

Extracción Enzimática vs. Prensado: Contenido de Antioxidantes en el Aceite de Palma Africana (*Elaeis guineensis*)

Gutiérrez-Rueda, Patricia^{1,2,3} ; Delgado-Salgado, Patricio^{1,2,4} ; Champutiz-Ortiz, Eliana^{4,*} 

¹Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias Exactas, Quito-Ecuador

²Universidad Yachay Tech, Escuela de Ciencias Químicas e Ingeniería, Urcuquí, Ecuador

³Universidad Federal do Pará, Faculdade de Engenharia em Alimentos, Belém, Brasil

⁴Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Médicas, Quito, Ecuador

Resumen: El presente estudio aborda la optimización del proceso de extracción de aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*), con prioridad en el contenido antioxidante como parámetro de calidad. La extracción tradicional por prensado, aunque ampliamente utilizada, compromete la integridad de compuestos antioxidantes. Se plantea como problema la necesidad de procesos más eficientes y sostenibles que maximicen el rendimiento de aceite y conserven sus propiedades funcionales. El objetivo fue comparar el rendimiento y calidad del aceite obtenido mediante tratamiento enzimático (celulasa, pectinasa y proteasa) frente al prensado convencional, a partir de la evaluación de variables operacionales: temperatura, concentración enzimática y tiempo. Se utilizó un diseño experimental compuesto central rotacional (DCCR), y se aplicaron metodologías validadas para cuantificar carotenoides, compuestos fenólicos, capacidad antioxidante (ABTS) y estabilidad oxidativa. Los resultados mostraron que la extracción enzimática incrementó significativamente el rendimiento de aceite y la concentración de antioxidantes. La pectinasa mostró el mayor rendimiento (88.78%), mientras que la proteasa proporcionó la mayor concentración de carotenoides (1174.86 ppm) y capacidad antioxidante (168.65 $\mu\text{mol Trolox/g}$). Las muestras tratadas enzimáticamente sin prensar (DSP) superaron consistentemente a las prensadas (DP) en todas las variables analizadas. La validación del modelo estadístico confirmó la robustez de las condiciones experimentales. Se concluye que la extracción enzimática acuosa representa una estrategia tecnológica efectiva para mejorar la calidad nutricional del aceite de palma, al preservar su perfil antioxidante, y así minimizar impactos térmicos y químicos. Esta investigación respalda su aplicación industrial como una alternativa sustentable y funcional para aceites vegetales de alta calidad.

Palabras clave: Palma Africana de Aceite, Efecto Antioxidante, Procesamiento y Extracción

Enzymatic Extraction versus Pressing: Antioxidant Content in African Palm Oil (*Elaeis guineensis*)

Abstract: This study addresses the optimization of the extraction process of African palm oil (*Elaeis guineensis*), with priority given to the antioxidant content as a quality parameter. Traditional pressing extraction, although widely used, compromises the integrity of antioxidant compounds. The problem posed is the need for more efficient and sustainable processes that maximize oil yield while preserving its functional properties. The objective was to compare the yield and quality of oil obtained through enzymatic treatment (cellulase, pectinase, and protease) versus conventional pressing, based on the evaluation of operational variables: temperature, enzyme concentration, and time. A central composite rotational design (CCRD) was used, applying validated methodologies to quantify carotenoids, phenolic compounds, antioxidant capacity (ABTS), and oxidative stability. The results showed that enzymatic extraction significantly increased oil yield and antioxidant concentration. Pectinase showed the highest yield (88.78%), while protease provided the highest concentration of carotenoids (1174.86 ppm) and antioxidant capacity (168.65 $\mu\text{mol Trolox/g}$). Enzymatically treated samples without pressing (DSP) consistently outperformed pressed ones (DP) in all variables analyzed. The validation of the statistical model confirmed the robustness of the experimental conditions. It is concluded that aqueous enzymatic extraction represents an effective technological strategy to improve the nutritional quality of palm oil by preserving its antioxidant profile while minimizing thermal and chemical impacts. This research supports its industrial application as a sustainable and functional alternative for high-quality vegetable oils.

Keywords: African Palm Oil, Antioxidant Effect, Processing and Extraction

1. INTRODUCCIÓN

*emchamputiz@uce.edu.ec
Recibido: 13/09/2025
Aceptado: 15/07/2025

El aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*), por su potencial productivo, representa aproximadamente el 35 % de producción y comercialización en el mercado global de aceites vegetales, consolidándose como el más consumido a nivel mundial (Chong et al., 2017). Algunas propiedades únicas como la resistencia a la oxidación, elevado punto de fusión y proceso de obtención han contribuido en esta expansión y su amplio uso en la industria alimentaria.

Con respecto a su composición, se caracteriza por su alto contenido de carotenos (provitamina A), que le da el típico color rojizo al fruto, también contiene fracciones de la vitamina E como tocoferoles y tocotrienoles, compuestos fenólicos y otros fitonutrientes (Goncalves et al., 2016; Teixeira et al., 2013).

Los tocoferoles y tocotrienoles unidos a los carotenos reducen en daño celular producido por la acción de sustancias tóxicas o contaminación del ambiente, es decir, actúan como agentes antioxidantes, reducen el envejecimiento y desarrollo de algunas enfermedades. Pueden participar como agentes anticancerígenos e incluso, antitrombóticos. Funcionan, además, como fuente de vitamina A (Es-Sai et al., 2025).

No obstante, su composición final dependerá de varios factores que incluyen: especie, grado de maduración del fruto, parte que se utilizará para su extracción (pulpa o almendra) y el procesamiento, siendo este último, clave para obtener un aceite con mayor aporte nutricional (Kumar et al., 2017).

En términos generales, el aceite de palma africana está en equilibrio entre grasas saturadas e insaturadas, estas últimas están distribuidas en un 40% de ácido oleico y 10% de ácido linoleico, ambos, fuentes de omega 6 y 9 (Es-Sai et al., 2025).

