

Efecto del grado de acidez del suelo (pH) y la temperatura sobre el crecimiento del largo promedio de las raíces de semillas de lechuga *Great Lakes 118*

Manrique Camacho Pochet¹, Amanda Cedeño Guzmán², Iván Daniel Rodríguez Cruz³ y Marie Sofia Villalobos Martínez⁴

¹Escuela de Estadística, MANRIQUE.CAMACHO@ucr.ac.cr

²Escuela de Estadística, AMANDA.CEDENO@ucr.ac.cr

³Escuela de Estadística y Sociología, IVAN.RODRIGUEZCRUZ@ucr.ac.cr

⁴Escuela de Estadística, MARIE.VILLALOBOS@ucr.ac.cr

6 de enero de 2024

Resumen

El crecimiento de las raíces de las semillas de lechuga puede verse afectado por una diversidad de factores, entre ellos la acidez del suelo y las variaciones de temperatura. Por ende, este estudio se enfocó en analizar cómo el pH del suelo influye en la longitud promedio de las raíces de las semillas de la variedad *Great Lakes 118* de lechuga, considerando diferentes niveles de temperatura (frío, ambiente y caliente). El experimento se llevó a cabo en un entorno controlado de laboratorio, utilizando un diseño experimental mixto que combinó niveles de pH (2.90, 6.00 y 10.30), temperatura y un índice de germinación (en una escala de 0 % a 100 %). Se realizaron nueve combinaciones de tratamientos (cada uno con 5 réplicas) y se analizó la interacción entre el pH y las distintas temperaturas en grados Celsius. Se encontraron diferencias significativas pero no relevantes en los contrastes de pH Alcalino – Neutro y Neutro – Ácido en temperaturas ambiente y calientes, respectivamente. Pero, se identificó los mismos argumentos planteados por Laynez Garsaball y Méndez Natera (2013) y Souza Lemos Neto y cols. (2018), al intentar encontrar diferencias relevantes de 3 milímetros en niveles de pH en temperaturas ambiente, dada la fijación del índice de germinación en un 50 %. Además, en temperaturas ambiente sí se logró hallar contrastes significativos (Neutro – Ácido y Alcalino – Ácido) que superaron la diferencia relevante de $\delta = 3$ en mm. Finalmente, es de interés analizar más a fondo el estudio para tener en cuenta las interacciones y peculiaridades del índice de germinación en el crecimiento promedio de las raíces de esta variedad de lechuga.

Palabras clave: Lechuga, longitud de raíz, pH, temperatura, índice de germinación, variedad *Great Lakes 118*

Abstract

The growth of the roots of the lettuce seeds could be altered by a diversity of factors, among them the acidity of the ground and the temperature variations. Therefore, this study focused on analyzing how the effect of the pH affects the mean length of the roots of the lettuce seeds Great Lakes 118, considering different levels of temperature (cold, ambient, and hot). The experiment was carried out in a controlled laboratory environment, using a mixed experimental design that combined pH levels (2.90, 6.00 and 10.30), temperature and a germination rate (in a scale of 0 % to 100 %). Nine combinations of treatments (each with 5 replicas) were performed and the interaction between pH and the different levels of temperature in Celsius. Significant but not relevant differences were found in the contrasts of pH Alkaline – Neutral and Neutral – Acid in ambient and hot temperatures, respectively. It was identified the same arguments proposed by (Layne Garsaball y Méndez Natera, 2013) and (Souza Lemos Neto y cols., 2018), by trying to find a relevant difference of 3 millimeters in the levels of pH in temperatures ambient, given a fixed rate of germination of 50 %. In addition, in ambient temperatures the contrasts (Neutral – Acid and Alkaline – Acid) were found significant and reached the threshold of the relevant difference of $\delta = 3$ mm. Finally, is of interest to analyze more deeply the study to account the interactions and peculiarities of the germination rate in the mean growth of the roots of this variety of lettuce.

Keywords: Lettuce, root length, pH, temperature, germination rate, variety *Great Lakes 118*

Résumé

La croissance des racines des graines de laitue peut être affectée par divers facteurs, dont l'acidité du sol et les variations de température. Par conséquent, cette étude s'est concentrée sur l'analyse de l'influence du pH du sol sur la longueur moyenne des racines des graines de la variété de laitue Great Lakes 118, en tenant compte de différents niveaux de température (froide, ambiante et chaude). L'expérience a été menée dans un environnement de laboratoire contrôlé, en utilisant un plan expérimental mixte qui combinait les niveaux de pH (2,90, 6,00 et 10,30), la température et un indice de germination (sur une échelle de 0 à 100). Neuf combinaisons de traitement (chacune avec 5 répétitions) ont été réalisées et l'interaction entre le pH et les différentes températures en degrés Celsius a été analysée. Des différences significatives mais non pertinentes ont été trouvées dans les contrastes pH alcalin – neutre et neutre – acide à des températures ambiantes et chaudes, respectivement. Cependant, les mêmes arguments soulevés par Layne Garsaball y Méndez Natera (2013) et Souza Lemos Neto y cols. (2018) ont été identifiés, en essayant de trouver des différences pertinentes de 3 millimètres dans les niveaux de pH à des températures ambiantes, étant donné la fixation de l'indice de germination à 50 %. En outre, à température ambiante, des contrastes significatifs (neutre – acide et alcalin – acide) ont été trouvés qui dépassaient la différence pertinente de 3 mm. Enfin, il est intéressant de poursuivre l'analyse de l'étude

pour prendre en compte les interactions et les particularités de l'indice de germination sur la croissance moyenne des racines de cette variété de laitue.

Mots-clés: Laitue, longueur des racines, pH, température, taux de germination, variété *Great Lakes*
118

1. Introducción

El grado de acidez del suelo (pH) se considera uno de los parámetros más influyentes en términos de la fertilidad del suelo. Dicho parámetro indica si este contiene elementos tóxicos que puedan dañar la plantación de lechuga, si existe un adecuado contenido de elementos básicos tales como la disponibilidad de nutrientes esenciales para un crecimiento óptimo, y consecuentemente, si se cuenta o no con las condiciones necesarias para el desarrollo correcto del cultivo de lechuga (Rivera y cols., 2018, p.101) (Osorio, 2012, p.4) (Cremona y Enriquez, 2020, p.2). Controlar los niveles de pH por medio de una medición constante resulta un instrumento eficaz para mejorar y conservar dichas mejoras en la fertilidad del suelo (González-Fernández y cols., 2003, p.377).

El porcentaje de germinación de la lechuga difiere según las condiciones ambientales a las que esté expuesta, y entre ellas destaca la temperatura (Gil y Miranda, 2011, p.13). Cada variedad de especie de lechuga tiene una temperatura mínima, adecuada, y máxima, y sobrepasar estos valores atenta directamente contra su desarrollo, dado que afecta las propiedades del suelo por medio de su grado de meteorización y disminución progresiva de la viabilidad; cuando se incrementa la temperatura, se transforma la permeabilidad de las membranas plasmáticas, lo cual pone en riesgo el porcentaje de germinación (Chaves-Barrantes y Gutiérrez-Soto, 2017) (Forsythe, 2002, p.45). Dicho argumento indica que las variaciones en el comportamiento climático actual son capaces de afectar la tasa de crecimiento de los cultivos de lechuga (Ojeda-Bustamante y cols., 2011), y esto solo significa que en un futuro se podría tener consecuencias graves sobre la calidad y cantidad de los frutos si en la productividad agrícola no se toma en cuenta los cambios de temperie.

