

Cinética de crecimiento del *Aspergillus niger* en el raquis de la palma africana (*Elaeis guineensis*)

Danae Fernández Rivero¹; Juan De Dios Espinoza Moya²;
Samantha de los Angeles Martínez Espín³

(Recibido: mayo 07, 2025; Aceptado: agosto 05, 2025)
<https://doi.org/10.29076/issn.2602-8360vol9iss17.2025pp32-36p>

Resumen

El raquis de la palma africana (*Elaeis guineensis*), subproducto generado en las plantas extractoras de aceite, representa una fuente significativa de contaminación ambiental. No obstante, gracias a los avances en la biotecnología, este residuo puede ser valorizado como sustrato para el crecimiento de microorganismos. En este estudio se realizó un proceso fermentativo a partir del crecimiento del hongo *Aspergillus niger* en el raquis de la palma africana. Se determinó la concentración celular cada 2 días por el método de peso seco. Se evaluaron los modelos cinéticos de Gompertz, Logístico, Brody y Bertalanffy con el objetivo de identificar la ecuación que mejor describa el crecimiento del hongo y permita predecir la concentración celular en un momento determinado del proceso fermentativo. El modelo Logístico mostró el mejor ajuste, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.985758 y una tasa de crecimiento de $0.40967 \text{ días}^{-1}$. Estos resultados evi- dencian el potencial del raquis como sustrato alternativo en procesos biotecnológicos, aportando una solución sostenible para el aprovechamiento de residuos agroindustriales.

Palabras clave: *Aspergillus niger*; fermentación microbiana; modelos cinéticos.

Growth kinetics of *Aspergillus niger* on African oil palm (*Elaeis guineensis*) rachis

Abstract

The rachis of the African oil palm (*Elaeis guineensis*), a by-product generated in oil extraction plants, represents a significant source of environmental pollution. However, thanks to advances in biotechnology, this waste can be valorized as a substrate for microbial growth. In this study, a fermentation process was carried out using *Aspergillus niger* grown on African oil palm rachis. Cell concentration was determined every two days using the dry weight method. The Gompertz, Logistic, Brody, and Bertalanffy kinetic models were evaluated to identify the equation that best describes fungal growth and enables prediction of cell concentration at a given point in the fermentation process. The Logistic model showed the best fit, with a coefficient of determination (R^2) of 0.985758 and a growth rate of 0.40967 day^{-1} . These results highlight the potential of palm rachis as an alternative substrate in biotechnological processes, offering a sustainable solution for the utilization of agro-industrial waste.

Keywords: *Aspergillus niger*; microbial fermentation; kinetic models.

¹ Universidad Técnica de Ambato, Ecuador. Email: da.fernandez@uta.edu.ec. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7530-7467>. *Autor para correspondencia

² Universidad Técnica de Ambato, Ecuador. Email: jd.espinoza@uta.edu.ec. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9123-0236>

³ Email: sam_martinez39@hotmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1666-165X>

INTRODUCCIÓN

La palma africana (*Elaeis guineensis*) es una planta oleaginosa originaria de la costa occidental de África, de la cual se extrae aceite. En los últimos años, su producción ha aumentado a nivel global, superando al aceite de soja debido a su uso en la fabricación de alimentos, cosméticos, cremas y jabones, lo que ha impulsado su demanda (1). *E. guineensis* es de gran relevancia para la agroindustria ecuatoriana debido al incremento en la demanda de su aceite. En el proceso de extracción del aceite se generan residuos agroindustriales como el raquis, específicamente en la fase de desfrutación, donde se producen racimos vacíos (2).

El raquis es un subproducto lignocelulósico que puede ser degradado por microorganismos, especialmente por hongos, gracias a su capacidad para descomponer la celulosa y la lignina. Esto lo convierte en un material con potencial para su aprovechamiento en procesos de fermentación microbiana en la elaboración de sustratos enriquecidos con proteínas (3). El *Aspergillus niger* es un hongo filamentoso que tiene la capacidad de producir una gran cantidad de enzimas y metabolitos como: amilasa, lipasa, celulasa y ácido cítrico (4), por lo que se pudiera utilizar el raquis de la palma africana como sustrato para su crecimiento.

