °C)
Orden 0			
Log(k)	0,86	0,78	0,57
k	7,53	6,08	3,68
Vida útil (días)	712,96	883,00	1458,86
Vida útil (meses)	23,77	29,43	48,63
Vida útil (años)	1,98	2,45	4,05
Orden 1			
Log(k)	-3,32	-3,41	-3,61
k	0,000480	0,00039	0,00024
Vida útil (días)	743,07	914,55	1486,15
Vida útil (meses)	24,77	30,49	49,54
Vida útil (años)	2,06	2,54	4,13
Orden 2			
log(k)	-7,56	-7,64	-7,85
k	0,000000028	0,000000027	0,000000014
Vida útil (días)	855,31	886,99	1710,62
Vida útil (meses)	28,51	29,57	57,02
Vida útil (años)	2,38	2,46	4,75

K: Constante de velocidad. / **K:** Rate constant.

Discusión

El producto fitosanitario formulado a partir del extracto acuoso liofilizado de *T. grandis* presentó valores de pH dentro del rango reportado para extractos liofilizados de otras especies vegetales. Estudios previos señalan valores entre 4,9 y 5,5 en extractos de *Ilex guayusa*, *Hibiscus sabdariffa*, *Ocotea quixos* y *Citrus aurantifolia* (Luna-Fox et al., 2023; Luna-Fox et al., 2025), lo cual indica que el pH del producto desarrollado es consistente con matrices similares de origen vegetal. El pH es un parámetro fundamental en productos liofilizados, ya que influye directamente en la estabilidad química y microbiológica, así como en la solubilidad y actividad de los principios activos una vez reconstituidos (Aksu et al., 2020).

Un pH ácido podría favorecer la conservación de compuestos bioactivos sensibles a condiciones alcalinas y puede mejorar la compatibilidad del producto con otros insumos agrícolas; esto reduce el riesgo de reacciones indeseadas durante su aplicación. La conductividad se encontró dentro del rango reportado para otros extractos vegetales (2-14,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$), donde se asocian estos valores a la presencia natural de electrolitos (K^+ , Na^+ , Ca^{2+}) y compuestos fenólicos solubles (Nowacka et al., 2019). En el extracto de *T. grandis*, los valores bajos de conductividad sugieren una carga iónica moderada, que puede ser ventajosa para su aplicación como producto

fitosanitario, ya que una menor conductividad favorece la estabilidad físicoquímica de la formulación y reduce el riesgo de incompatibilidades con otros insumos agrícolas.

Las cenizas totales indican la concentración de minerales inorgánicos y sales residuales presentes en el producto final. Los resultados obtenidos en este estudio fueron superiores a los encontrados en productos liofilizados de *Telfairia occidentalis* ($10,35 \pm 0,40$ %) (Henry et al., 2022), flores ($4,60 \pm 0,09$ %) y hojas ($3,07 \pm 0,04$ %) de *Moringa oleifera* (Manju et al., 2021). Estos minerales tienen un papel importante en la efectividad fitosanitaria de extractos vegetales; esto se debe a que algunos iones como el potasio y el calcio han sido reportados como cofactores en la actividad antifúngica de los metabolitos secundarios presentes en las plantas, lo que mejora su capacidad para actuar contra patógenos (Bauza-Kaszewska et al., 2022; Lombardo et al., 2023).

El contenido de humedad constituye uno de los análisis más recurrentes en materiales vegetales y productos sometidos a liofilización. Este parámetro resulta fundamental para garantizar la estabilidad, preservar la calidad de los extractos deshidratados y optimizar los procesos tecnológicos asociados a su elaboración. Los valores obtenidos ($13,9$ - $14,9$ %) superan los reportados para otros liofilizados como *Euterpe oleracea* ($5,68$ %) (Oliveira et al., 2019) y *Telfairia occidentalis* ($10,04$ %) (Henry et al., 2022). Esta diferencia podría deberse a la higroscopicidad de los compuestos de *T. grandis* y las condiciones ambientales de la Amazonía durante el procesamiento. Estos resultados resaltan la importancia de evaluar parámetros de humedad específicos para cada materia prima, particularmente en especies con alta concentración de metabolitos hidrofílicos.

