

## ESTRÉS HIPÓXICO EN LA ZONA RADICULAR DE LA ARVEJA (*Pisum sativum* L.) BAJO DIFERENTES REGÍMENES HÍDRICOS SUBÓPTIMOS Y SISTEMAS DE COBERTURA DEL SUELO E IMPACTO EN EL CRECIMIENTO

### Hypoxic stress in the root zone of pea (*Pisum sativum* L.) under different suboptimal water regimes and soil cover systems and impact on growth

Quiroga Sossa Brigido Moises<sup>1\*</sup>, Mamani Montecinos Paola Andrea<sup>2</sup>, Pérez Ticona José Luis<sup>3</sup>,  
Ramos Choque Cristina<sup>4</sup>, Sanchez Quispe Esther Dayzy<sup>5</sup>

#### RESUMEN

El estrés por hipoxia en plantas por exceso de agua, limita la productividad agrícola en cultivos como la arveja (*Pisum sativum* L.), afectando procesos fisiológicos como la respiración radicular y la fotosíntesis. Con la necesidad de optimizar el uso del agua en la agricultura, este estudio evaluó el efecto de diferentes niveles de saturación hídrica en la zona radicular (25 %, 50 %, 75 % y 100 %) sobre el crecimiento de la arveja, comparando sistemas con cobertura (cerrado) y sin cobertura (abierto) en el estrés hipóxico y eficiencia hídrica. El estudio se realizó en Viacha La Paz, Bolivia (3.857 m s.n.m.), en el año 2019. Se midieron variables (altura, diámetro del tallo, área foliar, IAF, TCA, TCR, TAN y consumo de agua), bajo dos sistemas. Los muestreos destructivos se realizaron mensualmente durante 126 días. El tratamiento al 75 % de saturación en sistema cerrado mostró los mejores resultados en altura (79,70 cm), área foliar (545 cm<sup>2</sup>), IAF (1,0265) y TAN (0,0023 g/cm<sup>2</sup> día). En sistema abierto, el mismo nivel destacó en TCA (1,0179 g/día) y TCR (0,1475 g/g día). Los sistemas abiertos con 75 % y 100 % de saturación registraron mayor consumo hídrico (12.860,63 cm<sup>3</sup> y 12.583,60 cm<sup>3</sup>), mientras que los cerrados con 100 % y 75 % consumieron menos agua (9.089,10 cm<sup>3</sup> y 8.781,00 cm<sup>3</sup>). El nivel del 75 % de saturación en sistema cerrado optimizó el crecimiento de la arveja y redujo el consumo de agua, demostrando ser una estrategia eficiente para cultivos en condiciones de limitación hídrica, minimizando el estrés hipóxico sin comprometer la productividad.

**Palabras clave:** *Pisum sativum* L., hipoxia, aireación, capacidad de campo, crecimiento, tasa.

#### ABSTRACT

Hypoxia stress in plants due to excess water limits agricultural productivity in crops such as peas (*Pisum sativum* L.), affecting physiological processes such as root respiration and photosynthesis. With the need to optimize water use in agriculture, this study evaluated the effect of different levels of water saturation in the root zone (25 %, 50 %, 75 % and 100 %) on pea growth, comparing systems with cover (closed) and without cover (open) on hypoxic stress and water efficiency. The study was conducted in Viacha La Paz, Bolivia (3,857 m a.s.l.), in 2019. Variables (height, stem diameter, leaf area, IAF, TCA, TCR, TAN and water consumption) were measured under two systems. Destructive sampling was carried out monthly for 126 days. The 75 % saturation treatment in a closed system showed the best results in height (79.70 cm), leaf area (545 cm<sup>2</sup>), IAF (1.0265) and TAN (0.0023 g/cm<sup>2</sup> day). In the open system, the same level stood out in TCA (1.0179 g/day) and TCR (0.1475 g/g day). The open systems with 75 % and 100 % saturation registered higher water consumption (12,860.63 cm<sup>3</sup> and 12,583.60 cm<sup>3</sup>), while the closed systems with 100 % and 75 % consumed less water (9,089.10 cm<sup>3</sup> and 8,781.00 cm<sup>3</sup>). The 75% saturation level in the closed system optimized pea growth and reduced water consumption, proving to be an efficient strategy for crops under conditions of water limitation, minimizing hypoxic stress without compromising productivity.

**Keywords:** *Pisum sativum* L., hypoxia, aeration, field capacity, growth, rate.

#### Artículo original

DOI: <https://doi.org/10.53287/jcov4467tf45g>

Recibido: 11/04/2025

Aceptado: 22/06/2025

<sup>1</sup> \*Autor de correspondencia: Investigador, Carrera Ingeniería en Producción y Comercialización Agropecuaria, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0001-9797-3965>. [bmquiroga@umsa.bo](mailto:bmquiroga@umsa.bo)

<sup>2</sup> Investigador, Carrera Ingeniería en Producción y Comercialización Agropecuaria, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0008-6258-364.2020>. [ing.paola.mamani@gmail.com](mailto:ing.paola.mamani@gmail.com)

<sup>3</sup> Investigador, Carrera Ingeniería en Producción y Comercialización Agropecuaria, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0006-8816-0667>. [ing.joseph.perez@gmail.com](mailto:ing.joseph.perez@gmail.com)

<sup>4</sup> Investigador, Carrera Ingeniería en Producción y Comercialización Agropecuaria, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0004-4516-3396.20>. [ramoschc1996@gmail.com](mailto:ramoschc1996@gmail.com)

<sup>5</sup> Investigador, Carrera Ingeniería en Producción y Comercialización Agropecuaria, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0002-2826-6831>. [dayzesan@gmail.com](mailto:dayzesan@gmail.com)

## INTRODUCCIÓN

El estrés por hipoxia en plantas, generado por condiciones de anegamiento o riego excesivo, es un factor crítico que limita la productividad agrícola, especialmente en cultivos sensibles como la arveja (*Pisum sativum* L.). Este fenómeno afecta procesos fisiológicos clave, como la respiración radicular, la fotosíntesis y la absorción de nutrientes, lo que puede llevar a reducciones significativas en el rendimiento. Dada la creciente variabilidad climática y la necesidad de optimizar el uso del agua en la agricultura, comprender los efectos de los regímenes hídricos subóptimos en cultivos leguminosos adquiere relevancia tanto científica como práctica.

La arveja es una de las primeras leguminosas cultivadas por el hombre en la antigüedad, siendo fundamental en la alimentación humana durante siglos. Registros históricos escritos evidencian su cultivo hace más de 7.000 años a.C. (De Bernardi, 2017). El estrés por inundación genera en la planta cambios que pueden ser irreversibles como disminución de la permeabilidad de las membranas, peroxidación de lípidos, degradación de proteínas clorofilas, disminución de la expansión foliar y cierre estomático, el riego continuo busca prevenir la escasez de agua, pero en volúmenes pequeños, la aireación radicular podría verse comprometida, llevando potencialmente a hipoxia (Mugnai et al., 1999). Las plantas acuáticas transportan oxígeno a través de sus tejidos hacia la zona radicular. Esta liberación de oxígeno crea microzonas aerobias alrededor de las raíces, lo cual favorece la actividad de microorganismos degradadores de contaminantes en aguas residuales; sin embargo, la ausencia de oxígeno puede inhibir la respiración aerobia de las raíces y causar la acumulación de sustancias dañinas, por lo tanto, el transporte de oxígeno es crucial para el funcionamiento de estos sistemas de tratamiento biológico (Domínguez, 2003). La deficiencia de oxígeno en la zona radicular, causada por exceso de agua estancada que desplaza el aire del suelo, puede reducir significativamente el crecimiento de las raíces, la tasa de fotosíntesis, el contenido de clorofila en las hojas y en última instancia, la producción de materia seca de la planta.

Niveles adecuados de oxígeno en el suelo favorecen una mayor tasa fotosintética, lo que conduce a una mejor producción de carbohidratos y un desarrollo radicular más óptimo (Khondaker y Ozawa, 2007). Fischer y Orduz-Rodríguez (2012), señalan que primero mueren las raíces finas y fibrosas. El estrés por falta de oxígeno de las plantas, es el resultado de lluvia excesiva, inundaciones, anegamiento del suelo, inmersión de las raíces o compactación del suelo Wang et al. (2021) citado por Habibi (2023). Las condiciones de estancamiento en el suelo provocan una reducción mucho más rápida de la disponibilidad de oxígeno, lo que genera condiciones de estrés más intensas para las plantas en comparación con aguas de inundación en movimiento, donde la turbulencia facilita la solubilización del oxígeno (Kreuzwieser y Rennenberg, 2014). En suelos inundados, el potencial redox disminuye, lo cual es un indicador del bajo nivel de oxígeno presente. Esta condición de inundación también inhibe la actividad de enzimas como la  $\beta$ -D-glucosidasa y la fosfatasa, que están involucradas en los ciclos del carbono, nitrógeno, fósforo y azufre. Estas condiciones cambiantes en el suelo generan efectos negativos en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Jimenez et al., 2012). El comportamiento de oxígeno en el suelo se denomina normoxia, donde el contenido de oxígeno es suficiente; anoxia, que implica la ausencia total de oxígeno en el suelo y está relacionada con el encharcamiento prolongado, condición que eventualmente llevará a la muerte de las plantas; e hipoxia, caracterizada por un bajo contenido de oxígeno en el suelo, asociada con el encharcamiento temporal o un drenaje pobre (o lento) del suelo (Schaffer, 2006). En suelos anegados o inundados, la difusión de oxígeno se ve significativamente reducida debido a que el agua reemplaza el aire en los poros del suelo, presentando una resistencia a la difusión del oxígeno 10.000 veces mayor que en el aire; esta deficiencia de oxígeno representa un estrés severo para las plantas, ya que funciones cruciales como la respiración mitocondrial, la oxidación y los procesos de oxigenación no pueden llevarse a cabo de manera normal (Koppitz, 2004). El oxígeno es un factor limitante para el crecimiento y desarrollo de las plantas en condiciones de inmersión y anegamiento; las plantas están sujetas a un rango variable de concentraciones de oxígeno, como normoxia, hipoxia y anoxia, que pueden variar con el tiempo y el espacio (Zahra, 2021).

Las plantas desarrollan estrategias adaptativas dirigidas a la supervivencia de estas diversas condiciones de anegamiento, que pueden variar en frecuencia, duración, momento y profundidad, estas adaptaciones pueden incluir cambios fisiológicos y morfológicos, como la formación de aerénquima en respuesta a períodos prolongados de inundación (Blom y Voesenek, 1996). Específicamente, la hipoxia y anoxia pueden disminuir la disponibilidad de nitrógeno en el suelo, un nutriente esencial para el desarrollo vegetal, así como inhibir la absorción de agua e iones por las raíces, limitando el suministro de recursos necesarios para el crecimiento; además, la respuesta inicial a la inundación incluye el cierre estomático, inducido por un aumento en el ácido abscísico (ABA), lo que reduce la entrada de CO<sub>2</sub> y, por ende, la tasa fotosintética, la cual es fundamental para la producción de energía y biomasa para el crecimiento. La anoxia también puede disminuir el contenido de rubisco, una enzima clave en la fotosíntesis, lo que limita aún más la capacidad de la planta para crecer (Herrera et al., 2010).

La anoxia radicular induce una serie de cambios fisiológicos, y aunque la respiración anaeróbica puede ser una respuesta inicial, su prolongación puede llevar a la acumulación de sustancias nocivas en la rizosfera, tales como acetaldehído y etanol, lo que puede causar daño radicular o incluso la muerte de la planta (Liu et al., 2022). Las condiciones de hipoxia dificultan la absorción activa de nutrientes minerales por las raíces, una disminución en la absorción de nutrientes esenciales puede indirectamente afectar la fotosíntesis, ya que este proceso requiere de varios nutrientes para el funcionamiento de sus componentes, como la clorofila y las enzimas; en condiciones anaeróbicas se produce una acumulación de etileno, la cual puede inducir clorosis foliar, un síntoma ocasionado por una disminución de las citoquininas procedentes de las raíces, lo que a su vez puede reducir la capacidad fotosintética de la planta (Pardos, 2004).