El crecimiento microbiano en la actualidad puede ser descrito mediante modelos cinéticos, de esta forma se puede predecir la dinámica de la población microbiana bajo diferentes condiciones. De esta forma, permiten expresar matemáticamente la relación entre la concentración celular en función del tiempo, de esta forma ayuda en las industrias a diseñar estrategias para maximizar la producción de biomasa (5).

Entre los modelos cinéticos más utilizados se encuentra el de Monod, el cual establece una relación entre la velocidad de crecimiento y la concentración de sustrato, de manera análoga a la cinética enzimática de Michaelis-

Menten. Otro modelo ampliamente aplicado es el modelo Logístico o de Verhulst, que considera una fase de crecimiento exponencial seguida de una desaceleración debido a la limitación de recursos y la acumulación de productos de desecho. Para situaciones donde el crecimiento presenta una fase de latencia prolongada, el modelo de Gompertz es una herramienta útil, ya que describe de manera más precisa la transición entre las distintas fases del crecimiento. La elección del modelo adecuado depende de las condiciones experimentales y del tipo de microorganismo (6).

En este trabajo se evaluaron diferentes modelos cinéticos para el crecimiento del *Aspergillus niger* en el raquis de *Elaeis guineensis*, con el objetivo de obtener una expresión matemática que lo describa en las condiciones de fermentación estudiadas.

METODOLOGÍA

Proceso fermentativo

A partir de las condiciones establecidas para el crecimiento microbiano del *A. niger* en el raquis de la palma africana (7), se inocularon 50000 conidios/g de medio de *A. niger* en el sustrato obtenido a partir del raquis seco y molido. Se incubó utilizando un agitador orbital a la temperatura de 30 °C con una velocidad de agitación de 130 rpm durante 8 días. Se tomaron muestras cada 2 días para la determinación de la concentración de biomasa, la cual fue estimada por el método gravimétrico de peso seco. Primeramente, se determinó la masa del tubo de centrífuga vacío, seguidamente se colocó 5 mL de la muestra del fermentado y se centrifugó a 4000 rpm por 10 minutos. El pellet obtenido se lavó con agua destilada y se colocó en la estufa a 60 °C durante 24 horas. Se calculó la concentración celular a partir de la relación entre la masa de la muestra seca y el volumen del cultivo fermentado utilizado (8).

Modelos cinéticos

En el presente estudio se compararon

cuatro modelos matemáticos utilizando los datos experimentales del crecimiento de *Aspergillus niger* registrados en los días: 0, 2, 4, 6 y 8 del proceso fermentativo. Se aplicó un análisis de regresión no lineal utilizando los modelos: Logístico, Von Bertalanffy, Brody y Gompertz, a partir de las expresiones que definen a cada uno (7).

A continuación, se presentan las ecuaciones correspondientes a estos modelos, las cuales fueron empleadas para evaluar el ajuste de los datos experimentales y estimar los parámetros cinéticos.

Para un ajuste logístico se usó el siguiente modelo:

$$P(t) = \frac{K}{1 + \left(\frac{K - P_0}{P_0}\right) e^{-rt}} \quad (1)$$

Donde:

$P(t)$: concentración celular en función del tiempo

t : tiempo (días)

r : tasa de crecimiento (días⁻¹)

K : concentración máxima del sistema en función de los recursos finitos

P_0 : población inicial en el tiempo cero

Para un ajuste con Von Bertalanffy se usó el modelo:

$$P(t) = P_{max} \left(1 - e^{-k(t-t_0)}\right) \quad (2)$$

Donde:

$P(t)$: concentración celular en función del tiempo

t : tiempo (días)

k : tasa de crecimiento (días⁻¹)

t_0 : es el parámetro que se ajusta al punto de inicio del crecimiento

P_{max} : concentración celular máxima en el tiempo

Para un ajuste por Brody se usó el modelo:

$$P(t) = P_{max} \left(1 - be^{-kt}\right) \quad (3)$$

Donde:

