

Evaluación de la germinación diaria en dos cultivares de arroz mediante regresión lineal

Evaluation of daily germination in two rice cultivars using linear regression

 Sahily Cano-Llorente^{1*},  Sergio F. Rodríguez-Rodríguez²,  Roberto A. García-Reyes³,  María Elena Ruíz-Pérez⁴,  Gerardo Cueto-Aldana⁵,  Manuel José Linares-Álvaro⁶ and  Benjamín Gaskins-Espinosa⁷

¹Universidad de Granma, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Departamento de Agronomía, Bayamo, Granma, Cuba.

²Universidad de Granma, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Departamento de Ingeniería Forestal, Bayamo, Granma, Cuba. E-mail: sfrodriquez1964@gmail.com

³Ministerio e la Agricultura, Delegación Provincial de Holguín, Holguín, Cuba. E-mail: ralejandro9409@gmail.com

⁴Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. E-mail: mruijperez@gmail.com

⁵Estación Territorial de Investigaciones de Granos. Jucarito, Río cauto, Granma, Cuba. E-mail: gcueto142@gmail.com

⁶Universidad de Granma, Departamento de Redes, Dirección de Informatización, Bayamo, Granma, Cuba.

⁷Universidad de Granma, Facultad de Ciencias Técnicas, Departamento de Ciencias Técnicas Agropecuarias, Bayamo, Granma, Cuba. E-mail: bgaskine@gmail.com

*Autora para correspondencia: Sahily Cano Llorente, e-mail: sahilycanolllorente@gmail.com

RESUMEN: Entre los tipos de acondicionamiento de semillas de plantas se encuentra el hidroacondicionamiento con beneficios demostrados en las propiedades germinativas, e imprescindible para uniformar la germinación en arroz. El objetivo consistió en evaluar la dinámica diaria de semillas hidroacondicionadas germinadas de los cultivares de arroz INCA P-5 e IACuba-41 (*Oryza sativa* L.) mediante un modelo de regresión lineal simple. En enero de 2024, en Río Cauto, Granma, Cuba, se realizó el experimento con 200 semillas de arroz (100 por cultivar: INCA LP-5 e IACuba-41). Las semillas, seleccionadas sin defectos y con humedad ajustada al 9-10%, se imbibieron durante 72 h con agua de riego, se secaron 48 h a la sombra y se sembraron en bandejas con suelo Vertisol propio de la zona. Se evaluó la cantidad de semillas germinadas diarias durante 14 días. Se aplicó un modelo de regresión lineal simple (días como variable independiente, germinación como dependiente) mediante mínimos cuadrados ordinarios, con la pendiente (a), la ordenada al origen (b) y sus intervalos de confianza por bootstrap con 1 999 repeticiones y percentil 95%. Se determinó además la heterocedasticidad, autocorrelación de los residuos, valores predichos y sus errores estándar. Los resultados confirman que las semillas germinadas por días en ambos cultivares no se ajusta a un modelo de regresión lineal con etapas asimétricas de ruptura de la latencia, pico germinativo y posterior descenso, con una ligera dispersión menor o una germinación más concentrada del cultivar INCA LP-5 respecto a IACuba-41. **Palabras clave:** Hidroacondicionamiento, germinación, arroz, semillas, cultivares, regresión lineal.

ABSTRACT: Among the types of plant seed priming, hydropriming stands out with proven benefits in germination properties and is essential for standardizing germination in rice. The objective was to evaluate the daily dynamics of hydroconditioned germinated seeds of rice cultivars INCA P-5 and IACuba-41 (*Oryza sativa* L.) using a simple linear regression model. In January 2024, in Río Cauto, Granma, Cuba, the experiment was conducted with 200 rice seeds (100 per cultivar: INCA LP-5 and IACuba-41). The seeds, selected without defects and with moisture adjusted to 9-10%, were imbibed for 72 hours with irrigation water, dried for 48 hours in the shade, and sown in trays with local Vertisol soil. The number of germinated seeds was evaluated daily for 14 days. A simple linear regression model was applied (days as independent variable, germination as dependent) using ordinary least squares, with the slope (a), intercept (b) and their bootstrap confidence intervals with 1,999 repetitions and 95,0 percentile. Heteroscedasticity, autocorrelation of residuals, predicted values and their standard errors were also determined. The results confirm that the germinated seeds per day in both cultivars do not fit a linear regression model with asymmetric stages of dormancy breaking, germination peak and subsequent decline, with a slight lower dispersion or a more concentrated germination of the INCA LP-5 cultivar compared to IACuba-41

Keywords: Hydropriming, germination, rice, seeds, cultivars, linear regression.

Recibido: 02/04/2025

Aceptado: 01/10/2025

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Contribución de los autores: **Conceptualización:** Sahily Cano Llorente. **Curación de datos:** Sahily Cano Llorente, Sergio F. Rodríguez Rodríguez, Roberto A. García Reyes, María Elena Ruíz Pérez. **Investigación:** Sahily Cano Llorente, Sergio F. Rodríguez Rodríguez. **Metodología:** Sahily Cano Llorente, Roberto A. García Reyes. **Validación:** Sahily Cano Llorente, Sergio F. Rodríguez Rodríguez, Roberto A. García Reyes, María Elena Ruíz Pérez, Gerardo Cueto Aldana, Manuel José Linares Álvaro y Benjamín Gaskins Espinosa. **Redacción, borrador original:** Sahily Cano Llorente, Sergio F. Rodríguez Rodríguez, Roberto A. García Reyes, María Elena Ruíz Pérez, Gerardo Cueto Aldana, Manuel José Linares Álvaro y Benjamín Gaskins Espinosa. **Redacción, revisión y edición:** Sahily Cano Llorente, Sergio F. Rodríguez Rodríguez, Roberto A. García Reyes, María Elena Ruíz Pérez y Benjamín Gaskins Espinosa.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



INTRODUCCIÓN

El hidroacondicionamiento o *hidroprimingen* (en inglés), es un tipo de acondicionamiento de semillas de plantas que transforma la germinación y el establecimiento inicial de especies vegetales como el arroz (*Oryza sativa* L.), girasol (*Helianthus annuus* L.), altramuza (*Lupinus albus* L.) y algodón (*Gossypium hirsutum* L.). Consiste en hidratar la semilla de modo controlado, lo que activa el metabolismo sin que la radícula salga. Mondo *et al.* (2016) demostraron que esta técnica incrementa la germinación y el vigor de arroz en tierras altas, sin alterar el ciclo ni el rendimiento de grano, lo que la hace útil en sistemas agrícolas con presiones ambientales.

El hidroacondicionamiento activa redes fisiológicas, bioquímicas y moleculares que explican su efecto favorable. Choi *et al.* (2024) observaron que, en arroz, este tratamiento estimula la elongación de la plúmula y la radícula, al tiempo que eleva la actividad de enzimas antioxidantes que reducen el estrés oxidativo bajo déficit hídrico.

