

*Artículo científico***Bioestimulación con gel de *Aloe vera* L. para mejorar el crecimiento del sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) en Entisoles**Joxual Josué Araque-Pérez<sup>1</sup>Autor para correspondencia. Correo electrónico: [202490165@fausac.gt](mailto:202490165@fausac.gt)

Universidad de San Carlos, Unidad de vinculación y gestión de recursos (UVIGER), Facultad de Agronomía, Ciudad de Guatemala, Guatemala.

DOI: <https://doi.org/10.15517/jf7vyb11>

Recibido el 13 de diciembre del 2024; Aceptado el 15 de mayo del 2025

**Resumen**

**Introducción.** El gel de sábila (*Aloe vera* L.) es conocido por sus propiedades bioactivas, como fitohormonas y aminoácidos esenciales que promueven el desarrollo vegetal, lo cual puede ser una alternativa para aprovechar los elementos en el suelo y hacerlos disponibles para las plantas.

**Objetivo.** Evaluar su potencial como bioestimulante en el crecimiento del sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench).

**Materiales y métodos.** Se sembraron cinco semillas por maceta plástica, cada una con 3 kg de un suelo clasificado como Entisol, se utilizó un diseño de bloques completamente al azar, con cinco tratamientos y tres réplicas un testigo absoluto (sin tratamiento), un control relativo (fertilización convencional) y tres tratamientos con diferentes dosis de gel de *A. vera* combinadas con fertilización (0-46-0 y urea a 100 kg ha<sup>-1</sup>). Se analizaron altura, peso seco aéreo y de raíz mediante ANDEVA y prueba de Tukey, encontrando diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

**Resultados.** Para la variable pesos, existen diferencias en los tratamientos con gel de sábila (peso seco aéreo:  $3,83 \pm 0,55$  g; raíz:  $2,50 \pm 0,17$  g) frente al testigo (aéreo:  $0,44 \pm 0,03$  g; raíz:  $0,54 \pm 0,03$  g) y el control relativo (aéreo:  $1,33 \pm 0,15$  g; raíz:  $1,27 \pm 0,09$  g). Este mismo comportamiento se observó para la Altura, los tratamientos con gel de sábila son significativamente mayores en comparación con el tratamiento Relativo ( $p < 0,001$ ).

**Conclusión.** La aplicación de 100 a 30 ml de gel por 3 kg de suelo, en combinación con fertilización, mejoró notablemente el crecimiento del sorgo, favoreciendo tanto la biomasa aérea como radicular.

**Palabras clave:** bioestimulantes; agricultura sostenible; bioactivos; fertilización combinada.

## Research Article

### Abstract

#### Bioestimulation with *Aloe vera* L. gel to enhance the growth of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) in Entisols

**Introduction.** *Aloe vera* L. is known for its bioactive properties, such as phytohormones and essential amino acids that promote plant development, which may represent an alternative means of harnessing soil elements and making them available to plants. **Objective.** To evaluate its potential as a biostimulant on the growth of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Materials and methods.** Five seeds were sown per plastic pot, each containing 3 kg of soil (classified as Entisols), using a completely randomized block design with five treatments and three replicates: an absolute control (no treatment), a relative control (conventional fertilization), and three treatments combining different doses of *A. vera* gel with fertilization (0-46-0 and urea at 100 kg ha<sup>-1</sup>). Plant height, shoot dry weight, and root dry weight were analyzed by analysis of variance (ANOVA) followed by Tukey's test, revealing significant differences ( $p < 0.05$ ). **Results.** For biomass variables, treatments with *A. vera* gel exhibited higher values (shoot dry weight:  $3.83 \pm 0.55$  g; root dry weight:  $2.50 \pm 0.17$  g) compared to the absolute control (shoot:  $0.44 \pm 0.03$  g; root:  $0.54 \pm 0.03$  g) and the relative control (shoot:  $1.33 \pm 0.15$  g; root:  $1.27 \pm 0.09$  g). The same trend was observed for plant height, with treatments containing *A. vera* gel being significantly greater than the relative control ( $p < 0.001$ ). **Conclusion.** The application of 30 to 100 mL of gel per 3 kg of soil, in combination with fertilization, markedly improved sorghum growth, enhancing both shoot and root biomass.

**Keywords:** biostimulants; sustainable agriculture; bioactives; combined fertilization.

### Introducción

La especie *Aloe vera* (sinonimia: *Aloe barbadensis* Miller) es una planta perenne perteneciente a la familia Xanthorrhoeaceae, posee hojas alargadas, espinosas y con bordes dentados, compuestas de un gel transparente y viscoso (Kumar *et al.* 2017). Las hojas contienen cuatro tipos de vitaminas, minerales, seis clases de enzimas, lípidos, carbohidratos, proteínas y 18 aminoácidos esenciales (Ahmed *et al.* 2009). Además, posee elementos como calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K), manganeso (Mn), magnesio (Mg), cobre (Cu), zinc (Zn), cromo (Cr) y selenio (Se), siendo este último muy bien conocido por ser un buen antioxidante (Chen *et al.* 2009).

El gel de sábila posee propiedades bioestimulantes atribuidas a su contenido de hormonas vegetales (auxinas y giberelinas) y ácido salicílico, que favorecen el desarrollo radicular (Surjushe *et al.* 2008), e incluye metabolitos sinérgicos como alcaloides, aloínas, lectinas, lignina, saponinas, taninos, compuestos fenólicos y glucomanano (Darini *et al.* 2015, Hamman 2008). La alta concentración de fitohormonas en el gel sugiere su potencial como bioestimulante para mejorar el desarrollo de otras especies vegetales (Carranza *et al.* 2021). Varios estudios han demostrado que este extracto mejora la resistencia al estrés abiótico en diversas plantas, lo que incrementa el rendimiento bajo condiciones de sequía, salinidad o temperaturas extremas (Alkuwayti *et al.* 2022, Hazrati *et al.* 2016). Por ejemplo, la aplicación foliar de *Aloe vera* estimuló el crecimiento vegetativo y la productividad de *Abelmoschus esculentus*, y aumentó su biomasa y rendimiento (Padmaja *et al.* 2007). En *Ocimum basilicum*, su uso mejoró la altura, el número de hojas y la producción de aceite esencial (Hamouda *et al.* 2012), y en esquejes de *Syzygium jambos*, el extracto potenció la inducción radicular por acodo aéreo, lo que incrementó la longitud y el número de raíces (Mirihagalla y Fernando 2020).

Un bioestimulante se define como una sustancia, un microorganismo o una combinación de ambos que, al aplicarse sobre la planta o el suelo, activan procesos fisiológicos que optimizan la captación y asimilación de nutrientes y refuerzan la tolerancia frente a estrés biótico (enfermedades por hongos, bacterias o virus) y abiótico (sequía, salinidad, temperaturas extremas) (Ehtesham *et al.* 2021, Ma *et al.* 2022). Se ha demostrado que los bioestimulantes mejoran parámetros agronómicos como el crecimiento radicular, la eficiencia fotosintética y la producción de biomasa, lo que se traduce en cultivos de mayor calidad y libres de residuos tóxicos (Franzoni *et al.* 2022). Sin embargo, a diferencia de los fertilizantes que suministran directamente macro y micronutrientes para el desarrollo vegetal, los bioestimulantes no aportan nutrientes de forma inmediata, sino que potencian la actividad metabólica de la planta y favorecen la movilización de los nutrientes ya existentes en el suelo (Ma *et al.* 2022).