$P(t)$: concentración celular en función del tiempo

t : tiempo (días)

k : tasa de crecimiento (días⁻¹)

b : es el parámetro que se ajusta al punto de inicio del crecimiento

P_{max} : concentración celular máxima en el tiempo

Para un ajuste por Gompertz se usó el modelo:

$$P(t) = Ke^{-e^{-r(t-t_0)}} \quad (4)$$

Donde:

$P(t)$: concentración celular en función del tiempo

t : tiempo (días)

r : tasa de crecimiento (días⁻¹)

t_0 : es el parámetro que se ajusta al punto de inicio del crecimiento

K : concentración celular máxima en el tiempo

Se procedió a evaluar los 4 modelos matemáticos a los datos experimentales con el uso del Software Phyton versión 3.10 en Google Colab para hallar las métricas de ajuste: el mayor coeficiente de determinación R^2 , la menor suma de cuadrados de residuos (SSR) y el menor error cuadrático medio (RMSE); esto permitió determinar un modelo óptimo para predecir el crecimiento del hongo *Aspergillus niger* y de esta manera obtener la tasa de crecimiento en el raquis de la palma africana (*Elaeis guineensis*).

RESULTADOS

A partir de los datos experimentales obtenidos del proceso de fermentación se aplicaron las ecuaciones de los modelos cinéticos, obteniendo que el modelo Logístico fue en el que mejor se ajustaron los datos de esta investigación (9), con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.985758 (Tabla 1).

Además, en este modelo se obtuvo una menor suma de cuadrados de residuos (SSR) con un valor de 0.003824. El valor del error cuadrático medio (RMSE) fue de 0.027657. Estos resultados indican que el modelo Logístico posee un ajuste robusto por poseer un mayor valor de R^2 y valores bajos de SSR y RMSE lo cual predice que los valores del modelo se acercan a los valores experimentales.

Tabla 1. Métricas para definir el mejor ajuste

Modelo/ Métrica	R ²	SSR	RMSE
Logístico	0.985758	0.003824	0.027657
Von Bertalanffy	0.985274	0.003955	0.028124
Brody	0.985274	0.003955	0.028124
Gompertz	0.985525	0.003887	0.027882

DISCUSIÓN

Al seleccionar el modelo matemático Logístico como el que posee una mejor predicción del crecimiento microbiano en las condiciones realizadas en esta investigación se obtiene un valor para la tasa de crecimiento de 0,40967 días⁻¹ (Ecuación 5).

$$P(t) = \frac{0.98264}{1 + \left(\frac{0.98264 - 0.32956}{0.32956} \right) e^{-0.40967t}} \quad (5)$$

Este modelo cinético fue aplicable también para describir la cinética de la producción de celulasas por *Aspergillus niger* (10). Sin embargo, otros autores han señalado que el crecimiento de este hongo en un medio formulado a partir de *Solanum tuberosum* se ajusta mejor a los modelos propuestos por Bertalanffy y Brody ($R^2 = 0,994$) (11). Esto sugiere que el tipo de sustrato desempeña un papel fundamental en el patrón de crecimiento de *A. niger*, ya que influye directamente en la disponibilidad de nutrientes, la inducción enzimática y la velocidad de asimilación de compuestos esenciales para el metabolismo del hongo. En particular, medios con composiciones distintas pueden modificar la tasa de crecimiento específica y la producción de metabolitos secundarios. Por tanto, la adecuación de un modelo cinético depende en gran medida de las características fisicoquímicas del medio de cultivo, que condicionan no sólo la tasa de crecimiento, sino también la forma de la curva de crecimiento (12). En consecuencia, la elección del sustrato no solo afecta la eficiencia productiva, sino también la precisión del modelo matemático que mejor describe el comportamiento del sistema biológico.