Catiempo *et al.* (2024) emplearon análisis transcriptómico en semillas de girasol y hallaron que genes que codifican la expansión celular son clave para el mejoramiento de la germinación tras el hidroacondicionamiento. El acondicionamiento o priming fortalece la tolerancia a estreses abióticos. Khalequzzaman *et al.* (2023) observaron que, en algodón, el tratamiento incrementó la germinación, el rendimiento y la productividad del agua bajo sequía. Pláček *et al.* (2018) demostraron que la combinación de hidroacondicionamiento con agua de humo favoreció la germinación de lupino (*Lupinus angustifolius* L.) a bajas temperaturas, un resultado valioso para regiones frías. Zhang *et al.* (2024) añaden que variables como la temperatura y la humedad regulan la germinación del arroz silvestre (*Oryza rufipogon* Griff.), y el acondicionamiento permite ajustar dichas respuestas.

La regresión lineal simple modela la germinación que vincula días transcurridos con porcentaje de semillas germinadas, lo que permite estimar tasas y evaluar uniformidad. Bewley *et al.* (2012) usaron esta técnica con datos transformados (arcoseno) frente al tiempo, tras validar la independencia de residuos y calcular la velocidad de germinación en alfalfa (*Medicago sativa* L.) y lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo condiciones controladas.

Sin embargo, escasean los estudios que emplean la dinámica de semillas germinadas en el tiempo como variable cuantitativa discreta, frente a la tendencia predominante de evaluar parámetros germinativos mediante porcentajes y tasas calculadas. El objetivo de esta investigación consistió en evaluar la dinámica diaria de semillas hidroacondicionadas germinadas de los cultivares de arroz INCA P-5 e IACuba-41 (*Oryza sativa* L.) mediante un modelo de regresión lineal simple.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se ejecutó en el municipio de Río Cauto, provincia de Granma, en enero de 2024. Se emplearon 200 semillas de arroz (*Oryza sativa* L.) correspondientes a los cultivares cubanos INCA LP-5 e IACuba-41, con 100 unidades por cultivar. Estos cultivares surgieron del programa de mejoramiento genético del arroz cubano y poseen uniformidad genética y categoría registrada. Se obtuvieron en la UEB de Semillas “La Gavina”, perteneciente a la Empresa Agroindustrial de Granos “Fernando Echenique” en Granma, Cuba.

Se eligieron semillas sin defectos visibles, ausencia de granos vacíos, sin daños por insectos ni malformaciones. El contenido de humedad se ajustó al intervalo 9 a 10%, conforme a la normativa internacional (ISTA Rules, 2022).

Las semillas se sembraron en bandejas de aluminio con dimensiones de 5.0 cm de alto, 20 cm de ancho y 35 cm de largo. Las bandejas se llenaron con suelo Vertisol (Hernández-Jiménez *et al.*, 2019).

Antes de la siembra, las semillas se imbibieron en agua del canal de riego, utilizada para inundar los campos de arroz en esa zona, durante un periodo de 72 h, que es la práctica usual que se aplica en esas áreas productivas, para que los resultados se ajustaran lo más posible a la realidad, lo que no constituyó una limitante debido a que el porcentaje de germinación del experimento en ambos cultivares sobrepasó el 95,0%. Tras este tiempo, las semillas se colocaron a la sombra en un lugar aireado durante 48 horas. Posteriormente, se sembraron en la superficie del suelo de las bandejas, y se humedeció el suelo con agua sin provocar encharcamiento. Cada semilla se sembró en las bandejas en hileras separadas por tres centímetros, con una separación de 10 cm entre hileras.

Las bandejas permanecieron en condiciones ambientales de enero de 2024. Las temperaturas registradas fueron mínimas de 25 °C, medias de 27 °C y máximas de 29 °C. El fotoperiodo alcanzó 12 h y la humedad relativa se situó en el 80%. Se evaluó el número de semillas germinadas por día durante 14 días, desde la siembra hasta el día 14. Se consideró germinación la emergencia visible de la radícula (>2 mm).

Con los datos se ajustó un modelo de regresión lineal simple (días como variable independiente, germinación como dependiente) mediante mínimos cuadrados ordinarios. Se obtuvo la pendiente (a), la ordenada al origen (b) y sus intervalos de confianza por remuestreo bootstrap y percentil 95,0%. La significancia de los coeficientes se verificó con la t de Student y la heterocedasticidad con la prueba de Breusch-Pagan. Se estimó la autocorrelación de los residuos mediante el estadístico de Durbin-Watson. La fuerza de la asociación se midió con el coeficiente de correlación producto-momento (r) y la proporción de varianza explicada o coeficiente de determinación ajustado (R^2 aj.). Se determinó además el valor p del modelo de regresión lineal por Fisher y por bootstrap con 9 999 permutaciones al 95,0% de confiabilidad.

Para ambos cultivares (INCA LP-5 e IACuba-41), se calculó el residual (valor observado - valor predicho por la recta ajustada) y su error estándar de predicción por cada día. Se empleó la ecuación de regresión lineal simple $\hat{Y} = b_0 + b_1X$. Los valores predichos provinieron del modelo, mientras los residuos surgieron de la diferencia entre valores observados y predichos. Asimismo, se estimaron los errores estándar de los valores predichos para evaluar la precisión del modelo. Se analizó la función de autocorrelación de los residuos mediante un gráfico de función de autocorrelación para determinar la independencia de los errores. Los residuos y sus errores estándar se graficaron frente a los días transcurridos para inspeccionar la homocedasticidad y la adecuación del modelo.

Se determinó además la probabilidad de las semillas germinadas en el tiempo estimada por Kaplan-Meier por Log-rank y Wilcoxon para análisis de supervivencia por métodos no paramétricos, para los tiempos de germinación T25, T50 y T75 (número de días necesarios para que germine el 25,0; 50,0 y 75,0% del total de semillas germinadas).

Los análisis se realizaron en el software R versión 4.5.1 [R Core Team \(2021\)](#), con los paquetes boot para bootstrap, lmtest para pruebas diagnósticas, car para soporte estadístico, broom para tabular resultados, y survival versión 3.7-0 [Therneau \(2024\)](#) para análisis de supervivencia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La interpretación de la [Tabla 1](#) tiene como finalidad comparar los cultivares INCA LP-5 e IACuba-41 a partir de los parámetros de la regresión lineal simple y su relevancia agronómica.

Tabla 1. Parámetros estadísticos de la regresión lineal días vs germinación. *** $p < 0,001$ para ambos cultivares.

Variable	INCA LP-5	IACuba-41
Pendiente (a)	$0,369 \pm 0,319$	$0,367 \pm 0,337$
IC 95% Pendiente	-0,117 - 1,213	-0,108 - 1,284
Intercepto (b)	$1,171 \pm 2,443$	$1,114 \pm 2,581$
IC 95% Intercepto	-2,005 - 5,529	-2,281 - 5,277
Correlación r	0,317	0,300
R ² ajustado	0,025	0,014
Error estándar	4,82	5,09
Durbin-Watson	0,473***	0,437***
Breusch-Pagan (p)	0,132	0,081
p Fisher modelo	0,270	0,265
p Bootstrap modelo	0,298	0,292

La pendiente (a), que indica el cambio diario en la germinación, es 0.369 ± 0.319 para INCA LP-5 y 0.367 ± 0.337 para IACuba-41, mostrando tasas similares entre ambos cultivares. El error estándar, ligeramente mayor en IACuba-41, sugiere mayor variabilidad,

por una dispersión más amplia en sus datos. Los intervalos de confianza al 95% (-0,117 a 1,213 para INCA LP-5; -0,108 a 1,284 para IACuba-41) incluyen el cero, lo que indica ausencia de relación lineal significativa. La similitud en las tasas de germinación favorece la planificación de siembra y asegura una emergencia uniforme del arroz, clave para la homogeneidad del cultivo. Sin embargo, se recomienda validar estos resultados en diversas condiciones edafoclimáticas.

