



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



FACULTAD DE AGRONOMÍA
E INGENIERÍA FORESTAL
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE



Escuela Técnica Superior
de Ingeniería Agronómica
y del Medio Natural

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

FACULTAD DE AGRONOMÍA E INGENIERÍA FORESTAL

Efectos del encharcamiento temporal y prolongado en diferentes portainjertos de cítricos (Roubidoux, Citrumelo, C35, C22)

TESIS DE MAGISTER

ALUMNO: DIEGO CLARAMONTE MANRIQUE

TUTOR EXTERNO: JOHANNA MARTIZ

TUTOR UPV: CARLOS MESEJO

Santiago de Chile, Julio 2024.

Curso académico: 2023/2024

Título

Efectos del encharcamiento temporal y prolongado en diferentes portainjertos de cítricos (Roubidoux, Citrumelo, C35, C22)

Resumen:

Con el cambio climático, las lluvias cada vez son más esporádicas y violentas. Por ello surge la necesidad de conocer más sobre los efectos de condiciones prolongadas de hipoxia, sobre la fisiología y desarrollo de plantas de cítricos en diferentes portainjertos de cítricos. Para ello, se seleccionaron 48 plantas de 1 año de edad de naranjo cv. Cara Cara (*Citrus sinensis*) injertadas en 4 portainjertos diferentes: *C35*, *C22*, *Roubidoux* y *Citrumelo*. Se establecerán 3 tratamientos, el primero será el control, sin anegamiento, en el segundo se inundarán las plantas durante 7 días para posteriormente evaluar la recuperación de las mismas, y en el tercer tratamiento se dejarán inundadas durante 30 días y se evaluará el tiempo que pueden sobrevivir en estado de hipoxia. Para conocer el estado de la planta se medirán parámetros de intercambio gaseoso (fotosíntesis neta y conductividad estomática) el potencial hídrico, la clorofila, daño foliar en porcentaje de hojas afectadas (donde una necrosis de 25% de la superficie foliar se considera hoja dañada) y la materia seca.

Palabras clave: Encharcamiento, cítricos, C35, Roubidoux, Citrumelo, C22, recuperación.

ALUMNO: DIEGO CLARAMONTE MANRIQUE

TUTOR EXTERNO: JOHANNA MARTIZ

TUTOR UPV: CARLOS MESEJO

Title

Effects of temporary and prolonged waterlogging on different citrus rootstocks (Roubidoux, Citrumelo, C35, C22)

Abstract:

With climate change, rainfall is becoming more sporadic and violent. Therefore, there arises the need to understand more about the effects of prolonged hypoxic conditions on the physiology and development of citrus plants on different citrus rootstocks. For this purpose, 48 one-year-old plants of Cara Cara orange (*Citrus sinensis*) grafted onto 4 different rootstocks, namely C35, C22, Roubidoux, and Citrumelo, were selected. Three treatments will be established: the first will be the control, without flooding; the second will involve flooding the plants for 7 days, followed by evaluating their recovery, and the third treatment will involve leaving the plants submerged for 30 days to assess the time they can survive under hypoxic conditions. To assess the plant's condition, parameters such as gas exchange (net photosynthesis and stomatal conductance), water potential, chlorophyll content, percentage of foliar damage (where necrosis of 25% of the leaf surface is considered damaged), and dry matter will be measured.

Keywords: waterlogging, citrus, C35, Roubidoux, Citrumelo, C22, recovery.

STUDENT: DIEGO CLARAMONTE MANRIQUE

EXTERNAL TUTOR: JOHANNA MARTIZ

UPV TUTOR: CARLOS MESEJO

Contenido

1.	Introducción	5
2.	Hipótesis	8
3.	Objetivos	8
3.1	Objetivo general	8
3.2	Objetivo específico	8
4.	Material y Métodos:	9
4.1	Material vegetal, tratamientos de estrés y diseño experimental.	9
4.2	Mediciones	10
5.	Resultados	12
5.1	Evolución de la tasa fotosintética neta	12
5.2	Análisis de los Gráficos de Conductancia Estomática	15
5.3	Evaluación del Potencial Hídrico	18
5.4	Contenido relativo en clorofila	22
5.5	Número de hojas	25
5.6	Participación de biomasa	28
6.	Conclusiones	32
7.	Bibliografía	33