Las propiedades nutricionales y la creciente demanda y producción mundial de aceite de palma han captado el interés de la industria en este campo. Los métodos más comunes de extracción, como el prensado y el uso de disolventes, presentan un desafío frente a la pérdida de carotenoides y ácidos grasos insaturados. Además, la búsqueda de tecnologías más limpias, rentables y sostenibles ha impulsado una intensa investigación para mejorar la eficiencia y escalabilidad del proceso (Bandura, 2023).

Las consideraciones de seguridad relativas al uso de disolventes orgánicos llevaron a la creación de un proceso de extracción acuosa (PEA) con el objetivo de encontrar una tecnología más limpia para extraer el aceite y para conservar sus propiedades funcionales (Ghorbanzadeh & Rezaei, 2017; Yusoff et al., 2015).

La baja extracción de aceite es uno de los principales retos de la PEA, que puede mejorarse al aplicar enzimas hidrolíticas a este proceso (2020; Ghorbanzadeh & Rezaei, 2017). Los estudios indican que la rotura de la pared celular aumenta el rendimiento de extracción de aceite y compuestos antioxidantes (Rathi et al., 2012), ya que se ha visto una pérdida considerable de estas sustancias durante el proceso de refinado, blanqueamiento y desodorización (Balvardi et al., 2015).

Otras ventajas en los procedimientos de extracción enzimática están relacionadas con su aceleración en los procesos, toxicidad mínima, contaminación ambiental incipiente y la concentración enzimática que se requiere, el pH y temperaturas son fácilmente controlables, luego de una estandarización adecuada (Chodar et al., 2017).

Además, estos estudios han demostrado que la eficacia y la calidad del aceite dependen de determinadas condiciones (temperatura, tiempo, agitación, concentración de enzimas, pH) que favorecen la extracción. Las enzimas más utilizadas para la extracción acuosa de aceite son la celulasa, la pectinasa, la proteasa y la α -amilasa (Vovk et al., 2023).

En el ámbito de la extracción y obtención de compuestos bioactivos, se han explorado nuevas técnicas y herramientas destinadas a mejorar el rendimiento de los procesos, como la incorporación de complejos enzimáticos sintéticos y otros recursos. La enzimología industrial desempeña un papel crucial, ya que facilita la conversión de productos naturales en productos de alto valor añadido (Rahban et al., 2022).

El empleo de enzimas para extraer carotenoides se fundamenta en la hidrólisis de la pared celular de las plantas y de compuestos de alto peso molecular, como proteínas, polifenoles y polisacáridos (Silvamany, 2015).

En las últimas décadas, se ha investigado intensamente el uso de enzimas en la extracción de aceites vegetales y compuestos bioactivos, aplicándose esta técnica a semillas oleaginosas de interés comercial (Campos et al., 2022).

La extracción de aceite de palma ha evolucionado hacia métodos más sostenibles, destacando el uso de enzimas como celulasa, pectinasa y proteasa. Estas mejoran la liberación del aceite al degradar la matriz celular sin afectar su calidad nutricional. Estudios recientes han optimizado variables como temperatura, pH y concentración enzimática para maximizar el rendimiento y reducir el impacto ambiental. Este enfoque representa una alternativa eficiente frente a los métodos tradicionales de prensado y disolventes, lo que minimiza la pérdida de carotenoides y ácidos grasos esenciales.

El objetivo de este estudio fue evaluar el rendimiento de enzimas (celulasa, pectinasa y proteasa) en la extracción de aceite de palma a partir de pulpa de dende y torta de palmiste (AOAC, 2012, Teixeira, 2013; Mat Hassan et al., 2021) y para los procesos de preparación de la materia prima, liofilización y tratamiento enzimático, además de comparar la calidad de estos aceites con la del aceite obtenido por prensado. Los parámetros determinados fueron la concentración de carotenoides, la capacidad antioxidante, los compuestos fenólicos, la estabilidad oxidativa, los ácidos grasos libres y el perfil de ácidos grasos.

2. METODOLOGÍA

2.1 Enzimas

Las enzimas utilizadas en el proceso fueron Celluclast® 1.5 L (pH óptimo: 4.5 – 5.5), con 113 U/g de CMCasa, Ultrazyme

AFPL (pectinasa) (pH óptimo: 4.5 – 5.5) con 1533 U/g de PMGL y Alcalasa (proteasa) con 1357 U/g. Celluclast® 1.5 L tiene una actividad óptima entre 323 y 333 K y pH entre 4.5 y 6; mientras que Ultrazyme AFPL entre 313 y 333 K y pH 4.5 y 5.5 y Alcalasa alrededor de 333 K y a valores de pH entre 6.5 y 8.5.

2.2 Preparación de la materia prima

La fruta se esterilizó (398 K durante 5 min) para ayudar en el desgrane manual de los frutos e inactivar las enzimas lipasas, peroxidasa, polifenoloxidasas y lipoxigenasas responsables de la hidrólisis de triacilglicérols y la oxidación de polifenoles y carotenos en frutas frescas, lo que también favorece el proceso de extracción.

Finalizada esta etapa, se retiró el mesocarpio de la fruta y se dividió en dos lotes. El lote A para tratamiento enzimático, mientras que el lote B para prensado primero y el residuo (torta) a tratamiento enzimático.

2.3 Liofilización

Uno de los aspectos esenciales para mejorar el proceso de extracción es la liofilización del fruto tratado, a través de la deshidratación en condiciones de temperatura (328 K) y presión (10 μ Hg), el objetivo es triturarlo con facilidad.

2.4 Tratamiento enzimático

Después de ser liofilizados, los lotes A y B se sometieron a una reducción de tamaño en un multiprocesador de cuchillas (durante 3 minutos) para aumentar la superficie de contacto de las muestras y facilitar la acción de las enzimas en el proceso.

Diez gramos de muestra se mezclaron con 30 mL de agua destilada para celulasa y pectinasa y 30 mL de solución tampón de pH 7 (citrato-fosfato sódico 0.1 M) para la proteasa (alcalasa) en un reactor con un volumen de 125 mL y agitación a 200 rpm.