El intercepto, $1,171 \pm 2,443$ para INCA LP-5 y $1,114 \pm 2,581$ para IACuba-41, refleja alta incertidumbre y sobreestima la germinación inicial, que debería ser nula. Los intervalos de confianza (-2,005 a 5,529 para INCA LP-5; -2,281 a 5,277 para IACuba-41) incluyen el cero, confirmando baja precisión. Esta sobreestimación evidencia una limitación del modelo lineal, especialmente en el inicio del proceso.

La correlación de Pearson (0,317 para INCA LP-5; 0,300 para IACuba-41) indica una relación débil entre días y germinación, ligeramente más fuerte en INCA LP-5, aunque sin relevancia práctica. El R² ajustado (0,025 para INCA LP-5; 0,014 para IACuba-41) muestra que el modelo explica solo el 2,5% y 1,4% de la variabilidad, característico de un ajuste pobre. El error estándar (4,82 para INCA LP-5; 5,09 para IACuba-41) indica mayor dispersión en IACuba-41, e indica menor precisión predictiva.

El estadístico de Durbin-Watson (0,473 para INCA LP-5; 0,437 para IACuba-41, $p < 0,001$) revela autocorrelación positiva en los residuales, lo que provoca violación del supuesto de independencia. Esto indica que el modelo no captura la estructura temporal de los datos, con una dependencia sistemática entre observaciones consecutivas, más pronunciada en IACuba-41. La prueba de Breusch-Pagan ($p = 0,132$ para INCA LP-5; $p = 0,081$ para IACuba-41) al no ser significativa señala presencia de homocedasticidad de los residuos en ambos cultivares,

La autocorrelación y el bajo R² ajustado refuerzan la inadecuación del modelo lineal, que no representa la cinética real de la germinación. Enfoques no lineales o de series temporales permitirían modelar mejor la dependencia entre observaciones sucesivas, ofreciendo mayor precisión para ambos cultivares. El análisis de residuos ([Tablas 2 y 3](#)) permite identificar cuatro fases distintivas en la dinámica germinativa de ambos cultivares: latencia, exponencial, desaceleración y meseta. Estas etapas reflejan patrones de sobreestimación y subestimación del modelo lineal, vinculados a procesos fisiológicos clave. Su examen facilita la comprensión de diferencias entre INCA LP-5 e IACuba-41, además de evidenciar limitaciones del ajuste lineal para describir la germinación del arroz.

El valor p del modelo de regresión lineal, calculado mediante el estadístico F de Fisher y por bootstrap para ambos cultivares, fue mayor a 0.05; por lo tanto, el modelo no es estadísticamente significativo. Esto indica que no existe evidencia suficiente para afirmar que la cantidad de semillas germinadas por día sigue una relación lineal.

Tabla 2. Valores observados, predichos y residuos para INCA LP-5

Días	Semillas germinadas	Valor predicho	Residuo	Error estándar del valor predicho
0	0	2,343	-2,343	4,885
1	0	3,081	-3,081	4,355
2	0	3,820	-3,820	3,859
3	0	4,558	-4,558	3,410
4	0	5,297	-5,297	3,030
5	2	6,035	-4,035	2,747
6	8	6,774	1,226	2,594
7	26	7,512	18,488	2,594
8	24	8,250	15,750	2,747
9	20	8,989	11,011	3,030
10	14	9,728	4,273	3,410
11	6	10,466	-4,466	3,8587

Tabla 3. Valores observados, predichos y residuos para IACuba-41

Días	Semillas germinadas	Valor predicho	Residuo	Error estándar del valor predicho
0	0	2,229	-2,229	5,162
1	0	2,963	-2,963	4,603
2	0	3,697	-3,697	4,077
3	0	4,431	-4,431	3,602
4	0	5,165	-5,165	3,199
5	2	5,900	-3,900	2,902
6	8	6,633	1,367	2,741
7	18	7,367	10,633	2,741
8	28	8,101	19,900	2,902
9	26	8,835	17,165	3,199
10	14	9,569	4,431	3,602
11	2	10,303	-8,303	4,077
12	0	11,037	-11,037	4,603
13	0	11,771	-11,771	5,162

El análisis de residuos revela un patrón no lineal que se puede agrupar en fases del proceso de germinación.

Fase de ruptura de la latencia (días 0-4): sobreestimación y diferencias en la magnitud del retraso inicial

Durante los primeros cinco días de muestreo, ambos cultivos exhiben residuos negativos crecientes. Esto indica una sobreestimación sistemática por parte del modelo lineal. La magnitud acumulada del error difiere: INCA LP-5 acumula 15,98 unidades en los días 0-4, mientras IACuba-41 alcanza 18,48 unidades.

Esta mayor magnitud en IACuba-41 sugiere un retraso inicial más pronunciado, debido al posible vínculo con una dormancia residual persistente o a una menor velocidad de imbibición inicial, lo que implica que IACuba-41 requeriría mayor grados-día para superar el umbral fisiológico de germinación.

Fase exponencial (días 5-8): amplitud y pico de subestimación

Entre los días 5 y 8, ambos cultivos pasan a residuos positivos. Esto refleja la subestimación del modelo en la etapa de máxima velocidad germinativa. La dinámica difiere en lo cualitativo, INCA LP-5 alcanza su máximo residual positivo en el día 7 (18,49%), mientras IACuba-41 lo hace en el día 8 (19,90%).

Este desfase indica que IACuba-41 posee una curva de progresión germinativa desplazada hacia la derecha. La acumulación de residuos positivos en IACuba-41 es de 49,66 unidades frente a 35,27 en INCA LP-5, lo que denota una tasa de germinación más abrupta.

Fase de desaceleración y pérdida de viabilidad (días 9-13)

A partir del día 9, ambos cultivos muestran reducción de residuos positivos. INCA LP-5 cambia de signo en el día 11 (-4,47), mientras IACuba-41 lo hace en el día 10 (-8,30) y alcanza un residual negativo extremo en el día 13 (-11,77). Esta mayor amplitud en IACuba-41 (acumulado de -31,11 unidades vs. -4,47 en INCA LP-5) indica una desaceleración más brusca y pérdida más rápida de viabilidad, señal de que IACuba-41 posee una amplitud de germinación menos concentrada en el tiempo.

Precisión predictiva y heterogeneidad residual

El error estándar de los residuos es mayor en IACuba-41 (rango 2,74-5,16) que en INCA LP-5 (2,59-4,89). Esta mayor dispersión refleja heterogeneidad residual superior en IACuba-41, atribuible a variabilidad biológica intrasemillas o sensibilidad a microvariaciones ambientales.

Desde la estadística, la mayor amplitud de intervalos de confianza para los residuos de IACuba-41 refuerza que su curva germinativa es más difícil de predecir con un modelo lineal simple. Aunque ambos cultivos desafían la validez del modelo lineal, pero con matices que permiten discriminar su comportamiento fisiológico. INCA LP-5 exhibe germinación más precoz y estable, con menor amplitud de residuos y ajuste superior. Esto lo posiciona como más robusto en condiciones marginales o con manejo agronómico intensivo.