En Centroamérica, los Entisoles (Psamments y Fluvents) son suelos jóvenes con escaso desarrollo de horizontes, predominantes en planicies costeras y llanuras aluviales (Alvarado Hernández 2022). Su textura arenosa y baja capacidad de intercambio catiónico limitan la retención de nutrientes como  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , lo que requiere aplicaciones frecuentes de fertilizantes para mantener la productividad (Marschner 2012). Desde el 2021, los precios de referencia internacionales de los fertilizantes han experimentado un aumento. El mayor incremento se ha observado en los fertilizantes nitrogenados y fosfatados, lo que ha imposibilitado a los pequeños productores obtener buenos rendimientos en sus tierras (FAO 2021).

En este contexto, se selecciona el Sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) como planta porque no compite con los otros granos básicos y puede cultivarse en áreas no adecuadas (Corredor seco). Además de proporcionar grano y forraje, con el Sorgo es posible producir azúcar refinada, papel y miel (Almodares y Hadi 2009). También, puede servir para la producción de alimentos balanceados, lo cual ayudaría a los problemas de desnutrición en Latinoamérica (Khoddami *et al.* 2023). Esto lo convierte en un suplemento versátil, útil no solo para la alimentación, sino también para cubrir zonas áridas o semiáridas, conservar la humedad del suelo y servir como fuente de energía para microorganismos durante la descomposición de la materia orgánica. El manejo sustentable de las tierras es necesario para maximizar la producción de cultivos y minimizar la degradación de los ecosistemas y del suelo (Reynolds *et al.* 2009).

La mayoría de las investigaciones se han centrado en la aplicación foliar del gel, y los estudios sobre las interacciones entre el suelo y la planta son aún limitados. La bioestimulación con gel de sábila (*Aloe vera* L.) representa una posible alternativa, para la eficiencia y producción de los cultivos. Esta investigación tiene como objetivo explorar el gel de sábila (*A. vera*) como un bioestimulante en el cultivo del Sorgo (*Sorghum bicolor*), con base en la hipótesis en la cual la aplicación del gel de sábila ayudara a mejorar la absorción de los nutrientes expresados en la planta (altura, peso aéreo y radical), ante la necesidad de buscar soluciones sostenibles que permitan aumentar el rendimiento en los cultivos para los agricultores, adaptados a los Entisoles que son parte del corredor seco.

## **Materiales y métodos**

### **Establecimiento del ensayo**

La investigación se llevó a cabo en el Centro Experimental Docente de Agronomía (CEDA) de la Universidad de San Carlos (Guatemala - Centroamérica), se empleó un diseño de bloques completamente al azar (DBCA). El material germinativo utilizado fue sorgo variedad ICTA-Rendidor - (*Sorghum bicolor*). Se sembraron cinco semillas por maceta plástica, cada una con 3 kg de suelo (Entisol) previamente tamizado con malla de 10 Mesh (2 mm apertura) y enviado al laboratorio para su análisis químico antes de iniciar con la siembra. Se utilizaron cinco tratamientos con tres réplicas, para un total de 15 macetas instaladas (**Tabla 1**). Las macetas se colocaron a una distancia de 50 cm entre hileras y 50 cm entre plantas. Éstas permanecieron en condiciones de invernadero durante 35 días, desde la siembra hasta la cosecha. El experimento tuvo una duración total de dos meses (octubre y noviembre del 2024).

### Preparación e incorporación del gel de sábila (*Aloe vera* L.)

Para obtener el gel de sábila (*Aloe vera* L.), se seleccionaron hojas maduras sin daños visibles por microorganismos o macroorganismos. Las hojas se lavaron con 50 ml de agua destilada. A continuación, se realizaron cortes longitudinales finos para extraer pequeños fragmentos de gel, los cuales se recolectaron en frascos de 450 ml. Este gel se incorporó al suelo junto con triple superfosfato (0-46-0), en dosis de 30 ml de gel por kg de suelo en los tratamientos T1 y T3, y de 100 ml kg<sup>-1</sup> en T2. El fertilizante se aplicó directamente sobre los fragmentos de gel restantes y luego se mezcló homogéneamente con el suelo (**Tabla 1**).

Una vez mezclado uniformemente con el material aplicado (fósforo y gel) se procedió a sembrar semillas de sorgo (*Sorghum bicolor*) en macetas, para iniciar el proceso de germinación. Quince días después de la germinación, se realizó un raleo para dejar tres plantas por maceta, se seleccionaron plantas homogéneas con respecto al tamaño con el fin de evitar sesgos al momento de recolectar las muestras. Finalmente, 20 días después de la germinación, se aplicó urea - CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> como fertilizante (**Tabla 1**).

**Tabla 1.** Dosificaciones aplicadas al suelo en el establecimiento del experimento.

**Table 1.** Soil dosage applications at the beginning of the experiment.

Tratamientos	Dosis	Triple super fosfato 0-46-0	Dosis de gel de sábila	<sup>†</sup> 100 kg Urea ha <sup>-1</sup>
Testigo	Suelo	-	-	-
Relativo	Suelo + Fósforo	0,5 g 3kg <sup>-1</sup> de suelo	-	0,1 g 3kg <sup>-1</sup> de suelo
T1	Gel + Suelo + Fósforo	0,5 g 3kg <sup>-1</sup> de suelo	30 ml 3kg <sup>-1</sup> de suelo	0,1 g 3kg <sup>-1</sup> de suelo
T2	Gl + Suelo + Fósforo	1 g 3kg <sup>-1</sup> de suelo	100 ml 3kg <sup>-1</sup> de suelo	0,1 g 3kg <sup>-1</sup> de suelo
T3	Gel + Suelo	-	30 ml 3kg <sup>-1</sup> de suelo	0,1 g 3kg <sup>-1</sup> de suelo

<sup>†</sup> Se aplicó 20 días después de la germinación de la planta (DDG).

<sup>†</sup> Applied 20 days after germination (DAG).

### Medición de altura y peso seco de las plantas

Se recolectó la muestra de datos para la variable altura 30 días después de la germinación de las semillas. Se utilizó una cinta métrica para medir desde la base del suelo hasta el ápice superior del tallo. Los tratamientos se separaron en subconjuntos, y se registró el tamaño por cada planta y repetición (3 réplicas) (CIMMYT 1995). Las plantas se enviaron al laboratorio Salvador Castillo Orellana (USAC), con la intención de lograr el secado parcial se introdujeron al horno a 70 °C por 48 horas, posteriormente se colocaron en la balanza analítica, lo que permitió recolectar datos del peso de la materia seca para raíz y parte aérea (tallo y hojas), (**Figura 1**).