La concentración de enzima y tiempo de incubación variaron en función del diseño experimental aplicado. Al final de cada experimento, las enzimas se inactivaron a 348 K durante 5 min. Tras esto, las micelas obtenidas se centrifugaron a 4000 g por 10 min.

2.3.1 Diseño experimental

Con el fin de evaluar el proceso de extracción enzimática, se llevó a cabo un diseño experimental factorial completo con 3 repeticiones en el punto central, utilizando un diseño central compuesto rotacional (DCCR) (Montgomery, 2017; Bezerra et al., 2008), como muestra la Tabla 1.

Las variables independientes del proceso fueron la temperatura (K), la concentración de enzima (% p/p) [Enzima] y el tiempo (min). Las variables de respuesta fueron la concentración de carotenoides y el rendimiento de extracción de aceite. La Tabla 2 muestra las combinaciones de variables

seleccionadas para los lotes A y B más tres repeticiones en el punto central y los niveles en detalle.

Tabla 1. Niveles de las variables de la entrada.

		Niveles				
		- α	-1	0	1	+ α
Variables	Temperatura (K)	303	308	318	328	333
	Concentración de enzima (% m/v)	1.5	2	3	4	4.5
	Tiempo de reacción (min)	45	60	120	180	195

Tabla 2. Diseño experimental de extracción enzimática

		Codificados			Reales		
#	X1	X2	X3	T (°K)	Conc. de enzima (% m/v)	t (min)	
1	-1	-1	-1	308	2	60	
2	1	-1	-1	328	2	60	
3	-1	1	-1	308	4	60	
4	1	1	-1	328	4	60	
5	-1	-1	1	308	2	180	
6	1	-1	1	328	2	180	
7	-1	1	1	308	4	180	
8	1	1	1	328	4	180	
9	-1.68 (- α)	0	0	303	3	120	
10	1.68 (+ α)	0	0	333	3	120	
11	0	-1.68 (- α)	0	318	1.5	120	
12	0	1.68 (+ α)	0	318	4.5	120	
13	0	0	-1.68 (- α)	318	3	45	
14	0	0	1.68 (+ α)	318	3	195	
15	0	0	0	318	3	120	
16	0	0	0	318	3	120	
17	0	0	0	318	3	120	

X1=T=temperatura, X2=conc.= concentración y X3=t= tiempo de reacción

2.3.2 Rendimiento del aceite extraído

Los lotes A y B se caracterizaron en cuanto a su contenido de aceite mediante el método de Soxhlet indicado en la AOAC 920.39 (2019), con hexano como solvente, y el valor para el lote A fue de 49.02 g de aceite/100 g de pulpa, mientras que para el lote B fue de 35.37 g de aceite/100 g de torta. Estos datos se utilizaron como referencia para calcular el rendimiento de aceite extraído. El rendimiento se calculó según la Ecuación 1. Las muestras de cada lote se almacenaron a 255 K hasta su análisis.

$$\text{Rendimiento}_{\text{aceite}} = \frac{\text{masa aceite (g)} / \text{masa pulpa (g)}}{\text{Contenido total de aceite (g/g)}} \times 100 \quad (1)$$

2.3.3 Determinación de los carotenoides

Los aceites obtenidos se analizaron para determinar los carotenoides totales mediante el método espectrofotométrico,

se solubilizó 50 mg del aceite en hexano P.A. (Nuclear) y se leyó la absorbancia a una longitud de onda de 453 nm. Los resultados se expresaron en mg por kg de extracto (Gross, 1991).

El rendimiento de aceite se calculó con base en la cantidad total de lípidos encontrados en la muestra mediante análisis Soxhlet. La concentración de carotenoides se calculó a partir de la concentración de β -caroteno y se expresa en ppm.

2.4 Análisis del mejor ensayo

2.4.1 Determinación del contenido de fenoles totales (CFT)

El CFT de los extractos oleosos (2 g de extracto oleoso en metanol al 80 %) se cuantificó por medio del reactivo de Folin-Ciocalteu (Singleton et al, 1999), con pequeñas modificaciones. Se mezcló una alícuota de 300 μ l de la solución de extracto con 5 mL de reactivo de Folin-Ciocalteu (10 % en agua destilada). Después de 5 min, se añadieron 4 mL de carbonato sódico (7.5 % en agua destilada). Las muestras se incubaron durante 2 h. a temperatura ambiente en la oscuridad. La absorbancia se midió a 765 nm. Se preparó una curva estándar con soluciones de ácido gálico de concentraciones conocidas. Los resultados se expresaron en μ g de equivalentes de ácido gálico (EAG) por g de extracto.

2.4.2 Capacidad antioxidante por el método ABTS

La cuantificación de la actividad antioxidante se llevó a cabo en las muestras de aceite basándose en el método del radical ABTS descrito por Rufino et al. (2007), con algunas modificaciones. La lectura se realizó (734 nm) 6 minutos después de mezclar la muestra y la solución de ABTS.

Los datos se trazaron en un diagrama de dispersión de la absorbancia frente a la concentración en mM de Trolox. La actividad antioxidante fue calculada mediante la sustitución en la ecuación de la recta de absorbancia, que fue equivalente a 1.000 μ M con respecto al patrón de Trolox (Rufino et al., 2007). El resultado para el término x corresponde a la dilución de la muestra (mg/L) equivalente a 1.000 μ M de Trolox.

2.4.3 Estabilidad oxidativa

La estabilidad oxidativa se realizó de acuerdo con el método de la AOCS (2002), que se describe brevemente: consistió en someter a condiciones de oxidación acelerada 3 g de aceite, se midió el tiempo (en horas) que tarda una muestra en alcanzar un nivel de oxidación (enranciamiento) en condiciones de 403 °K y un caudal de aire de 20 L/h. Se evaluó en el equipo Metrohm 743 Rancimat.