Índice de Figuras

Figura 1 Evolución de la tasa fotosintética neta en los portainjertos de Rubidoux	12
Figura 2 Evolución de la tasa fotosintética neta en los portainjertos de Citrumelo	13
Figura 3 Evolución de la tasa fotosintética neta en los portainjertos de C35	14
Figura 4 Evolución de la tasa fotosintética neta en los portainjertos de C22	14
Figura 5 Evolución de la conductancia estomática en los portainjertos de Rubidoux	15
Figura 6 Evolución de la conductancia estomática en los portainjertos de Citrumelo	16
Figura 7 Evolución de la conductancia estomática en los portainjertos de C35	16
Figura 8 Evolución de la conductancia estomática en los portainjertos de C22	17
Figura 9 Evolución del Potencial hídrico de los portainjertos de Rubidoux	18
Figura 10 Evolución del Potencial hídrico de los portainjertos de Citrumelo	20
Figura 11 Evolución del Potencial hídrico de los portainjertos de C35	21
Figura 12 Evolución del Potencial hídrico de los portainjertos de C22	21
Figura 13 Evolución Contenido relativo de clorofila en hoja adulta del portainjerto Rubidoux.	22
Figura 14 Evolución Contenido relativo de clorofila en hoja adulta del portainjerto Citrumelo.	23
Figura 15 Evolución Contenido relativo de clorofila en hoja adulta del portainjerto C35.	23
Figura 16 Evolución Contenido relativo de clorofila en hoja adulta del portainjerto C22.	24
Figura 17 Evolución del número de hojas de las plantas del portainjerto Rubidoux.	25
Figura 18 Evolución del número de hojas de las plantas del portainjerto Citrumelo.	26
Figura 19 Evolución del número de hojas de las plantas del portainjerto C35.	26
Figura 20 Evolución del número de hojas de las plantas del portainjerto C22.	27
Figura 21 Masa de los portainjertos de Rubidoux separada en Hojas, Tallo y Raíces.	28
Figura 22 Masa de los portainjertos de Citrumelo separada en Hojas, Tallo y Raíces	29
Figura 23 Masa de los portainjertos de C35 separada en Hojas, Tallo y Raíces	29
Figura 24 Masa de los portainjertos de C22 separada en Hojas, Tallo y Raíces	29
Figura 25 Porcentaje de conversión de materia fresca a materia seca de las distintas partes de las plantas de Rubidoux	30
Figura 26 Porcentaje de conversión de materia fresca a materia seca de las distintas partes de las plantas de Citrumelo	30
Figura 27 Porcentaje de conversión de materia fresca a materia seca de las distintas partes de las plantas de C35	30
Figura 28 Porcentaje de conversión de materia fresca a materia seca de las distintas partes de las plantas de C22	31
Figura 29 Porcentaje de materia seca de las distintas partes de las plantas de Rubidoux, Citrumelo, C35 y C22	31

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Diagrama de la distribución de las plantas y los tratamientos durante el ensayo	9
Ilustración 2 Distribución de las plantas en el invernadero	10
Ilustración 3 Evolución apariencia de un brote	19
Ilustración 4 Raíces de Rubidoux, Citrumelo, C35 y C22 tras los tratamientos	28

1. Introducción

El cambio climático es una realidad que afecta de manera significativa a la agricultura, especialmente en regiones con condiciones extremas como las zonas cítricas de Chile, caracterizadas por su extrema aridez. Este fenómeno ha aumentado la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, como el fenómeno climático "El Niño" 2023, que trajo consigo condiciones adversas como lluvias torrenciales.

Durante eventos de lluvias extremadamente violentas, las plantas pueden llegar a quedar encharcadas durante varios días, con el agua acumulada cubriendo por completo el cultivo. Esta situación pone en riesgo la supervivencia de las plantas, y exige la evaluación de la resistencia de los portainjertos al encharcamiento.