**Figura 1.** Preparación de muestra vegetal, para los cálculos de pesos en materia seca: a) muestras colocadas al horno a 70 °C, b) recolecta de datos de la variable peso seco aéreo y de raíz en balanza analítica.

**Figure 1.** Preparation of plant samples for dry matter weight calculations: (a) samples placed in an oven at 70 °C; (b) data collection of aerial and root dry weight using an analytical balance.

### Procesamiento de datos

Se utilizó un diseño experimental de Bloques Completamente al Azar (DBCA), con tres repeticiones (R1, R2 y R3) que representaron los bloques experimentales, para un total de cinco tratamientos evaluados (Testigo absoluto, Relativo, T1, T2 y T3). Cada réplica se consideró un bloque independiente debido a la posible heterogeneidad experimental de las condiciones ambientales, realizando un análisis ANDEVA. Se incluyeron las pruebas Tukey ( $p = 0,05$ ), debido a que los datos mostraron una distribución normal, evaluando diferencias significativas entre grupos.

El modelo aplicado para el análisis de datos (ANDEVA) se estructuró de la siguiente manera:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

donde  $Y_{ij}$  es la respuesta observada (altura, peso seco aéreo o peso seco raíz) del tratamiento  $i$  en el bloque  $j$ ;  $\mu$  media general del experimento.  $\tau_i$ : efecto fijo del  $i$ -ésimo tratamiento (Testigo, Relativo, T1, T2, T3).  $\beta_j$  efecto fijo del bloque  $j$  (Réplica 1, Réplica 2, Réplica 3).  $\varepsilon_{ij}$  error aleatorio del experimento (variabilidad no controlada).

Se aplicó un análisis de regresión lineal simple estimado mediante mínimos cuadrados ordinarios (OLS). La ecuación de dicho modelo se representó de la siguiente forma:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i$$

donde  $y_i$  corresponde al peso seco de raíz (g) de la planta  $i$ ,  $x_i$  es el peso seco aéreo (g),  $\beta_0$  es el intercepto que indica el valor esperado de  $y$  cuando  $x = 0$ , y  $\beta_1$  representa la pendiente que señala el cambio en  $y$  por cada unidad de  $x$ . El término  $\varepsilon_i$  se asumió con distribución normal, media cero y varianza constante. El ajuste del modelo se realizó según los procedimientos estándar de OLS. Se verificaron los supuestos de normalidad de residuos, homocedasticidad y ausencia de multicolinealidad (Zar 2010). Los análisis estadísticos fueron procesados en el lenguaje de programación R (R Core Team 2024).

## Resultados

### Variable altura

En la **Figura 2**, se comparan las alturas máximas alcanzadas por cada tratamiento al finalizar el experimento. El tratamiento Testigo (sin gel de sábila ni fertilizante) registró la altura más baja, con 6,7 cm, seguido de Relativo (también sin gel, pero con fertilizante) con 10,1 cm. Los cambios de la altura se empiezan a observar con la aplicación del gel de sábila, tanto T1 (30 mL) como T3 (30 mL) presentaron alturas muy similares, de 15,48 cm y 15,39 cm respectivamente. Sin embargo, el mayor desarrollo se dio en T2, que recibió 100 mL de gel de sábila y alcanzó una altura máxima de 17,87 cm. Esto sugiere que la dosis de gel influye en el crecimiento (**Figura 2**).



Se realizó un análisis de Shapiro-Wilk para mostrar que los tratamientos, evaluados individualmente, cumplen con el supuesto de normalidad ( $p > 0,05$ ). Los valores obtenidos fueron: Relativo ( $p = 0,27$ ), T1 ( $p = 0,31$ ), T2 ( $p = 0,62$ ), T3 ( $p = 0,27$ ) y Testigo ( $p = 0,3121$ ). Razón por la cual se utilizó un análisis de ANDEVA. Los resultados encontraron diferencias significativas ( $3,988-12^{***}$ ), validando que las dosis con tratamientos del gel de sábila (*Aloe vera*) influirán en la variable dependiente (altura), (Figura 2 y Tabla 2).



**Figura 2.** Tamaños de plantas 30 días después de siembra (30DDS), cada rotulación hace énfasis en los tratamientos aplicados. Los tratamientos en el orden respectivo de la fotografía: Testigo, Relativo, T1, T2, T3.

**Figure 2.** Plant size at 30 days after sowing (30 DAS), each label highlights the applied treatments. Shown in the following order from left to right: Control, Relative, T1, T2, and T3.



**Tabla 2.** Análisis ANDEVA para los tratamientos en referencia a la altura.

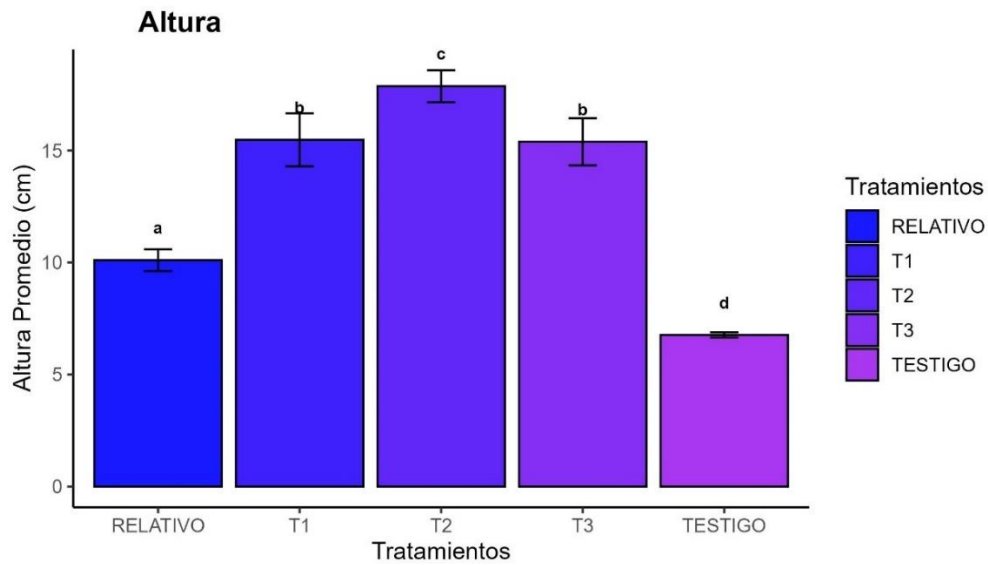
**Table 2.** Analysis of variance (ANOVA) for plant height among treatments.

Factor	GL	SC	MC	Valor F	Pr(>F)
Bloque	2	29,1	14,59	2,68	0,0811
Tratamientos	4	744,5	186,13	31,58	3,988e-12*
Residuales	40	235,7	5,89	-	-

\* Diferencias significativas entre los tratamientos en relación con la altura ( $\text{Pr}(>F) < 0,001$ ).

\* Significant differences between treatments in relation to plant height ( $\text{Pr}(>F) < 0,001$ ).