2.5 Análisis estadístico

Todas las pruebas se realizaron por triplicado. Los valores se expresan como medias aritméticas. La significación estadística de las diferencias entre los grupos se analizó mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5%.

Para la extracción enzimática se utilizó un Diseño Compuesto Rotacional Central (DCRC) utilizando el Diseño Factorial Completo 2^3 con 3 repeticiones en el punto central. La comparación entre medias se realizó mediante análisis de varianza (ANOVA) y prueba de Tukey. Todos los cálculos se realizaron con el software STATISTICA 7.0 ® (Stat Soft Inc., Tulsa, Oklahoma, EE.UU.). Como criterio de selección, para la mejor condición de extracción, se consideró la significancia del coeficiente de regresión mediante la prueba t, y se adoptó el nivel de significancia del 5% y la magnitud del coeficiente de determinación (R^2).

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Actividad enzimática

En la Tabla 3, se muestran los resultados para la actividad enzimática de la celulasa, pectinasa y alcalasa. Se observa que las actividades fueron significativamente diferentes ($p \leq 0.1$). Se observa que la actividad enzimática mostrada por la celulasa es mayor.

Tabla 3. Caracterización de la actividad enzimática

Componentes	Celulasa (U/mL)	Pectinasa (U/mL)	Alcalasa (U/mL)
Carboximetil-celulasa	1113.12 \pm 0.834 ^a	348.34 \pm 12.82 ^b	ND
Celulasa total	63.51 \pm 1.131 ^a	18.60 \pm 23.349 ^b	ND
Poligalacturonasa	431.56 \pm 3.03 ^a	3.25 \pm 0.491 ^b	ND
Pectina liasa	2.59 \pm 3.436 ^a	1433.46 \pm 1.465 ^b	ND
Proteasa	ND	ND	1357.5 \pm 16.77

Valores medios obtenidos a partir de análisis por duplicado. Las medias seguidas de la misma letra en las filas no difieren estadísticamente entre sí, según la prueba de Tukey al nivel del 10 %. *ND = No detectado.

La Celluclast 1,5L mostró una alta actividad enzimática frente a la CM Casa (1113,12 \pm 0,83 U/mL) y la PG (431,56 \pm 3,03 U/mL), resultados que concuerdan con los reportados por Teixeira et al. (2013), quienes señalaron valores de hasta 1800 U/mL y 581,23 U/mL, respectivamente, para estas mismas enzimas. Asimismo, la actividad total de celulasa (Fpasa) fue superior en Celluclast (63,51 \pm 1,13 U/mL) en comparación con Ultrazyme, lo que coincide con los hallazgos de Farías (2013), que destacan la alta capacidad hidrolítica de esta formulación.

Por otro lado, Ultrazyme AFP-L presentó su mayor actividad en PMGL (1433,46 \pm 1,465 U/mL), lo que indica una fuerte especificidad hacia la pectina-liasa, contrastando con Celluclast que mostró una actividad significativamente menor (2,59 \pm 3,436 U/mL). Esta diferencia sugiere una especialización funcional de Ultrazyme, lo cual es coherente con el estudio de Teixeira (2013), quien reportó concentraciones relevantes de pectinometilesterasa en preparaciones similares.

En cuanto a Alcalasa, únicamente se detectó una actividad proteasa (1357,5 \pm 16,77 U/mL), la cual fue su principal función. Estos datos se alinean con los resultados de Apar y Özbek (2008), quienes observaron una elevada actividad hidrolítica de la alcalasa, y destacaron su eficiencia en la solubilización proteica frente a otras enzimas.

3.2 Evaluación del tratamiento enzimático en función de la cantidad de aceite extraído

La Tabla 4 muestra los resultados del diseño experimental para la extracción enzimática con las enzimas de maceración celulasa, pectinasa y alcalasa.

Tabla 4. Matriz DCCR para el tratamiento enzimático

#	Celulasa (%)		Pectinasa (%)		Alcalasa (%)	
	DP	DSP	DP	DSP	DP	DSP
1	41.90	49.90	53.90	56.77	49.04	52.23
2	43.05	48.05	54.05	55.06	50.72	53.79
3	61.33	66.33	72.34	73.97	55.30	58.26
4	76.57	81.57	87.58	88.53	57.04	60.07
5	47.41	52.41	58.41	59.24	53.93	56.53
6	50.19	55.19	61.19	62.36	50.05	53.02
7	60.93	65.92	71.92	72.45	53.08	56.01
8	76.35	81.34	87.3	88.78	67.02	70.04
9	60.70	65.69	71.69	72.94	69.49	72.89
10	68.32	73.32	79.32	80.37	70.20	73.33
11	26.41	31.40	37.40	38.61	35.90	48.45
12	62.92	67.91	73.91	74.91	42.42	55.34
13	59.84	64.84	70.84	71.43	41.03	54.05
14	63.14	68.13	74.13	75.59	52.16	65.50
15	47.35	52.35	58.35	59.35	56.08	56.05
16	48.17	53.16	59.16	60.35	53.16	56.11
17	47.39	52.39	58.39	59.37	53.04	59.07

En la matriz, se observó que, para los ensayos 4 (temperatura: 328 K, concentración enzimática 4 % y tiempo 60 min.) y 8 (temperatura: 328 K, concentración enzimática 4 % y tiempo 180 min.) con pectinasa y celulasa y, que para los ensayos 8, 9 (temperatura: 303 K, concentración enzimática 3 % y tiempo 120 min.) y 10 (temperatura: 333 K, concentración enzimática 3 % y tiempo 120 min.) para alcalasa se presentaron los mayores rendimientos de extracción de aceite, sea para el dende prensado así como para aquel sin prensar.

Los valores más bajos de extracción fueron detectados en el ensayo 11 (temperatura: 318 K, concentración enzimática 1.5 % y tiempo 120 min.), con rendimientos de 26.21 % y 31.40 % para DP y DSP extraídos con celulasa; 37.40 % y 38.61 % para DP y DSP extraídos con pectinasa; y finalmente, 35.90 % y 48.45 % para DP y DSP extraídos con alcalasa.