La hipoxia impone una demanda energética a la planta al requerir ajustes metabólicos y la activación de mecanismos de tolerancia, mientras que al mismo tiempo limita la capacidad de la planta para generar energía de manera eficiente a través de la respiración aeróbica (Domingo et al., 2002; Kozłowski, 1997). La oxigenación adecuada de las raíces es esencial para el transporte de nutrientes y la producción de energía metabólica en las plantas; las raíces dependen críticamente de un nivel óptimo de oxígeno para su funcionamiento saludable, la falta de oxígeno impide la absorción de nutrientes y la respiración de las raíces, lo que resulta en un crecimiento precario e incluso la muerte de la planta; por lo tanto, un buen suministro de oxígeno en la zona radicular es indispensable para el desarrollo y la supervivencia de los cultivos (Samperio, 1997). Según Caicedo-Camposano et al. (2019), en condiciones de falta de oxígeno, el metabolismo de las raíces puede cambiar a vías anaeróbicas, como la fermentación, que son menos eficientes en la producción de energía y pueden generar la acumulación de compuestos tóxicos como el etanol y el lactato en la zona radicular; para intentar mitigar los efectos de la hipoxia, algunas plantas, incluyendo el maíz, pueden desarrollar adaptaciones morfológicas como la formación de raíces adventicias o aerénquima, un tejido con espacios de aire que facilita el transporte de oxígeno desde las partes aéreas hacia las raíces sumergidas, la absorción de macronutrientes disminuye, debido a la mortalidad de la raíz, a la pérdida de micorrizas, y a la supresión del metabolismo de la raíz (Kozłowski, 1997). Para Khondaker y Ozawa (2007), la deficiencia de oxígeno en el aire del suelo afecta el crecimiento de las plantas, el anegamiento reduce tanto el crecimiento de las raíces grandes como de las pequeñas, la disminución del contenido de clorofila reduce la tasa de fotosíntesis y la acumulación de carbohidratos, lo que a su vez disminuye la materia seca tanto de la raíz como del tallo.

Según Neuman (1993), la reducción en el crecimiento foliar podría estar relacionada con cambios en la reología de la pared celular, ya que el crecimiento celular está controlado por la turgencia y las características de la pared; se indica que tanto la restricción de la raíz como la hipoxia de la raíz causan reducción en la capacidad de aflojamiento de la pared inducido por ácido, esta reducción en el aflojamiento de la pared celular podría influir en la expansión celular y, por lo tanto, en el área foliar. Los periodos cortos con deficiencia de oxígeno normalmente derivan en la inhibición de la expansión de las hojas y una reducción en el crecimiento de la raíz y de los brotes, la falta de aire deteriora el sistema radicular, lo cual subsecuentemente afecta la parte aérea de la planta, incidiendo en el crecimiento de los brotes y provocando abscisión de hojas y quemaduras en las puntas

(Ferreira et al., 2006). La falta de oxígeno, causada por el anegamiento, interfiere con la respiración normal de la planta a nivel mitocondrial. La ausencia de oxígeno como aceptor de electrones lleva a una acumulación de NADH y una reducción en la producción de ATP, la principal fuente de energía de la célula, además, se detiene la regeneración del NAD<sup>+</sup>, esencial para la glicólisis, lo que resulta en una disminución general de la energía disponible para los procesos metabólicos de la planta, pueden cambiar su metabolismo de respiración aeróbica a la vía de la fermentación, como un mecanismo adaptativo debido a la falta de oxígeno (Jimenez et al., 2012).

Las plantas responden a la falta de oxígeno con un incremento rápido en la producción de lactato, lo que causa una disminución del pH en el citoplasma que, a su vez, activa la fermentación etanólica (Kato-Noguchi, 2001). La falta de oxígeno, principal efecto de la inundación, incrementa la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) tanto en la mitocondria como en el cloroplasto, como respuesta a este aumento de ROS, se activa el sistema de defensa antioxidante de la planta, considerándose esta una respuesta a corto plazo; sin embargo, bajo condiciones de inundación, la capacidad de la planta para eliminar ROS disminuye, lo que provoca la acumulación de peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Esta acumulación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> induce la peroxidación lipídica, incrementa la permeabilidad de la membrana y acelera la senescencia foliar (Jimenez et al., 2012). Según Chen et al. (2024) el anegamiento induce una serie de respuestas fisiológicas y bioquímicas adversas en las plantas, incluyendo la limitación del intercambio gaseoso, reducción de la fotosíntesis y el metabolismo energético, y la acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS). Durante la primera etapa (1-13 días de inundación), a pesar de la disminución en la tasa de difusión de oxígeno (ODR) y el potencial redox del suelo (Eh), la masa seca de los brotes no disminuye, y se incrementa la concentración de sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARs), un indicador de daño oxidativo, junto con un incremento en la actividad de la enzima superóxido dismutasa (SOD), que es parte del sistema de defensa antioxidante, sin embargo en la segunda etapa (13-27 días), se caracteriza por una disminución en la concentración de TBARs y las actividades de SOD y glutatión reductasa (GR), así como en las concentraciones de pigmentos y la masa seca de los brotes; es importante señalar que el drenaje del suelo inundado resultó en concentraciones elevadas de TBARs y también aumentó las actividades de SOD y GR, sugiriendo que la respuesta antioxidante juega un papel crucial en la tolerancia de *Vicia faba* al estrés hipóxico y post hipóxico asociado con la inundación y el drenaje (Balakhnina et al., 2010).

La optimización del riego es esencial para garantizar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, particularmente en regiones con alta precipitación o drenaje limitado. Evaluar cómo los niveles de saturación del suelo (25 %, 50 %, 75 % y 100 %) afectan parámetros fisiológicos en arveja permitirá diseñar estrategias de manejo que minimicen el estrés hipóxico sin comprometer la productividad. Además, comparar sistemas abiertos (sin cobertura) y cerrados (con cobertura) se analiza el rol de la evapotranspiración en la dinámica del oxígeno radicular. Este estudio contribuirá a la literatura científica al integrar aspectos fisiológicos, agronómicos y ambientales, ofreciendo bases técnicas para el cultivo eficiente de leguminosas en condiciones de riesgo hídrico. El exceso de agua en el suelo reduce la disponibilidad de oxígeno para las raíces, generando estrés hipóxico que limita el crecimiento y la productividad de la arveja. Sin embargo, no está claro cómo diferentes niveles de saturación hídrica (por debajo de la capacidad de campo) interactúan con el potencial evaporativo del suelo (abierto vs. cerrado) para modular este estrés. Tampoco se ha cuantificado su impacto en parámetros fisiológicos clave, como la expansión foliar, la tasa de asimilación neta o la eficiencia fotosintética.

El objetivo del estudio fue evaluar el impacto de regímenes hídricos subóptimos (25 %, 50 %, 75 % y 100 % de saturación en la zona radicular, todos por debajo de la capacidad de campo) sobre parámetros fisiológicos clave (altura, área foliar, IAF, TCA, TCR, TAN) en arveja (*Pisum sativum* L.), comparando dos sistemas con distinto potencial evaporativo: suelo sin cobertura (abierto) y suelo con cobertura (cerrado), para determinar su relación con la inducción de estrés hipóxico en raíces y optimizar el uso eficiente del agua.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización

El trabajo se realizó en la ciudad de Viacha, La Paz Bolivia, en la Carrera de Ingeniería en Producción y Comercialización Agropecuaria dependiente de la Universidad Mayor de San Andrés, la investigación fue desarrollada durante el periodo comprendido entre agosto y diciembre del 2019. La Carrera está ubicada geográficamente: 16°38'52"S 68°17'32"W y una altitud de 3857 m s.n.m., posee un clima frío y seco la mayor parte del año con una estación lluviosa entre diciembre y febrero. Las temperaturas máximas oscilan entre 16 y 18 °C y las mínimas entre 7 y 9 °C. Posee una precipitación anual de 500 mm (INE, 2005).

### Metodología

#### *Unidades experimentales*

El trabajo se realizó bajo cuatro tratamientos y dos subtratamientos con cuatro repeticiones, con un total de 32 unidades experimentales independientes en macetas, con un volumen aproximado de 10 litros. Un sustrato con 1 parte de abono, 1 parte de turba, 2 partes de suelo.

Los tratamientos consistieron en reposición de agua al 100 %, 75 %, 50 %, y 25 %, por debajo de su capacidad de campo. Dos subtratamientos en dos sistemas, abierto y cerrado. Sistema con superficie de maceta abierta o expuesta, con la superficie del suelo de la maceta en contacto directo con el ambiente, permitiendo la evaporación. Sistema con superficie de maceta cerrada o cubierta, con la superficie del suelo en la maceta fue cubierta, limitando o previniendo la pérdida de agua por evaporación directa.

#### *Siembra y cosecha*

Se utilizó semillas de arveja, se sembraron ocho semillas pre-germinadas en grupos de dos por unidad experimental, el ensayo se realizó desde el 07 de agosto del año 2019 (fecha de siembra) al 11 de diciembre del año 2019 (última evaluación). La evaluación se realizó cada siete días, y tres muestreos destructivos de biomasa (cosecha) cada 14 días aproximadamente. La materia seca se determinó a una temperatura de 74 °C determinando el peso constante.

#### *Capacidad de campo*

La capacidad de campo del sustrato se determinó mediante la fórmula propuesta por Morales (2019).

$$CC = \frac{WSh - WSs}{WSs} \cdot 100$$

Dónde: CC = capacidad de campo (%); WSh = peso de sustrato húmedo (g); WSs = peso de sustrato seco (g).

La humedad a capacidad de campo se determinó con el sustrato completamente seco, se adicionó agua a saturación restando el agua escurrida hasta tres días posteriores (Silva, et al., 2015), con lo que se determinó el agua retenida en cada unidad experimental, la cual fue la base para calcular la reposición en base a la CC.

#### *Variables evaluadas*

Para el presente trabajo se evaluó: altura de la planta, diámetro de tallo, área foliar, índice de área foliar, tasa de crecimiento absoluta, tasa de crecimiento relativa, tasa de asimilación neta, total de agua de repuesta.

*Altura de la planta (cm)*, se determinó desde la base de la planta hasta el ápice, el seguimiento y recolección de datos se realizó una vez por semana, con un total de 16 mediciones.

*Diámetro de tallo (cm)*, se determinó en la base de la planta, el seguimiento y recolección de datos se realizó una vez por semana con un total de 16 mediciones.

*Área foliar (cm<sup>2</sup>)*, fue determinado mediante la relación área-peso con un total de 16 mediciones. Para obtener el área de la hoja, se pesó el área delimitada en la muestra, posteriormente se realizó la relación matemática con el peso total de las hojas, de acuerdo a la siguiente ecuación (Morales, 2019).

$$\text{Área foliar} = \frac{\text{área bocado}}{\text{peso bocado}} \cdot \text{peso total}$$

*Índice de área foliar*, se determinó, con la relación del área foliar- área del suelo cubierta por el área foliar, con un total de 16 mediciones, de acuerdo a la siguiente ecuación (Morales, 2019).

$$\text{Índice área foliar} = \frac{\text{área foliar}}{\text{área del suelo}}$$

*Tasa de crecimiento absoluta*, se midió durante el crecimiento de la arveja, cosechando mensualmente, determinando la biomasa y materia seca, se determinó mediante la siguiente ecuación (Hunt, 1978 citado por Morales, 2019).

$$TCA = \frac{W2 - W1}{(t2 - t1)}$$

Dónde: TCA = tasa de crecimiento absoluta (g/día); W1b = peso seco inicial (g); W2 = peso seco final (g); t2 - t1 = intervalo de tiempo transcurrido entre evaluaciones (días).