El objetivo principal de este ensayo es comprobar si los distintos grados de acidez del suelo (pH) y temperatura (en grados Celsius) afectan de forma significativa el crecimiento promedio de las raíces de las semillas de la variedad de lechuga denominada *Great Lakes 118*. Los resultados obtenidos permitirán comprender mejor la influencia de estos factores – en específico el del pH – en el crecimiento de las semillas de lechuga y a su vez, los hallazgos contribuirán a optimizar las prácticas agrícolas para mejorar la productividad de los cultivos. Esto es idóneo debido a que la optimización de la producción agrícola está cada vez más presente, dada la creciente demanda de alimentos y actuales limitaciones de recursos naturales.

2. Metodología

Para el desarrollo del experimento se utilizó la variedad de semillas de lechuga *Great Lakes 118* que, por sus características morfológicas, es un tipo de lechuga que tiene un tiempo de germinación muy rápido, entre las 24 a 48 horas. La variable respuesta considerada para el experimento fue la **longitud promedio de las raíces de las semillas de lechuga de la variedad Great Lakes 118** con un porcentaje de germinación en bolsa del 98 %, según cálculos del Laboratorio de Semillas del CIGRAS (véase el Anexo 6). Dicha respuesta se midió con una regla convencional y todos los tratamientos estuvieron un total de 48 horas (dos días) en cada una de las cámaras de germinación a niveles de temperatura constante.

Por otro lado, la hipótesis de investigación que se evaluó durante el análisis estadístico fue determinar la influencia del grado de acidez del suelo (pH) en la longitud promedio de las raíces de las semillas de la variedad de lechuga *Great Lakes 118*, considerando diferentes grados de temperatura (Frío, Ambiente y Caliente). En este caso, se considera una diferencia relevante de 3 mm ($\delta = 3$) al momento de comparar las longitudes promedios de las raíces de las semillas del tipo de lechuga *Lactuca sativa* que estuvo en observación en cada combinación de tratamiento.

Asimismo, se trabajó con un factor de diseño ligado al grado de acidez del suelo (pH) y un factor de control asociado a los grados de temperatura (en grados Celsius), cada factor con tres niveles respectivamente. Por lo tanto, se efectuaron nueve combinaciones de tratamientos con cinco repeticiones cada una, para un total de 45 réplicas (experimento balanceado). La siguiente tabla resume esto dicho:

Factores		Combinación de tratamiento	Número de repeticiones
pH	Temperatura		
Ácido	Frío	2.90 pH – 15°C	5
Neutro	Frío	6.00 pH – 15°C	5
Alcalino	Frío	10.30 pH – 15°C	5
Ácido	Ambiente	2.90 pH – 25°C	5
Neutro	Ambiente	6.00 pH – 25°C	5
Alcalino	Ambiente	10.30 pH – 25°C	5
Ácido	Caliente	2.90 pH – 30°C	5
Neutro	Caliente	6.00 pH – 30°C	5
Alcalino	Caliente	10.30 pH – 30°C	5

Tabla 1: Combinación de tratamientos con su respectiva cantidad de repeticiones.

De igual manera, cada una de estas combinaciones estuvieron debidamente tratadas en tres diferentes cámaras de germinación según el grado de temperatura, y para las soluciones del pH se generaron con los siguientes compuestos químicos:

Tipo de solución	Compuesto	Grado de pH	Observaciones
Ácida	Ácido cítrico	≈ 2,90	Se estabilizó con Hidróxido de potasio (KOH)
Neutra	Agua destilada	≈ 6,00	
Alcalina	Bicarbonato de sodio	≈ 10,30	

Tabla 2: Niveles de pH de las tres soluciones.¹

Además, se tuvo que medir una covariable asociada al índice de germinación de las semillas en las Placas de Preti debido a que, por la naturaleza de las semillas, hubo ciertos platos donde germinaron la

¹Todas las soluciones fueron creadas con base de agua destilada. Además, el nivel de pH se midió con Peachímetro calibrado.

totalidad de ellas (10 semillas) y en otros donde hubo variaciones desde 1 a 9 semillas germinadas. El índice de germinación se expresa de la siguiente forma:

$$\text{Ind}_{\text{germinación}} = \frac{\text{Número de semillas germinadas por Placa de Petri}}{\text{Número total de semillas por Placa de Preti}} \times 100 \quad (1)$$

Por otro lado, el modelo experimental mixto que se desarrolló tuvo la siguiente expresión lineal:

$$\mu_{ij,X_1} = \beta_0 + \gamma_i + \tau_j + \beta_1 X_1 + (\gamma\tau)_{ij} + \gamma_i^{(1)} X_1 + \tau_j^{(1)} X_1 \quad (2)$$

donde,

1. β_0 : intercepto.
2. γ_i : efecto del grado de acidez del suelo (pH), $i = 1, 2, 3$.²
3. τ_j : efecto de los grados de temperatura (grados Celsius), $j = 1, 2, 3$.³
4. X_1 : covariable asociada al índice de germinación.
5. $(\gamma\tau)_{ij}$: efecto de interacción entre el pH y la temperatura.
6. $\gamma_i^{(1)} X_1$: interacción entre el pH (i) y el índice de germinación (X_1).
7. $\tau_j^{(1)} X_1$: interacción entre la temperatura (j) y el índice de germinación (X_1).

También, se tomó en cuenta un análisis descriptivo y gráfico para comprender cómo se comportó la variabilidad entre cada combinación de tratamiento (figura 1). De igual modo, se verificó la asociación lineal entre respuesta – covariable, y en cada una de las combinaciones de tratamientos que ejerce la covariable sobre la reducción del *CMRes* del experimento.⁴ Además, se examinó el cumplimiento de los supuestos de normalidad de los residuos y de homocedasticidad de los datos, con el fin de poder llegar a realizar inferencias y conclusiones válidas.

Por otro lado, con el modelo ajustado en cuestión (ecuación 2) se analizó la hipótesis para verificar si existe interacción entre el grado de acidez del suelo y la temperatura. Es decir, se contrastó la siguiente hipótesis:

$$H_0 : (\gamma\tau)_{ij} = 0 \quad H_1 : (\gamma\tau)_{ij} \neq 0 \quad (3)$$

donde γ_i es el efecto del grado de acidez del suelo y τ_j el efecto asociado a los grados del factor de temperatura.

Este contraste contenido en la ecuación 3 quiere decir que el efecto que tienen los tres grados de acidez del suelo (pH) sobre la longitud promedio de las raíces de las semillas de lechuga *Great Lakes 118*

²Para este factor $i = 1$ es pH ácido, $i = 2$ pH neutro e $i = 3$ pH alcalino.