El análisis post-hoc de Tukey HSD validó las diferencias significativas entre los tratamientos (**Figura 3**). En particular, los tratamientos T1, T2 y T3 son significativamente mayores en comparación con el tratamiento Relativo ( $p < 0,001$ ). Asimismo, el Testigo es el de menor altura en contraste con T1, T2 y T3 ( $p < 0,001$ ). No se observaron diferencias significativas entre T1 y T3 ( $p = 0,9$ ).

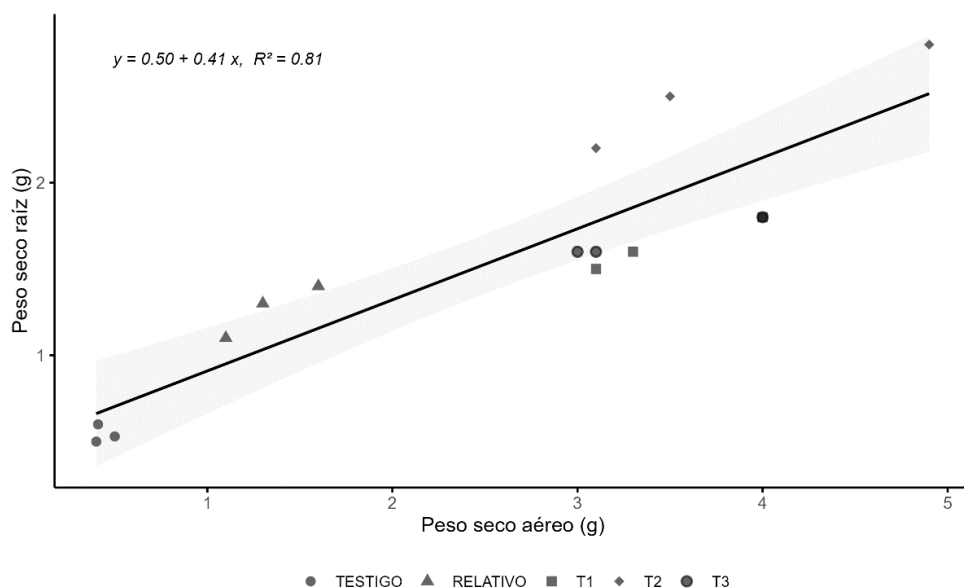


**Figura 3.** Valores de altura promedio de las plantas de acuerdo con las dosis en los diferentes tratamientos.

**Figure 3.** Average plant height as a function of the applied doses in the different treatments.

### Variable peso

En la **Figura 4**, se observa que el tratamiento T2, al que se le aplicaron 100 mL de gel de sábila, alcanzó la mayor producción conjunta de biomasa aérea (3,1 - 4,9 g) y radicular (2,2 - 2,8 g), dicha dosis estimuló de manera más marcada el crecimiento de brotes y raíces. En contraste, el tratamiento Relativo (sin gel) registró valores reducidos (aéreo 1,1–1,6 g; raíz 1,1–1,4 g) y el Testigo (sin gel) mostró los valores más bajos (aéreo  $\approx$  0,4–0,5 g; raíz  $\approx$  0,5–0,6 g), lo que confirma el papel del gel como bioestimulante. Tanto T1 como T3 (30 mL de gel) presentaron rendimientos intermedios y muy similares (aéreo  $\approx$  3,0–4,0 g; raíz  $\approx$  1,5–1,8 g). A pesar de estas diferencias, todos los tratamientos se distribuyeron en torno a la misma línea de regresión ( $y = 0,50 + 0,41 x$ ;  $R^2 = 0,81$ ), lo que demuestra un patrón alométrico común en la asignación de biomasa entre brotes y raíces.



**Figura 4.** Relación alométrica entre la biomasa aérea y la biomasa radicular en plantas para cada tratamiento (Testigo, Relativo, T1, T2 y T3).

**Figure 4.** Allometric relationship between shoot biomass and root biomass in plants for each treatment (Control, Relative, T1, T2, and T3).

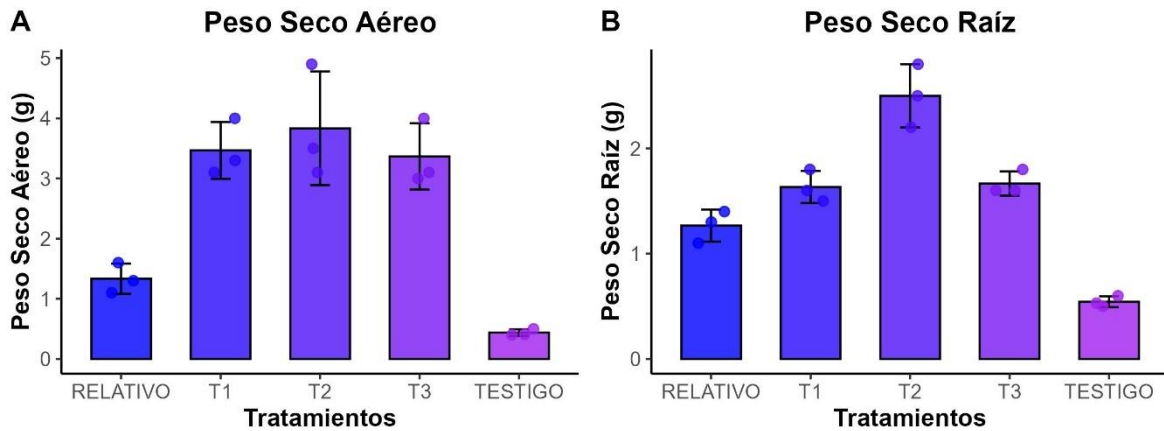
El ANDEVA demuestra que existen diferencias significativas en el peso seco aéreo ( $p = 0,000306^{***}$ ) y el peso seco de raíz ( $p = 2,18 \text{ e-}05$ ). Los resultados indicarían que los tratamientos con gel de sábila influyen sobre el crecimiento aéreo y radicular de las plantas evaluadas (**Figura 5** y **Tabla 3**). El factor de Bloque explica que la variabilidad debida a las réplicas no altera de forma consistente el peso seco aéreo y de raíz las diferencias en dosis de gel de sábila son las responsables de la mayor parte de la variación en ambos componentes de biomasa.

**Tabla 3.** Análisis de varianza (ANDEVA) para las variables peso seco aéreo y peso seco de raíz.  
**Table 3.** Analysis of variance (ANOVA) for shoot dry weight and root dry weight.