IACuba-41 muestra germinación más rezagada pero explosiva una vez iniciada, con meseta abrupta y variabilidad residual elevada. Estas características lo harían más adecuado para ambientes homogéneos y estables donde la emergencia concentrada sea ventaja competitiva.

El gráfico muestra los residuos (Fig. 1a) del modelo (eje y) según los días transcurridos (eje x), con barras de error que reflejan los errores estándar de las predicciones. Desde el punto de vista estadístico, permite evaluar violaciones a los supuestos de linealidad (patrones sistemáticos en residuos), homocedasticidad (varianza constante, indicada por barras de error similares) e independencia (agrupaciones temporales). La línea roja en $y=0$ sirve como referencia para verificar si los residuos se distribuyen de forma aleatoria, lo que sugeriría un ajuste adecuado del modelo.

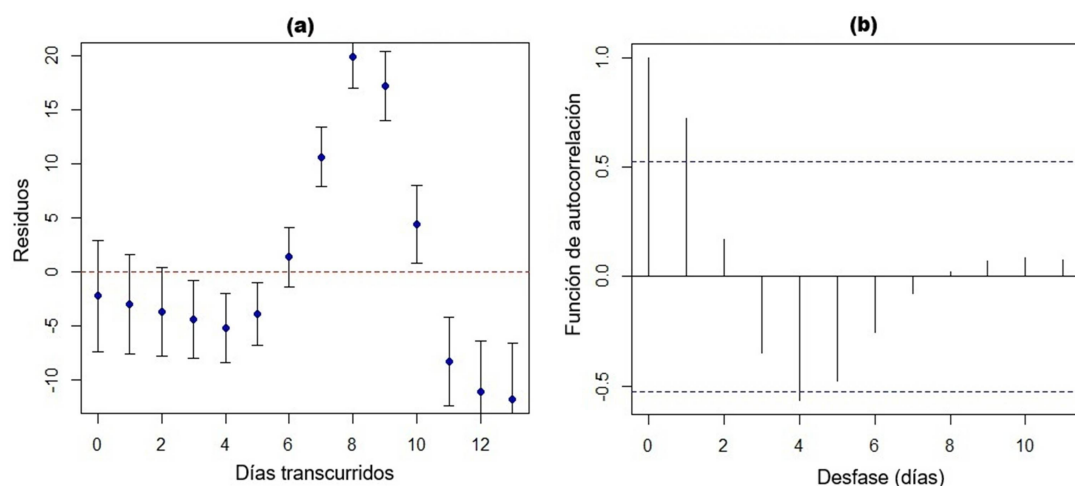


Figura 1. Residuos con sus errores estándar (1a) y su autocorrelación (1b), cultivar IACuba-41.

En IACuba-41, los residuos muestran un patrón curvilíneo, negativos en días 0-4 (<-10), positivos en días 8-9 (>15), y negativos en días 11-13 (<-10), indica una dinámica no lineal. El modelo lineal subestima la germinación temprana y tardía, pero sobreestima la fase intermedia.

Las barras de error, más amplias en los extremos, confirman heterocedasticidad, reflejo de la variabilidad biológica en la emergencia de plántulas, influida por imbibición o agotamiento de reservas. El modelo lineal no captura la cinética no lineal de este cultivar adaptado a condiciones tropicales.

IACuba-41 presenta residuos de mayor magnitud (>19 vs. >18 en INCA LP-5) y barras de error más amplias ($SE \approx 5,16$ vs. $\approx 4,89$), para una mayor variabilidad y menor precisión predictiva. La autocorrelación es más pronunciada en IACuba-41, lo que sugiere dependencias temporales más fuertes.

En INCA LP-5 (Fig. 2a), los residuos son negativos en días los días 0-5 (≈ -5), positivos en los días 7-9 (>15), y negativos los días del 11-13 (<-10), con curvatura menos pronunciada. La heterocedasticidad indica menor precisión en los extremos, con subestimación inicial y tardía, y sobreestimación central.

El gráfico de autocorrelación (Fig. 1b) muestra la correlación serial de residuos, con valores entre -1 y 1. El eje x representa los desfases (lags en inglés), y el eje y, la función de autocorrelación. Líneas azules punteadas marcan umbrales de significancia ($\pm 2/\sqrt{n}$, $n=14$).

La autocorrelación evalúa dependencias seriales, donde barras que superan umbrales violan la independencia de errores, lo que aumenta la varianza de estimadores. En datos germinativos, esto refleja dependencias temporales inherentes.

En IACuba-41, la autocorrelación en desfase 1 (≈ 0.6) es significativa, y decae en desfases superiores, lo que indica un proceso AR (1). Un proceso AR (1) (autorregresivo de orden 1) es un modelo estadístico en el que el valor de una variable en un momento dado depende linealmente de su valor en el momento inmediatamente anterior, más un término de error aleatorio. Esto implica que los residuos no son completamente aleatorios, sino que tienen una estructura temporal donde cada residuo está influenciado por el anterior, y sugiere efectos de arrastre, como sincronización en la emergencia o factores ambientales como temperatura.

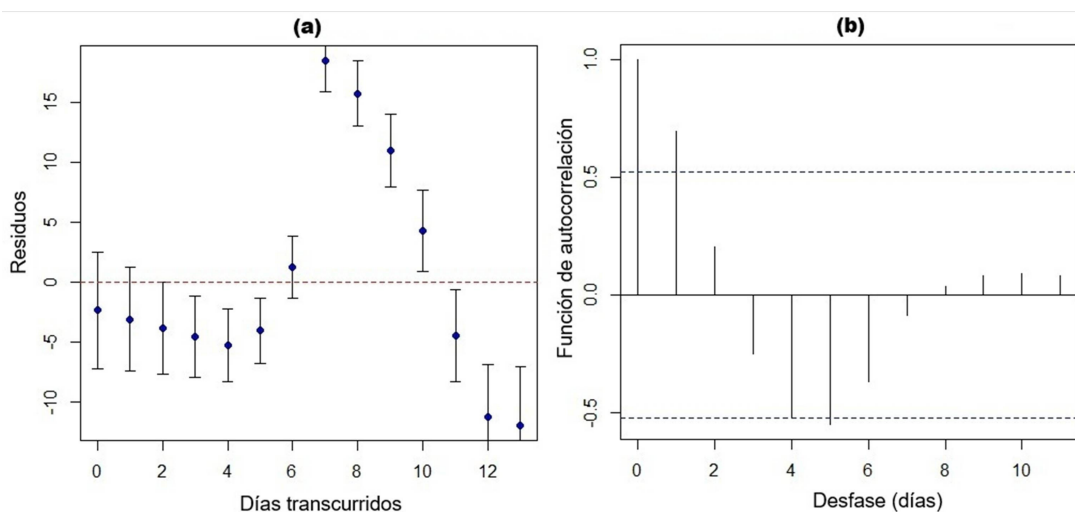


Figura 2. Residuos con sus errores estándar (2a) y su autocorrelación (2b), cultivar INCA LP-5.

La rápida decadencia implica que el modelo lineal no captura la estructura temporal. Modelos con errores autorregresivos o GAM podrían mejorar el ajuste de no linealidades.