³El subíndice $j = 1$ es para temperatura fría, $j = 2$ temperatura ambiente y $j = 3$ temperatura caliente.

⁴Véase la figura 5.

son iguales entre los tres grados de temperatura que se van a utilizar en el experimento. Es importante tener claro que para todas las pruebas de hipótesis se usó una significancia de un 5 %, un valor común entre las investigaciones que se computan en el campo de la agronomía (Shrestha, 2019).

Por otra parte, dado el modelo ajustado se comprobaron aquellos pares (con corrección de Bonferroni) de contrastes que resultaron ser significativos y por ende, se les calculó una cota inferior con el objetivo de determinar la relevancia de estas diferencias. Se examinó si las variaciones en las cotas de pH eran al menos de 3 mm, según el dato de la diferencia relevante propuesto.

También, se tuvo en cuenta el cálculo de la potencia de la prueba del experimento por medio de una simulación donde este resultado $(1 - \beta)$ indica la probabilidad máxima de encontrar diferencias de 3 mm entre los tres niveles de temperatura (factor fijado), en caso que existieran. La lógica de esta simulación se basó en probar la potencia de la prueba ANDEVA para la interacción de pH y Temperatura mediante la creación de datos con una diferencia relevante entre los promedio de $(\delta = 3)$, es decir que se establecieron los promedios poblacionales hipotéticos para que se tuviera en cuenta dicha diferencia relevante. Además, se utilizó el Cuadrado Medio Residual como la varianza dentro de cada tratamiento y la covariable se generó ajustando un modelo de la siguiente manera:

$$X = rZ + \varepsilon \quad (4)$$

donde r es la correlación del modelo 0,3135, Z es la matriz de los promedios por tratamiento generados durante la simulación y ε es una variable aleatoria que se distribuye normal con parámetros $\mu = 0$ y $\sigma^2 = 1 - r^2$; es decir que $\varepsilon \sim \mathcal{N}(\mu = 0, \sigma^2 = 1 - r^2)$.

Seguidamente, se generaron las nueve combinaciones de tratamientos. Esta simulación se hizo con 10,000 repeticiones y se asignó un 1 cuando la prueba Análisis de Varianza (ANDEVA) lograba rechazar la hipótesis nula. Por el otro lado, se le asignó un 0 si no se lograba rechazar la hipótesis contrastada. Posteriormente, a este cálculo se le calcula la proporción de veces que se rechazó correctamente la hipótesis nula para obtener de esta manera la potencia de la prueba.

Finalmente, para el análisis de los datos se utilizó el software estadístico R en su versión 4.3.1 y se contó con el apoyo del agrónomo Marcelo Murillo Quesada del Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS) del Laboratorio de Semillas de la Universidad de Costa Rica, para la ejecución y asistencia técnica del trabajo.

3. Resultados

En la primera etapa del análisis, se realizó una investigación descriptiva que reveló que las combinaciones de tratamientos a una temperatura ambiente de 25°C mostraron una sobre-estimación en comparación con la media general de la respuesta (4.1789). Por otro lado, las combinaciones de temperaturas frías y calientes tendieron a subestimar el valor promedio de la respuesta (deterioro y ralentización del proceso de germinación) (Souza Lemos Neto y cols., 2018, p.678). En la figura 1 se puede notar como la combinación de temperatura ambiente y un grado de acidez alcalino tuvo un mayor promedio del tamaño de la longitud promedio de las semillas.

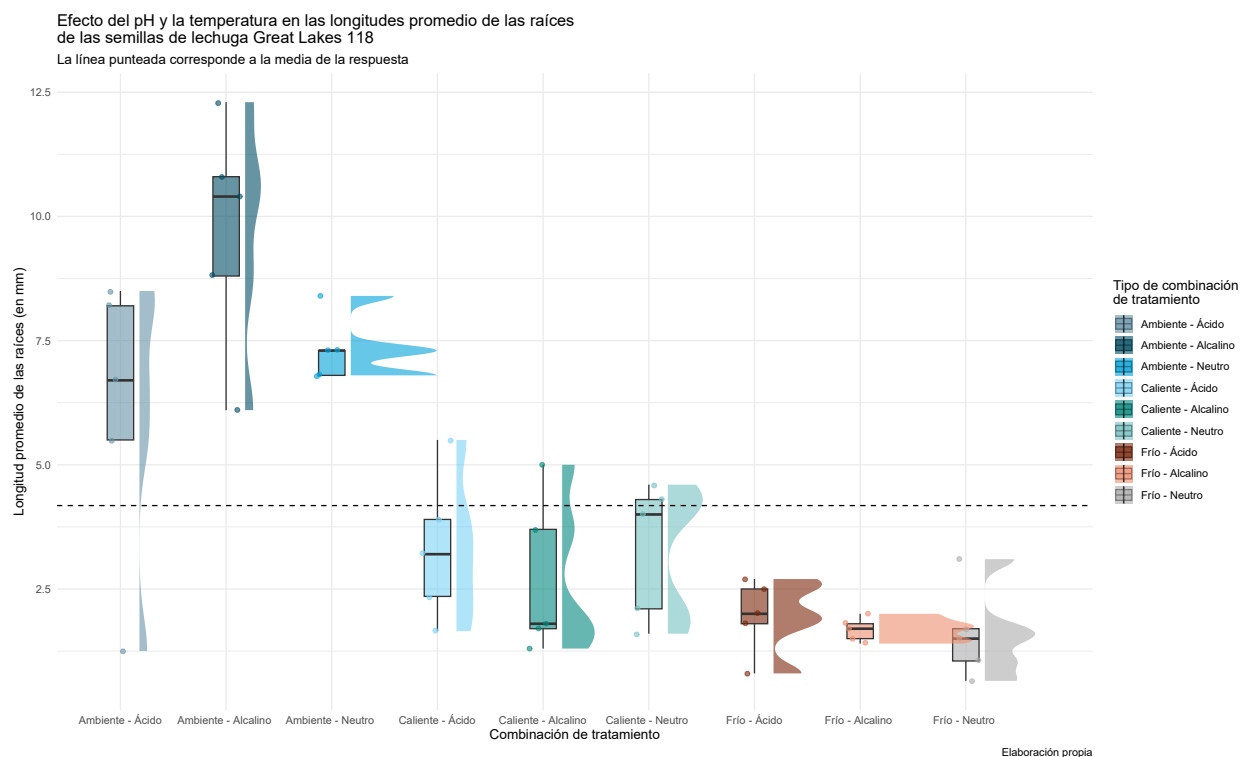


Figura 1: Variabilidad presente en cada combinación de tratamiento.