El encharcamiento se produce cuando el agua en el suelo supera su capacidad de campo, saturando los espacios de aire por un tiempo prolongado. Esto restringe el intercambio de gases con la atmósfera y afecta los procesos químicos y biológicos normales del suelo. Las plantas extraen agua del suelo entre dos puntos, el punto de marchitez y la capacidad de campo, ambos determinados experimentalmente. (Rowe y Beardsell, 1973)

La principal consecuencia de la inundación es la disminución del oxígeno en el suelo, resultado de una serie de reacciones químicas y bioquímicas. A medida que el oxígeno es eliminado por el agua o utilizado por microorganismos y las raíces de los árboles, otros compuestos ocupan su lugar como aceptores finales de electrones en el proceso de respiración. Esto conduce a la reducción del suelo (Domingo *et al.* 2002). Aunque las raíces de los cítricos no se ven afectadas inmediatamente por la baja concentración de oxígeno en el suelo, son extremadamente sensibles a la presencia de sulfuro de hidrógeno (H_2S). El H_2S se forma en suelos encharcados debido a la descomposición anaeróbica de materia orgánica, donde las bacterias reducen sulfatos a sulfuro. Por lo tanto, la presencia de H_2S es un indicador significativo de la reducción del suelo y del inicio de daños en las raíces. La producción de H_2S y, en última instancia, el grado de daño a las raíces dependen de la temperatura, el contenido de materia orgánica y la actividad microbiana (Agustí, 2020). Como ejemplo, las raíces de los cítricos pueden morir en solo tres días de encharcamiento a temperaturas relativamente altas del suelo ($30-35^{\circ}C$), pero pueden sobrevivir durante meses a temperaturas más bajas ($<15^{\circ}C$) (Davis y Albrigo, 1994). Se ha observado que la gravedad del encharcamiento aumenta conforme aumenta la temperatura en la zona de las raíces (Rowe, 1966). También se ha visto que el pH del suelo tiene una función importante en la formación de H_2S . Donde tras 7 días de encharcamiento las plantas en suelos con pH cercanos a 5, presentaron daños importantes, mientras que las mismas plantas en suelos neutros no sufrieron ningún daño. Los suelos ricos en materia orgánica también suelen aumentar los daños en las plantas encharcadas, ofreciendo condiciones adecuadas para que los microorganismos reduzcan diversos compuestos presentes en el suelo. En contraste, las plántulas de cítricos cultivadas en arena sobreviven durante meses cuando se inundan, porque en este tipo de sustrato no hay suficientes materiales para que los microorganismos produzcan sulfuro de hidrógeno (Ford, 1968).

Otro de los grandes problemas del encharcamiento es el daño oxidativo, este se debe a la acumulación de formas reactivas del oxígeno, que causan la destrucción de las paredes celulares. Se ha demostrado que, los genotipos que muestran mayor tolerancia al encharcamiento tienen una capacidad mejorada para retrasar el daño oxidativo, gracias a una mayor actividad antioxidante enzimática y un contenido elevado de compuestos antioxidantes polares. Esto sugiere una relación directa entre la sensibilidad al estrés y la acumulación temprana de malondialdehído (MDA). Además, la acumulación temprana de MDA parece estar relacionada con una capacidad reducida para eliminar H_2O_2 en las plantas sometidas a estrés oxidativo. (Arbona, 2008)

Además, las plantas cultivadas en condiciones de encharcamiento suelen enfrentar daño oxidativo inducido por la generación de especies reactivas de oxígeno. Estas especies reactivas de oxígeno afectan la integridad de las membranas e inducen daño a la eficiencia del fotosistema II, lo que causa una considerable disminución en las tasas netas de fotosíntesis. Se debe añadir que, estas perturbaciones en los mecanismos fisiológicos pueden afectar las reservas y la translocación de carbohidratos. De hecho, las especies de plantas tolerantes y sensibles al encharcamiento pueden ser diferenciadas en función de su eficiente utilización de carbohidratos (Ashraf, 2012).

Por otro lado; bajo condiciones de encharcamiento, las plantas muestran varias respuestas, incluyendo una conductancia estomática reducida, una tasa de asimilación neta de CO_2 y una conductividad hidráulica de las raíces disminuida. En general, los árboles encharcados muestran una apariencia deteriorada y producen cosechas de baja calidad. En muchos casos, los árboles no mueren, pero su producción es mínima hasta que se solucionan los problemas de drenaje (Davis y Albrigo, 1994).