En INCA LP-5 (Fig. 2b), la autocorrelación en desfase 1 ($\approx 0,5-0,6$) es significativa pero menos intensa, con decadencia en desfases posteriores, y sugiere menor dependencia serial. Esto viola la independencia, y afecta pruebas como Durbin-Watson ($\approx 0,4-0,5$). Esto puede atribuirse a efectos acumulativos, como liberación de inhibidores o acumulación de metabolitos. INCA LP-5 muestra mayor uniformidad genética o menor sensibilidad ambiental.

IACuba-41 presenta residuos positivos centrales mayores, aunque presenta mayor incertidumbre en las fases inicial y tardía. Dicha característica podría implicar una mayor vulnerabilidad frente a estrés abiótico, como la sequía inicial. Por su parte, INCA LP-5 muestra transiciones más graduales, lo que indica una mayor estabilidad germinativa, lo que resulta útil en sistemas de cultivo diversificados.

Ambos cultivares de arroz muestran violaciones similares a los supuestos del modelo lineal: no linealidad (residuos curvilíneos), heterocedasticidad (errores más amplios en extremos) y autocorrelación positiva, baja capacidad explicativa (R^2 ajustado $\leq 0,025$), intervalos de confianza que incluyen el cero y autocorrelación significativa de residuos (Durbin-Watson $< 0,5$) coinciden con problemas descritos por Sileshi (2012) y Carvalho et al. (2018), quienes advierten sobre subestimación del error estándar y significancia inflada al ignorar la naturaleza binomial y correlación temporal de los datos.

Esta limitación quedó evidenciada en el estudio de Scott et al. (1984) con *Solanum lycopersicum* L., donde se demostró que la estimación del tiempo medio de germinación y de la probabilidad condicional de germinación (riesgo) resulta sesgada si no se incorporan modelos de supervivencia o funciones de distribución acumulada.

Otro problema surge cuando los datos de germinación se expresan de forma acumulativa, situación que rompe la independencia de las observaciones. En este contexto, Hay et al. (2014) recomiendan analizar proporciones mediante modelos probit o logit (GLM binomial). Estos autores también advierten que la transformación arcoseno, habitual en trabajos sobre porcentaje de germinación, no corrige la heterocedasticidad y puede incluso agravar la falta de normalidad, como evidenciaron Ahrens et al. (1990).

La variabilidad en la proporción de semillas germinadas no siempre es constante entre genotipos. En el cultivar IACuba-41, se observó heterocedasticidad marginal ($p = 0,081$), lo que indica que la varianza depende del nivel de la media. Este comportamiento ha sido descrito por Scott et al. (1984) y Sileshi (2012), quienes demostraron que la varianza sigue una función cuadrática respecto al promedio.

Ante esta limitación, se recomienda el uso de modelos más flexibles. Los modelos lineales generalizados mixtos (GLMM) y las regresiones beta-binomiales permiten incorporar efectos aleatorios asociados. Esta característica mejora la representación de la estructura jerárquica de los datos. Bolker et al. (2009) y McNair et al. (2012) destacan que estos enfoques ofrecen inferencias más confiables cuando la varianza no es constante.

Para otras alternativas del análisis de regresión Jiang et al. (2020) aplicaron análisis de regresión paso a paso para seleccionar indicadores mínimos de calidad del suelo en humedales deltaicos, con alta correlación del coeficiente de determinación ($R^2 > 0,85$). Este método permite para un conjunto de datos optimizar recursos sin sacrificar precisión, y es aplicable a variables y parámetros relacionados con la germinación.

Al comparar cultivares, es fundamental considerar que parámetros fisiológicos de la semilla como la temperatura base (Tb) y el potencial hídrico base (ψ_b) varían entre genotipos. Bradford (2002) y Ali y Ullah (2022) recomiendan estimarlos simultáneamente mediante modelos hidrotérmicos. Este procedimiento evita sesgos que surgen al asumir valores fijos o ajustar pendientes lineales por separado.

La distribución de los tiempos de germinación rara vez se ajusta al modelo normal, en especial en presencia de censura o asimetría. Watt et al. (2011) y Mesgaran et al. (2013) han demostrado que estas alternativas reducen el error de predicción.

Un enfoque adicional robusto es el uso de modelos de supervivencia condicional. Scott et al. (1984) subrayan que permiten analizar el tiempo hasta la germinación sin asumir normalidad. Este método ha sido validado en *Solanum lycopersicum* L. por Scott y Jones (1982).

La aplicación de regresión lineal simple en INCA LP-5 e IACuba-41 reproduce los errores sistemáticos identificados durante más de cuatro décadas en la literatura especializada: violación de independencia, heterocedasticidad y subestimación del error. La transición hacia modelos probit/logit, hidrotérmicos y de supervivencia no resulta solo recomendable, sino necesaria para obtener estimaciones válidas y comparaciones fiables entre cultivares.

En ambos casos, se aconseja transitar hacia modelos no lineales, para curvas de germinación, o bien incorporar términos autorregresivos, como los modelos ARIMA, con el propósito de mejorar el ajuste y las inferencias sobre viabilidad seminal y rendimiento potencial.

Investigaciones futuras podría integrar variables ambientales con el fin de desentrañar estas dinámicas, para optimizar las prácticas de siembra en el contexto de la agronomía tropical y la presión del cambio climático.

Aunque las pendientes de germinación son muy similares entre cultivares (0,369 frente a 0,367), IACuba-41 alcanzó un pico mayor (14 frente a 13 plántulas el día 8). Esta diferencia podría atribuirse a una mayor viabilidad inicial o a niveles más bajos de dormancia. Estos rasgos son relevantes en programas de mejoramiento, donde el establecimiento rápido y uniforme del cultivo incide directamente en el rendimiento final.

En los últimos años, el acondicionamiento ha evolucionado más allá de su uso tradicional. [Kharb et al. \(2023\)](#) demostraron que esta técnica con la inclusión de hierro no solo mejora la germinación y el crecimiento en arroz, sino que también incrementa el contenido de hierro en las plántulas. Esta evidencia abre una vía prometedora para la biofortificación de cultivos, en especial en regiones con deficiencias nutricionales.

Sin embargo, esta técnica no está exenta de riesgos. [Ren et al. \(2023\)](#) advierten que ciertos métodos de acondicionamiento de semillas pueden acelerar el deterioro de las semillas de arroz. Este efecto se vincula con un aumento en la producción de especies reactivas de oxígeno, una respiración elevada y la degradación prematura del almidón. Estos procesos comprometen la viabilidad a largo plazo, lo que exige un diseño cuidadoso de los protocolos.

Los contaminantes ambientales representan un desafío emergente para la germinación de semillas. Investigaciones recientes revelan que microplásticos como polietileno, polipropileno y poliestireno afectan de forma adversa el desarrollo inicial de plantas de arroz [Iswahyudi et al. \(2024\)](#), y limita la eficacia del acondicionamiento en suelos contaminados. A pesar del progreso científico, subsisten limitaciones notables. La ausencia de protocolos estandarizados, que incluye tiempos de hidratación y concentraciones de sustancias, obstaculiza la comparabilidad de resultados y su reproducción.