Se comprobó que la germinación a temperatura ambiente (principalmente en pH alcalino) resultó en raíces de semillas más largas, mientras que en temperaturas frías, la escarificación fue más influyente para obtener raíces más cortas (Portuguez-García y cols., 2020). En la figura 2 – y también en la figura 7 del Anexo 2 – se muestra un bosquejo de cómo fue el proceso de germinación para cada combinación de tratamiento:

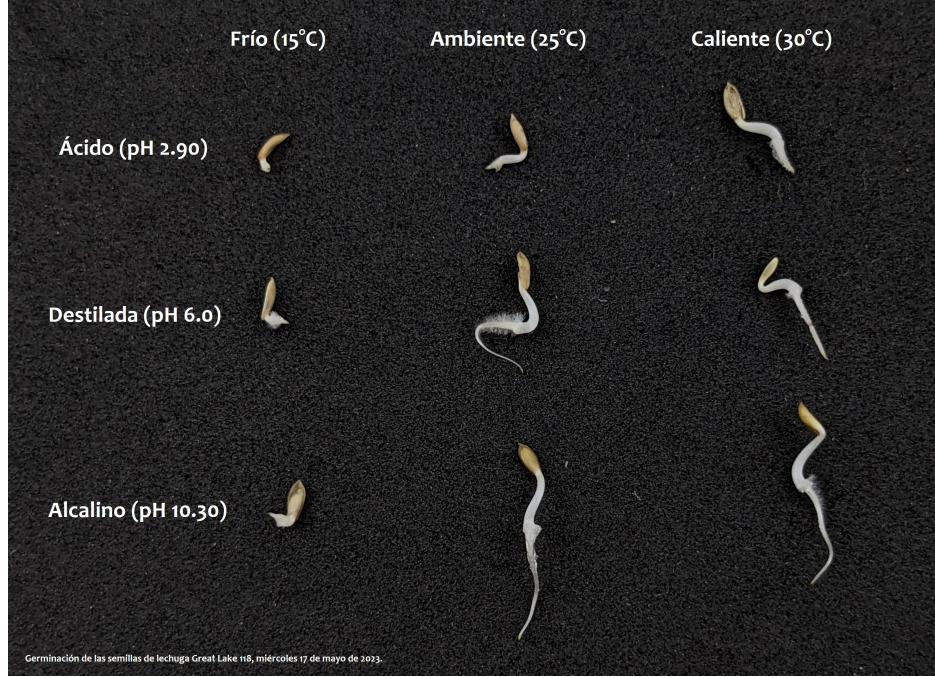


Figura 2: Proceso de germinación según grado de pH y temperatura.

Asimismo, se llegó a tener el siguiente modelo ajustado donde la interacción entre el factor de pH y el índice de germinación presente en la ecuación 2 no se tomó en cuenta por no ser significativo en el Análisis de Varianza.⁵ Entonces, la ecuación lineal del modelo experimental ajustado es la siguiente:

$$\mu_{ij,X_1} = \beta_0 + \gamma_i + \tau_j + \beta_1 X_1 + (\gamma\tau)_{ij} + \tau_j^{(1)} X_1 \quad (5)$$

donde,

1. β_0 : intercepto.
2. γ_i : efecto del grado de acidez del suelo (pH), $i = 1, 2, 3$.⁶
3. τ_j : efecto de los grados de temperatura (grados Celsius), $j = 1, 2, 3$.⁷
4. X_1 : covariable asociada al índice de germinación.
5. $(\gamma\tau)_{ij}$: efecto de interacción entre el pH y la temperatura.
6. $\tau_j^{(1)} X_1$: interacción entre la temperatura (j) y el índice de germinación (X_1).

⁵Tenga en cuenta que la probabilidad asociada a esta interacción fue de: $\gamma_i^{(1)} X_1 = 0,89799$.

⁶Para este factor $i = 1$ es pH ácido, $i = 2$ pH nuestro e $i = 3$ pH alcalino.

⁷El subíndice $j = 1$ es para temperatura fría, $j = 2$ temperatura ambiente y $j = 3$ temperatura caliente.

Por otro lado, al momento de ajustar el modelo experimental mixto (ecuación 5) se logró comprobar la presencia de normalidad de los residuos y homocedasticidad de las varianzas (se mantienen constantes); estos resultados están contenidos en la siguiente tabla resumen:

Supuesto	Prueba	p-value
Normalidad	Shapiro-Wilks	0.981
Homocedasticidad	Breusch-Pagan	0.115

Tabla 3: Pruebas de normalidad y homocedasticidad del modelo experimental mixto.

Asimismo, los siguientes dos gráficos (3a y 3b) respaldan el análisis numérico de las pruebas formales presentadas en la tabla anterior para evaluar los supuestos de un modelo lineal:

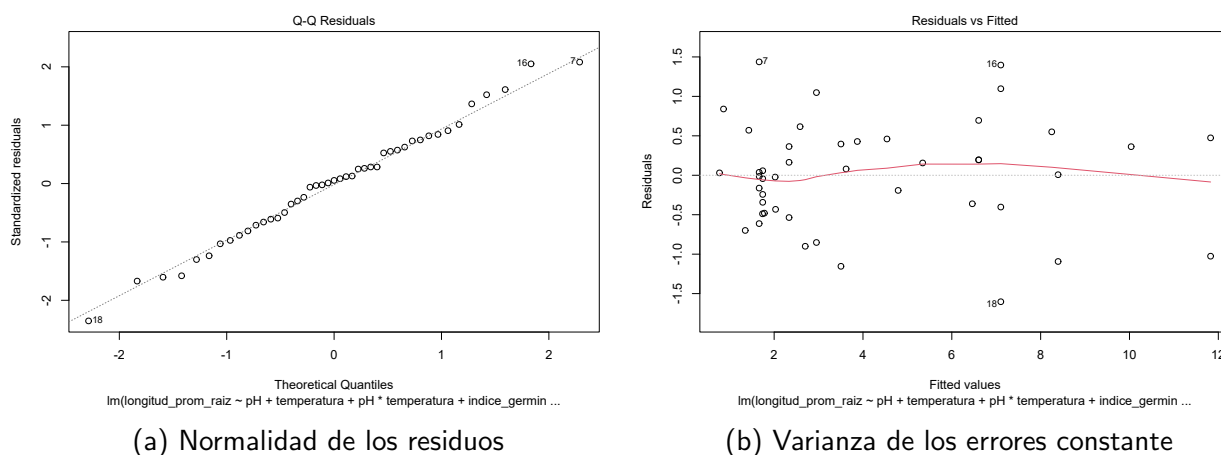


Figura 3: Análisis gráfico de los supuesto de normalidad de los residuos y homocedasticidad del modelo experimental.

En consecuencia, y una vez habiendo comprobado los supuestos del modelo. En el Análisis de Varianza (ANDEVA) se logró comprobar que **sí existe un efecto de interacción entre el nivel del pH y la temperatura sobre la respuesta** (se obtuvo un $p < 0,000014$). Es decir, bajo este escenario no se va a analizar por separado el efecto del pH y de la temperatura sobre la respuesta, debido a que el coeficiente del efecto de interacción surgió significativo $(\gamma\tau)_{ij} < 0,05$. Además, se comprobó que el efecto de interacción entre el pH y el índice de germinación $(\gamma_i^{(1)} X_1)$ no fue significativo; por ende, se omitió del modelo propuesto.