Variable	Factor	GL	SC	MC	Valor F	Pr(>F)
Peso seco aéreo	Tratamiento	4	27,243	6,811	20,187	0,000306***
	Bloque	2	0,274	0,137	0,405	0,6796
	Residual	10	2,699	0,33	—	
Peso seco de raíz	Tratamiento	4	6,038	1,5096	41,366	2,18 e-05***
	Bloque	2	0,013	0,0067	0,182	0,837
	Residual	10	0,292	0,0365	—	

\*\*\*Diferencias significativas entre los tratamientos en relación con el peso seco aéreo y el peso seco de raíz, con base en ANDEVA (Pr (>F) < 0,001)

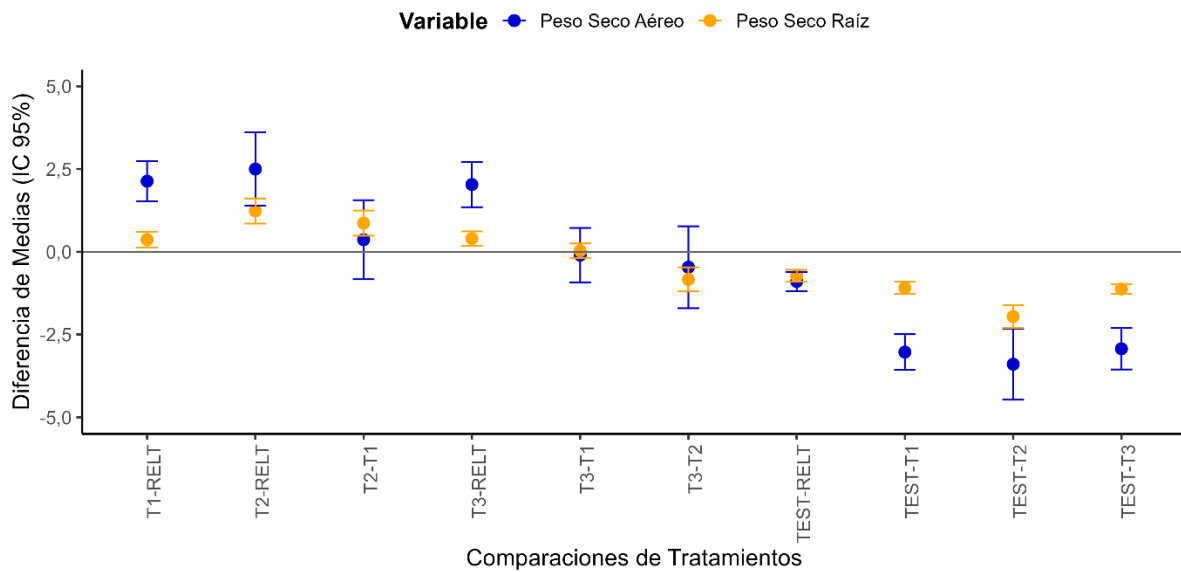
\*\*\*Significant differences among treatments in relation to shoot and root dry weights based on ANOVA (Pr(>F) < 0.001).



**Figura 5.** Efecto de los tratamientos sobre dos variables alométricas: a) Peso aéreo de la planta, b) Peso seco de la raíz. Barras de error representan un intervalo de confianza de 95%, obtenidos mediante el ANDEVA.

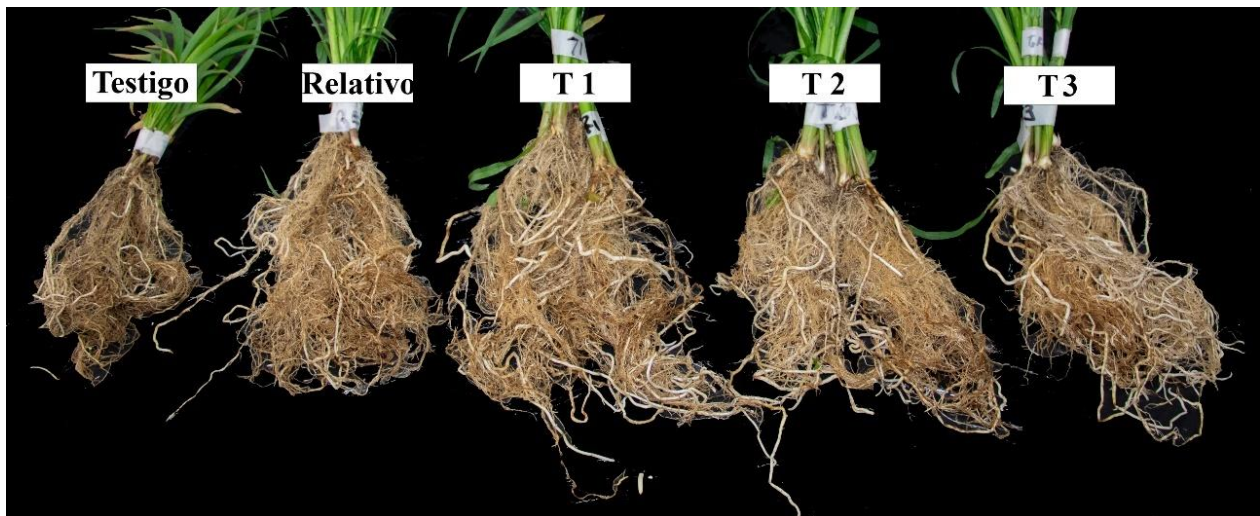
**Figure 5.** Effect of treatments on two allometric variables: a) Shoot dry weight; b) Root dry weight. Error bars represent a confidence interval of 95%, obtained through ANOVA.

La prueba múltiple de Tukey para peso seco aéreo mostró que T1, T2 y T3 tienen un efecto muy similar entre sí y producen valores significativamente mayores que el Testigo ( $p < 0,001$ ). En cambio, el tratamiento Relativo no difiere del Testigo ( $p = 0,325$ ), lo que indica que sin gel los valores de biomasa aérea se mantienen bajos. Para peso seco de raíz, T2 superó a todos los demás tratamientos ( $p < 0,001$ ), mientras que T1 y T3 no difieren entre sí ( $p > 0,9$ ), ambos quedaron por debajo de T2, pero por encima del Testigo. En ambos casos, el Testigo mostró los valores más bajos de biomasa (aérea y radicular), y T2 fue el tratamiento más efectivo para incrementar peso seco en las dos variables (**Figuras 6 y 7**).



**Figura 6.** Comparación de las diferencias entre las medias para dos variables alométricas con base en la prueba múltiple de Tukey. la línea continua está como referencia para identificar significancia entre los tratamientos. Los códigos T1, T2 y T3 en la gráfica hace referencia a los tratamientos evaluados. RELT: Relativo, TEST: Testigo.

**Figure 6.** Comparison of treatment effects on two allometric variables based on Tukey's multiple range test. The solid line serves as a reference to identify significant differences among treatments. The codes T1, T2, and T3 correspond to the experimental treatments; RELT = Relative, TEST = Control.



**Figura 7.** Variabilidad en el tamaño de la raíz asociada a cada tratamiento. La rotulación hace énfasis en los tratamientos aplicados (Testigo, Relativo, T1, T2, T3).

**Figure 7.** Root size comparison among treatments, with labels highlighting the applied treatments (Control, Relative, T1, T2, T3).

## Discusión

En los suelos Entisoles, la capacidad de retención de nutrientes se vuelve muy limitada por la escasa formación de horizontes y por su textura generalmente gruesa. En consecuencia, estos suelos requieren fertilizaciones frecuentes y en dosis elevadas para compensar la rápida lixiviación de nutrientes hacia capas más profundas (Alvarado Hernández 2022). A un pH de 7,1 (rangos de los análisis), la disponibilidad de fósforo disminuye, notablemente debido a la formación de fosfatos de calcio poco solubles, lo que explica la baja concentración de P (3,10 ppm) registrada en la muestra de suelo (**Tabla 4**), muy por debajo del rango medio (12-16 ppm), (Fageria 2001).