La concentración de compuestos fenólicos totales en extractos de hojas de *T. grandis* ha sido reportada en estudios previos. Por ejemplo, se han reportado concentraciones entre 617 mg EAG/100g (Suryanti et al., 2020) y 4300 mg EAG/100g (Budianto et al., 2023) en extractos acuosos. Estos resultados fueron superiores a los encontrados en esta investigación. Varios autores han indicado que la variabilidad de los compuestos bioactivos está influenciada por condiciones ambientales, características genéticas, así como por la ubicación radial dentro del tronco, la posición y edad de las hojas, y la madurez del árbol (Campos et al., 2025; Chávez-Salgado et al., 2022; Sugumaran et al., 2024).

Se han identificado diferentes compuestos con potencial biológico en los extractos líquidos de *T. grandis*. Por ejemplo, en un estudio previo se logró identificar y aislar diversos compuestos a partir de fracciones obtenidas con cloruro de metileno ($\text{DCM}/\text{H}_2\text{O}$) y acetato de etilo ($\text{EtOAc}/\text{H}_2\text{O}$), empleando un proceso de extracción a temperatura ambiente durante 24 h (Macías et al., 2008). Entre los compuestos detectados se encontraron apocarotenoides, cuya actividad fitotóxica fue confirmada. Uno de ellos, el 3β -hidroxi- $7,8$ -dihidro- β -ionol, mostró un potencial efecto alelopático en cultivos de lechuga y tomate. En investigaciones posteriores, se logró extraer y caracterizar diterpenos y triterpenos. Asimismo, se determinó la configuración estructural del ácido abeograndinoico y se comprobó el notable efecto fitotóxico tanto del ácido 2-oxokovalénico como del 19-hidroxiferruginol (Macías et al., 2010).

Adicional a las propiedades fitotóxicas descritas, se ha documentado que los metabolitos secundarios de *T. grandis* poseen un espectro de actividad biológica que trasciende el ámbito alelopático, en línea con la versatilidad farmacológica descrita para metabolitos fenólicos, terpenoides, quinonas y otros compuestos vegetales con efectos antioxidantes, citotóxicos, antimicrobianos, antiinflamatorios y antitumorales (Riaz et al., 2023; Vyas et al., 2019). Entre estos se reporta la 5-hidroxi-1,4-naftoquinona asociada con una marcada actividad antibacteriana, el 4-hidroxilapachol por su efecto citotóxico y una naftoquinona con propiedades antiulcerosas (Vyas et al., 2019; Zhao et al., 2023). Asimismo, la literatura científica destaca la presencia del ácido 2-hexadecanoiloxibenzoico con capacidad antiviral, del lapachol con reconocido potencial antitumoral y del 4',5'-dihidroxi-epi-isocatalapachol, el cual exhibe un carácter antifúngico (Barzkar et al., 2024; Rui et al., 2025; Zhao et al., 2023). Finalmente, se resalta la relevancia de la 5,8-dihidroxi-2-metilntraquinona debido a su eficacia antiplasmódica (Kiss et al., 2023). El hallazgo de estos metabolitos reafirma la versatilidad química de la especie y sugiere un elevado potencial para el desarrollo de agentes terapéuticos.

Los límites de calidad utilizando las estadísticas de la prueba de Bowker presentan valores óptimos que proporcionaron estabilidades y eficiencias satisfactorias en el liofilizado. El intervalo de pH indica que el producto necesita un medio ligeramente ácido para mantener la estabilidad de sus principios activos, probablemente debido a la sensibilidad de los compuestos fenólicos. El rango de límites de conductividad eléctrica también proporciona un buen control del contenido iónico, lo cual es esencial para asegurar la pureza del producto y su correcta solubilidad al momento de su aplicación.