Estos resultados permiten concluir que el uso de enzimas, especialmente en muestras no prensadas, favorece significativamente la eficiencia en la extracción de aceite, siendo la Alcalasa la más destacada por su rendimiento globalmente superior. Igualmente, según Zahedifar et al. (2023) se sabe que el tratamiento enzimático en medio acuoso es realmente eficaz para degradar las paredes de los tejidos vegetales, además de evitar la degradación de compuestos de interés como antioxidantes y carotenoides gracias al uso de temperaturas moderadas.

Texeira et al. (2013) utilizaron la enzima Celluclast 1.5 L, Pectinasa Multiefecto FE y tanasa producida por *Paecilomyces variotii* para extraer aceite de palma a una concentración de enzima del 4 %, 323 °K y 1 hora y encontraron que la enzima fue significativa, lo que aumentó la concentración de aceite y antioxidantes.

Hamzah et al. (2019) utilizaron celulasa y β 1-4 glucosidasa para la extracción de aceite de palma y descubrieron que parámetros como el pH, la temperatura y la concentración de enzimas influyen en la hidrólisis enzimática de la fibra. Los resultados revelaron que el pH y la temperatura aumentan el rendimiento de extracción de aceite cuando las enzimas se utilizan en una concentración más alta.

3.3 Validación experimental del modelo

Para validar el modelo, se aleatorizaron algunos experimentos y se compararon resultados de valores predichos por el modelo, con las mismas variables para el rendimiento del óleo como para la concentración de carotenoides, mismos que se muestran en la Tabla 5. Los resultados confirman que los puntos experimentales pueden ser explicados por estos modelos. La Tabla 6 muestra los resultados del rendimiento en aceite.

Tabla 5. Variables de la validación experimental del modelo de rendimiento de óleo y de la concentración de carotenoides

Ensayo	T (K)	[E] (% m/v)	R t(min)
1	308	2	60
4	328	4	60
10	333	3	120
12	318	4.5	120

T = temperatura; [E]= concentración enzimática; t=tiempo y R=reacción.

Tabla 6. Resultado experimental del modelo de rendimiento de óleo

Rendimiento de aceite (%)					
CDP	CDSP	PDP	PDSP	ADP	ADSP
40.98	52.86	56.82	56.00	51.65	55.87
76.43	82.31	85.44	88.01	55.27	58.95
66.80	76.59	79.87	81.77	83.45	74.77
60.65	69.76	77.44	78.64	46.19	61.12

CDP = extracción con celulasa de palma africana prensada, CDSP = extracción con celulasa de palma africana sin prensar, PDP = extracción con pectinasa de palma africana prensada, PDSP = extracción con pectinasa de palma africana sin prensar, ADP = extracción con alcalasa de palma africana prensada y ADSP = extracción con alcalasa de palma africana sin prensar

Los resultados de las pruebas de validación del modelo para la concentración de carotenoides se presentan en la Tabla 7. Se comprobó que los puntos experimentales también pueden ser explicados por los modelos descritos, ya que los valores obtenidos pueden ser comparados con valores preestablecidos.

Tabla 7. Validación experimental del modelo de concentración de carotenoides

Ensayo	Concentración de carotenoides (ppm)					
	CDP	CDSP (en inglés)	PDP	PDSP	ADP	ADSP
1	436.64	653.67	513.84	829.76	850.61	1156.03
4	475.12	677.71	557.38	870.41	850.54	1156.40
10	467.09	673.92	551.93	867.41	866.98	1171.98
12	460.82	666.98	542.34	858.64	846.32	1153.54

T = temperatura; [E]= concentración enzimática; t=tiempo y R=reacción. CDP = extracción con celulasa de palma africana prensada, CDSP = extracción con celulasa de palma africana sin prensar, PDP = extracción con pectinasa de palma africana prensada, PDSP = extracción con pectinasa de palma africana sin prensar, ADP = extracción con alcalasa de palma africana prensada y ADSP = extracción con alcalasa de palma africana sin prensar.

3.4 Compuestos antioxidantes

La determinación de compuestos antioxidantes se realizó en triplicado de las muestras extraídas con la aplicación del mejor ensayo para cada una de las enzimas, leídas por espectrofometría de cada aceite obtenido. Los resultados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Contenido de carotenoides totales presentes en el aceite extraído

		Carotenoides (ppm)
	Aceite bruto 3	669.52±0.834 ^e
Dende prensado (DP)	Blanco	398.53±0.6713 ^a
	Celulasa	473.78±0.058 ^b
	Pectinasa	560.68±0.173 ^d
	Alcalasa	866.68±0.907 ^e
Dende sin prensar (DSP)	Blanco	519.10±0.849 ^c
	Celulasa	680.67±0.387 ^f
	Pectinasa	874.45±0.105 ^b
	Alcalasa	1174.86±0.246 ⁱ

Nota: Las medias seguidas de la misma letra no difieren por la prueba de Tukey al nivel del 95 %

Los resultados mostraron que el tratamiento enzimático tuvo un aumento en el rendimiento de extracción de carotenoides totales para aceite de dende. Todas las muestras tratadas fueron estadísticamente diferentes ($p < 0,05$). El aceite extraído con alcalasa tiene una mayor concentración de carotenoides tanto para la DP como para la DSP. La celulasa y la pectinasa utilizadas en DSP tienen una concentración más alta en comparación con el DP.

3.3.1 Carotenoides totales

Los carotenoides son responsables del color del aceite de palma, actúan como antioxidantes, al capturar radicales libres y neutralizándolos, dicho de forma más sencilla, los carotenoides protegen el aceite contra el proceso oxidativo de los triacilgliceroles (Edem, 2002; Gunstone, 2018; Hendler & Rorvik, 2008).