*Tasa de crecimiento relativa*, se evaluó durante el crecimiento de la arveja, cosechando mensualmente, determinando la biomasa y materia seca. Para la obtención de la tasa de crecimiento relativa, se empleó a la siguiente ecuación (Santos et al., 2010).

$$TCR = \frac{\ln W2 - \ln W1}{(t2 - t1)}$$

Dónde: TCR = tasa de crecimiento relativa (g/g día); W1 = peso seco inicial (g); W2 = peso seco final (g); t2 - t1 = intervalo de tiempo transcurrido entre evaluaciones (días); Ln = logaritmo natural.

*Tasa de asimilación neta*, a partir de la materia seca y el área foliar se determinó la tasa de asimilación neta. La evaluación se determinó mediante la fórmula propuesta por Hunt (1978) citado por Morales (2019).

$$TAN = \frac{W2 - W1}{A2 - A1} \cdot \frac{\ln A2 - \ln A1}{t2 - t1}$$

Donde: TAN = tasa de asimilación neta (g/cm<sup>2</sup> día); W1 = peso seco inicial (g); W2 = peso seco final (g); A1 = área foliar inicial (cm<sup>2</sup>); A2 = área foliar final (cm<sup>2</sup>); t2 - t1 = intervalo de tiempo transcurrido entre dos evaluaciones (días); ln = logaritmo natural.

Reposición de agua, fue hallada mediante la siguiente fórmula:

$$RA = PUEF - PUEI$$

Dónde: RA = reposición de agua (cm<sup>3</sup>); PUEF = peso unidad experimental (g); PUEI = peso unidad experimental final (g).

El análisis de la información fue mediante regresión con una hoja electrónica Excel.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Altura de la planta de arveja

La altura de planta de arveja (AP) en respuesta a los cuatro niveles de reposición de agua y dos sistemas de cobertura de la superficie de suelo presentan diferencias numéricas, ajustados los datos se genera una función polinómica de tercer orden (Figura 1), con coeficientes de determinación altos en los ocho tratamientos (Tabla 1). El tratamiento B6C075% alcanzó una altura de 79,70 cm, donde la función ajustada está por encima de los demás tratamientos. Por debajo se encuentra el tratamiento B2A075% con una AP de 73,40 cm, al igual que la función ajustada. Los tratamientos B1A100%, B5C100% se encuentran por debajo de los anteriores tratamientos y por debajo el tratamiento B3A050%. Finalmente muy por debajo se encuentran los tratamientos B8C025% B4A025% B7C050%, evaluados a los 112 días.

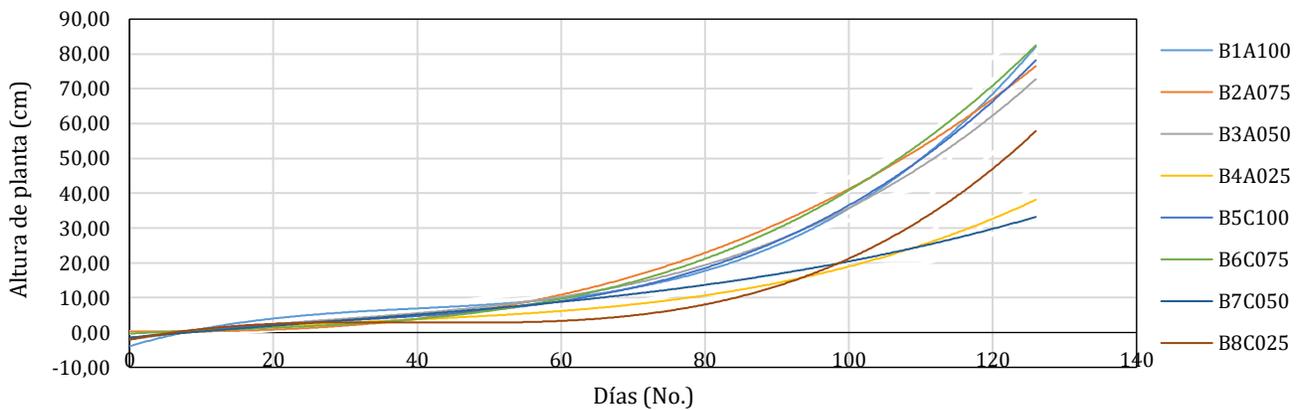


Figura 1. Altura de la planta (AP) de arveja (cm) en condición de estrés hipóxico en la zona radicular bajo diferentes regímenes hídricos subóptimos y sistemas de cobertura de suelo e impacto en el crecimiento.

El tratamiento B6C075% y B2A075%, para AP de arveja (Figura 1) presentan funciones ajustadas que se destacan en comparación a los demás tratamientos con coeficientes de determinación 0,9956; 0,9932 respectivamente, saturando el suelo con agua un 75 % debajo de su capacidad de campo en ambos sistemas (Tabla 1), saturando el suelo al 75 % queda un 25 % de espacio aéreo que permite la circulación del aire en comparación a los tratamientos de saturación completa. Los tratamientos al 100 % de saturación en ambos sistemas (B1A100%, B5C100%) con 0 % de espacio aéreo se encuentran por debajo de los tratamientos al 75 % con coeficientes de determinación de 0,9649 y 0,9935. Yetisir et al. (2006), menciona el anegamiento causa inanición de oxígeno, que surge de la lenta difusión de gases en el agua y del consumo de oxígeno por microorganismos y raíces de las plantas. El suelo inundado rápidamente se queda sin oxígeno a profundidades de pocos milímetros, restringiendo el rendimiento de los cultivos sensibles a inundaciones. El tratamiento B3A050% presenta una altura aproximada a los niveles de 75 % de reposición de agua.

En comparación a los tratamientos descritos, los tratamientos restantes no se ajustan a un patrón regular y por debajo de los valores de los tratamientos destacados, estos por su baja saturación presentan mayor espacio aéreo para que el oxígeno circule libremente en la zona radicular, sin embargo la baja disponibilidad de agua limita el crecimiento de la planta de arveja, Shrivastava y Kumar (2015) citados por Contreras-Medina y Melo-Sabogal (2022), señalan que la escasez de agua se ha convertido en un factor limitante para la producción agrícola y que sin agua la sobrevivencia de las plantas se ve comprometida disminuyendo el rendimiento de los cultivos entre un 20 y 50 %.

Tabla 1. Funciones y coeficientes de determinación para altura de planta (AP) de arveja (cm) en condición de estrés hipóxico en la zona radicular bajo diferentes regímenes hídricos subóptimos y sistemas de cobertura de suelo e impacto en el crecimiento.

Tratamiento	Variable (X)	Variable (Y)	Ecuación de regresión	r <sup>2</sup>
B1A100%	Días	Altura	$y = 0,0001x^3 - 0,0126x^2 + 0,6077x - 3,9291$	0,9649
B2A75%	Días	Altura	$y = 3E-05x^3 + 0,0017x^2 - 0,0214x + 0,3689$	0,9903
B3A50%	Días	Altura	$y = 6E-05x^3 - 0,0053x^2 + 0,3044x - 2,0328$	0,9905
B4A25%	Días	Altura	$y = 4E-05x^3 - 0,0038x^2 + 0,2284x - 1,5841$	0,9701
B5C100%	Días	Altura	$y = 7E-05x^3 - 0,006x^2 + 0,2897x - 1,6468$	0,9935
B6C75%	Días	Altura	$y = 5E-05x^3 - 0,002x^2 + 0,1045x - 0,3112$	0,9956
B7C50%	Días	Altura	$y = 1E-05x^3 - 0,0012x^2 + 0,1883x - 1,4739$	0,9854
B8C25%	Días	Altura	$y = 9E-05x^3 - 0,0104x^2 + 0,4003x - 2,0496$	0,9876

El crecimiento longitudinal del tallo y dominancia apical en plantas herbáceas queda reducido por efecto del anegamiento en la zona radicular, además de incrementarse la cantidad de etileno (Pardos, 2004). La arquitectura específica de crecimiento de una planta, caracterizada por su escaso desarrollo foliar y tipo de ramificación, afecta directamente su capacidad para interactuar con un factor ambiental crucial para el crecimiento (Barrera et al., 2010). Aldana y García (2012) citados por Moreno y Fischer (2014), señalan que el anegamiento en la zona radicular por un periodo de 6 a 8 días redujo el crecimiento longitudinal del tallo considerablemente.

### Diámetro de tallo de la planta de arveja

El tratamiento B1A100% y B2A075%, para diámetro de tallo (DT) de arveja (Figura 2) presentan funciones ajustadas que se destacan en comparación a los demás tratamientos con coeficientes de determinación 0,9672; 0,959 respectivamente, saturando el suelo con agua al 100 y 75 % en el sistema abierto (Tabla 2), en la saturación al 100 % no queda espacio aéreo (0), saturando el suelo al 75 % queda un 25 % de espacio aéreo que permite la circulación del aire en comparación a los otros tratamientos, al 100 % el grosor del tallo es mayor al 75 % de saturación con 0,05 cm de diferencia. Las condiciones adversas de factores bióticos (microorganismos) y abióticos (temperatura, anegamiento, salinidad, otros) que influyen en la concentración de oxígeno en la rizósfera, pueden llevar a una rápida caída en los niveles de oxígeno y afectar la morfología y el metabolismo (Moreno et al., 2020). En manglares, bajo condiciones de inundación, se observan cambios en el crecimiento del tallo (aumento en diámetro y grosor del córtex y médula) y una disminución en el tamaño de los vasos del xilema. Estos cambios sugieren una adaptación para reducir la pérdida de oxígeno en un ambiente con baja disponibilidad del mismo en la zona de las raíces (Madhavan et al., 2024). Morard et al. (2000); Dutilleul et al.; Eckhard et al. (2013) citados por Moreno et al. (2020), señalan que la hipoxia tiene efectos inmediatos tanto en el crecimiento de la raíz como del vástago, lo que a su vez impacta el desarrollo general de la planta.

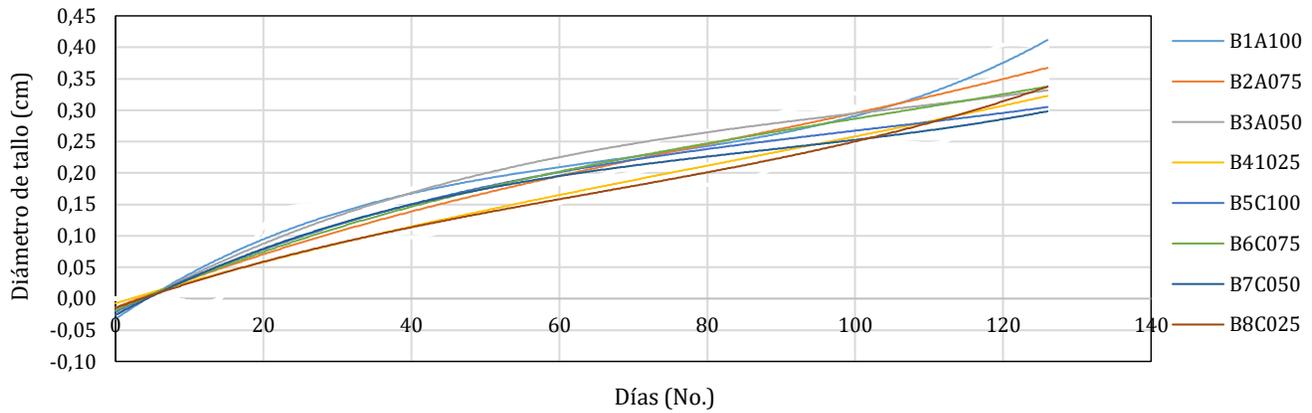


Figura 2. Diámetro de tallo (DT) de la planta de arveja (cm) en condición de estrés hipóxico en la zona radicular bajo diferentes regímenes hídricos subóptimos y sistemas de cobertura de suelo e impacto en el crecimiento.