El límite de cenizas regula el contenido mineral para evitar cualquier efecto adverso en la formulación final. El contenido de humedad resulta crucial para que el producto liofilizado conserve sus propiedades, ya que un exceso podría reactivar las enzimas y la actividad microbiana. El rango bilateral para los polifenoles asegura una concentración óptima de estos bioactivos responsables de su actividad biológica, previniendo tanto niveles insuficientes como excesivos que podrían comprometer su eficacia.

En esta investigación, se utilizó la capacidad antioxidante como indicador cuantitativo de la estabilidad química del producto en condiciones aceleradas. Esta elección se justifica por el hecho de que los compuestos responsables de la actividad biológica del extracto liofilizado de *T. grandis* son los polifenoles, los cuales representan los mayores contribuyentes a su potencial antioxidante (Di Salvo et al., 2023). Teniendo en cuenta que estos compuestos son susceptibles a procesos de oxidación, y que dicha reacción se acelera con el aumento de la temperatura, el análisis de la capacidad antioxidante bajo estas condiciones ayuda a inferir con mayor precisión la tasa de degradación de los compuestos bioactivos.

El buen ajuste de los datos a los tres modelos cinéticos evaluados puede atribuirse a la naturaleza controlada del sistema y a la composición química del extracto, rica en compuestos fenólicos con patrones bien caracterizados de degradación térmica. Diversos estudios han reportado que los polifenoles, principales responsables de la actividad antioxidante, siguen trayectorias de degradación que pueden ajustarse tanto a modelos de orden cero, como de primer y segundo orden. El ajuste depende de factores como la matriz, la temperatura y la concentración (Hobbi et al., 2021; Natolino & Da Porto, 2020; Sridhar et al., 2021).

En extractos vegetales liofilizados, como el utilizado en este estudio, la homogeneidad del sistema y la ausencia de actividad enzimática contribuyen a una cinética más predecible (Selvakumar et al., 2021). Además, la naturaleza compleja de la actividad antioxidante, resultado de la interacción sinérgica entre distintos metabolitos puede explicar por qué distintos modelos logran describir adecuadamente su evolución en el tiempo (Munteanu & Apetrei, 2021). Esto refuerza la aplicabilidad de la cinética química en la predicción de la estabilidad de productos fitosanitarios basados en extractos naturales, especialmente bajo condiciones controladas de almacenamiento y simulación acelerada.

La fuerte correlación observada entre las constantes cinéticas y la temperatura, validada mediante el modelo de Arrhenius, refleja el carácter típicamente termodependiente de los procesos de degradación oxidativa en matrices ricas en compuestos fenólicos. Esta relación ha sido ampliamente documentada en sistemas vegetales, donde el aumento de la temperatura incrementa la tasa de oxidación de metabolitos bioactivos, lo cual disminuye progresivamente la actividad antioxidante (De Vilela Silva et al., 2023; Zawawi et al., 2022). Esto sugiere que las condiciones de procesamiento y almacenamiento térmico son cruciales para preservar la capacidad bioactiva de estos compuestos.

El comportamiento observado en este estudio es consistente con el principio de que la estabilidad de los polifenoles se ve comprometida por mecanismos térmicos de descomposición, como la ruptura de anillos aromáticos o la pérdida de grupos hidroxilo, los cuales afectan su capacidad reductora (Yang et al., 2022). El grado de ajuste al modelo de Arrhenius sugiere que no existieron interferencias importantes de factores externos, como reacciones paralelas o cambios en el medio, lo cual es característico de sistemas bien controlados, como los obtenidos por liofilización. Este comportamiento confirma la aplicabilidad de modelos cinéticos en la predicción del deterioro funcional de extractos naturales y proporciona una base sólida para proyectar la vida útil del producto bajo distintas condiciones de almacenamiento.

Cabe destacar que, si bien para medicamentos de uso humano rara vez se tolera más de un 15 % de degradación, un cambio de hasta un 20 o 30 % resulta aceptable para considerar que un producto de este tipo conserva sus características de calidad (Rojas Triana, 2021). Es posible conservar el liofilizado hasta cuatro años en refrigeración. Sin embargo, a una temperatura cercana a la ambiental, como 20 °C, su durabilidad es de dos años, lo cual resulta aceptable sin que sea necesario el gasto energético que conlleva la refrigeración.