Las concentraciones de carotenoides totales obtenidas en el proceso de extracción enzimática del aceite de dende en las

muestras de DP tuvieron un valor inferior al del aceite obtenido de las muestras de DSP (650-1000 ppm), lo que muestra que el uso de enzimas da un aceite de mejor calidad y concuerda con el estudio hecho por Choo (1994). Las muestras DSP presentaron valores más elevados.

3.3.2 Fenoles totales

Los análisis de fenoles para las muestras de aceite extraídas enzimáticamente se indican en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados de fenoles totales del aceite de dende

		Compuestos Fenólicos (mgEAG/100g)	Compuestos Fenólicos (mgEAG/100g)
	Aceite bruto 3	20.35±0.265 ^a	--
Dende prensado (DP)	Blanco	25.16±0.010 ^b	63.41±0.176 ^b
	Celulasa	36.35±0.265 ^d	81.97±0.088 ^d
	Pectinasa	35.53±0.176 ^d	121.22±0.265 ^b
	Alcalasa	44.1±0.265 ^e	90.35±0.276 ^f
Dende sin prensar (DSP)	Blanco	24.35±0.265 ^b	67.85±0.972 ^c
	Celulasa	22.78±0.530 ^b	61.28±0.176 ^a
	Pectinasa	24.14±0.176 ^b	86.41±0.530 ^c
	Alcalasa	29.1±0.618 ^c	106.28±0.018 ^g

Nota: *EAG=equivalente de ácido gálico. Las medias seguidas de la misma letra en la columna no difieren por la prueba de Tukey al nivel del 95 %.

Los resultados de fenoles totales en el aceite muestran que se detectaron valores bajos de fenoles adsorbidos en el aceite de palma crudo. Los promedios mostraron valores aproximados con poca diferencia significativa entre ellos ($p < 0.05$). Las muestras extraídas con alcalasa mostraron valores de 44.1±0.265 mgEAG/100 g para DP y 29.1±0.618 mgEAG/100 g para DSP, mostrando ambos un incremento en comparación con las otras muestras.

Las muestras extraídas con celulasa y pectinasa de DSP presentaron valores inferiores al aceite crudo y cercanos a su blanco, sin embargo, esta diferencia no fue estadísticamente significativa; las muestras extraídas con celulasa y pectinasa tampoco mostraron diferencias significativas entre ellas.

Los resultados en la cuantificación de compuestos fenólicos se encontraron en la media comparados con los valores obtenidos por Teixeira et al. (2013), que utilizaron las enzimas Celluclast 1.5 L (Novo-zymes, Paraná, Brasil), Pectinase Multieffect FE (Genencor Int. Rochester, NY) y tanasa para la extracción acuosa de aceite de palma y encontraron un contenido de polifenoles para la muestra extraída con pectinasa/celulasa de 21.43±0.58 mgEAG/kg, para pectinasa/celulasa/tanasa de 14.76±1.00 mgEAG/kg y para tanasa de 26.43±0.58 mgEAG/kg.

3.3.3 Capacidad antioxidante

Se realizaron análisis ABTS en las muestras de aceite de palma. Los resultados se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Capacidad antioxidante del aceite de dende.

		Capacidad antioxidante ($\mu\text{mol Trolox/g aceite}$)
	Aceite bruto 3	94.23 \pm 0.173 ^d
Dende prensado (DP)	Blanco	87.51 \pm 0.134 ^b
	Celulasa	66.91 \pm 0.750 ^a
	Pectinasa	99.32 \pm 0.886 ^e
	Alcalasa	147.49 \pm 0.629 ^h
Dende sin prensar (DSP)	Blanco	131.44 \pm 0.332 ^f
	Celulasa	93.83 \pm 0.386 ^c
	Pectinasa	124.95 \pm 0.950 ^f
	Alcalasa	168.65 \pm 0.721 ⁱ

Nota: Las medias seguidas de la misma letra en la columna no difieren por la prueba de Tukey al nivel del 95 %.

La capacidad antioxidante en las muestras de dende prensado es más baja en comparación con la capacidad mostrada en extracciones enzimáticas en dende sin prensar, con una diferencia estadísticamente significativa.

Del mismo modo, como ilustran otros autores (Neo et al., 2010), este trabajo muestra valores de capacidad antioxidante que se sitúan dentro de la media tanto para los blancos como para los aceites extraídos por prensado y maceración enzimática.

3.3.4 Estabilidad oxidativa

La estabilidad oxidativa de los aceites de palma extraídos con las diferentes enzimas se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Análisis de estabilidad oxidativa del aceite de dende

		Estabilidad oxidativa (horas)
	Aceite bruto 3	3.82 ^c
Dende prensado (DP)	Blanco	3.06 ^d
	Celulasa	3.08 ^a
	Pectinasa	3.51 ^b
	Alcalasa	4.87 ^e
Dende sin prensar (DSP)	Blanco	5.73 ^b
	Celulasa	4.91 ^f
	Pectinasa	5.15 ^e
	Alcalasa	6.33 ⁱ

Nota: Las medias seguidas de la misma letra en la columna no difieren por la prueba de Tukey al nivel del 95 %.

Al analizar la estabilidad oxidativa, se observa que el tratamiento enzimático tuvo un efecto significativo según la prueba de Tukey con un nivel de confianza de 95 %. Los aceites extraídos del dende sin prensar tienen mayor estabilidad oxidativa que los extraídos de la palma aceitera prensada, que además tienen una alta cantidad de antioxidantes naturales como los carotenoides y según Matthäus (2007) y Berger (2005), la presencia de antioxidantes naturales como carotenoides, tocoferoles y tocotrienoles está ligada a la

estabilidad oxidativa y a bajas cantidades de ácido linoleico (2-11 %) y ácido linolénico (0.1-0.4 %).