La comprensión de rutas regulatorias permanece incompleta. Si bien estudios han progresado en la identificación de genes y metabolitos esenciales [Liu et al. \(2023\)](#); [Catiempo et al. \(2024\)](#), la integración de estos elementos en modelos funcionales requiere mayor desarrollo. Otro obstáculo crítico es la escasez de información sobre efectos prolongados del acondicionamiento en rendimiento y calidad del grano, dado que la mayoría de las investigaciones se enfocan exclusivamente en germinación y crecimiento inicial. La aplicación extensiva de estas técnicas en sistemas agrícolas comerciales encuentra barreras de naturaleza logística y económica.

La especificidad genotípica en las respuestas al acondicionamiento restringe su aplicabilidad universal. Según señalan [Barik et al. \(2022\)](#), esta variabilidad demanda investigaciones centradas en la diversidad genética de cultivos.

Por otro lado, [Ranmeechai et al. \(2022\)](#) encontraron que el hidroacondicionamiento mejora significativamente la germinación y el vigor en variedades de arroz filipinas tras periodos prolongados de almacenamiento. Esta capacidad para contrarrestar los efectos del envejecimiento posibilita su uso en sistemas donde el acceso a semillas nuevas es limitado. Así, el acondicionamiento se consolida como una herramienta estratégica, siempre que se equilibre eficacia y conservación de la calidad de la semilla.

El modelado de la germinación mediante regresión simple constituye una herramienta esencial. Estos modelos posibilitan analizar respuestas a variables

como temperatura, salinidad y estrés hídrico, para optimizar condiciones agrícolas en cultivos de arroz, sésamo, *Foeniculum vulgare* (Mill.), *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek y *Allium cepa* L. La caracterización de la respuesta germinativa de *Secale montanum* Guss. ante distintas temperaturas permitió identificar umbrales óptimos mediante modelos no lineales ([Ansari et al., 2017](#)).

El análisis de interacciones con factores estresantes se ha visto simplificado por la regresión simple. Al evaluar el efecto conjunto de salinidad e hidroacondicionamiento en *Foeniculum vulgare* Miller, [Kiani et al. \(2013\)](#) observaron un aumento de la tolerancia que abre posibilidades para suelos degradados. En un escenario emergente, [Kumar y Thakur \(2025\)](#) describieron, mediante regresión no lineal, la fitotoxicidad dosis-dependiente de nanopartículas de hematita en *Vigna radiata* (Linnaeus) Wilczek y *Allium cepa* Linnaeus, lo que proyecta usos sostenibles de la nanotecnología.

Cuando los datos se tornan complejos o desbalanceados, la regresión simple se combina con métodos avanzados para superar sus límites. En la clasificación de plántulas de arroz, [Mara et al. \(2025\)](#) integraron inteligencia artificial y un componente lineal para refinar la precisión, mientras que [Cheng et al. \(2022\)](#) emplearon resonancia magnética nuclear de bajo campo y aprendizaje automático, al utilizar regresión lineal para interpretar el vigor. Ambos trabajos sugieren una transición hacia modelos híbridos y técnicas no destructivas.

En el ámbito genético y productivo, [Sales et al. \(2017\)](#) aplicaron regresión lineal en un estudio de asociación genómica para localizar loci relacionados con la tolerancia al frío en germinación de arroz en subespecies japonicas. Por su parte, [Sairdama y Matakana \(2025\)](#) identificaron, también con regresión lineal, factores que inciden en la producción de arroz, como superficie sembrada y fertilizantes, para mostrar la utilidad de modelos simples en decisiones agrícolas a gran escala.

Persisten vacíos importantes. Investigaciones que emplean regresión no lineal, como las de [Puteh et al. \(2010\)](#); [Ansari et al. \(2017\)](#) y [Pedroso et al. \(2019\)](#), se realizan en condiciones controladas y requieren validación en campos reales. Además, la regresión simple, lineal o no lineal, requiere apoyos como aprendizaje automático para capturar interacciones multifactoriales, tal como señalan [Cheng et al. \(2022\)](#) y [Mara et al. \(2025\)](#). La integración con datos ómicos también es escasa; aunque [Sales et al. \(2017\)](#) avanzan en genética, los modelos simples no revelan redes regulatorias complejas.

Estudios como los de [Kiani et al. \(2013\)](#) asumen patrones simples y muestran sensibilidad a valores extremos, lo que sugiere la conveniencia de enfoques robustos o bayesianos. Finalmente, la falta de protocolos estandarizados y de validación interespecie limita la generalización. Superar estas brechas permitirá emplear la regresión simple con mayor confianza en agricultura de precisión y estrategias de resiliencia climática.

La revisión exhaustiva de métodos analíticos y gráficos para el análisis de datos de germinación de semillas destaca la necesidad de manejar respuestas cualitativas de individuos y distribuciones poblacionales en el tiempo, con la inclusión de datos censurados (semillas viables que no germinan durante el ensayo). Scott *et al.* (1984) presentan este análisis en su artículo.

Entre los métodos analíticos, la regresión lineal simple se aplica de forma amplia para tratamientos cuantitativos, como es el caso del análisis de porcentaje de germinación, se usa regresión lineal después de transformación arcsen para particionar efectos en componentes lineales, cuadráticos u ortogonales, lo que facilita comparaciones de tratamientos. En igual sentido se utiliza también para el índice de germinación y el coeficiente de velocidad de germinación, para describir respuestas a variables continuas como temperatura, con análisis de covarianza para probar homogeneidad de coeficientes y detectar interacciones como genotipo-temperatura (Scott *et al.*, 1984).

La relación entre la tasa de germinación (recíproco del tiempo hasta un porcentaje fijo) y la temperatura se modela mediante regresión lineal simple. Covell *et al.* (1986) extrapolan datos diarios y analizan residuos para asegurar independencia en leguminosas como garbanzo (*Cicer arietinum* L.) y soja (*Glycine max* (L.) Merr.).

Estos estudios subrayan la versatilidad de las regresiones lineales simples para capturar la progresión diaria de la germinación, aunque enfatizan la necesidad de transformaciones y validaciones para manejar variabilidad y cumplir supuestos estadísticos en contextos agrícolas.

Los resultados de la Figura 3 demuestran los porcentajes altos de germinación alcanzados, la no existencia de diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los patrones de germinación de ambos cultivares de las pruebas Log-rank ($p = 0,939$) y Wilcoxon ($p = 0,895$), y que las pequeñas variaciones observadas en las curvas de germinación son producto al azar y no a diferencias biológicas, calidad del agua o de las semillas entre los materiales genéticos. Esta equivalencia estadística se refuerza con la coincidencia exacta en los tiempos de germinación T25, T50 y T75 (8, 9 y 10 días respectivamente para ambos cultivares).

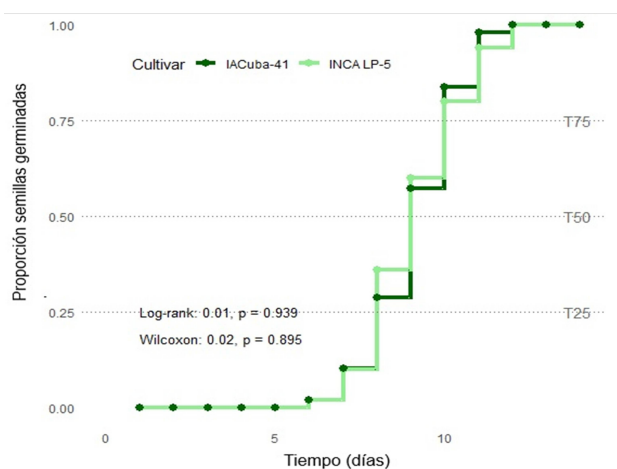


Figura 3. Probabilidad de las semillas hidroacondicionadas germinadas en función del tiempo estimada por Kaplan-Meier y Wilcoxon. T25, T50 y T75 son los tiempos de germinación. Valores de $p > 0,05$ indican ausencia de diferencias significativas.