Esta investigación aporta bases para estudios futuros, dentro del marco de la química verde, orientados a la obtención de productos naturales a partir de residuos agroindustriales y forestales, con menor impacto ambiental al evitar el uso de agroquímicos tóxicos o peligrosos. Para los agricultores, podría representar una alternativa de fácil adquisición y preparación mediante simple reconstitución en disolución acuosa, además de requerir un volumen reducido de almacenamiento mientras se conserve en estado sólido.

Conclusiones

Las especificaciones calculadas para los parámetros evaluados permiten realizar un control efectivo de la calidad fisicoquímica del producto liofilizado obtenido a partir de hojas de *Tectona grandis*. El producto liofilizado presentó una estabilidad de al menos dos años a una temperatura cercana a la ambiental (20 °C), lo cual se considera aceptable en correspondencia con su finalidad de uso.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Estatal Amazónica por el apoyo financiero brindado a través del proyecto “Desarrollo de nuevos productos agroindustriales de alto valor agregado a partir de aceites fijos, esenciales y extractos de plantas ricos en metabolitos antioxidantes o antimicrobianos”, código: DI-PR-2022-UEA-003.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Ahmed, H. F. A., Seleiman, M. F., Mohamed, I. A. A., Taha, R. S., Wasonga, D. O., & Battaglia, M. L. (2023). Activity of essential oils and plant extracts as biofungicides for suppression of soil-borne fungi associated with root rot and wilt of marigold (*Calendula officinalis* L.). *Horticulturae*, 9(2), Artículo 222. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020222>
- Aksu, M. İ., Turan, E., & Şat, İ. G. (2020). Effects of lyophilized red cabbage water extract and pH levels on the quality properties of *Pastırma cemen* paste during chilled storage. *Journal of Stored Products Research*, 89, Artículo 101696. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101696>
- Arteaga-Crespo, Y., Radice, M., Bravo-Sanchez, L. R., García-Quintana, Y., & Scalvenzi, L. (2020). Optimisation of ultrasound-assisted extraction of phenolic antioxidants from *Ilex guayusa* Loes. leaves using response surface methodology. *Heliyon*, 6(1), Artículo e3043. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03043>