Debido a los rangos del pH básico, micronutrientes como Cu, Zn, Fe y Mn tienden a quedar en formas poco solubles: el  $\text{Cu}^{2+}$  se adsorbe a óxidos e hidróxidos, el  $\text{Zn}^{2+}$  precipita como  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ , y el  $\text{Fe}^{3+}$  forma  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , lo que reduce su solubilidad y limita su absorción por las raíces (Shen *et al.* 2011). En la muestra (**Tabla 4**), se observaron valores de Cu (0,10 ppm) y el Fe (4,50 ppm) por debajo de sus rangos óptimos (2-4 ppm para Cu y 10-15 ppm para Fe), y aunque el Mn aparece en 28,50 ppm (rango medio 10-15 ppm), gran parte estaría en forma de  $\text{MnO}_2$ , el cual es poco disponible para las plantas (Marschner 2012).

Con respecto a los tratamientos el testigo 6,7 cm (altura menor) al no contener ningún nutrimento no se desarrolló de manera adecuada por la poca disponibilidad de nutrientes, por ende, los datos del peso aéreo y raíz eran los más bajos. Las plantas adquieren fósforo lábil en forma de aniones de ortofosfato, específicamente  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  (suelos ácidos) y  $\text{HPO}_4^{2-}$ , los cuales le ayudan al proceso de enraizamiento (Wang y Lambers 2020). Teóricamente, el gel de *Aloe vera* pudo haber participado en la bio-estimulación para que las plantas pudieran absorber de mejor manera los elementos, por esta razón se vio reflejado tanto en la altura como en el peso de las plantas que tenían tratamientos del gel.

**Tabla 4.** Análisis químico del suelo se utilizó en el presente estudio.

**Table 4.** Chemical analysis results of the soil used in present study.

	pH	P	Cu	Zn	Fe	Mn	MO*
				ppm			(%)
<b>Rango medio</b>	<b>6-6,5</b>	<b>12 - 16</b>	<b>2 - 4</b>	<b>4 - 6</b>	<b>10 - 15</b>	<b>10 - 15</b>	<b>4 - 5</b>
M-3	7,1	3,1	0,1	10,0	4,5	28,5	5,1
		Ca	Mg	Na	K	CIC*	SB*
				meq 100 g <sup>-1</sup>			(%)
<b>Rango medio</b>		<b>4 - 8</b>	<b>1,5-2</b>	<b>--</b>	<b>0,27-0,38</b>	<b>20-25</b>	<b>75-90</b>
M-3		13,5	3,3	0,4	1,2	23,3	78,9

\*MO: Materia orgánica; CIC: Capacidad de Intercambio de Cationes; SB: Saturación de bases.

\*MO: Organic matter content; CIC: Cation exchange capacity; SB: Base saturation.

Los cinco aminoácidos que más dominan en la planta de sábila son el ácido aspártico (14,30 g g<sup>-1</sup>), seguido por el ácido glutámico (14,20 g g<sup>-1</sup>), la leucina (8,50 g g<sup>-1</sup>), la lisina (8,20 g g<sup>-1</sup>) y la glicina (7,80 g g<sup>-1</sup>) contenidos de nutrientes por cada 100 g de *Aloe vera* (gel de sábila) (Setiawan 2012). Se encontró que los tratamientos T1, T2 y T3 (gel de sábila) tienen mejor estructura en la planta (raíz y tallos) en comparación con el tratamiento Relativo y el Testigo; teóricamente, están relacionados a la Glicina (7,80 g g<sup>-1</sup>) contenidos en el gel del *Aloe vera*.

La glicina puede facilitar la absorción y translocación de nutrientes en las plantas (Souri y Hatamian 2019), colabora en la división celular, los procesos de desarrollo, el aumento de la fotosíntesis, la biosíntesis de proteínas (Mohammadipour y Souri 2019). Además, la glicina promueve la acumulación de carbohidratos (sacarosa, glucosa, fructosa), que pueden actuar como fuente de energía y proporcionar anillos de carbono para la biosíntesis de polifenoles (Liu *et al.* 2016).

El documento de Miranda *et al.* 2023 menciona que la aplicación foliar del extracto de *Aloe vera* al 5%, mejora el número y longitud de raíces, volumen radical y altura en cultivos de Tomate (*Lycopersicum esculentum*). En cuanto a los tratamientos con el gel de sábila (*Aloe vera*) en Sorgo, obtuvieron el mejor peso seco aéreo ( $3,83 \pm 0,55$ ) y de raíz ( $2,50 \pm 0,17$  g) en este caso, el gel aplicado al suelo para el cultivo de sorgo es una alternativa que dio resultados similares, por lo que debe ser estudiado con mayor profundidad. Aunque no está del todo claro como el gel de sábila puede aportar a la planta, es necesario desarrollar análisis foliares en diferentes etapas fenológicas, para comprender mejor el aporte de la acumulación de nutrientes.

El enraizamiento, que fue más evidente en los tratamientos con el gel de sábila, puede atribuirse a los dos primeros aminoácidos (ácido aspártico y glutámico) y al efecto de bioestimulante que favorece la mejor absorción de nutrientes y la disponibilidad del fósforo para la planta, el ácido glutámico participa en el metabolismo del nitrógeno, para su asimilación por las plantas como en las reacciones catalizadas por aminotransferasas (Cao *et al.* 2010). Por otro lado, el ácido aspártico actúa como precursor en la producción de otros aminoácidos como la lisina, treonina, metionina e isoleucina, por la vía metabólica del ácido aspártico. Su aplicación fortalece a las plantas para enfrentar condiciones adversas como sequía, salinidad y toxicidad por metales pesados (Rai 2002), ambos son utilizados para la creación de bioestimulantes, como materia prima en su formulación (Colla *et al.* 2015).

En la **Tabla 4**, se evidencia que la concentración de fósforo (3,10 ppm) está muy por debajo del rango óptimo (12 - 16 ppm), lo cual limita su difusión en el suelo, principal mecanismo de transporte del P (Fernández 2007). Hipotéticamente, el gel de sábila, gracias a sus aminoácidos y polisacáridos, puede mejorar el flujo de masa hacia las raíces y aumentar la absorción de agua, lo cual solubilizaría diferentes elementos (Alfosea-Simón *et al.* 2021), facilitando así la movilidad del fósforo en la rizosfera.



Este efecto se traduce en un mayor volumen radicular, que a su vez exuda carboxilatos, protones y fosfatasa para movilizar P, Ca y Fe, optimizando la fotosíntesis (Khan *et al.* 2023). Aunque el pH (7,1) favorece la precipitación de sales y la inmovilización de nutrientes, el *Aloe vera* ha demostrado mitigar los efectos de salinidad moderada (Murillo-Amador *et al.* 2014). Esto podría aumentar la solubilidad de los elementos como el fósforo, calcio y hierro. Las plantas tratadas con gel mostraron raíces más voluminosas y mejor desarrollo aéreo, podría ser que el *Aloe vera* facilita la disponibilidad de nutrientes y mejora las características físicas del cultivo.