Sin embargo, Mamani *et al.* (2024) encontraron diferentes valores de la significación por ambas pruebas estadísticas no paramétricas en parámetros de la germinación de *Cecropia pachystachya* Trécul y de *Jacaranda caroba* (Vell.) A.H.Gentry.

CONCLUSIONES

Los cultivares cubanos de arroz INCA LP-5 y IACuba-41 presentan dinámicas germinativas similares, INCA LP-5 muestra menor dispersión residual y mayor estabilidad. Sin embargo, el modelo lineal no representa de forma adecuada el proceso de semillas germinadas por días, debido a su naturaleza sigmoideal con etapas asimétricas de ruptura de la latencia, pico y descenso de la germinación, autocorrelación y baja capacidad explicativa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHRENS, W.H.; COX, D.J.; BUDHWAR, G.: "Use of the arcsine and square root transformations for subjectively determined percentage data", *Weed Science*, 38(4-5): 452-458, 1990, ISSN: 0043-1745, DOI: <https://doi.org/10.1017/s0043174500056824>
- ALI, U.; ULLAH, S.: "Hydrothermal time model analysis of seed germination responses to osmotic stress and temperatures in *Cicer arietinum* L. varieties", *Journal of Xi'an Shiyu University, Natural Science Edition*, 18(12): 1279-1287, 2022, ISSN: 1673-064X.
- ANSARI, O.; GHADERIFAR, F.; ZADEH, F.; MORADI, A.: "Evaluation of nonlinear regression models to describe seed germination response of mountain rye (*Secale montanum*) to temperature.", 2017, DOI: <https://doi.org/10.29252/yujs.3.2.31>.
- BAKIK, S.R.; PANDIT, E.; SANGHAMITRA, P.; MOHANTY, S.P.; BEHERA, A.; MISHRA, J.; NAYAK, D.K.; BASTIA, R.; MOHARANA, A.; SAHOO, A.: "Unraveling the genomic regions controlling the seed vigour index, root growth parameters and germination per cent in rice", *PLoS One*, 17(7): e0267303, 2022, ISSN: 1932-6203, DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267303>.
- BEWLEY, J.D.; BRADFORD, K.; HILHORST, H.: *Seeds: physiology of development, germination and dormancy*, Ed. Springer Science & Business Media, 2012, ISBN: 1-4614-4692-9.
- BOLKER, B.M.; BROOKS, M.E.; CLARK, C.J.; GEANGE, S.W.; POULSEN, J.R.; STEVENS, M.H.H.; WHITE, J.-S.S.: "Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution", *Trends in ecology & evolution*, 24(3): 127-135, 2009, ISSN: 0169-5347, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.10.008>.
- BRADFORD, K.J.: "Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy", *Weed Science*, 50(2): 248-260, 2002, ISSN: 0043-1745, DOI: [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2002\)050\[0248:AOHTTQ\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2002)050[0248:AOHTTQ]2.0.CO;2).

- CARVALHO, F.J.; SANTANA, D.G. de; ARAÚJO, L.B. de: "Why analyze germination experiments using Generalized Linear Models?", *Journal of Seed Science*, 40(3): 281-287, 2018, ISSN: 2317-1537, DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-1545v40n3185259>.
- CATIEMPO, R.L.; PHOTCHANACHAI, S.; POWELL, A.F.; STRICKLER, S.R.; WONGS-AREE, C.: "Transcriptome analysis suggests the role of expansin genes in the improved germination of sunflower (*Helianthus annuus* L.) seeds after hydropriming", *Crop Science*, 64(3): 1862-1873, 2024, ISSN: 0011-183X, DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/csc2.21221>.
- CHENG, E.; SONG, P.; WANG, B.; HOU, T.; WU, L.; ZHANG, B.: "Determination of rice seed vigor by low-field nuclear magnetic resonance coupled with machine learning.", 2022, DOI: <https://doi.org/10.35633/inma-teh-67-52>.
- CHOI, J.-Y.; JU, Y.-H.; NAKAMICHI, A.; CHO, S.-W.; WOO, S.-H.; SAKAGAMI, J.-I.: "Effect of seed hydropriming on the elongation of plumule and radicle during the germination process and changes in enzyme activity under water-deficient conditions", *Plants*, 13(24): 3537, 2024, ISSN: 2223-7747, DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13243537>.
- COVELL, S.; ELLIS, R.; ROBERTS, E.; SUMMERFIELD, R.: "The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes: I. A comparison of chickpea, lentil, soyabean and cowpea at constant temperatures", *Journal of Experimental Botany*, 37(5): 705-715, 1986, ISSN: 1460-2431, DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/37.5.705>.
- HAY, F.R.; MEAD, A.; BLOOMBERG, M.: "Modelling seed germination in response to continuous variables: use and limitations of probit analysis and alternative approaches", *Seed Science Research*, 24(3): 165-186, 2014, ISSN: 0960-2585, DOI: <https://doi.org/10.1017/S096025851400021X>.
- HERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PÉREZ-JIMÉNEZ, J.M.; BOSCH-INFANTE, D.; SPECK, N.C.: "La clasificación de suelos de Cuba: énfasis en la versión de 2015", *Cultivos tropicales*, 40(1), 2019, ISSN: 0258-5936.
- ISTA RULES: *International rules for seed testing*, [en línea], Inst. International Seed Testing Association, 2022, Disponible en: https://seedhealth.org/files/2022/03/ISTA_Rules_2022_SHMethods_7-004.pdf.
- ISWAHYUDI, I.; WIDODO, W.; WARKOYO, W.; SUTANTO, A.; GARFANSA, M.P.; MUJIYANTI, W.A.; SHOLEH, M.S.: "Investigating the impact of microplastics type of polyethylene, polypropylene, and polystyrene on seed germination and early growth of rice plants", *Environmental Quality Management*, 34(1): e22287, 2024, ISSN: 1088-1913, DOI: <https://doi.org/10.1002/tqem.22287>.
- JIANG, M.; XU, L.; CHEN, X.; ZHU, H.; FAN, H.: "Soil quality assessment based on a minimum data set: a case study of a county in the typical river delta wetlands", *Sustainability*, 12(21): 9033, 2020, ISSN: 2071-1050, DOI: <https://doi.org/10.3390/su12219033>.
- KHALEQUZZAMAN; ULLAH, H.; HIMANSHU, S.K.; ISLAM, N.-E.-T.; TISARUM, R.; CHA-UM, S.; DATTA, A.: "Seed priming improves germination, yield, and water productivity of cotton under drought stress", *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(2): 2418-2432, 2023, ISSN: 0718-9508, DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01196-5>.
- KHARB, V.; SHARMA, V.; DHALIWAL, S.S.; KALIA, A.: "Influence of iron seed priming on seed germination, growth and iron content in rice seedlings", *Journal of Plant Nutrition*, 46(16): 4054-4062, 2023, ISSN: 0190-4167, DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2220731>.
- KIANI, S.; ESHRAGHI-NEJAD, M.; ESMAEILZADE-MORIDANI, M.; HOSSAIN, M.: "Regression analysis of salinity, hydropriming and their interaction effect on Fennel (*Foeniculum vulgare*) seeds germination", *International Journal of Traditional and Herbal Medicine*, 1(5): 130-135, 2013.
- KUMAR, P.; THAKUR, N.: "Examination of seed germination process and assess phytotoxicity in *Vigna radiata* (Mung bean) and *Allium cepa* (Onion) using triple-doped green hematite nanoparticles and their photocatalytic potential", *Environmental Science and Pollution Research*, : 1-17, 2025, ISSN: 1614-7499, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36735-3>.
- LIU, C.; LI, C.; BING, H.; ZHAO, J.; LI, L.; SUN, P.; LI, T.; DU, D.; ZHAO, J.; WANG, X.: "Integrated physiological, transcriptomic, and metabolomic analysis reveals the mechanism of guvermectin promoting seed germination in direct-seeded rice under chilling stress", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(19): 7348-7358, 2023, ISSN: 0021-8561, DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c00559>.
- MAMANI, G.Q.; DUARTE, M.L.; ALMEIDA, L.S. de; MARTINS FILHO, S.: "Non-parametric survival analysis in seed germination of forest species", *Journal of Seed Science*, 46, 2024, ISSN: 2317-1537, DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-1545v46288345>.
- MARA, M.N.; HIDAYAT, S.S.; PUTRI, F.T.; RAHMAWATI, D.; WAHYUNI, S.; PRABOWO, M.C.A.; KABIR, N.N.S.; INDRA, R.T.: "Overcoming imbalanced rice seed germination classification: Enhancing accuracy for effective seedling identification", *IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI)*, 14(1): 62-72, 2025, ISSN: 2089-4872, DOI: <https://doi.org/10.11591/ijai.v14.i1.pp62-72>.
- MCNAIR, J.N.; SUNKARA, A.; FROBISH, D.: "How to analyse seed germination data using statistical time-to-event analysis: non-parametric and semi-parametric methods", *Seed Science Research*, 22(2): 77-95, 2012, ISSN: 1475-2735, DOI: <https://doi.org/10.1017/S0960258511000547>.
- MESGARAN, M.; MASHHADI, H.; ALIZADEH, H.; HUNT, J.; YOUNG, K.; COUSENS, R.: "Importance of distribution function selection for hydrothermal time models of seed germination", *Weed Research*, 53(2): 89-101, 2013, ISSN: 0043-1737, DOI: <https://doi.org/10.1111/wre.12008>.