La capacidad de los árboles frutales para resistir el encharcamiento generalmente depende del patrón utilizado para el injerto, no tanto de la variedad injertada (Rowe y Beardsell, 1973). En el caso de los cítricos, los diversos patrones muestran niveles variables de tolerancia a la asfixia de las raíces; no obstante, las fuentes existentes presentan algunas contradicciones en este aspecto.

En cuanto a los portainjertos de cítricos, se destaca que el C35 y el Rubidoux, muestran una tolerancia intermedia frente al problema del encharcamiento del suelo. Estos portainjertos han demostrado ser capaces de resistir condiciones donde el exceso de agua puede ser un factor limitante para otros portainjertos. (Aleza, 2020)

En relación a Citrumelo Swingle, la bibliografía difiere en su capacidad de resistir el encharcamiento. Algunos autores lo clasifican como resistente (Forner et al, 1983; Ford, 1968) y otros lo clasifican como semi sensible (Arbona, 2009) o Wutscher (1981) que señala que es susceptible al exceso de agua en el suelo, lo que causa que los árboles se vuelvan amarillos. Además, no prospera en suelos muy arcillosos, donde muestra síntomas de clorosis y un crecimiento detenido.

Una de las razones de la tolerancia al encharcamiento de los cítricos se puede deber a la porosidad constitutiva. Esta emerge como una característica crucial que permite adaptaciones efectivas frente a condiciones adversas como el encharcamiento. Muchos estudios han revelado que la capacidad de los tejidos vegetales para regular su porosidad interna, facilita una respuesta adaptativa al exceso de agua en el suelo. La capacidad de ajustar los espacios porosos dentro de

los tejidos, especialmente en raíces, no solo permite mitigar los efectos del encharcamiento al reducir la entrada de agua y mantener la estructura celular, sino que también protege contra el daño asociado al estrés hídrico extremo.

En este estudio, se busca conocer la tolerancia de diferentes portainjertos a periodos prolongados o transitorios de encharcamiento y su capacidad de recuperación. Esta investigación puede proporcionar información valiosa, para desarrollar estrategias de manejo, que aseguren la sostenibilidad y productividad de los cultivos cítricos en estas condiciones desafiantes.

2. Hipótesis

Se plantea la hipótesis de que las plantas que experimentan encharcamiento, tanto temporal como prolongado, ven restringido su desarrollo llegando a debilitarse significativamente e incluso a morir.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la tolerancia y la capacidad de recuperación de los portainjertos *Rubidoux*, *Citrumelo*, *C35* y *C22* en plantas de naranjo cv. *Cara Cara*.

3.2 Objetivo específico

- Medir como se ve afectada la actividad fotosintética de la planta
- Determinar la evolución de la clorofila en plantas encharcadas.
- Evaluar la evolución del potencial hídrico en plantas encharcadas.
- Observar el daño foliar causado por el encharcamiento.
- Determinar el impacto del estrés por anoxia en la partición de la biomasa, en los distintos componentes de las plantas.

4. Material y Métodos:

4.1 Material vegetal, tratamientos de estrés y diseño experimental.

Para el estudio se seleccionaron 48 plantas de naranjo cv. Cara Cara de un año de edad, injertadas en cuatro portainjertos C35, C22, Rubidoux y Citrumelo, provenientes de un vivero autorizado (Deliplant). Las plantas están en bolsas plásticas de polietileno de 7 litros.

Previo al experimento las plantas se riegan 3 veces por semana con 0.5 L de agua. Las plantas están protegidas bajo invernadero de tipo venlo, donde se mantiene una temperatura controlada.

El estudio consiste en colocar las plantas en un contenedor estanco y cubrirlas de agua hasta 2 cm por encima de la superficie del sustrato. Durante los días que dura el experimento el nivel de agua se rellena para mantenerlo dentro de los valores deseados. El estudio comprende tres tratamientos que se aplicarán a 4 plantas de cada portainjerto. **El tratamiento 0 (T0)** es el control, en el cual las plantas se mantienen con riego normal. **El tratamiento 1 (T1)** donde las plantas se someten a 7 días de encharcamiento y luego se analizará su capacidad de recuperación; y en **el tratamiento 2 (T2)** que consiste en someter las plantas a un encharcamiento prolongado durante 30 días.