	<i>Gl</i>	<i>SC</i>	<i>CM</i>	<i>F</i>	$Pr(> F)^8$
pH	2	6.522	3.261	5.456	0.009*
Temperatura	2	289.283	144.642	242.014	0.000*
Índice de germinación	1	37.345	37.345	62.485	0.000*
pH:temperatura	4	43.994	10.998	18.403	0.000*
Temperatura:índice de germinación	2	18.956	9.478	15.858	0.000*
Residuales	33	19.723	0.598		

Tabla 4: Análisis de varianza del modelo experimental.

En la figura 4 se observa que la diferencia entre los niveles de pH ácidos y alcalinos es mayor en temperaturas ambiente en comparación con niveles de pH neutros. Estos resultados proporcionan un indicio de la presencia de un efecto de interacción entre el pH y la temperatura, como se evidenció en la prueba formal del ANDEVA.

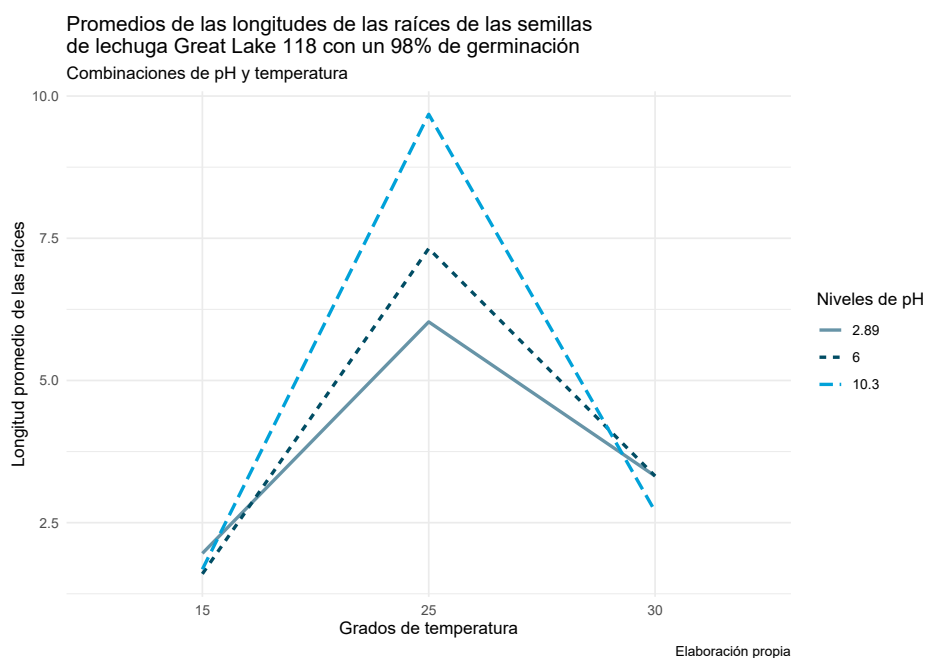


Figura 4: Análisis de interacción.

Igualmente, al agregar la covariable se obtuvo una reducción de la varianza a comparación con no considerarla. Específicamente, el Cuadrado Medio Residual ($CMRes$) – medida de resumen de la variabilidad dentro de las combinaciones de tratamientos – disminuyó de 2.517 a 0.598, lo que representa una reducción de más de 1.92 unidades en la variabilidad residual. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

⁸Los (*) significan que la probabilidad asociada fue menor a 0.05.

	Sin la covariable	Con la covariable	Reducción
CMRes	2.517	0.598	1.92

Tabla 5: Varianza residual del modelo experimental.

Al considerar el índice de germinación, se observó una correlación moderada y positiva entre la respuesta y dicho índice (0.3135 según el coeficiente de Pearson). Además, en la figura 5, se observa que las correlaciones lineales entre la respuesta y el índice de germinación para cada combinación de tratamientos de pH y temperatura son en su mayoría fuertes y positivas. Sin embargo, se destaca una excepción en el tratamiento con temperatura de 15°C y un pH alcalino, donde la correlación es fuerte y negativa. Al considerar la covariable en el modelo, se reduce la variabilidad residual al tener en cuenta la relación entre la medición del índice de germinación y el tipo de variable de respuesta en el experimento (Martirena-Ramírez y cols., 2019, p.231).

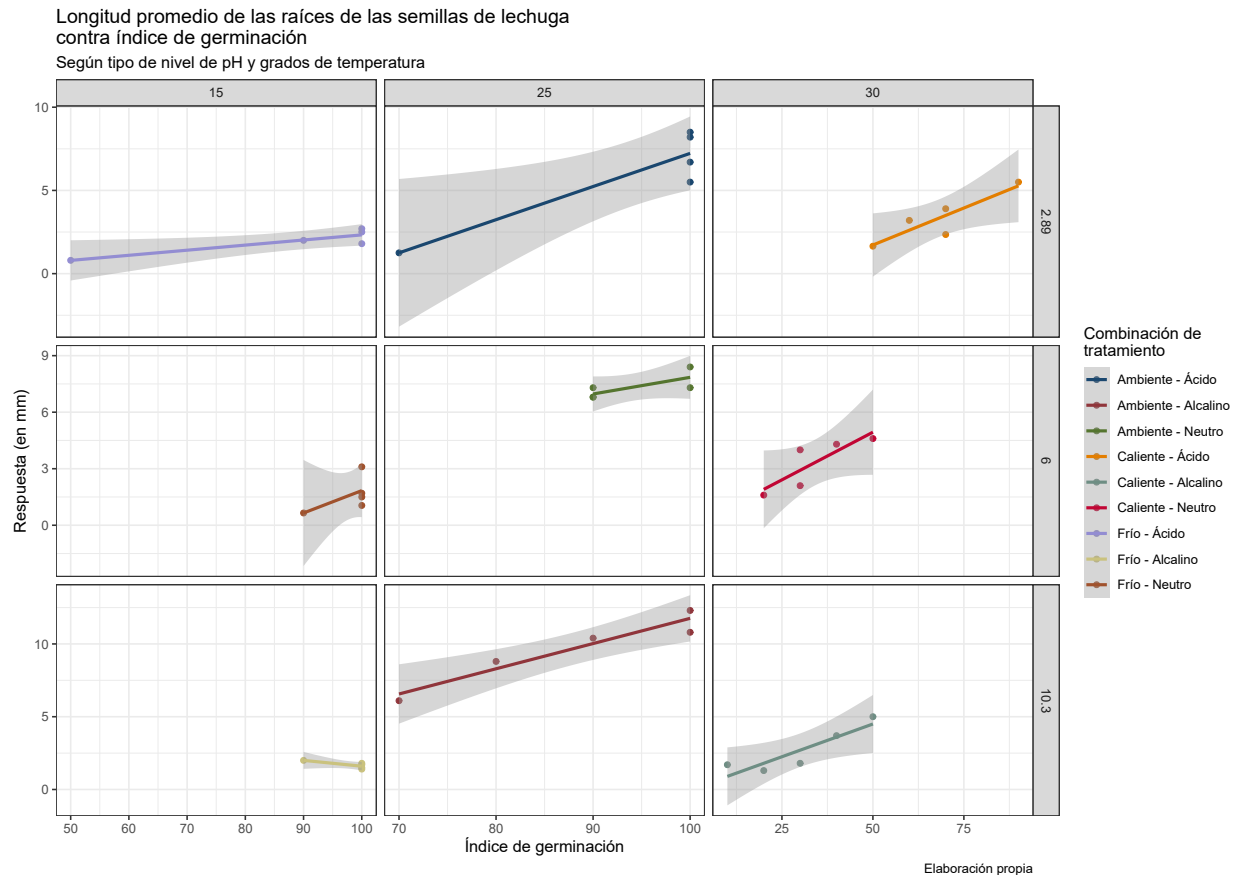


Figura 5: Variabilidad de la respuesta tomando en cuenta la covariable contra cada tipo de tratamiento.