- Barzkar, N., Sukhikh, S., & Babich, O. (2024). Study of marine microorganism metabolites: new resources for bioactive natural products. *Frontiers in Microbiology*, 14, Artículo 1285902. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1285902>
- Bauza-Kaszewska, J., Breza-Boruta, B., Lemańczyk, G., & Lamparski, R. (2022). Effects of eco-friendly product application and sustainable agricultural management practices on soil properties and phytosanitary condition of winter wheat crops. *Sustainability*, 14(23), Artículo 15754. <https://doi.org/10.3390/su142315754>
- Beh, E. J., & Lombardo, R. (2022). Visualising departures from symmetry and Bowker's X^2 Statistic. *Symmetry*, 14(6), Artículo 1103. <https://doi.org/10.3390/sym14061103>
- Budianto, P., Suroto, S., Wasita, B., & Mirawati, D. K. (2023). *Tectona grandis* leaves: Determination of total flavonoid content, phenolic content, characterization of the leaves, and compound identification in GC-MS. *Pharmacognosy Journal*, 15(1), 165-170. <https://doi.org/10.5530/pj.2023.15.24>
- Campos, C. M., Hoffmann, W. R., Correia, F. dos S., Lengowski, E. C., Silva, M. J. da, Natalino, R., Oliveira, A. C., & Pereira, B. L. C. (2025). Radial variation in colorimetric parameters, chemical composition, and biological resistance of teak wood extracted from 13- and 22-year-old teak trees. *Forests*, 16(1), Artículo 177. <https://doi.org/10.3390/f16010177>
- Charoensit, P., Sawasdiapol, F., Tibkawin, N., Suphrom, N., & Khorana, N. (2021). Development of natural pigments from *Tectona grandis* (teak) leaves: Agricultural waste material from teak plantations. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 19, Artículo 100365. <https://doi.org/10.1016/j.sep.2020.100365>
- Chávez-Salgado, L., Vandenbossche, V., & Vilarem, G. (2022). *Tectona grandis* Linn. f. secondary metabolites and their bioactive potential: a review. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 15(2), Article 112-120. <https://doi.org/10.3832/IFOR3714-015>
- De Vilela Silva, E. T., Melo de Queiroz, A. J., Feitosa de Figueirêdo, R. M., Moura, H. V., Dos Santos, F. S., De França Silva, A. P., Fernandes Cavalcanti, C., Gonçalves Gregório, M., Oliveira Galdino, P., & Palmeira Gomes, J. (2023). Dynamic modelling of degradation kinetics of phenolic compounds, phenolic profiles, mineral content, and overall antioxidant capacity of germinated peanut flours. *LWT*, 183, Artículo 114927. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114927>
- Di Salvo, E., Gangemi, S., Genovese, C., Cicero, N., & Casciaro, M. (2023). Polyphenols from Mediterranean plants: biological activities for skin photoprotection in atopic dermatitis, psoriasis, and chronic urticaria. *Plants*, 12(20), Artículo 3579. <https://doi.org/10.3390/plants12203579>
- Goda, Y. (2022). Regulatory science of natural products. *Journal of Natural Medicines*, 76(4), 732-747. <https://doi.org/10.1007/s11418-022-01639-w>
- Han, M., Yang, F., Zhang, K., Ni, J., Zhao, X., Chen, X., Zhang, Z., Wang, H., Lu, J., & Zhang, Y. (2023). Antioxidant, anti-inflammatory and anti-diabetic activities of *Tectona grandis* methanolic extracts, fractions, and isolated compounds. *Antioxidants*, 12(3), Artículo 664. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX12030664>
- Henry, A. D., Noble, K., Michael, S., Raphael, J., William Akuffo, O. F., Philomena, E., Francis, A., & Kwabena, O. K. (2022). Investigation of the physicochemical properties of freeze-dried fruit pulp of *Telfairia occidentalis* and its potential use as suspending agent. *Heliyon*, 8(7), Artículo e09997. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09997>
- Hobbi, P., Okoro, O. V., Delporte, C., Alimoradi, H., Podstawczyk, D., Nie, L., Bernaerts, K. V., & Shavandi, A. (2021). Kinetic modelling of the solid-liquid extraction process of polyphenolic compounds from apple pomace: influence of solvent composition and temperature. *Bioresources and Bioprocessing*, 8(1), 1-14. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00465-4>

- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013). *NTE INEN 1122:2013. Requisitos del café soluble*. Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Jurčević Šangut, I., Pavličević, L., & Šamec, D. (2024). Influence of air drying, freeze drying and oven drying on the biflavone content in yellow ginkgo (*Ginkgo biloba* L.) leaves. *Applied Sciences*, 14(6), Artículo 2330. <https://doi.org/10.3390/app14062330>
- Khursheed, A., Rather, M. A., Jain, V., Wani, A. R., Rasool, S., Nazir, R., Malik, N. A., & Majid, S. A. (2022). Plant based natural products as potential ecofriendly and safer biopesticides: a comprehensive overview of their advantages over conventional pesticides, limitations and regulatory aspects. *Microbial Pathogenesis*, 173, Artículo 105854. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2022.105854>
- Kiss, A., Akbari, F. H., Marchev, A., Papp, V., & Mirmazloum, I. (2023). The cytotoxic properties of extreme fungi's bioactive components—an updated metabolic and omics overview. *Life*, 13(8), Artículo 1623. <https://doi.org/10.3390/life13081623>
- Lahlali, R., Taoussi, M., Laasli, S. E., Gachara, G., Ezzougari, R., Belabess, Z., Aberkani, K., Assouguem, A., Meddich, A., El Jarroudi, M., & Barka, E. A. (2024). Effects of climate change on plant pathogens and host-pathogen interactions. *Crop and Environment*, 3(3), 159-170. <https://doi.org/10.1016/j.crope.2024.05.003>
- Laureanti, E. J. G., Paiva, T. S., De Matos Jorge, L. M., & Jorge, R. M. M. (2023). Microencapsulation of bioactive compound extracts using maltodextrin and gum arabic by spray and freeze-drying techniques. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, Artículo 126969. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126969>
- Lombardo, M. F., Panebianco, S., Azzaro, A., Catara, V., & Cirvilleri, G. (2023). Assessing copper-alternative products for the control of pre- and postharvest *Citrus anthracnose*. *Plants*, 12(4), Artículo 904. <https://doi.org/10.3390/plants12040904>
- Luna-Fox, S. B., Álvarez-Castro, R. R., Peñafiel-Bonilla, N. J., Radice, M., Scalvenzi, L., Arteaga-Crespo, Y., López-Hernández, O. D., & Bravo-Sánchez, L. R. (2023). Elaboración de un preparado hidrosoluble en forma de sólido pulverulento a partir de *Ilex guayusa* Loes. *La Técnica Revista de Las Agrociencias*, 13(1), 47-56. <https://doi.org/10.33936/latecnica.v13i1.5725>
- Luna-Fox, S. B., García-Quintana, Y., Arteaga-Crespo, Y., & Radice, M. (2025). Formulation of lyophilized products rich in polyphenols from *Hibiscus sabdariffa* and its combination with *Ocotea quixos* and *Citrus aurantifolia*. *Revista Chilena de Nutrición*, 52(1), 31-42. <https://doi.org/10.4067/s0717-75182025000100031>
- Lyubenova, A., Rusanova, M., Nikolova, M., & Slavov, S. B. (2023). Plant extracts and Trichoderma spp: possibilities for implementation in agriculture as biopesticides. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, 37(1), 159-166. <https://doi.org/10.1080/13102818.2023.2166869>
- Macías, F. A., Lacret, R., Varela, R. M., Nogueiras, C., & Molinillo, J. M. G. (2008). Bioactive apocarotenoids from *Tectona grandis*. *Phytochemistry*, 69(15), 2708-2715. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2008.08.018>
- Macías, F. A., Lacret, R., Varela, R. M., Nogueiras, C., & Molinillo, J. M. G. (2010). Isolation and phytotoxicity of terpenes from *Tectona grandis*. *Journal of Chemical Ecology*, 36(4), 396-404. <https://doi.org/10.1007/s10886-010-9769-3>
- Manju, K. M., Rekha, Priyanka, & Kumar, N. (2021). Effect of fluidized-bed and freeze-drying techniques on physicochemical, nutritional, thermal, and structural properties of *Moringa oleifera* flowers, leaves, and seeds. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(9), Artículo e15719. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15719>