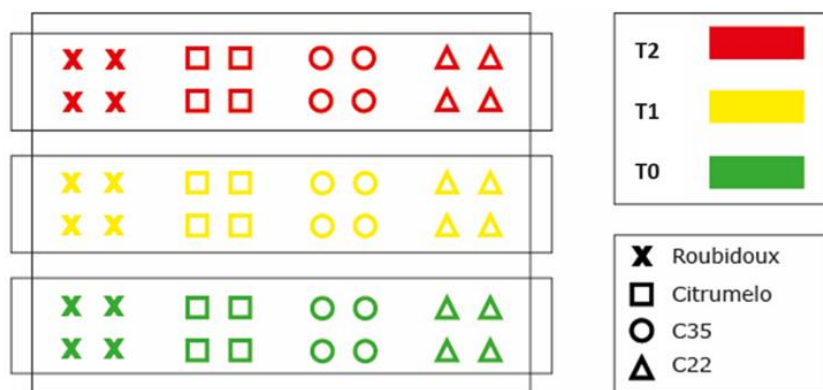


Ilustración 1 Diagrama de la distribución de las plantas con los tratamientos durante el ensayo



Ilustración 2 Distribución de las plantas en el invernadero

4.2 Mediciones

Para evaluar el efecto del anegamiento se medirán parámetros fisiológicos y morfológicos. Los parámetros que se evaluarán son los siguientes:

4.2.1 Actividad Fotosintética y conductancia estomática.

Medir la capacidad fotosintética evalúa la eficiencia de la planta en convertir luz solar en energía, mientras que la conductancia estomática regula el intercambio de gases y la transpiración. Estas mediciones son clave para entender la salud vegetal, manejar el estrés ambiental y optimizar prácticas agronómicas para mejorar la producción y la calidad de los cultivos. Para conocerla se mide la asimilación neta de CO_2 con IRGA (Infra-Red Gas Analyzer) modelo CIRAS 3, Este equipo es capaz de medir las concentraciones gaseosas de dióxido de carbono (CO_2) y de vapor de agua (H_2O) en una corriente de aire que pasa a través de una cámara sellada alrededor de la hoja. Al analizar las concentraciones de estos gases antes y después de su paso por la hoja, el sistema IRGA puede determinar la tasa de fotosíntesis (Vu y Yelenosky 1991), la tasa de transpiración y otros factores vinculados al intercambio gaseoso de la planta. Para tomar las medidas, se seleccionó una hoja sana de cada planta y se realizó la medición de una planta de cada patrón y tratamiento cada vez, primero la primera planta de un patrón seguida de la primera de otra, etc. Una vez se habían medido todas las plantas, se volvió a realizar una segunda medición con el objetivo de reducir el posible error causado por las condiciones ambientales. Con el mismo fin, también se realizaron las medidas a primera hora del día.

4.2.2 Potencial Hídrico

Medir el potencial hídrico, es fundamental para evaluar el estado hídrico de las plantas. Para este proceso se implementará una cámara de Scholander. Previo a su utilización, se deben seleccionar hojas sanas de cada una de las plantas, y colocarlas dentro de un sobre impermeable a la luz y al agua durante 30 minutos, sin separarlas de la planta. Una vez transcurrido este periodo, las hojas se separan de la planta y se introducen en la cámara. En esta se va aumentando la presión hasta que se puede observar como el agua empieza a salir por el peciolo de la hoja. Para la medida se seleccionó una hoja de cada planta y se realizó en las horas medias del día entre las 10 y las 12 (am)

4.2.3 Medición de clorofila

Para medir la clorofila se utiliza un Medidor SPAD, que permite conocer el contenido en clorofila de las hojas de manera indirecta sin ser un sistema destructivo. El medidor calcula un valor numérico basado en la diferencia entre la intensidad de la luz emitida y la cantidad de luz detectada. Este valor, está correlacionado con la concentración de clorofila en la hoja. Para la medida se seleccionó una hoja sana de cada una de las plantas y se midió siempre la misma hoja para reducir el error.