- MONDO, V.V.; NASCENTE, A.; NEVES, P. de C.; TAILLEBOIS, J.; OLIVEIRA, F.: "Seed hydropriming in upland rice improves germination and seed vigor and has no effects on crop cycle and grain yield.", 2016, DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.11.PNE70>.
- PEDROSO, R.M.; NETO, D.D.; VICTORIA FILHO, R.; FISCHER, A.J.; AL-KHATIB, K.: "Modeling germination of smallflower umbrella sedge (*Cyperus difformis* L.) seeds from rice fields in California across suboptimal temperatures", *Weed Technology*, 33(5): 733-738, 2019, ISSN: 0890-037X, DOI: <https://doi.org/10.1017/wet.2019.52>.
- PLAŽEK, A.; DUBERT, F.; KOPEĆ, P.; DZIURKA, M.; KALANDYK, A.; PASTUSZAK, J.; WOLKO, B.: "Seed hydropriming and smoke water significantly improve low-temperature germination of *Lupinus angustifolius* L.", *International Journal of Molecular Sciences*, 19(4): 992, 2018, ISSN: 1422-0067, DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms19040992>.
- PUTEH, A.B.; ROSLI, R.; MOHAMAD, R.B.: "Dormancy and cardinal temperatures during seed germination of five weedy rice (*Oryza* spp.) strains", *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, 33(2): 243-250, 2010, ISSN: 1511-3701.
- R CORE TEAM: "R: A language and environment for statistical computing", *R foundation for statistical computing*, Vienna, Austria, 2021.
- RANMEECHAI, N.; LACAP, A.T.; TAC-AN, M.I.A.; BAYOGAN, E.R.V.: "Seed germination and vigor of four Philippine rice varieties as influenced by hydropriming and storage at various durations", *Philippine Journal of Science*, 151(2): 755-765, 2022, ISSN: 0031-7683, DOI: <https://doi.org/10.56899/151.02.18>.
- REN, M.; TAN, B.; XU, J.; YANG, Z.; ZHENG, H.; TANG, Q.; ZHANG, X.; WANG, W.: "Priming methods affected deterioration speed of primed rice seeds by regulating reactive oxygen species accumulation, seed respiration and starch degradation", *Frontiers in Plant Science*, 14: 1267103, 2023, ISSN: 1664-462X, DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1267103>.
- SAIRDAMA, S.S.; MATAKENA, S.: "Factors Affecting Production Rice Farming (*Oryza sativa*. L) in Biha Village Makimi District, Nabire Regency, Indonesia", *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 11(5): 43-50, 2025, ISSN: 2407-795X, DOI: <https://doi.org/10.29303/jppi-pa.v11i5.10884>.
- SALES, E.; VIRUEL, J.; DOMINGO, C.; MARQUÉS, L.: "Genome wide association analysis of cold tolerance at germination in temperate japonica rice (*Oryza sativa* L.) varieties", *PloS one*, 12(8): e0183416, 2017, ISSN: 1932-6203, DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183416>.
- SCOTT, S.; JONES, R.: "Low temperature seed germination of *Lycopersicon* species evaluated by survival analysis", *Euphytica*, 31(3): 869-883, 1982, ISSN: 0014-2336, DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00039227>.
- SCOTT, S.J.; JONES, R.; WILLIAMS, Wa.: "Review of data analysis methods for seed germination 1", *Crop science*, 24(6): 1192-1199, 1984, ISSN: 0011-183X, DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400060043x>.
- SILESHI, G.W.: "A critique of current trends in the statistical analysis of seed germination and viability data", *Seed Science Research*, 22(3): 145-159, 2012, ISSN: 1475-2735, DOI: <https://doi.org/10.1017/S0960258512000025>.
- THERNEAU, T.A.: *Package for Survival Analysis in R. R package version 3.7-0, [en línea]*, 2024, Disponible en: <https://CRAN.R-project.org/package=survival>.
- WATT, M.S.; BLOOMBERG, M.; FINCH, W.E.: "Development of a hydrothermal time model that accurately characterizes how thermoinhibition regulates seed germination", *Plant, Cell & Environment*, 34(5): 870-876, 2011, ISSN: 0140-7791, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02292.x>.
- ZHANG, Z.; XUE, J.; GU, T.; WANG, H.; CHAUHAN, B.S.: "Effect of environmental factors on seed germination and seedling emergence of weedy rice (*Oryza sativa* f. spontanea) in China", *Weed Science*, 72(1): 54-60, 2024, ISSN: 0043-1745, DOI: <https://doi.org/10.1017/wsc.2024.59>.