Las bajas concentraciones de oxígeno inducen una vía de degradación de la sacarosa específica de la planta y que conserva la energía, lo que disminuye el consumo de oxígeno y mejora su rendimiento. Las bajas concentraciones de oxígeno también provocan adaptaciones morfológicas a largo plazo, que permiten disminuir la respiración por volumen tisular y aumentar la entrada de oxígeno (Geigenberger, 2003). Una adecuada aireación (AP75%) se asocia con un mayor crecimiento en altura y que el crecimiento en respuesta a la aireación puede ser modelado con precisión, existe una relación positiva entre el nivel de aireación y el crecimiento de la parte aérea de la planta (Quiroga et al., 2024).

Tabla 2. Funciones y coeficientes de determinación para diámetro de tallo (DT) de planta de arveja (cm) en condición de estrés hipóxico en la zona radicular bajo diferentes regímenes hídricos subóptimos y sistemas de cobertura de suelo e impacto en el crecimiento.

Tratamiento	Variable (X)	Variable (Y)	Ecuación de regresión	r <sup>2</sup>
B1A100%	Días	Diámetro	$y = 5E-07x^3 - 1E-04x^2 + 0,0081x - 0,0324$	0,9672
B2A75%	Días	Diámetro	$y = 1E-07x^3 - 3E-05x^2 + 0,0048x - 0,0143$	0,9590
B3A50%	Días	Diámetro	$y = 2E-07x^3 - 5E-05x^2 + 0,0066x - 0,0256$	0,9640
B4A25%	Días	Diámetro	$y = 6E-08x^3 - 2E-05x^2 + 0,0036x - 0,0074$	0,9453
B5C100%	Días	Diámetro	$y = 1E-07x^3 - 4E-05x^2 + 0,0058x - 0,021$	0,9640
B6C75%	Días	Diámetro	$y = 1E-07x^3 - 3E-05x^2 + 0,0053x - 0,0187$	0,9642
B7C50%	Días	Diámetro	$y = 2E-07x^3 - 6E-05x^2 + 0,0063x - 0,0261$	0,9640
B8C25%	Días	Diámetro	$y = 2E-07x^3 - 3E-05x^2 + 0,0043x - 0,0148$	0,9752

### Área foliar de la planta de arveja

El área foliar (AF) de la planta de arveja en respuesta a los cuatro niveles de reposición de agua y dos sistemas de cobertura de la superficie de suelo presentan diferencias, ajustados los datos se genera una función polinómica de tercer orden (Figura 3), con coeficientes de determinación altos en los ocho tratamientos (Tabla 3). El tratamiento B6C075% alcanzó un área de 545 cm<sup>2</sup>, con una función ajustada con un coeficiente de determinación de 0,9703. Por debajo se encuentra el tratamiento B2A075% con un AF de 480 cm<sup>2</sup>, con un r<sup>2</sup> 0,9847. Los tratamientos B1A100%, B5C100% con 340,99 y 415 cm<sup>2</sup> respectivamente, seguidos por los tratamientos B8C025%, B3A050%, B4A025%, finalmente B7C050%.

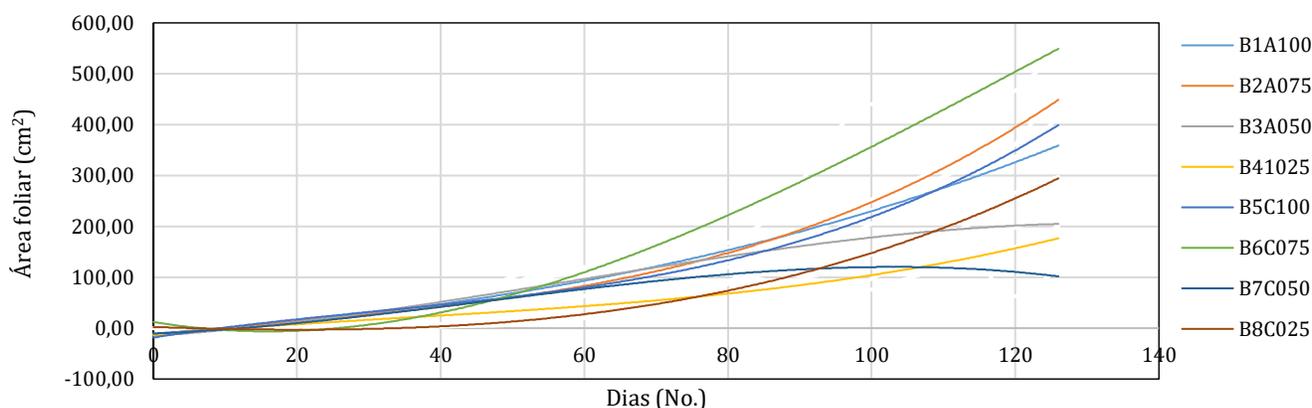


Figura 3. Área foliar (AF) de la planta de arveja (cm<sup>2</sup>) en condición de estrés hipóxico en la zona radicular bajo diferentes regímenes hídricos subóptimos y sistemas de cobertura de suelo e impacto en el crecimiento.

La falta de oxígeno puede llevar a la acumulación de almidón en las hojas debido a la falta de transporte a las raíces bajo condiciones de inundación. Los síntomas comunes de anegamiento son la clorosis y el marchitamiento de las hojas (Yetisir et al., 2006). Según Pardos (2004), por hipoxia radicular reducen las citoquininas procedentes de las raíces lo que forman hojas más anchas con clorosis foliar, posteriormente su senescencia y abscisión. Bajo estrés hídrico, la biomasa de la parte aérea, el índice de área foliar se reduce (Gomes, 2000). Quiroga et al. (2024), con 75 % de reposición de agua reportó mayor área foliar en comparación a tratamientos de 50 % y 25 % de reposición.

Tabla 3. Funciones y coeficientes de determinación para el área foliar (AF) de la planta de arveja (cm<sup>2</sup>) en condición de estrés hipóxico en la zona radicular bajo diferentes regímenes hídricos subóptimos y sistemas de cobertura de suelo e impacto en el crecimiento.

Tratamiento	Variable (X)	Variable (Y)	Ecuación de regresión	r <sup>2</sup>
B1A100%	Días	Área foliar	$y = 5E-05x^3 + 0,01091x^2 + 1,0078x - 10,635$	0,9729
B2A75%	Días	Área foliar	$y = 0,0002x^3 - 0,013x^2 + 1,547x - 14,214$	0,9847
B3A50%	Días	Área foliar	$y = -0,0001x^3 + 0,0234x^2 + 0,9473x - 15,169$	0,9386
B4A25%	Días	Área foliar	$y = 0,0001x^3 - 0,0107x^2 + 1,2003x - 12,78$	0,8912
B5C100%	Días	Área foliar	$y = 0,0003x^3 - 0,0256x^2 + 2,1942x - 18,504$	0,9744
B6C75%	Días	Área foliar	$y = -0,0002x^3 + 0,0793x^2 - 2,3674x + 12,181$	0,9703
B7C50%	Días	Área foliar	$y = -0,0002x^3 + 257x^2 + 0,5786x - 10,55$	0,7171
B8C25%	Días	Área foliar	$y = 0,0001x^3 + 0,008x^2 - 0,4732x + 2,2928$	0,9859

De acuerdo a la Tabla 3, los ajustes de los coeficientes de determinación (r<sup>2</sup>) son altos, donde se destacan los tratamientos con un 75 % de reposición de agua en ambos sistemas de cultivo, abierto y cerrado, estos tratamientos al no ser completamente saturados dejan un 25 % de aireación en la zona radicular lo que favorece a un mayor crecimiento del AF, con reducción de agua de la mitad del sistema radicular redujo la tasa de desarrollo del AF casi un 50 %, tanto la expansión de las hojas individuales como la iniciación de nuevas hojas se redujeron por el secado del suelo (Davies y Zhang, 1991).

### Índice de área foliar de la planta de arveja

El índice de área foliar (IAF) de la planta de arveja en respuesta a los cuatro niveles de reposición de agua y dos sistemas de cobertura de la superficie de suelo, presenta el mismo comportamiento del área foliar independiente, los datos generan una función polinómica de tercer orden (Figura 4), con coeficientes de determinación en los ocho tratamientos (Tabla 4). El tratamiento B6C075% alcanzó un IAF de 1,0265, con un coeficiente de determinación de 0,8963. Por debajo se encuentra el tratamiento B2A075% con un IAF de 0,904, con un r<sup>2</sup> 0,77.

Los tratamientos B1A100%, B5C100% con IAF de 0,6423 y 0,7819 respectivamente, seguidos por los tratamientos restantes.

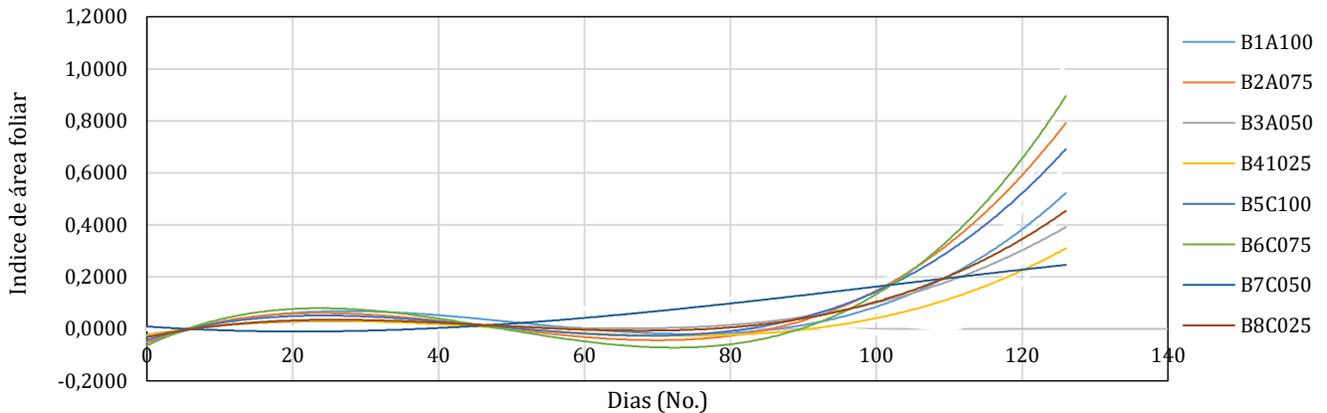


Figura 4. Índice de área foliar (IAF) de la planta de arveja en condición de estrés hipóxico en la zona radicular bajo diferentes regímenes hídricos subóptimos y sistemas de cobertura de suelo e impacto en el crecimiento.

Con el índice de área foliar (IAF) se puede estimar la capacidad fotosintética que es crucial para el crecimiento y su relación con la acumulación de biomasa y el rendimiento bajo condiciones de estrés hídrico (Cándido et al., 2014). Uno de los procesos fisiológicos más sensibles al déficit hídrico en el frijol es el desarrollo foliar, ya que su efecto reduce el AF y acelera la senescencia de las hojas maduras Davies y Zhang (1991) citados por Acosta et al. (2008). En los estudios clásicos de análisis de crecimiento, el AF junto con variables de peso seco de biomasa, número de nudos y ramas, y altura de tallos, puede ser utilizada para describir un resumen de los procesos fisiológicos principales del cultivo y para calcular otros índices derivados como IAF, intensidad de crecimiento relativo y área foliar específica, entre otros (Barradas et al., 1999).

La relación entre las condiciones ambientales, que incluyen riego y el crecimiento mejoran el rendimiento de la planta (Warnock et al., 2006). Drew (1988) citado por Carazo (2016), señala el peso seco radicular fue mayor en las plantas con oxifertirrigación, también la relación área/peso seco de las raíces de estas plantas fue significativamente mayor que en las no tratadas, lo que indica un mayor desarrollo en ambos parámetros pero aún más marcado en cuanto al área específica de dichas raíces; por ello las raíces de plantas oxifertirrigadas tendrán un mayor superficie de contacto con la matriz porosa y la solución del sustrato de la rizosfera y por tanto mayor potencial de captación de nutrientes.