4.2.4 Número de hojas

Para conocer el daño foliar se evaluará mediante observación visual, contando el número total de hojas sanas, se tomará como hoja dañada toda aquella que presente un 25% o más de su superficie necrótica (Arbona 2009). Para ello se contaron las hojas de todas las plantas durante todo el experimento y se evaluó las diferencias entre ellas.

4.2.5 Materia Seca

Para medir la diferencia de materia seca entre los tratamientos, se colocan las muestras vegetales separadas en raíz, tallo y hojas dentro de la estufa, entre 60°C hasta que el peso de la muestra no cambie durante un período de tiempo específico. Las muestras se dejaron durante 72 horas dentro de la estufa. Este proceso elimina toda el agua presente, lo que permite determinar la cantidad de materia seca real de la muestra.

4.2.6 Análisis estadístico

En este estudio, se realizaron análisis estadísticos sobre datos obtenidos de 4 plantas por cada uno de los 4 portainjertos y bajo tres tratamientos distintos. El objetivo principal fue evaluar la significancia del tratamiento, del portainjerto y de la interacción entre ambos en varios aspectos del crecimiento y desarrollo de las plantas. Los datos fueron sometidos a análisis de varianza (ANOVA) para investigar los efectos del encharcamiento temporal y prolongado en características como el estado general de la planta, la defoliación, y el contenido de clorofila en hojas adultas y brotes.

Para determinar diferencias estadísticamente significativas, se emplearon pruebas de comparación múltiple de Tukey con un nivel de significancia establecido en 0,05. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software STATGRAPHICS, asegurando así la validez y la robustez de los resultados obtenidos para cumplir con los objetivos del estudio.

5. Resultados

5.1 Evolución de la tasa fotosintética neta

A continuación, se puede ver la evolución de los valores de la actividad fotosintética neta para los portainjertos estudiados. Como se observa en las figuras, los valores máximos se obtienen siempre para las plantas control, pese a que se observa una tendencia descendiente causada por la bajada de las temperaturas. (Sage, R. F., & Kubien, D. S. (2007)). Aunque se observe una tendencia en la cual las plantas del grupo control muestran valores superiores en la tasa de fotosíntesis neta, la variabilidad inherente a esta medida, influenciada por múltiples factores, hace que no haya muchos casos donde se puedan detectar diferencias significativas en los valores registrados.

Se observó que todas las combinaciones de portainjerto y variedad de cítricos mostraron una recuperación rápida después de un período de encharcamiento de 7 días. Aunque inicialmente se vio afectada, las plantas se recuperaron rápidamente, alcanzando valores similares a las plantas control en tan solo unos días después de ser retiradas del agua.

En la figura 1 se observa que existen diferencias significativas para los valores de actividad fotosintética neta para los días 26/4 y 10/5. En el 26/4 se puede observar cómo no existe diferencia significativa entre los tratamientos T1 y T2 que corresponden a las plantas encharcadas y que los valores de T0 son significativamente superiores. El 29/4 las plantas T1 se sacaron del agua, esto coincide con los días donde no se registraron diferencias significativas para los tratamientos y no es hasta el 10/5 donde se observan diferencias significativas entre los tratamientos donde T0 y T1 se mantienen con valores similares y T2 presenta valores significativamente inferiores cercanos a 0. Estas diferencias se pueden deber a una reducción de la actividad fotosintética causada por una situación de anoxia como muchos estudios demuestran (Pérez-Jiménez, M., Hernández, J. A., & Olmos, E. (2013))