4. CONCLUSIONES

Los ensayos 4 y 8 para las enzimas celulasa y pectinasa y los ensayos 8, 9 y 10 para alcalasa mostraron un rendimiento mayor de extracción de aceite, tanto para el dende prensado como sin prensar, a una concentración enzimática sobre el 3 %, con un rango de temperatura de 303 a 333 K para alcalasa y a 328 K para celulasa y pectinasa.

Las concentraciones de carotenos totales con extracciones enzimáticas en dende prensado de aceite de palma fueron inferiores a las del aceite obtenido mediante que en las muestras de dende sin prensar donde presentaron valores más elevados, estadísticamente significativos.

Con respecto a la concentración de fenoles totales en el aceite, se detectaron valores bajos de fenoles adsorbidos en el aceite de palma crudo. Las muestras extraídas con enzimas, aunque hay variaciones entre ellas y entre los procesos de prensado o sin prensar, no son estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

La capacidad antioxidante en las muestras de dende prensado es más baja en comparación con la capacidad mostrada en extracciones enzimáticas en dende sin prensar, con una diferencia estadísticamente significativa.

Al analizar la estabilidad oxidativa, se observa que el tratamiento enzimático tuvo un efecto significativo según la prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95 %, en aceite extraído de dende sin prensar.

Como se ha observado en este estudio, el tratamiento enzimático en medio acuoso es realmente eficaz para degradar las paredes de los tejidos vegetales, ha sido posible demostrar una menor degradación de compuestos carotenoides gracias al uso de temperaturas moderadas específicas y ciertas enzimas.

En conclusión, la extracción enzimática de aceites vegetales, principalmente orientada a aumentar los rendimientos de extracción de aceite, ofrece resultados prometedores y con alto contenido de compuestos antioxidantes. Esto se debe a la capacidad de las enzimas para alcanzar las paredes de las plantas y liberar los aceites contenidos en el interior de las células vegetales. Por estas razones, este método es una de las opciones de elección para obtener aceites de alta calidad destinados al consumo humano y conservar al máximo las propiedades antioxidantes, principalmente del aceite de palma africana.

No obstante, los procedimientos descritos requieren un control de cada uno de los procesos, desde la recolección del fruto, almacenamiento y conservación, liofilización, trituración y demás aspectos que son altamente influyentes como la temperatura, presión, pH y otras condiciones que están directamente relacionadas con la calidad de obtención de los antioxidantes propios de este producto.

REFERENCIAS

- American Oil Chemists Society (AOCS). (2002). *Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society* (5th ed.). Champaign.
- Apar, D., & Özbek, B. (2008). Corn gluten hydrolysis by Alcalase: Effects of process parameters on hydrolysis solubilization and enzyme inactivation. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 22(2), 203-212. <https://hrcak.srce.hr/24796>
- Balvardi, M., Rezaei K., Mendiola, JA & Ibáñez, E. (2015). Optimization of the aqueous enzymatic extraction of oil from Iranian wild almond. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 92(7), 985-992. <https://doi.org/10.1007/s11746-015-2671-y>
- Bandura, V. & Fialkowska, L. (2023). Quality indicators of extracted sunflower and rapeseed oil obtained with hexane and ethyl alcohol solvents. *Animal Science and Food Technology*, 14(1), 9-25. <https://doi.org/10.31548/animal.1.2023.9>
- Berger, K. G. (2005). The use of palm oil in frying. *Frying Oil Series*. Malaysian Palm Oil Promotion Council (MPOPC). <https://doi.org/10.1002/ejlt.200690061>
- Campos Espinosa, G. Y., Udenigwe, C. C., & Tsopmo, A. (2022). Inhibition of low-density lipoprotein oxidation, antioxidative and bile acid-binding capacities of hydrolyzed proteins from carbohydrase-treated oat bran. *Journal of Food Biochemistry*, 46(3), e13675. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13675>
- Chodar, H., Rezaei, K. (2017). Laboratory-Scale Optimization of Roasting Conditions Followed by Aqueous Extraction of Oil from Wild Almond. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 94, 867-876. <https://doi.org/10.1007/s11746-017-2995-x>
- Chong, K. L., Kanniah, K. D., Pohl, C., & Tan, K. P. (2017). A review of remote sensing applications for oil palm studies. *Geo-Spatial Information Science*, 20(2), 184-200. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1337317>
- Choo, Y. M. (1994). Palm oil carotenoids. *Food Nutrition Bulletin*, 15(2), 130-137. <https://doi.org/10.1177/156482659401500212>
- Edem, D. O. (2002). Palm oil: Biochemical, physiological, nutritional, hematological, and toxicological aspects: A review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 57(3-4), 319-341. <https://doi.org/10.1023/A:1021828132707>
- Es-Sai B., Wahnou H., Benayad S., Rabbaa S., Laazious Y, El Kebbj R, & Limami Y. (2025). Gamma-Tocopherol: A Comprehensive Review of Its Antioxidant, Anti-Inflammatory, and Anticancer Properties. *Molecules*, 30(3), 653. <https://doi.org/10.3390/molecules30030653>
- Ghorbanzadeh, R. & Rezaei, K. (2017). Optimization of an Aqueous Extraction Process for Pomegranate Seed Oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 94(12), 1491-1501. <https://doi.org/10.1007/s11746-017-3045-4>
- Goncalves, C. B., Rodríguez, C. E. C., Marcon, E. C., & Meirelles, A. J. A. (2016). Deacidification of palm oil by solvent extraction. *Separation and Purification Technology*, 160(2), 106-111. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.01.016>
- Gross, J. (1991). *Pigments in vegetables: Chlorophylls and carotenoids*. New York: AVI Book. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2033-7>
- Gunstone, F. D. (2011). *Vegetable oils in food technology: Composition, properties and uses* (2nd ed., pp. 25-133). West Sussex, UK: Blackwell Publishing Ltd. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781444339925.fmatter>
- Hamzah, N., Tokimatsu, K., & Yoshikawa, K. (2019). *Solid Fuel Oil Palm Biomass Residues and Municipal Solid Waste by Hydrothermal Treatment for Electrical Power Generation in Malaysia: A review*. Sustainability, 11(4). <https://doi.org/10.3390/su11041060>
- Hendler, S. S., & Rorvik, D. (2008). *PDR for nutritional supplements* (2nd ed.). Montvale, NJ: Thomson Reuters, Physicians' Desk Reference.
- Kumar, S.P.J., Prasad, S.R., Banerjee, R., Agarwal, D., Kalyani, S., & Ramesh, K. Green solvents and technologies for oil extraction from oilseeds. *Chemistry Central Journal*, 11(9) (2017). <https://doi.org/10.1186/s13065-017-0238-8>
- Mat Hassan, N., Sohrab, M., Balakrishnan, V., Harris, M., Mustaner M., Mat A., Al-Gheethi A. & Ahmad A. (2021). Influence of Fresh Palm Fruit Sterilization in the Production of Carotenoid-Rich Virgin Palm Oil. *Foods*, 10(11), 22-26. <https://doi.org/10.3390/foods10112838>
- Montgomery, D.C. (2017). Design and Analysis of Experiments (9th ed.). Wiley. Disponible en: https://www.academia.edu/65675640/The_Design_and_Analysis_of_Experiments?utm_source=chatgpt.com
- Neo, Y. P., Ariffin, A., Tan, C. P., & Tan, Y. A. (2010). Phenolic acid analysis and antioxidant activity assessment of oil palm (*E. guineensis*) fruit extracts. *Food Chemistry*, 122(1), 353-359. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.02.046>
- Rahban, M., Zolghadri, S., Salehi, N., Ahmad, F., Haertlé, T., Rezaei-Ghaleh, N. & Saboury, A. A. (2022). Thermal stability enhancement: Fundamental concepts of protein engineering strategies to manipulate the flexible structure. *International journal of biological macromolecules*, 214, 642-654. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.06.154>
- Rathi, C. L., Pradhan, S., Javvadi, S., & Wani, A. (2012). An enzyme composition and process for extracting oil from oil palm fruits. *WO2012/011130*. Disponible en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/88/46/70/0970051e9f46b6/WO2012011130A2.pdf>
- Rufino, M. S., Alves, R. E., Brito, E. S., Morais, S. M., Sampaio, C. G., Perez-Jimenez, J., & Saura-Calixto, F. D. (2007). Metodología científica: Determinação da atividade antioxidante total em frutas pela captura do radical livre ABTS. *Embrapa Agroindústria Tropical: Comunicado Técnico 127*. Fortaleza-CE. Disponible en: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAT/10225/1/Cot_128.pdf
- Silvamany, H., & Jahim J. (2015). Enhancement of palm oil extraction using cell wall degrading enzyme formulation. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 19(1), 77-87. https://mjas.analis.com.my/wp-content/uploads/2018/11/Silvamany_19_1_10.pdf