- Munteanu, I. G., & Apetrei, C. (2021). Analytical methods used in determining antioxidant activity: a review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(7), Artículo 3380. <https://doi.org/10.3390/ijms22073380>
- Natolino, A., & Da Porto, C. (2020). Kinetic models for conventional and ultrasound assistant extraction of polyphenols from defatted fresh and distilled grape marc and its main components skins and seeds. *Chemical Engineering Research and Design*, 156, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.01.009>
- Nowacka, M., Tappi, S., Wiktor, A., Rybak, K., Miszczykowska, A., Czyzewski, J., Drozdal, K., Witrowa-Rajchert, D., & Tylewicz, U. (2019). The impact of pulsed electric field on the extraction of bioactive compounds from beetroot. *Foods*, 8(7), Artículo 244. <https://doi.org/10.3390/foods8070244>
- Oliveira, A. R., Ribeiro, A. E. C., Oliveira, É. R., Garcia, M. C., Soares Júnior, M. S., & Caliani, M. (2019). Structural and physicochemical properties of freeze-dried açai pulp (*Euterpe oleracea* Mart.). *Food Science and Technology*, 40(2), 282-289. <https://doi.org/10.1590/fst.34818>
- Palmkron, S. B., Bergenstahl, B., Håkansson, S., Wahlgren, M., Fureby, A. M., & Larsson, E. (2023). Quantification of structures in freeze-dried materials using X-ray microtomography. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 658, Artículo 130726. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130726>
- Riaz, M., Khalid, R., Afzal, M., Anjum, F., Fatima, H., Zia, S., Rasool, G., Egbuna, C., Mtewa, A. G., Uche, C. Z., & Aslam, M. A. (2023). Phytobioactive compounds as therapeutic agents for human diseases: a review. *Food Science & Nutrition*, 11(6), 2500-2529. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3308>
- Rojas Triana, K. D. (2021). *Evaluación de la estabilidad oxidativa y las propiedades fisicoquímicas de un aderezo de quinua (Chenopodium quinoa. Willd) con vegetales producido en Cundinamarca* [Trabajo de graduación, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio UNAD. <http://repository.unad.edu.co/handle/10596/40441>
- Rui, S., Fengrui, G., Yining, Z., Hong, S., Xuwen, Y., Changping, W., & Chunjia, Y. (2025). Biological activity of secondary metabolites of actinomycetes and their potential sources as antineoplastic drugs: a review. *Frontiers in Microbiology*, 16, Artículo 1550516. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1550516>
- Selvakumar, P., Karthik, V., Kumar, P. S., Asaithambi, P., Kavitha, S., & Sivashanmugam, P. (2021). Enhancement of ultrasound assisted aqueous extraction of polyphenols from waste fruit peel using dimethyl sulfoxide as surfactant: assessment of kinetic models. *Chemosphere*, 263, Artículo 128071. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128071>
- Sridhar, A., Ponnuchamy, M., Kumar, P. S., Kapoor, A., Vo, D. V. N., & Prabhakar, S. (2021). Techniques and modeling of polyphenol extraction from food: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(4), 3409-3443. <https://doi.org/10.1007/S10311-021-01217-8>
- Sugumaran, M. P., Kumar, G. G., Porkodi, G., & Kalaichelvi, K. (2024). Exploring the responses of teak and eucalyptus to elevated carbon dioxide in a changing atmosphere. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 23(3), 56-65. <https://doi.org/10.9734/ajee/2024/v23i3534>
- Suryanti, V., Kusumaningsih, T., Marliyana, S. D., Setyono, H. A., & Trisnawati, E. W. (2020). Identification of active compounds and antioxidant activity of teak (*Tectona grandis*) leaves. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 21(3), 946-952. <https://doi.org/10.13057/BIODIV/D210313>
- Vyas, P., Yadav, D. K., & Khandelwal, P. (2019). *Tectona grandis* (teak) – A review on its phytochemical and therapeutic potential. *Natural Product Research*, 33(16), 2338–2354. <https://doi.org/10.1080/14786419.2018.1440217>

- Yang, C. M., Chathuranga, K., Lee, J. S., & Park, W. H. (2022). Effects of polyphenols on the thermal decomposition, antioxidative, and antimicrobial properties of poly(vinyl alcohol) and poly(vinyl pyrrolidone). *Polymer Testing*, 116, Artículo 107786. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMERTESTING.2022.107786>
- Yang, C., Ji, X., Cheng, C., Liao, S., Obuobi, B., & Zhang, Y. (2024). Digital economy empowers sustainable agriculture: Implications for farmers' adoption of ecological agricultural technologies. *Ecological Indicators*, 159, Artículo 111723. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111723>
- Zawawi, N. A. F., Hazmi, N. A. M., How, M. S., Kantono, K., Silva, F. V. M., & Sulaiman, A. (2022). Thermal, high pressure, and ultrasound inactivation of various fruit cultivars' polyphenol oxidase: kinetic inactivation models and estimation of treatment energy requirement. *Applied Sciences*, 12(4), Artículo 1864. <https://doi.org/10.3390/app12041864>
- Zhao, S., Li, J., Liu, J., Xiao, S., Yang, S., Mei, J., Ren, M., Wu, S., Zhang, H., & Yang, X. (2023). Secondary metabolites of *Alternaria*: a comprehensive review of chemical diversity and pharmacological properties. *Frontiers in Microbiology*, 13, Artículo 1085666. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1085666>