Bonachela et al. (2008) citado por Moreno et al. (2020), señala que en condiciones de hipoxia (inducida por sustratos de partícula fina), el aumento del oxígeno a través de la oxifertirrigación resultó en un mayor crecimiento (mayor AF y peso seco), lo que subraya el impacto negativo de la hipoxia en el crecimiento. Según Smit et al. (1990), discos de hojas de plantas aireadas crecieron menos en savia de xilema de raíces hipóxicas en comparación con la savia de xilema de raíces aireadas, lo que sugiere que la hipoxia radicular puede influir en factores transportados en el xilema que afectan el crecimiento de las hojas.

Tabla 4. Funciones y coeficientes de determinación para el índice de área foliar (IAF) de la planta de arveja (cm<sup>2</sup>) en condición de estrés hipóxico en la zona radicular bajo diferentes regímenes hídricos subóptimos y sistemas de cobertura de suelo e impacto en el crecimiento.

Tratamiento	Variable (X)	Variable (Y)	Ecuación de regresión	r <sup>2</sup>
B1A100%	Días	Índice área foliar	$y = 2E-06X^3 - 0,0003x^2 + 0,0102x - 0,0542$	0,7561
B2A75%	Días	Índice área foliar	$y = 2E-06X^3 - 0,0003x^2 - 0,0106x + 0,0509$	0,8963
B3A50%	Días	Índice área foliar	$y = 9E-07X^3 - 0,0001x^2 + 0,0046x - 0,0231$	0,9
B4A25%	Días	Índice área foliar	$y = 1E-06X^3 - 0,000x^2 + 0,0063x + 0,0266$	0,7881
B5C100%	Días	Índice área foliar	$y = 2E-06X^3 - 0,0002x^2 + 0,0088x - 0,0423$	0,9093
B6C75%	Días	Índice área foliar	$y = 3E-06X^3 - 0,0004x^2 + 0,0136x - 0,0645$	0,8897
B7C50%	Días	Índice área foliar	$y = -2E-07X^3 + 5E-05x^2 - 0,0019x + 0,0092$	0,9024
B8C25%	Días	Índice área foliar	$y = 1E-06X^3 - 0,0002x^2 + 0,0059x - 0,0318$	0,7411

### Tasa de crecimiento absoluta de la planta de arveja

La tasa de crecimiento absoluta (TCA) de la planta de arveja en respuesta a los cuatro niveles de reposición de agua y dos sistemas de cobertura de la superficie de suelo presentan diferencias sustanciales, ajustados los datos se genera una función polinómica de tercer orden (Figura 5), con coeficientes de determinación altos r<sup>2</sup> en los tratamientos destacados (Tabla 5). El tratamiento B2A075% y B6C075% produjeron la mayor cantidad de materia seca con 0,10179 y 0,00929 g/día, con funciones ajustadas con un r<sup>2</sup> de 0,9044 y 0,9215 respectivamente. Por debajo se encuentra los tratamientos B1A100%, B5C100%, con 0,06121 y 0,00929 g/día con r<sup>2</sup> de 0,8253 y 0,4063 respectivamente. Finalmente muy por debajo se encuentran los tratamientos restantes (B3A050%, B4A025%, B7C050%, B8C025%) la materia seca corresponde a los 112 días de evaluación.

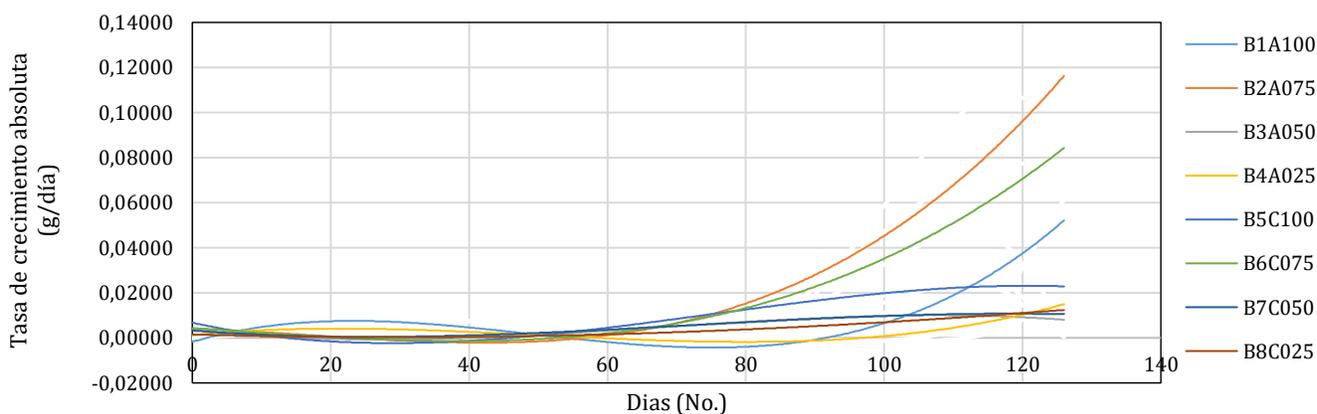


Figura 5. Tasa de crecimiento absoluta (TCA) de la planta de arveja (g/día) en condición de estrés hipóxico en la zona radicular bajo diferentes regímenes hídricos subóptimos y sistemas de cobertura de suelo e impacto en el crecimiento.

La falta de oxígeno en la zona radicular (hipoxia) representa un factor que restringe el crecimiento y el desarrollo de las plantas que se encuentran en suelos encharcados (Bai et al., 2010). La hipoxia induce una rápida acidificación del citoplasma en las puntas de las raíces de arroz y trigo, seguida de una recuperación parcial. También señala la respuesta en el contenido de ATP en relación con los cambios en el pH citoplasmático bajo condiciones de hipoxia (Kulichikhin et al., 2008). El efecto de la restricción de raíces en la morfología y fisiología de plántulas de tomate cultivadas en recipientes de diferente volumen (230, 35 y 7 ml) llenos de vermiculita y regadas con una solución nutritiva completa para prevenir cualquier escasez de agua y nutrientes, se reportó un crecimiento reducido de la planta (Mugnai et al., 1989). Aravena y Garbi (2018), obtuvo plantas con mayores TCA cuando se las cultivó en celdas de mayor volumen, con celdas a mayor volumen ocasiona mayor oxigenación y desarrollo radicular. En condiciones de restricción del riego se reduce el número de raíces principales, así como

la biomasa de la raíz y se incrementa el número de raíces secundarias, con una reducción en la relación de la parte área/raíz (Córdoba-Rodríguez et al., 2011).

Las especies nativas de sitios con un menor índice de aridez, fueron más afectadas por la sequía al sistema radicular. Eventos periódicos de sequía ocasionan estrés hídrico dentro de las plantas, afectando el crecimiento, la anatomía, la morfología, la fisiología y la bioquímica de los tejidos vegetales (Kramer y Kozlowski, 1947 citados por Córdoba-Rodríguez et al., 2011). Según Gomes et al. (2000), bajo condiciones de estrés hídrico, la acumulación de masa seca en los tallos, hojas y la parte aérea se reduce significativamente, lo que demuestra que las limitaciones en el crecimiento debido a la menor disponibilidad de agua. La hipoxia, causada por la inundación del sistema radicular, tiene un efecto en las plantas, específicamente en la formación de aerénquima como mecanismo de recuperación en la soja nodulada (Thomas et al., 2005). La oxifertirrigación ha favorecido la productividad (número de flores, número y peso de frutos), la calidad (peso y longitud de la flor cortada, duración de flor cortada, peso y superficie foliar y radicular de esqueje, plántula enraizada) y el estado hídrico (conductividad hidráulica y tasa transpiratoria) en los cultivos de rosa y pimiento (Carazo, 2016).

Chen et al. (2024), en suelos inundados con diferentes días, en comparación a suelos menos inundados con potencial hídrico de -20 kPa, el estrés por inundación redujo la biomasa en *Lepidium latifolium*, la producción de etileno en las raíces fue mayor. Los cambios bioquímicos en las plantas son usualmente inducidos por un periodo corto de inundación mientras que los cambios anatómicos y morfológicos están involucrados con aclimatación a largos periodos de inundación. Quiroga et al. (2024), con el tratamiento de 75 % de reposición de agua reportó mayor producción de materia seca y la función ajustada se destaca por encima de tratamientos al 50 y 25 % de reposición de agua.

Tabla 5. Funciones y coeficientes de determinación para la tasa de crecimiento absoluta (TCA) de la planta de arveja (g/día) en condición de estrés hipóxico en la zona radicular bajo diferentes regímenes hídricos subóptimos y sistemas de cobertura de suelo e impacto en el crecimiento.

Tratamiento	Variable (X)	Variable (Y)	Ecuación de regresión	r <sup>2</sup>
B1A100%	Días	TCA	$y = 2E-07x^3 - 2E-05x^2 + 0,0009x - 0,0018$	0,8253
B2A75%	Días	TCA	$y = 1E-07x^3 - 5E-06x^2 - 0,0001x + 0,0041$	0,9044
B3A50%	Días	TCA	$Y = -45-08x^3 + 8E-06x^2 - 0,0004x + 0,0039$	0,2430
B4A25%	Días	TCA	$y = 6E-08x^3 - 9E-06x^2 + 0,0003x + 0,0012$	0,6689
B5C100%	Días	TCA	$y = -7E-08x^3 + 1E-05x^2 - 0,0007x + 0,0067$	0,4063
B6C75%	Días	TCA	$y = 6E-08x^3 - 7E-07x^2 - 0,0002x + 0,0043$	0,9215
B7C50%	Días	TCA	$y = -3E-08x^3 + 6E-06x^2 - 0,0002x + 0,0032$	0,1755
B8C25%	Días	TCA	$y = -1E-09x^3 + 2E-06x^2 + 9E-05x + 0,0015$	0,5396

### Tasa de crecimiento relativa de la planta de arveja

La tasa de crecimiento relativa (TCR) de la planta de arveja en cuatro niveles de reposición de agua y dos sistemas de cobertura de la superficie de suelo los resultados presentan diferencias sustanciales, ajustados los datos se genera una función polinómica de tercer orden (Figura 6), El tratamiento B2A075% y B6C075% en base a la última cosecha (112 días) produjeron la mayor cantidad de materia seca por día en relación a la materia seca ya generada, con 0,1475 g/g día y 0,1147 g/g día, con funciones ajustadas con un r<sup>2</sup> de 0,6514 y 0,5975 respectivamente (Tabla 6). Por debajo se encuentra los tratamientos B1A100%, B5C100%. La baja eficiencia en el crecimiento relativo se puede explicar por la respuesta de la planta al estrés hipóxico.

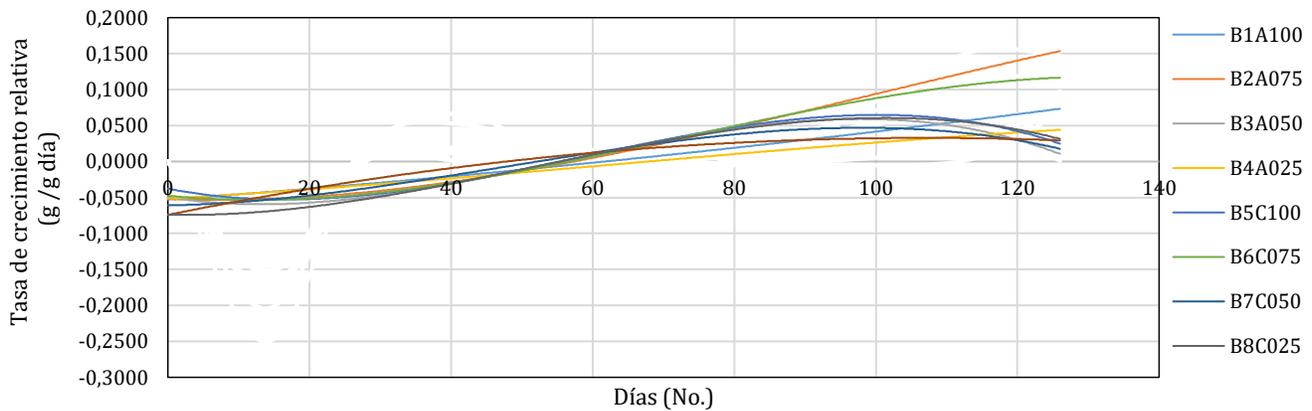


Figura 6. Tasa de crecimiento relativa (TCR) de la planta de arveja (g/g día) en condición de estrés hipóxico en la zona radicular bajo diferentes regímenes hídricos subóptimos y sistemas de cobertura de suelo e impacto en el crecimiento.