Otros documentos mantienen, también, el argumento que diferentes dosis con extracto del gel de sábila, *Aloe vera*, pueden aumentar el crecimiento del número de hojas, longitud de raíces y pesos de brotes de esquejes en vainilla (*Vanilla planifolia*), (Fauzi 2021). Otros han determinado mejoras en los parámetros de germinación, biomasa, altura y estructura de raíz, al aplicar diferentes concentraciones del gel de sábila de manera foliar, ejemplo de ello son las investigaciones de Miranda *et al.* 2023, Tucuch-Hass *et al.* 2022, Mirihagalla y Fernando 2020, Almeida 2010, los cuales coinciden con los hallazgos encontrados en esta investigación, aunque difieren en el método de suministro: los estudios citados emplean pulverizaciones foliares, mientras que aquí el gel se incorpora directamente al suelo.

Todos los tratamientos con dosis de *Aloe vera* mejoraron con base en las características físicas de la planta durante el experimento, incluso superaron la fertilización convencional para altura como peso seco (aéreo y raíz), el tratamiento T2 (100 ml de gel + 1g de fosforo, 0,1 g urea) destacó como el de mayor volumen y tamaño ( $p < 0,001$ ), *Aloe vera* es una fuente de nutrientes esenciales que puede aportar nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio, los cuales son fundamentales para cubrir los requerimientos nutricionales de las plantas y contribuir a su desarrollo adecuado (Nuraida *et al.* 2021). Esto pudo ayudar como un bioestimulante y aportar elementos necesarios para el crecimiento radicular y aéreo de la planta de Sorgo, con mucha similitud en lo que se ha comprobado en otras investigaciones con diferentes dosis de aplicación foliar (Padmaja *et al.* 2007, Hamouda *et al.* 2012, Alkuwayti *et al.* 2022, Hazrati *et al.* 2016, Mirihagalla y Fernando 2020).

## Conclusión

La aplicación de gel de *Aloe vera* (30 a 100 ml 3 kg<sup>-1</sup> de suelo) junto con fertilización convencional (0-46-0 y urea a 100 kg ha<sup>-1</sup>) mejoró significativamente el crecimiento vegetativo y la biomasa aérea y radical del sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) en Entisoles bajo invernadero. Debido a que el experimento se realizó en macetas y un solo ciclo de cultivo, se recomienda validar estos resultados con ensayos a campo en distintas variantes de Entisoles y condiciones climáticas. Sería interesante evaluar la repuesta de dosis mayores de *Aloe* con el objetivo de optimizar la nutrición y reducir el uso de fertilizantes. Como limitante, la extracción del gel requiere mucho tiempo; por ello, se sugiere probar hojas de *Aloe vera* trituradas, lo que facilitaría la producción a y aplicabilidad a mayor escala. Futuras investigaciones podrían extenderse a otros cultivos y suelos para determinar aplicabilidad y efectos sobre la solubilización de nutrientes.

## Agradecimiento

Al Dr. Iván Dimitri Castillo, docente de pregrado y posgrado de la Facultad de Agronomía (USAC-UVIGER), por su disposición para resolver dudas y su apoyo en la comprensión de las interacciones suelo-planta; al Dr. Aníbal Sacbaja Galindo, docente de pregrado y posgrado en Agronomía y jefe del Laboratorio de Suelo y Agua, por su valiosa colaboración en los análisis de suelo y en las herramientas de campo que permitieron llevar a cabo este ensayo, así como por compartir sus amplios conocimientos sobre suelo y planta, a las personas revisoras por sus comentarios constructivos, los cuales mejoraron de manera significativa la calidad de este trabajo.

## Literatura citada

Ahmed, MJ; Singh, Z; Khan, AS. 2009. Postharvest *Aloe vera* gel-coating modulates fruit ripening and quality of 'Arctic Snow' nectarine kept in ambient and cold storage. Int J Food Sci Technol 44(5):1024-1033. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01873.x>

Alfosea-Simón, M; Simón-Grao, S; Zavala-Gonzalez, EA; Cámara-Zapata, JM; Simón, I; Martínez-Nicolás, JJ; Lidón, V; García, F. 2021. Physiological, nutritional and metabolomic responses of tomato plants after the foliar application of amino acids aspartic acid, glutamic acid and alanine. Front Plant Sci 11:581234. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.581234>

Alkuwayti, MA; Aldayel, MF; Yap, YK; El Sherif, F. 2022. Exogenous application of *Aloe vera* leaf extract improves silybin content in *Silybum marianum* L. by up-regulating chalcone synthase gene. Agriculture 12(10):1649. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12101649>

Almeida, DM. 2010. Efecto del extracto de *Aloe vera* L. en la producción de plántulas de *Solanum lycopersicum* L. (tomate), en condiciones de Cepellón. Tesis Ingeniería Agronómica. Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saiz Montes de Oca". UTC. Latacunga, Ecuador. 59 p. Consultado 5 nov. 2024. Disponible en <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/3528>

Almodares, A; Hadi, MR. 2009. Production of bioethanol from sweet sorghum: A review. African Journal of Agricultural Research 4(2):772-780.

Alvarado Hernández, A. 2022. Entisoles e Inceptisoles. In Suelos de Centroamérica. Costa Rica, Editorial Tecnológica de Costa Rica. Disponible en <https://libros.tec.ac.cr/suelos-de-centroamerica-tipm6.html>

Cao, M; Song, C; Jin, Y; Liu, L; Liu, J; Xie, H. 2010. Synthesis of poly ( $\gamma$ -glutamic acid) and heterologous expression of pgsBCA genes. J Mol Catal B Enzym 67(1-2):111-116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2010.07.014>

Carranza Alvarez, C; Garcia, K; Hernández, H; Castillo-Pérez, L; Fortanelli, J. 2021. Efecto de extractos orgánicos naturales sobre la micropropagación de *Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews (Orchidaceae). Biotecnia 23(1):5-12. DOI: <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v23i1.805>

Chen, W; Lu, Z; Viljoen, A; Hamman, J. 2009. Intestinal drug transport enhancement by *Aloe vera*. Planta Med 75(6):587-595. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-0029-1185341>

CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo). 1995. Manejo de los ensayos e informe de los datos para el Programa de Ensayos Internacionales de Maíz del CIMMYT (en línea). Consultado 5 oct. 2024 Disponible en <http://hdl.handle.net/10883/3792>

Colla, G; Nardi, S; Cardarelli, M; Ertani, A; Lucini, L; Canaguier, R; Rouphael, Y. 2015. Protein hydrolysates as biostimulants in horticulture. *Sci Hort* 196:28-38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.037>

Darini, MT; Indradewa, D; Purwantoro, A; Shiddieq, D. 2015. Enhancing growth and aloin production of *Aloe vera* L. plantlets by sucrose and yeast extract elicitor dosages. *International Journal of Applied and Natural Sciences (IJANS)* 4(5):11-22. Disponible en <https://ssrn.com/abstract=2639036>

Ehtesham, Nia, A; Taghipour, S; Siahmansour, S. 2021. Pre-harvest application of chitosan and postharvest *Aloe vera* gel coating enhances quality of table grape (*Vitis vinifera* L. cv. 'Yaghouti') during postharvest period. *Food Chem* 347:129012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129012>

Fageria, NK. 2001. Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition* 24(8):1269-1290. DOI: <https://doi.org/10.1081/PLN-100106981>

FAO. 2021. El mercado mundial de fertilizantes: balance de la situación de un mercado en dificultades. Roma. s. p.