El valor de la tasa de crecimiento obtenido mediante este modelo (0,40967 días⁻¹, equivalente a 0,017069 h⁻¹) resulta similar al reportado para este microorganismo cuando se cultiva en un medio formulado a partir de *Solanum tuberosum*, donde se obtuvo una tasa de 0,016 h⁻¹ (11). Esta coincidencia sugiere que el modelo propuesto refleja adecuadamente el comportamiento cinético del microorganismo bajo condiciones nutricionales comparables, lo que refuerza la validez del modelo para describir el crecimiento microbiano en medios enriquecidos con fuentes de carbono complejas como las provenientes de subproductos agroindustriales.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que la capacidad predictiva de los modelos cinéticos depende en gran medida del tipo de sustrato utilizado en el cultivo de *Aspergillus niger*. Si bien el modelo evaluado mostró un buen ajuste a los datos experimentales de crecimiento celular, su aplicabilidad puede verse condicionada por las características del medio. Esto subraya la necesidad de considerar no solo parámetros cinéticos, sino también factores nutricionales y fisiológicos en la selección del modelo más apropiado. En consecuencia, la modelación del crecimiento microbiano debe abordarse con un enfoque flexible, adaptable a la naturaleza del sistema y al objetivo que se persigue en cada investigación.

Materiales complementarios: no aplica

Contribuciones de los autores:

Financiamiento: "Esta investigación no recibió financiamiento externo"

Declaración de consentimiento informado:
"No aplicable"

Conflictos de interés: "Los autores declaran no tener conflicto de interés".

REFERENCIAS

1. León A, Santacruz S. Elaboración de Bri-

- quetas a partir de Subproductos de Palma Africana (*Elaeis guineensis* J) y Arroz (*Oryza sativa* L). *Revista Politécnica*. 2021; 48:65–70.
2. Malacatus-Cobos PNGR, Byron V.-Llarena-Carrera GM. Generación de efluentes en el proceso de extracción de aceite crudo de Palma en el Ecuador. *Dominio de las Ciencias*. 2017;3(4):459–69.
 3. Anaya Aldana R, Molina Crespo DC. Evaluación económica y financiera de las alternativas de uso de los residuos de la materia prima de una planta industrial de extracción de palma de aceite. *Dictamen Libre*. 2018;(22):77–89.
 4. Pérez-Rodríguez F, Pliego-Arreaga R, Silva-Martínez GA, Cervantes-Montelongo JA, Pérez-Rodríguez F, Pliego-Arreaga R, et al. Caracterización bioquímica y molecular de la glucoamilasa producida por la cepa de *Aspergillus niger* HPD-2. *Biotecnia*. 2024; 26(1)
 5. Chambi D, Torres Jiménez AM. Modelos cinéticos sigmoidales aplicados al crecimiento de *Saccharomyces boulardii*. *Revista de Investigaciones Altoandinas*. 2021;23(1):47–54.
 6. Chambi D, Torres Jimenez AM. Modelos cinéticos sigmoidales aplicados al crecimiento de *Saccharomyces boulardii*. *Revista de Investigaciones Altoandinas*.
 7. Dumas LC, Fernández D. Protein enhancement of rachis of African Palm (*Elaeis guineensis*) using *Aspergillus niger*. *Bionatura Journal*. 2024;1(2):9. <http://dx.doi.org/10.70099/BJ/2024.01.02.9>
 8. Fonseca L, Fernández D, López Hernández O. Enriquecimiento proteico de *Solanum tuberosum* mediante fermentación en estado sólido utilizando *Aspergillus niger*. *Bionatura*. 2020;5:1189–94.
 9. Villegas R. DA, Valbuena N, Milla P. ME. Evaluación de modelos aplicados a la producción de materia seca de *Brachiaria brizantha* en el periodo lluvioso. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 2019;36(1):33–45.
 10. Ramos-Sánchez LB. Modelo cinético para la producción de celulasas por una cepa de *Aspergillus Niger* en fermentación sólida. 2018;45(2):1-13
 11. Apunte D, Fernández D, López O, D. Obtención medio enriquecido en proteínas a partir de residuos de papa (*Solanum tuberosum*) por fermentación microbiana. *Alimentos, Ciencia e Ingeniería*. 2019;27(1):93–107.
 12. Madigan MT, Martinko JM. Brock Biology of Microorganisms. *International Microbiology*. 2005;8(2): 149-152