En una segunda etapa, al observar la presencia de un efecto de interacción entre el grado de acidez del suelo y la temperatura $(\gamma\tau)_{ij}$, se llevaron a cabo comparaciones múltiples (por pares). Se estableció

previamente un valor de 50 para el índice de germinación y las comparaciones se fijaron con respecto a la temperatura (dado que el pH es el factor de diseño). Además, se aplicó la corrección de Bonferroni debido a la falta de ortogonalidad de los vectores contrastados, con el fin de identificar los tratamientos que mostraron diferencias relevantes; el nivel de significancia con esta corrección fue de $\alpha \approx 0,01667$ en vez de un $\alpha = 0,05$.

Además, se evaluó la potencia del experimento por medio de una simulación para determinar la probabilidad de detectar diferencias significativas entre los grados de temperatura y los tres grados de acidez del suelo. Los resultados revelaron una potencia superior al 99 % (específicamente una potencia del efecto de interacción del pH y la temperatura de 99,67 %), lo cual indica que se contaba con un número suficiente de repeticiones para detectar diferencias relevantes de 3 mm ($\delta = 3$) si estas realmente existieran.⁹ Si se quiere tener una potencia mayor a 99,67 % basta con agregar una repetición más por tratamiento, es decir se llegaría a una potencia de 99,994 %.

La siguiente tabla 6 posee aquellas comparaciones junto a su probabilidad asociada y al valor de la cota inferior (límite inferior) que posteriormente fue contrastado con la diferencia relevante que se estableció al inicio de la investigación.

Contraste (pH)	Grados de temperatura					
	Frío 15°C		Ambiente 25°C		Caliente 30°C	
	p-value	Cota Inferior	p-value	Cota Inferior	p-value	Cota Inferior
Neutro – Ácido	0.899		0.000	3.541	0.000	1.423
Alcalino – Ácido	0.870		0.000	3.541	0.694	
Alcalino – Neutro	0.436		0.000	2.251	0.694	

Tabla 6: Contrastes de los grados de acidez del suelo dentro de cada nivel de temperatura y la cota inferior para los contrastes significativos.

Dado los resultados contenidos en la tabla 6 se concluye que, con un 95 % confianza global, la longitud promedio de la raíz de las semillas de la variedad de lechuga *Great Lakes 118* para una temperatura de 25°C es al menos 3.541 mm mayor con el grado de pH neutro que con un grado de acidez del suelo ácido. Asimismo, la diferencia entre la respuesta del contraste de pH alcalino contra pH ácido en temperaturas ambiente es idéntico que el contraste anterior. En consecuencia, para estos dos contrastes analizados sí se logró observar que existe una diferencia relevante, puesto que excede de lo planteado por el experto ($\delta = 3$) en mm.

Por otra parte, en temperaturas ambiente el contraste en grados de acidez del suelo alcalino aventaja al pH neutro en al menos 2.251 mm. Empero, fue un contraste significativo que no logró superar el valor de la diferencia relevante de 3 milímetros.

⁹Véase la figura 8 en el Anexo 4 dónde se muestra un gráfico que reúne la simulación del cálculo de la potencia del experimento con distintos valores de n . En ese gráfico se encuentra dicho valor mencionado en este estudio y con el cuál se trabajó.

Finalmente, para el escenario donde se tiene una temperatura caliente de $30^{\circ}C$ el contraste entre un pH neutro contra pH ácido fue de igual forma significativo, mas no sobrepasa el valor de la diferencia mínima relevante establecida desde un inicio; es decir no se llegó a concluir que es una diferencia relevante.

4. Conclusiones y discusión

En este estudio, se investigó el efecto del pH del suelo y la temperatura en el crecimiento promedio de las raíces de las semillas de lechuga *Great Lakes 118*. Los resultados respaldaron los argumentos planteados por Rodríguez Romero y cols. (2014) y Martirena-Ramírez y cols. (2019) sobre la relevancia de utilizar un índice que proporcione información sobre el proceso de germinación de las variedades de semillas de lechuga. Al trabajar con la variedad *Great Lakes 118*, se encontró una alta relación entre el índice de germinación y la respuesta estudiada, lo que permitió obtener beneficios al ajustar el modelo de análisis, principalmente en una drástica reducción de la variabilidad residual. Esto último, Dufour y cols. (1998) también apoya que es positivo para poder tener presencia del supuesto de homocedasticidad de los datos y en la normalidad de los residuos.

Es importante considerar que en el análisis de las comparaciones múltiples, no se tuvo en cuenta el factor del índice de germinación ni su interacción con la temperatura. En su lugar, se fijó en un valor arbitrario dentro del rango observado en el estudio, en concreto en un $\text{Ind}_{\text{germinación}} = 50\%$; esto debido a las limitaciones de los objetivos del curso. Una recomendación para futuros estudios sería realizar un análisis más exhaustivo que incluya estas omisiones y se logre un estudio más sustancial y completo.

Dada esta aclaración, entonces los descubrimientos resultantes de la investigación resaltan que a una temperatura ambiente de 25°C , se observó que la longitud promedio de las raíces de las semillas de lechuga *Great Lakes 118* fue al menos 3.541 mm mayor en suelos con pH neutro en comparación con suelos ácidos. De la misma manera se reflejó que, en dicha temperatura, la longitud promedio de la raíz de lechuga fue al menos 3.541 mm mayor en un suelo con pH alcalino que con un pH ácido. Esto indica una diferencia significativa y relevante en el crecimiento de las raíces bajo estas condiciones.

Igualmente, los resultados indicaron que, en temperaturas ambiente, los suelos alcalinos promovieron un crecimiento de raíces aproximadamente 2.251 mm mayor en comparación con los suelos de pH neutro. Aunque esta diferencia fue estadísticamente significativa, no superó el umbral de relevancia de 3 mm establecido por el experto. Del mismo modo, en el escenario de temperatura caliente (30°C), se observó un contraste significativo entre los suelos alcalinos y neutros en el crecimiento de las raíces, pero tampoco superó el umbral mínimo relevante establecido desde el inicio del estudio. Estos hallazgos subrayan la importancia del pH del suelo y la temperatura en el crecimiento de las raíces de la lechuga *Great Lakes 118*, pero sugieren que las diferencias encontradas pueden no tener un impacto significativo desde una perspectiva práctica.