Aravena y Garbi (2018), durante la determinación (2 a 6 hojas), el tamaño de celda y el tipo de fertilizante utilizado no produjeron diferencias significativas en los valores de la TCR para ninguno de los tres intervalos de las determinaciones (2 a 4, 2 a 6 y 4 a 6 hojas), así como tampoco pudo observarse una interacción entre dichos factores. Yetisir et al. (2006), menciona que el anegamiento modifica la fisiología y la morfología de las plantas reduciendo el crecimiento. El estrés por hipoxia provoca una mayor disminución en la producción de biomasa, además de una reducción más pronunciada en el número de hojas, la longitud de la raíz y la altura de la planta (Bai et al., 2010). Contreras-Medina y Melo-Sabogal (2022), señalan la importancia del agua para procesos biológicos esenciales, que a su vez son cruciales para el crecimiento y desarrollo de raíces, tallos, hojas, flores y frutos, lo que explica menor crecimiento en los tratamientos con menor reposición de agua. Bajo estrés hídrico, la biomasa de la parte aérea, el IAF y la TCR se reducen (Gomes et al., 2000). La asfixia radicular dificulta el establecimiento de los huertos y causa problemas como la pérdida de árboles y la demora en la entrada en producción, lo que implica un efecto negativo en el crecimiento y desarrollo (Duque, 2011).

Las raíces se reducen en longitud y masa, pero pueden volverse más delgadas o más gruesas. La tasa de madurez puede retrasarse o adelantarse según la especie. El grado en que el crecimiento se reduce por la salinidad difiere mucho según la especie y, en menor medida, con las variedades dentro de una especie (Shannon y Grieve, 1998). Alexandrov y Hoogenboon (2000), observaron una alta correlación entre la precipitación y el rendimiento para maíz y trigo. La hipoxia del suelo afecta la longitud de las raíces finas de los almendros durante su temporada de crecimiento. Esto implica que la hipoxia tiene un impacto medible en el crecimiento de las raíces en términos de su longitud, lo cual es fundamental para la absorción de agua y nutrientes, por lo tanto, para el crecimiento general de la planta (Martinez, 2023). El estrés por hipoxia provoca una mayor disminución en la producción de biomasa, además de una reducción más pronunciada en el número de hojas, la longitud de la raíz y la altura de la planta (Bai et al., 2010). Quiroga et al. (2024), con el tratamiento de 75 % de reposición de agua reportó mayor producción de materia seca en función a la materia seca inicial con 0,051 g/g día (98 días) en comparación a tratamientos al 50 y 25 % respectivamente.

Tabla 6. Funciones y coeficientes de determinación para la tasa de crecimiento relativa (TCR) de la planta de arveja (g/g día) en condición de estrés hipóxico en la zona radicular bajo diferentes regímenes hídricos subóptimos y sistemas de cobertura de suelo e impacto en el crecimiento.

Tratamiento	Variable (X)	Variable (Y)	Ecuación de regresión	r <sup>2</sup>
B1A100%	Días	TCR	$y = -9E-10x^3 + 2E-06x^2 + 0,0007x - 0,053$	0,4260
B2A75%	Días	TCR	$y = -9E-8x^3 + 3E-05x^2 - 0,0004x - 0,0519$	0,6514
B3A50%	Días	TCR	$y = -4E-07x^3 + 7E-05x^2 - 0,0015x - 0,0498$	0,3684
B4A25%	Días	TCR	$y = -2E-08x^3 + 5E-06x^2 + 0,0006x - 0,0514$	0,3296
B5C100%	Días	TCR	$y = -4E-07x^3 + 7E-05x^2 - 0,002x - 0,0376$	0,4447
B6C75%	Días	TCR	$y = -2E-07x^3 + 4E-05x^2 + 0,001x - 0,0475$	0,5975
B7C50%	Días	TCR	$y = -2E-07x^3 + 3E-05x^2 + 0,0002x - 0,0609$	0,2329
B8C25%	Días	TCR	$y = -3E-07x^3 + 4E-05x^2 - 0,0002x - 0,0739$	0,2785

### Tasa de asimilación neta de la planta de arveja

La tasa de asimilación neta (TAN) de la planta de arveja en cuatro niveles de reposición de agua y dos sistemas de cobertura de la superficie de suelo, presentan el mismo comportamiento con la TAC y TRC, ajustados los datos se genera una función polinómica de tercer orden (Figura 7), con coeficientes de determinación altos principalmente en los dos tratamientos destacados (Tabla 7). Los tratamientos B6C075% B2A075% considerando la última cosecha (112 días) presentan la mayor eficiencia fotosintética (TAN) generando 0,0023 g/cm<sup>2</sup> día y 0,0021 g/cm<sup>2</sup> día de biomasa respectivamente, con funciones modelada con un r<sup>2</sup> de 0,08365 y 0,8982 respectivamente. Por debajo se encuentra los tratamientos B1A100%, B5C100%, con una eficiencia fotosintética baja, esto se puede explicar que la saturación al 100 % de su capacidad de campo produce hipoxia radicular lo que ocasiona menor TAN.

Contreras-Medina y Melo-Sabogal (2022), indican que un contenido adecuado de agua es importante para el proceso fotosintético y respiración, procesos que determinan el crecimiento de las hojas y demás órganos. La restricción de raíces en la morfología y fisiología de plántulas por efecto de diferentes volúmenes del sustrato, produce la inhibición del crecimiento de la raíz debido a una reducción en la relación de área foliar y la tasa de asimilación neta (Mugnai et al., 1989). Ferreyra et al. (2006), indican que la falta de oxígeno en el suelo induce a trastornos fisiológicos múltiples en las plantas. Se produce cierre de estomas, y un menor crecimiento de las raíces, y como consecuencia se inhibe la fotosíntesis y el transporte de hidratos de carbono.

Kubiske y Abrams (1992), en las relaciones hídricas y la fotosíntesis durante períodos de sequía: mesoicos y xéricos hallaron que la tasa fotosintética y la conductancia del vapor de agua estomático fueron mayores en las plántulas del sitio xérico con plántulas bien irrigadas. Durante la sequía, las plántulas de la estación xérica mantuvieron una fotosíntesis neta positiva para un menor potencial hídrico de las hojas antes del amanecer y un menor contenido de agua. Las plántulas de la estación mesoica mostraron una mayor variación intraprocedencia en el intercambio de gases durante los períodos de sequía. Esta variación podría estar relacionada con una fuerza menos selectiva para los rasgos de tolerancia a la sequía en el sitio méxico. Criollo y García (2009), en evaluación en rábanos, las bajas densidades incrementaron el área foliar y el rendimiento por planta, pero redujeron la producción por área. Los mayores valores de la tasa de asimilación neta (TAN) se determinaron para los tratamientos de 3 plantas/maceta (2,01 g/dm/d) y 4 plantas/maceta (1,57 g/dm/d) se presentaron en la cuarta lectura (16 ddt), el tratamiento con 2 plantas/maceta alcanzó su valor máximo a los 12 ddt (tercera lectura) y el tratamiento con 1 planta/maceta en la última lectura con 2,81 g/dm/d. La magnitud del índice de área foliar (IAF) define la capacidad de la cubierta vegetal para interceptar la radiación solar, que es la fuente primaria de energía utilizada por las plantas para la fabricación de tejidos (Diaz-Ambrona et al., 2011). Martínez (2023), en el estudio del crecimiento y dinámica nutrimental de chile con diferentes niveles de conductividad, observó que una vez los tratamientos 1,5; 2,0 y 2,5 dS/m tuvieron los máximos valores de TAN al inicio del cultivo, su eficiencia disminuyó constantemente a través del tiempo. Posterior a los 45 ddt (días después del trasplante) un

pequeño incremento fue observado en 1,0; 1,5 y 2,0 dS/m en los valores de TAN, y posteriormente un decremento constante se observó después de los 90 ddt. Respecto a 2,5 dS/m, los valores de TAN se incrementaron después de los 75 ddt, para finalmente mostrar una disminución en la acumulación de materia seca total a los 120 ddt. Tales resultados sugieren que en este periodo la planta debe ser abastecida con mayor cantidad de agua y nutrientes, debido a que en esta etapa se produce y acumula mayor cantidad de fotoasimilados.

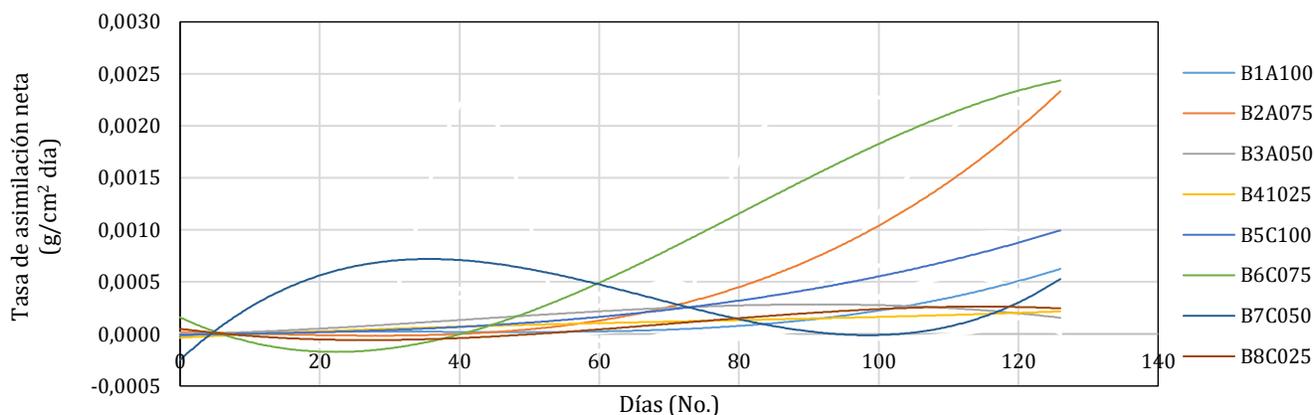


Figura 7. Tasa de asimilación neta (TAN) de la planta de arveja (g/cm<sup>2</sup>/día) en condición de estrés hipóxico en la zona radicular bajo diferentes regímenes hídricos subóptimos y sistemas de cobertura de suelo e impacto en el crecimiento.

Tabla 7. Funciones y coeficientes de determinación para la tasa de asimilación neta (TAN) de la planta de arveja (g/cm<sup>2</sup>/día) en condición de estrés hipóxico en la zona radicular bajo diferentes regímenes hídricos subóptimos y sistemas de cobertura de suelo e impacto en el crecimiento.