Fauzi, R. 2021. Penggunaan *Aloe vera* sebagai alternatif ZPT alami para pertumbuhan tanaman kacang hijau (*Vigna radiata*). *Trop Biosci* 1(2):4675. DOI: <https://doi.org/10.32678/tropicalbiosci.v1i2.4675>

Fernández, MT. 2007. Fósforo: amigo o enemigo. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar XLI (2):51-57. Consultado 5 nov. 2024. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223114970009>

Franzoni, G; Cocetta, G; Prinsi, B; Ferrante, A; Espen, L. 2022. Biostimulants on crops: Their impact under abiotic stress conditions. *Horticulturae* 8(3):189. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8030189>

Hamman, JH. 2008. Composition and applications of *Aloe vera* leaf gel. *Molecules* 13(8):1599-1616. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules13081599>

Hazrati, S; Tahmasebi-Sarvestani, Z; Modarres-Sanavy, SA; Mokhtassi-Bidgoli, A, Nicola, S. 2016. Effects of water stress and light intensity on chlorophyll fluorescence parameters and pigments of *Aloe vera* L. *Plant Physiology and Biochemistry* 106:141-148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.04.046>

Hamouda, AMA; Hendi, DMG; Abu El-Leel, OF. 2012. Improving basil growth, yield and oil production by *Aloe vera* extract and active dry yeast. *Egyptian Journal of Horticulture* 39(1):45-71.

Khan, F; Siddique, AB; Shabala, S; Zhou, M; Zhao, C. 2023. Phosphorus plays key roles in regulating plants' physiological responses to abiotic stress. *Plants* 12(15):2861. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12152861>

Khoddami, A; Messina, V; Vadabali Venkata, K; Farahnaky, A; Blanchard, CL; Roberts, TH. 2023. Sorghum in foods: Functionality and potential in innovative products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 63(9):1170-1186. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1960793>

Kumar, S; Yadav, M; Yadav, A; Yadav, JP. 2017. Impact of spatial and climatic conditions on phytochemical diversity and in vitro antioxidant activity of Indian *Aloe vera* (L.) Burm.f. *South Afr J Bot* 111:50-59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2017.03.012>

Liu, X; Yang, X; Wang, L; Duan, Q; Huang, D. 2016. Comparative analysis of metabolites profile in spinach (*Spinacia oleracea* L.) affected by different concentrations of gly and nitrate. *Sci Hortic.* 204:8-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.02.037>

Ma, Y; Freitas, H; Dias, MC. 2022. Strategies and prospects for biostimulants to alleviate abiotic stress in plants. *Front Plant Sci* 13:1024243. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1024243>

Marschner, P. 2012. Mineral Nutrition of Higher Plants (3 ed.). Academic Press. s. p.

Miranda Pérez, D; Maqueira Reyes, D; Solana Díaz López, M; Ravelo Arteaga, Y; Ravelo Pimentel, K. 2023. Efecto de un hidrogel natural a base de *Aloe vera* en diferentes dosis sobre parámetros de crecimiento del *Lycopersicum esculentum* L. *Ecovida* 13(1):1-8.

Mirihagalla, MK; Fernando, KM. 2020. Effect of *Aloe vera* gel for inducing rooting of stem cuttings and air layering of plants. *J Dry Zone Agric* 6(1):13-26.

Mohammadipour, N; Sour, MK. 2019. Beneficial effects of glycine on growth and leaf nutrient concentrations of coriander (*Coriandrum sativum*) plants. *J Plant Nutr* 42(14):1637-1644. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1628985>

Murillo-Amador, B; Córdoba-Matson, MV; Villegas-Espinoza, JA; Hernández-Montiel, LG; Troyo-Diéguez, E; García-Hernández, JL. 2014. Mineral content and biochemical variables of *Aloe vera* L. under salt stress. *PLoS One* 9(4):e94870. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094870>

Nuraida, W; Fermin, U; Arini, R; Hasan, RH; Rakian, TC; Mudi, L. 2021. Utilization of the integrated tongue of palm oil POC for increasing Pakcoy plant production. *J Agrotek Tropika* 9(3):463-472. DOI: <http://dx.doi.org/10.23960/jat.v9i3.4665>

Padmaja, C; Kowsalya, B; Seethalakshmi, C. 2007. Efficacy of *Aloe vera* (L.) leaf powder as a biostimulant in enhancing the growth and yield of lady's finger (*Abelmoschus esculentus* L.). *Res Crops* 8:395-397.

R Core Team. 2024. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Disponible en <https://www.R-project.org>

Rai, VK. 2002. Role of amino acids in plant responses to stresses. *Biol Plant* 45(4):481-487. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1022308229759>

Reynolds, D; Drury, C; Tan, C; Fox, CA; Yang, X. 2009. Use of indicators of pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 252-263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>

- Setiawan, MC. 2012. Kualitas minuman serbuk instan lidah buaya (*Aloe barbadensis* Miller) dengan variasi kadar matodekstrin dan suhu pemanasan. Tesis Lic. Yogyakarta, Universitas Atma Jaya. s. p.
- Shen, J; Yuan, L; Zhang, J; Li, H; Bai, Z; Chen, X; Zhang, W. 2011. Phosphorus dynamics: From soil to plant. *Plant Physiol* 156(3):997-1005. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.111.175232>
- Souri, MK; Hatamian, M. 2019. Aminochelates in plant nutrition: A review. *J Plant Nutr* 42(1):67-78. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1549671>
- Surjushe, A; Vasani, R; Saple, DG. 2008. *Aloe vera*: A short review. *Indian J Dermatol* 53(4):163-166. DOI: <https://doi.org/10.4103/0019-5154.44785>
- Tucuch-Haas, CJ; Cen-Caamal, JC; Kancab-Uc, RA; Tucuch-Haas, JI. 2022. Uso de gel de *Aloe vera* en la producción de plántulas de *Capsicum chinense*. *Biotecnia* 24(1):116-121. DOI: <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i1.1542>
- Wang, Y; Lambers, H. 2020. Root-released organic anions in response to low phosphorus availability: Recent progress, challenges and future perspectives. *Plant Soil* 447:135-156. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-019-03972-8>
- Zar, JH. 2010. *Biostatistical Analysis*. 4 ed. Hoboken, Prentice Hall. 944 p.