Una discusión relevante surge al considerar las figuras 2 y 4, las cuales muestran el efecto de interacción entre el pH y la temperatura $((\gamma\tau)_{ij})$. Se esperaban diferencias significativas en temperaturas ambiente (a 25°C), y en efecto se lograron encontrar diferencias en este aspecto. Mientras que en temperaturas más extremas (frío y caliente) no se encontraron diferencias (a excepción de la mencionada más atrás).

En consecuencia, esta situación respalda lo que afirman y demuestran Laynez Garsaball y Méndez Na-

tera (2013) sobre el hecho de que, para muchas especies de lechuga y otras especies, la germinación en los niveles de pH neutros, aproximadamente entre 6 y 7.5: «son considerados los ideales para la germinación de la mayoría de las especies» (p.232).

En síntesis, este estudio proporcionó una aproximación del impacto del grado de acidez del suelo (pH) y la temperatura en el crecimiento promedio de las longitudes de las raíces de las semillas de lechuga de la variedad *Great Lakes 118* Rivera y cols. (2018). Para una comprensión más completa del complejo proceso de germinación en especies comestibles como las lechugas, futuras investigaciones pueden barajar la incorporación de más niveles en cada factor, así como la inclusión de otros factores como fitoreguladores, hormonas y diferentes variedades de especies de lechuga Gil y Miranda (2011); Alcantara-Cortes y cols. (2019). Estos estudios adicionales ofrecerán una visión más precisa y detallada de los factores que influyen en el desarrollo del crecimiento de las raíces de las lechugas y otras especies similares.

Agradecimientos

Agradecemos al agrónomo Marcelo Murillo Quesada del Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS) por su valiosa contribución en la realización del experimento en las instalaciones del Laboratorio de Semillas, y su profundo conocimiento técnico fueron fundamentales para el éxito de este proyecto.

Citar este artículo

Rodríguez Cruz, I. D., Camacho Pochet, M., Cedeño Guzmán, A. y Villabos Martínez, M. S. (2023). *Efecto del grado de acidez del suelo (pH) y la temperatura sobre el crecimiento del largo promedio de las raíces de semillas de lechuga Great Lakes 118* [manuscrito no publicado]. Universidad de Costa Rica.

5. Anexos

Anexo 1

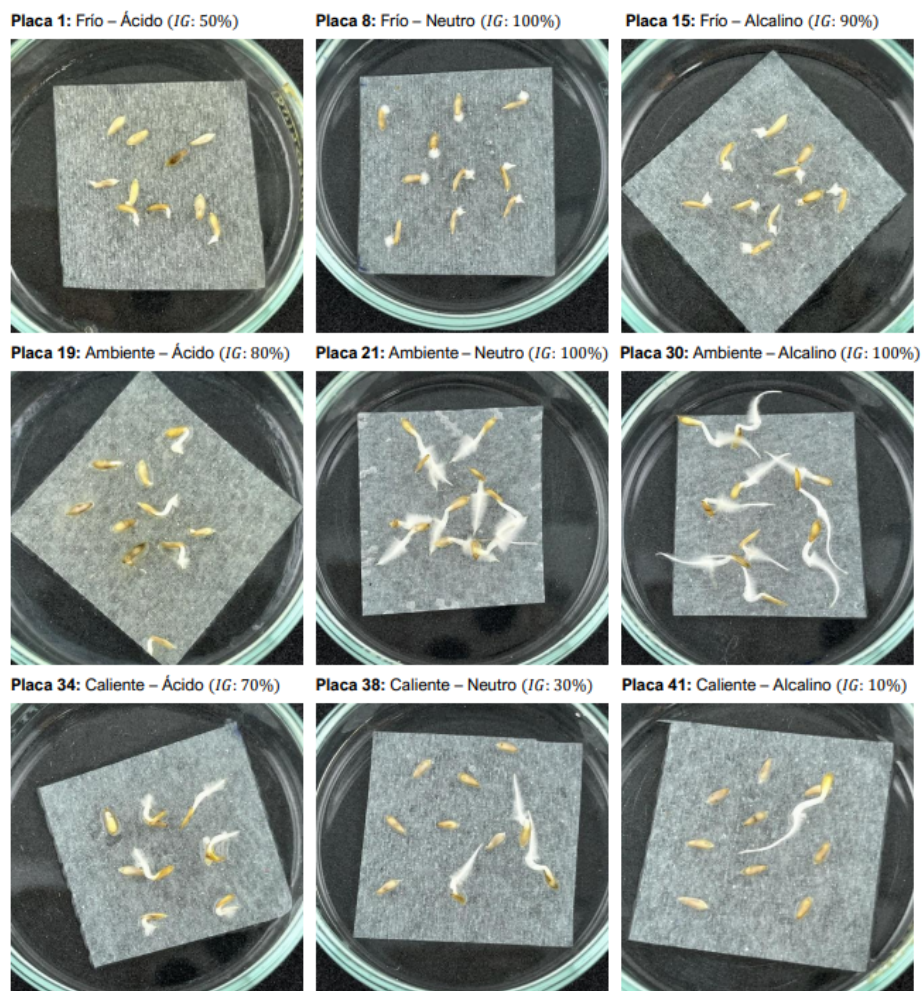


Figura 6: Semillas de lechuga *Great Lakes 118*.

5.1. Anexo 2

En esta figura 7 se muestra un bosquejo de los resultados por cada tipo de combinación de tratamiento una vez finalizado el Experimento. En este caso se tomaron aleatoriamente una Placas de Petri de cada una de las nueve combinaciones de tratamiento, y se adjuntó el respectivo valor del índice de germinación para ese caso en específico.

Germinación (en Placa de Petri) de las semillas de lechuga *Great Lake 118* según los nueve tipos de combinación de tratamientos.



Nota. Las fotografías fueron tomadas el miércoles 17 de mayo de 2023 a las 14:00 horas en el Laboratorio de Semillas del CIGRAS en la Universidad de Costa Rica. Ese día se concluyó el proceso de germinación en las tres cámaras de germinación (según el nivel de temperatura constante por 2 días). Además, el valor de IG representa el porcentaje de germinación de las semillas de lechuga por Placa de Petri, y las combinaciones están dadas en temperatura – pH.