Tratamiento	Variable (X)	Variable (Y)	Ecuación de regresión	r <sup>2</sup>
B1A100%	Días	TAN	$y = 9E-10x^3 - 1E-07x^2 + 4E-06x + 4E-05$	0,9268
B2A75%	Días	TAN	$y = 2E-09x^3 - 4E-08x^2 - 1E-06x + 2E-05$	0,8982
B3A50%	Días	TAN	$y = -6E-10x^3 - 7E-08x^2 + 2E-06x - 3E-06$	0,1888
B4A25%	Días	TAN	$y = 1E-10x^3 - 3E-08x^2 + 4E-06x - 4E-05$	0,1834
B5C100%	Días	TAN	$y = 3E-10x^3 + 2E-08x^2 + 7E-07x - 6E-06$	0,8199
B6C75%	Días	TAN	$y = -3E-09x^3 + 8E-07x^2 - 3E-05x + 0,0002$	0,8365
B7C50%	Días	TAN	$y = 6E-09x^3 - 1E-06x^2 + 6E-05x - 0,0003$	0,1750
B8C25%	Días	TAN	$y = -9E-10x^3 + 2E-07x^2 - 9E-06x + 5E-05$	0,4370

### Reposición total de agua

La reposición de agua (RTA) en el cultivo de arveja en cuatro niveles de reposición y dos sistemas de cobertura de la superficie de suelo (Figura 8), en el sistema cerrado se repuso menor cantidad de agua respecto al sistema abierto. En el sistema cerrado los niveles de reposición se encuentran en relación a los resultados de las variables, con el nivel de reposición al 75 % el total de agua fue 8.781,0 cm<sup>3</sup>, en el 100 % de reposición fue 9.080,10 cm<sup>3</sup>, por encima del 75 % pero menos eficiente en el crecimiento, con los otros niveles la reposición de agua fue menor y también repercutió con menor desarrollo del cultivo. En el sistema abierto la RTA fue mayor por efecto de la evaporación de agua del suelo, sin embargo la reposición al 75 % se destacó con una reposición de 12.143,71 cm<sup>3</sup>, por encima se encuentra la RTA al 100 % con 12.583,60 cm<sup>3</sup> y de igual forma que el anterior sistema fue menor eficiente en el crecimiento del cultivo de arveja. Contreras-Medina y Melo-Sabogal (2022), señalan la importancia del agua para procesos biológicos esenciales, como la transpiración, que a su vez son cruciales para el crecimiento de la planta.

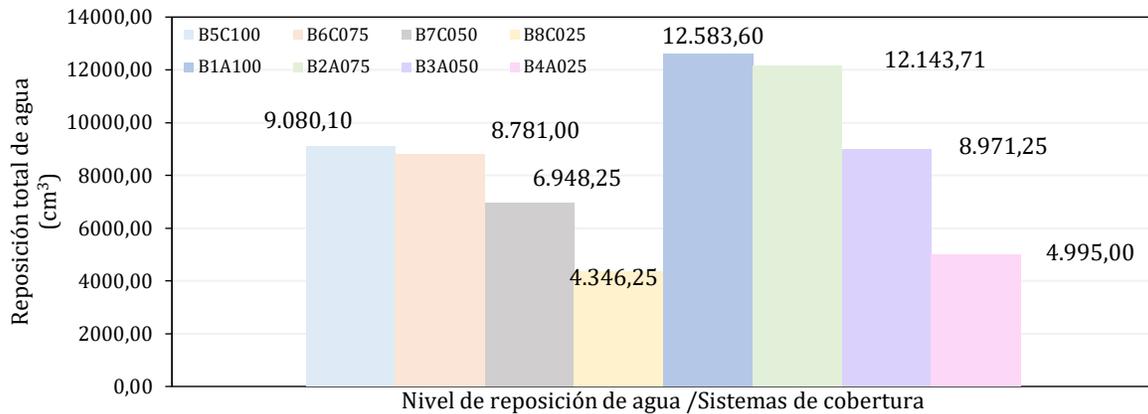


Figura 8. Reposición total de agua (RTA) para el cultivo de arveja (cm<sup>3</sup>) en condición de estrés hipóxico en la zona radicular bajo diferentes regímenes hídricos subóptimos y sistemas de cobertura de suelo e impacto en el crecimiento.

## CONCLUSIONES

Los tratamientos con 75 % de saturación hídrica (B6C075% y B2A075%) mostraron el mejor desempeño en todas las variables: mayor altura (79,70 cm), AF (545 cm<sup>2</sup>), IAF (1,0265), TCA (0,10179 g/día), TCR (0,1475 g/g/día) y TAN (0,0023 g/cm/día), respaldados por modelos polinómicos ( $R^2 > 0.74$ ). El 25 % de espacio aéreo en estos tratamientos optimizó el crecimiento al balancear disponibilidad hídrica y oxigenación. Los tratamientos con saturación completa (100 %) redujeron el rendimiento por hipoxia radicular (ejemplo, altura: 73,40 cm vs. 79,70 cm; TCA: 0,00929 g/día), mientras que los niveles <50 % mostraron los peores resultados. En ambos sistemas de cobertura, el 75 % de reposición fue el más eficiente, requiriendo menos agua que el 100 % pero con mayor productividad, equilibrando estrés hídrico y oxigenación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, E., Acosta, J. A., Amador, M. D., & Padilla, J. S. (2008). Relación entre índice de área foliar y rendimiento en frijol bajo condiciones de secano. *Agricultura técnica en México*, 34(1), 13-20. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0568-25172008000100002&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0568-25172008000100002&script=sci_arttext)
- Alexandrov, V. A., & Hoogenboom, G. (2000). The impact of climate variability and change on crop yield in Bulgaria. *Agricultural and forest meteorology*, 104(4), 315-327. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168192300001660>
- Aravena, J., & Garbi, M. (2018). Crecimiento y calidad de plantines de lechuga (*Lactuca sativa* L.), según tipo de fertilizante y tamaño de celda utilizado en almácigo. <https://agris.fao.org/search/en/providers/124859/records/67050cc7b1dfe472e144faa3>
- Bai, T., Li, C., Ma, F., Feng, F., & Shu, H. (2010). Responses of growth and antioxidant system to root-zone hypoxia stress in two *Malus* species. *Plant and Soil*, 327(1), 95-105. [https://www.researchgate.net/profile/Tuanhui-Bai/publication/226647131\\_Responses\\_of\\_growth\\_and\\_antioxidant\\_system\\_to\\_root-zone\\_hypoxia\\_stress\\_in\\_two\\_Malus\\_species/links/00b7d52eda9b697bec000000/Responses-of-growth-and-antioxidant-system-to-root-zone-hypoxia-stress-in-two-Malus-species.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Tuanhui-Bai/publication/226647131_Responses_of_growth_and_antioxidant_system_to_root-zone_hypoxia_stress_in_two_Malus_species/links/00b7d52eda9b697bec000000/Responses-of-growth-and-antioxidant-system-to-root-zone-hypoxia-stress-in-two-Malus-species.pdf)
- Balakhnina, T. I., Bennicelli, R. P., Stępniewska, Z., Stępniewski, W., & Fomina, I. R. (2010). Oxidative damage and antioxidant defense system in leaves of *Vicia faba major* L. cv. Bartom during soil flooding and subsequent drainage. *Plant and soil*, 327, 293-301. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-009-0054-6>
- Barradas, V. L., Jones, H. G., & Clark, J. A. (1999). Leaf orientation and distribution in a *Phaseolus vulgaris* L. crop and their relation to light microclimate. *International journal of biometeorology*, 43, 64-70. <https://link.springer.com/article/10.1007/s004840050117>
- Barrera, J., Suárez, D., & Melgarejo, L. M. (2010). II. Análisis de crecimiento en plantas. Experimentos en fisiología vegetal. Melgarejo, LM (Ed). Laboratorio de Fisiología y Bioquímica Vegetal. Departamento de Biología. Universidad Nacional de Colombia, 43, 25-39.

- Blom, C. W. P. M., & Voeselek, L. A. C. J. (1996). Flooding: the survival strategies of plants. *Trends in Ecology & Evolution*, 11(7), 290–295.
- Caicedo-Camposano, O., Cadena-Piedrahita, D., Galarza-Centeno, E., & Solorzano-Galarza, D. (2019). Permisibilidad del maíz (*Zea mays* L.) sometido a diferentes condiciones de inundación: Determinación del tiempo de drenaje en Babahoyo, Ecuador. *Revista Científica y Tecnológica UPSE (RCTU)*, 6(2), 67-75.  
<https://incyt.upse.edu.ec/ciencia/revistas/index.php/rctu/article/view/472/445>
- Cándido, M. P., Carlos, R. A., Waldo, O. B., Jorge, F. V., & Ernesto, F. M. H. S. I. (2014). Comparación de dos métodos para medir el índice de área foliar de chile poblano en invernadero. <https://www.researchgate.net/publication/267926789>
- Chen, K., Hu, Q., Ma, X., Zhang, X., Qian, R., & Zheng, J. (2024). The effect of exogenous melatonin on waterlogging stress in *Clematis*. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1385165. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1385165>
- Carazo Gómez, N. (2016). Oxifertirrigación en cultivo sin suelo de rosa para flor cortada (*Rosa* sp.) y pimiento (*Capsicum annum* L.): efectos en desarrollo y producción. <https://www.tesisenred.net/handle/10803/383065#page=1>
- Contreras-Medina, L. M., & Melo-Sabogal, D. V. (2022). ¿Cómo afecta la escasez de agua a la producción de tus alimentos y qué estrategias agrícolas se han implementado para reducir su impacto? *Digital Ciencia@ UAQRO*, 15(1), 20-28. <https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia/article/view/629>
- Córdoba-Rodríguez, D., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., & Muñoz-Orozco, A. (2011). Crecimiento de la raíz en plantas jóvenes de *Pinus pinceana* Gordon en respuesta a la humedad del suelo. *Agrociencia*, 45(4), 493-506. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952011000400008](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952011000400008)
- Criollo, H., & García, J. (2009). Efecto de la densidad de siembra sobre el crecimiento de plantas de rábano (*Raphanus sativus* L.) bajo invernadero. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 3(2), 210-222. [https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias\\_hortícolas/article/view/1214](https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias_hortícolas/article/view/1214)
- Davies, W. J., & Zhang, J. (1991). Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual review of plant biology*, 42(1), 55-76. [https://www.researchgate.net/profile/Jianhua-Zhang-35/publication/234836983\\_Root\\_Signals\\_and\\_the\\_Regulation\\_of\\_Growth\\_and\\_Development\\_of\\_Plants\\_in\\_Drying\\_Soil/links/59379228aca272ede1cb3cb5/Root-Signals-and-the-Regulation-of-Growth-and-Development-of-Plants-in-Drying-Soil.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jianhua-Zhang-35/publication/234836983_Root_Signals_and_the_Regulation_of_Growth_and_Development_of_Plants_in_Drying_Soil/links/59379228aca272ede1cb3cb5/Root-Signals-and-the-Regulation-of-Growth-and-Development-of-Plants-in-Drying-Soil.pdf)
- De Bernardi, L. A. (2017). Perfil de las Arvejas - 2017. E.E.A-INTA Balcarce. [https://magyp.gob.ar/sitio/areas/ss\\_mercados\\_agropecuarios/areas/regionales/\\_archivos/000030\\_Informes/000040\\_Legumbres/000012\\_Perfil%20de%20las%20Arvejas%20-%202017](https://magyp.gob.ar/sitio/areas/ss_mercados_agropecuarios/areas/regionales/_archivos/000030_Informes/000040_Legumbres/000012_Perfil%20de%20las%20Arvejas%20-%202017)
- Domingo, R., Pérez-Pastor, A., Ruiz-Sánchez, Ma. (2002). Physiological responses of apricot plants grafted on two different rootstocks to flooding conditions, *Journal of Plant Physiology*, Volume 159, 725-732. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-0670>
- Díaz-Ambrona, C. H., Valderrama, J. M., & Sogo, H. C. (2011). Modelos para la simulación dinámica del crecimiento y desarrollo de pastos. *Pastos*, 41(2), 127-162. <https://polired.upm.es/index.php/pastos/article/view/1931>
- Domínguez, A. L. (2003). Transporte de oxígeno a través de plantas acuáticas. *Scientia et Technica*, 1(21). <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7529>
- Duque, D. S. (2011). Asfixia radicular: estrategias de manejo en Colombia. In VII Congreso Mundial del Aguacate, Cairns. Memorias, editado por avocadosource (pp. 12-24). [https://www.avocadosource.com/wac7/section\\_10/lynceduquedavid2011.pdf](https://www.avocadosource.com/wac7/section_10/lynceduquedavid2011.pdf)
- Ferreira, R., Sellés, G., Maldonado, P., Celedón, J., Barreras, C., & Gil, P. (2006). La asfixia radicular y el manejo del riego en palto. Seminario Inter. Manejo del Riego y Suelo en el Cultivo del palto. INIA-CORFO, 27, 1-20. [https://www.avocadosource.com/Journals/INIA/INIA\\_Palta\\_FERREYRA\\_PAPER.pdf](https://www.avocadosource.com/Journals/INIA/INIA_Palta_FERREYRA_PAPER.pdf)
- Fischer, G., & Orduz-Rodríguez, J. O. (2012). Ecofisiología en frutales. Manual para el cultivo de frutales en el trópico, 54-72.
- Geigenberger, P. (2003). Response of plant metabolism to too little oxygen. *Current opinion in plant biology*, 6(3), 247-256. [https://doi.org/10.1016/s1369-5266\(03\)00038-4](https://doi.org/10.1016/s1369-5266(03)00038-4)
- Gomes, A. A., Araújo, A. P., Rossiello, R. O. P., & Pimentel, C. (2000). Acumulação de biomassa, características fisiológicas e rendimento de grãos em cultivares de feijoeiro irrigado e sob sequeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35, 1927-1937. <https://www.scielo.br/j/pab/a/bfKkfh9nP8qKYdYpL67fZCB/?format=pdf&lang=pt>
- Habibi, F. H., Liu, T., Adnan, M. & Schaffer, B., Ali, S. (2023). Physiological, biochemical, and molecular responses of fruit trees to root zone hypoxia. *Environmental and Experimental Botany*, Volume (206), Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105179>
- Herrera, A., Rengifo, E., & Tezara, W. (2010). Respuestas ecofisiológicas a la inundación en árboles tropicales tolerantes de un igapó. *Ecosistemas*, 19(1), 37-51. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/54>
- INE, M. (2005). Bolivia un mundo de potencialidades: Atlas Estadístico de Municipios. In Bolivia un mundo de potencialidades: Atlas Estadístico de Municipios (pp. 485-485).