- Singleton, J.A., Stikeleather, L.F. A solvent extractor system for the rapid extraction of lipids and trace bioactive micronutrients in oilseeds. *J Amer Oil Chem Soc* 76, 1461–1466 (1999). <https://doi.org/10.1007/s11746-999-0185-1>
- Texeira, C. B., Macedo, G. A., Macedo, J. A., Da Silva, H. M., & Rodríguez, A. M. (2013). Simultaneous extraction of oil and antioxidant compounds from oil palm fruit (*Elaeis guineensis*) by an aqueous enzymatic process. *Bioresource Technology*, 129:575-581. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.11.057>
- Vovk, H., Karnpakdee, K., Ludwig, R. & Nosenko, T. (2023). Enzymatic Pretreatment of Plant Cells for Oil Extraction. *Food technology and biotechnology*, 61(2), 160-178. <https://doi.org/10.17113/ftb.61.02.23.7896>
- Yusoff, M., Gordon, M.H., & Niranjana, K. (2015). Aqueous enzyme assisted oil extraction from oilseeds and emulsion de-emulsifying methods: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 41(1), 60-82. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.09.003>
- Zahedifar, M. Assessing alteration of oil quality, degradation and resistance indices under different land uses through network and factor analysis. *Catena*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106807>

una maestría en Ciencias Químicas con Mención en Química Médica en la Universidad Yachay Tech. Es Coordinador de Nivelación y Docente de Apoyo en la Unidad de Admisión de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de Ecuador y Docente de la Universidad Central del Ecuador.



Eliana, Champutiz-Ortiz, licenciada en Laboratorio Clínico e Histotecnológico (2005). Magíster en Gestión y Dirección de Proyectos, con el trabajo de investigación: Implementación de un Servicio de Diagnóstico Genético Prenatal en la Universidad de Especialidades Espíritu Santo UEES. Actualmente candidata a PhD en Ciencias de la Educación, en la Universidad de Rosario, Argentina. Docente de la Facultad de Ciencias Médicas de la Universidad Central del Ecuador, Acreditación como investigadora Senescyt REG-INV-15-00708.

BIOGRAFÍAS



Silvia, Gutiérrez-Rueda, obtuvo su título de Ingeniería en Biotecnología (2013) en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de Ecuador. Su trabajo de maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos en la Universidade Federal do Pará de Brasil (2016) consistió en la extracción de compuestos

antioxidantes utilizando tecnología enzimática de la palma africana. En el año 2016 ingresó a los laboratorios de Biotecnología de la ESPE en donde desarrollo e implementó nuevas tecnologías de análisis en el área de docencia de microbiología. Actualmente está cursando una maestría en Ciencias Químicas con Mención en Química Médica en la Universidad Yachay Tech. Desde 2023, es profesora del Departamento de Ciencias Exactas de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.



Patricio, Delgado-Salgado, Ingeniero en Biotecnología (2013) y Magíster en Sistemas de Gestión Ambiental (2021) con el trabajo de investigación: Detección molecular de SARS-CoV-2 en aguas residuales como componente de vigilancia ambiental de COVID-19, en la Universidad de las Fuerzas

Armadas ESPE de Ecuador. Actualmente está cursando