Figura 7: Germinación de las semillas para cada uno de las combinaciones de tratamiento

5.2. Anexo 3

En el siguiente enlace se encuentra la base de datos, la matriz de estructura, el *script* de R donde se ejecutó el análisis estadístico de este experimento y el *script* de la simulación de la potencia de la prueba: <https://drive.google.com/drive/folders/1ux-MDzaowYiP7Qn8gpuwfxMCMKQbmIkz?usp=sharing>

5.3. Anexo 4

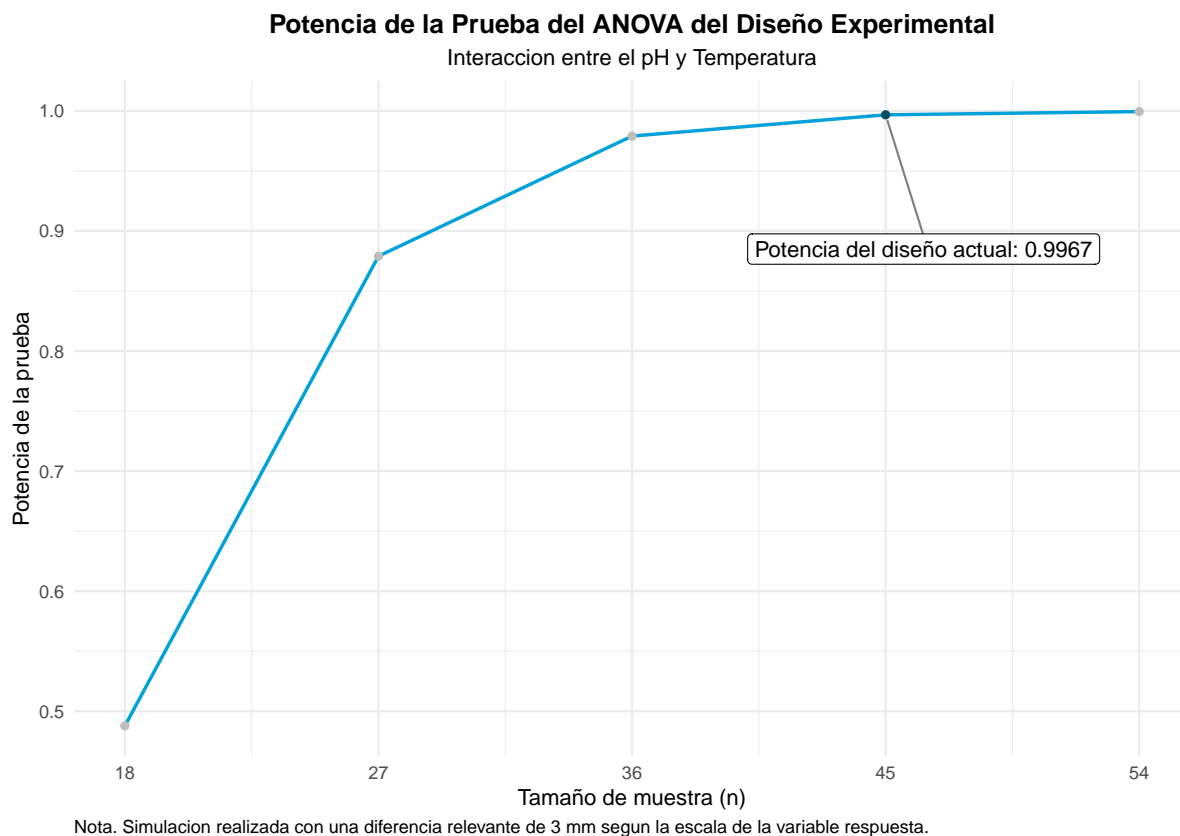


Figura 8: Potencia de la prueba para distintos valores de tamaño de muestra.

Referencias

- Alcantara-Cortes, J. S., Acero Godoy, J., Alcántara Cortés, J. D., y Sánchez Mora, R. M. (2019). Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal. *Nova*, 17(32), 109-129. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-24702019000200109&lng=en.
- Chaves-Barrantes, N. F., y Gutiérrez-Soto, M. V. (2017). Respuestas al estrés por calor en los cultivos. ii. tolerancia y tratamiento agronómico. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 255-271. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-13212017000100021.
- Cremona, M. V., y Enriquez, A. S. (2020). *Algunas propiedades del suelo que condicionan su comportamiento: El ph y la conductividad eléctrica* (Inf. Téc.). EEA Bariloche.
- Dufour, J., Farhat, A., Gardiol, L., y Khalaf, L. (1998). Simulation-based Finite Sample Normality Tests in Linear Regressions. *The econometrics journal*, 1(1), 154-173. <https://doi.org/10.1111/1368-423X.11009>.
- Forsythe, W. (2002). Parámetros ambientales que afectan la temperatura del suelo en turrialba, costa rica y sus consecuencias para la producción de cultivos. *Agronomía Costarricense*, 26(1), 42-61.
- Gil, A. I., y Miranda, D. (2011). Efecto de la temperatura, inmersión en agua y concentración de fitorreguladores sobre la germinación de semillas de papaya (Carica papaya L.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 2(1), 9-20. https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias_hortícolas/article/view/1169.
- González-Fernández, P., Ordóñez-Fernández, R., Espejo-Serrano, R., y Peregrini-Alonso, F. (2003). Cambios en el ph del perfil de un suelo ácido cultivado y enmendado con diversos materiales para incrementar su fertilidad. *Estudios de la zona no saturada del suelo*, 6, 373-378. https://abe.ufl.edu/Faculty/carpena/files/pdf/zona_no_saturada/estudios_de_la_zona_v6/p373-378.pdf.
- Layne Garsaball, J. A., y Méndez Natera, J. R. (2013). Efectos alelopáticos de extractos acuosos de hojas de botón de oro [tithonia diversifolia(hemsl.) a. gray.] sobre la germinación de semillas y crecimiento de plántulas de lechuga (lactuca sativa l.). *Scientia Agropecuaria*, 4, 229-241. <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop/article/view/336/316>.
- Martirena-Ramírez, A., Veitía, N., Torres, D., Rivero, L., García, L., Collado, R., y Ramírez-López, M. (2019). Longitud de la raíz: indicador morfológico de la respuesta al estrés hídrico en

- Phaseolus vulgaris L. en casa de cultivo. *Biot. Veg.*, 19(3), 225-233. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2074-86472019000300225.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Íñiguez-Covarrubias, M., y Montero-Martínez, M. J. (2011). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*, 45(1), 1-11. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952011000100001.
- Osorio, N. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4), 1-4. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/1829>.
- Portuguez-García, M. P., Rodríguez-Ruiz, A. M., Porras-Martínez, C., y González-Lutz, M. I. (2020). Efecto de la temperatura y la escarificación sobre la germinación de *Ischaemum rugosum* Salisb. *Agronomía Mesoamericana*, 31(2), 4991-498. <https://www.redalyc.org/journal/437/43762994015/html/>.
- Rivera, E., Sánchez, M., y Domínguez, H. (2018). pH como factor de crecimiento en plantas. *Revista de Iniciación Científica*, 4(2), 101-105. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/1829>.
- Rodríguez Romero, A. J., Robles Salazar, C. A., Ruíz Picos, R. A., López López, E., Sedeño Díaz, J. E., y Rodríguez Dorantes, A. (2014). Índices de germinación y elongación radical de *Lactuca sativa* en el biomonitorio de la calidad del agua del río Chalma. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 30(3), 307-316. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000300007&lng=es&tlng=es.
- Shrestha, J. (2019, 10). P-value: a true test of significance in agricultural research. doi: 10.5281/zenodo.4030711
- Souza Lemos Neto, H., Almeida-Guimarães, M., Do Nascimento-Silva, B., Dos Santos-Viana, C., y Medeiros-Filho, S. (2018). Germinación y emergencia de lechuga a temperaturas elevadas. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(3), 677-684. <https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i3.7720>.