- Jimenez, J. D. L. C., Moreno, L. P., & Magnitskiy, S. (2012). Respuesta de las plantas a estrés por inundación. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 6(1), 96-109. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S2011-21732012000100010&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S2011-21732012000100010&script=sci_arttext)
- Kato-Noguchi, H. (2001). Evaluation of the importance of lactate for the activation of ethanolic fermentation in lettuce roots in anoxia. *Physiologia Plantarum*, 109(1), 28-33. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2000.100105.x>
- Kozłowski, T. (1997). Responses of woody plants to flooding and salinity (Monografía de Fisiología de Árboles No. 1). <https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=424063>
- Khondaker, N. A., & Ozawa, K. (2007). Papaya plant growth as affected by soil air oxygen deficiency. In I International Symposium on Papaya 740. [https://www.actahort.org/books/740/740\\_27.htm](https://www.actahort.org/books/740/740_27.htm)
- Koppitz, H. (2004). Amino acid pattern in *Phragmites australis* as an indicator of oxygen deficiency at the root level. *Limnologica*, 34(1-2), 37-47.
- Kreuzwieser, J., & Rennenberg, H. (2014). Molecular and physiological responses of trees to waterlogging stress. *Plant, Cell & Environment*, 37(10), 2245-2259. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/pce.12310>
- Kubiske, M. E., & Abrams, M. D. (1992). Photosynthesis, water relations, and leaf morphology of xeric versus mesic *Quercus rubra* ecotypes in central Pennsylvania in relation to moisture stress. *Canadian Journal of Forest Research*, 22(9), 1402-1407. [https://www.researchgate.net/publication/295652396\\_Photosynthesis\\_water\\_relations\\_and\\_leaf\\_morphology\\_of\\_xeric\\_versus\\_mesic\\_Quercus\\_rubra\\_ecotypes\\_in\\_central\\_Pennsylvania\\_in\\_relation\\_to\\_moisture\\_stress\\_Discussion\\_of\\_sample\\_size\\_sampling\\_and\\_statistica](https://www.researchgate.net/publication/295652396_Photosynthesis_water_relations_and_leaf_morphology_of_xeric_versus_mesic_Quercus_rubra_ecotypes_in_central_Pennsylvania_in_relation_to_moisture_stress_Discussion_of_sample_size_sampling_and_statistica)
- Kulichikhin, K. Y., Chirkova, T. V., & Fagerstedt, K. V. (2008). Intracellular pH in rice and wheat root tips under hypoxic and anoxic conditions. *Plant signaling & behavior*, 3(4), 240-242. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.4161/psb.3.4.5151>
- Liu, J., Chen, Y., Wang, W., Liu, J., Zhu, Ch., Zhong, Y., Zhang, H., Liu, X., Yin, X. (2022). Transcription factors AcERF74/75 respond to waterlogging stress and trigger alcoholic fermentation-related genes in kiwifruit, *Plant Science*, Volume 314. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2021.111115>
- Madhavan, C., Meera, S. P., & Kumar, A. (2024). Anatomical adaptations of mangroves to the intertidal environment and their dynamic responses to various stresses. *Biological Reviews*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/brv.13172>
- Martinez, P. (2023). The Impact of Soil Hypoxia on Almond Fine Root Production During the Growing Season in California Orchard System. University of California, Davis. [https://escholarship.org/content/qt8xw3jt7/qt8xw3jt7\\_noSplash\\_09d727651311a3b67d87b3e14c8a9dcb.pdf](https://escholarship.org/content/qt8xw3jt7/qt8xw3jt7_noSplash_09d727651311a3b67d87b3e14c8a9dcb.pdf)
- Morales Alcon, N. V., Quiroga S.B.M. (2019). Dinámica del agua en un suelo arenoso con adición de sábila y penca deshidratadas y su influencia en el cultivo de acelga (*Beta vulgaris*) en el municipio de Viacha. <https://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/23791>
- Moreno, A., & Fischer, G. (2014). Efectos del anegamiento en los frutales. Una revisión. *Temas agrarios*, 19(1), 106-123. <https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/temasagrarios/article/view/729>
- Moreno Roblero, M. D. J., Pineda Pineda, J., Colinas León, M. T., & Sahagún Castellanos, J. (2020). Oxygen in the root zone and its effect on plants. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(4), 931-943. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342020000400931&script=sci\\_arttext&tlng=en](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342020000400931&script=sci_arttext&tlng=en)
- Mugnai, S., Vernieri, P., Tognoni, F., & Serra, G. (1999). Container volume effects on morphology and physiology of tomato seedlings. In XXV International Horticultural Congress, Part 6: Culture Techniques with Special Emphasis on Environmental Implications 516 (pp. 49-56). [https://www.actahort.org/books/516/516\\_5.htm](https://www.actahort.org/books/516/516_5.htm)
- Neuman, D. S. (1993). Shoot responses to root stress—a resource gathering point of view. *Journal of Arboriculture*, 19, 118-118. <https://auf.isa-arbor.com/content/isa/19/2/118.full.pdf>
- Pardos, J. A. (2004). Respuestas de las plantas al anegamiento del suelo. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales, Fuera de Serie* (1), 101-107. [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/106093778/cfe828ea9cbceffbdb23519a533ffb696e8-libre.pdf?1696118834=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DRespuestas\\_de\\_las\\_plantas\\_al\\_anegamiento.pdf&Expires=1750721197&Signature=fM~ptADJfjteVSRF0kLerXWt1cpnDv7HWWovi~ZHc6GkqoE5B6IASm6GhAf891SaWTuZe~sMYTxlpo9XOe4yPBcpZ-hjXEB97gSEvErFr2w8OuY9dPiqZAKyDXDiGjQXFD~wEmO~Lha756Xoz2RapNaZ~tCkCVtFYnDctjflk4DN9T1TxcWQPRkcVsj8xFQbjMvqg03FYN-3dlK0LMExG2cxGYemkeDSS5KGWg6tJLzFuKjboYQWw1cNSnou~YRXExv~hvi6m6srNsWiW490DoTOIFqDVdsRZmk9P7yyYf3twWJOC9PFtPnj9qR9RU0AYXDWP3BWH5xAho0-9sffQ\\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/106093778/cfe828ea9cbceffbdb23519a533ffb696e8-libre.pdf?1696118834=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DRespuestas_de_las_plantas_al_anegamiento.pdf&Expires=1750721197&Signature=fM~ptADJfjteVSRF0kLerXWt1cpnDv7HWWovi~ZHc6GkqoE5B6IASm6GhAf891SaWTuZe~sMYTxlpo9XOe4yPBcpZ-hjXEB97gSEvErFr2w8OuY9dPiqZAKyDXDiGjQXFD~wEmO~Lha756Xoz2RapNaZ~tCkCVtFYnDctjflk4DN9T1TxcWQPRkcVsj8xFQbjMvqg03FYN-3dlK0LMExG2cxGYemkeDSS5KGWg6tJLzFuKjboYQWw1cNSnou~YRXExv~hvi6m6srNsWiW490DoTOIFqDVdsRZmk9P7yyYf3twWJOC9PFtPnj9qR9RU0AYXDWP3BWH5xAho0-9sffQ_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA)

- Quiroga Sossa, B. M., Oviedo Farfán, J. E., Taboada Belmonte, C., Calle Aliaga, Y., & Castañeta Mamani, T. M. (2024). Aireación en la zona radicular y su relación con el pulso hídrico del suelo por debajo de la capacidad de campo y su efecto en el crecimiento de la arveja (*Pisum sativum* L.). CIBUM SCIENTIA, 3(1), 55–66.  
<https://doi.org/10.53287/gych5119pm55o>
- Samperio, R. G. (1997). Hidroponía básica. Editorial Diana, 176.
- Shannon, M. C., & Grieve, C. M. (1998). Tolerance of vegetable crops to salinity. Scientia horticulturae, 78(1-4), 5-38.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423898001897>
- Santos Castellanos, M., Segura Abril, M., & Núñez López, C. E. (2010). Análisis de crecimiento y relación fuente-demanda de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el municipio de Zipaquirá (Cundinamarca, Colombia). Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 63(1), 5253-5266.
- Schaffer, B. (2006). Efecto del Déficit de Oxígeno en el Suelo en la Fisiología y Productividad de Palto [Presentación de seminario]. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), La Platina, Santiago, Chile.  
[www.avocadosource.com/Journals/INIA/INIA\\_Palta\\_SCHAFFER\\_TALK](http://www.avocadosource.com/Journals/INIA/INIA_Palta_SCHAFFER_TALK)
- Silva Robledo, H., Silva Candia, P., Garrido Salinas, M., & Acevedo Hinojosa, E. (2015). Manual de estudio y ejercicios relacionados con el contenido de agua en el suelo y su uso por los cultivos.  
<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/130642/Manual-de-estudio-y-ejercicios-relacionados-con-el-contenido-de-agua.pdf>
- Smit, B. A., Neuman, D. S., & Stachowiak, M. L. (1990). Root hypoxia reduces leaf growth: role of factors in the transpiration stream. Plant Physiology, 92(4), 1021-1028.  
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1062411/pdf/plntphys00677-0165.pdf>
- Thomas, A. L., Guerreiro, S. M. C., & Sodek, L. (2005). Aerenchyma formation and recovery from hypoxia of the flooded root system of nodulated soybean. Annals of Botany, 96(7), 1191-1198. <https://academic.oup.com/aob/article-abstract/96/7/1191/244656?redirectedFrom=PDF>
- Warnock, R., Valenzuela, J., Trujillo, A., Madriz, P., & Gutiérrez, M. (2006). Área foliar, componentes del área foliar y rendimiento de seis genotipos de caraota. Agronomía tropical, 56(1), 21-42.  
<https://ve.scielo.org/pdf/at/v56n1/art02.pdf>
- Yetisir, H., Caliskan, M., Soyly, S., Sakar, M. (2006). Some physiological and growth responses of watermelon [*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. and Nakai] grafted onto *Lagenaria siceraria* to flooding.  
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.06.010>
- Zahra, N., M., Shaukat, K., Wahid A., Hussein, S., Naseer, R., Raza A., Iqbal S., Farooq, M. (2021). Hypoxia and anoxia stress: plant responses and tolerance mechanisms. Journal of agronomy and Crop Science. Volumen (207), 249-284. Wiley Online Library. <https://doi.org/10.1111/jac.12471>