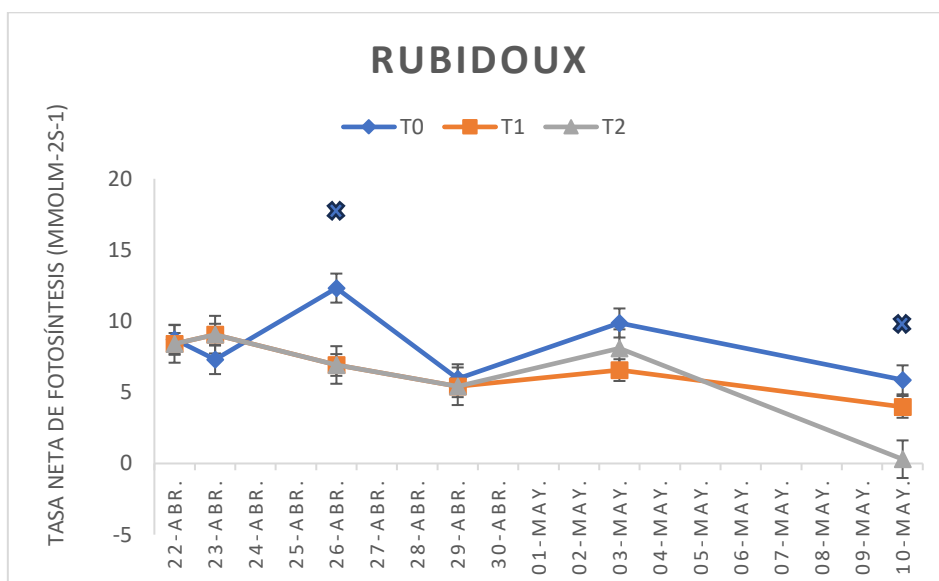


Figura 1 Evolución de la tasa fotosintética neta en los portainjertos de Rubidoux

Los portainjertos de Citrumelo (Figura 2) siguen una estructura similar al resto de portainjertos donde hay una tendencia a la baja. Lo más remarcable es la rápida recuperación de las plantas T1 las cuales se sacaron del agua el día 29/4 y en la siguiente medida del 3/5 ya presentaban valores idénticos y significativamente mayores a los de las plantas encharcadas.

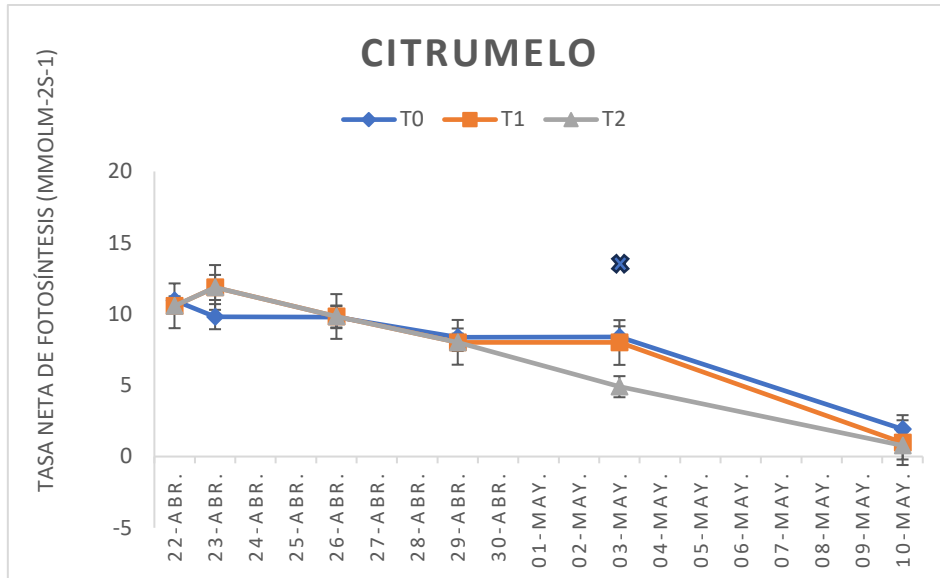


Figura 2 Evolución de la tasa fotosintética neta en los portainjertos de Citrumelo

En la figura 3 los portainjertos de C35 tuvieron una gran respuesta al tratamiento, donde la T0 siempre presentó valores superiores al resto de tratamientos existiendo diferencias significativas el 26/4. Por otro lado, las plantas de T1 se recuperaron rápidamente tras sacarlos del agua alcanzando valores ligeramente superiores que los valores del control en el 3/5 y siendo estos dos significativamente superiores a T2.

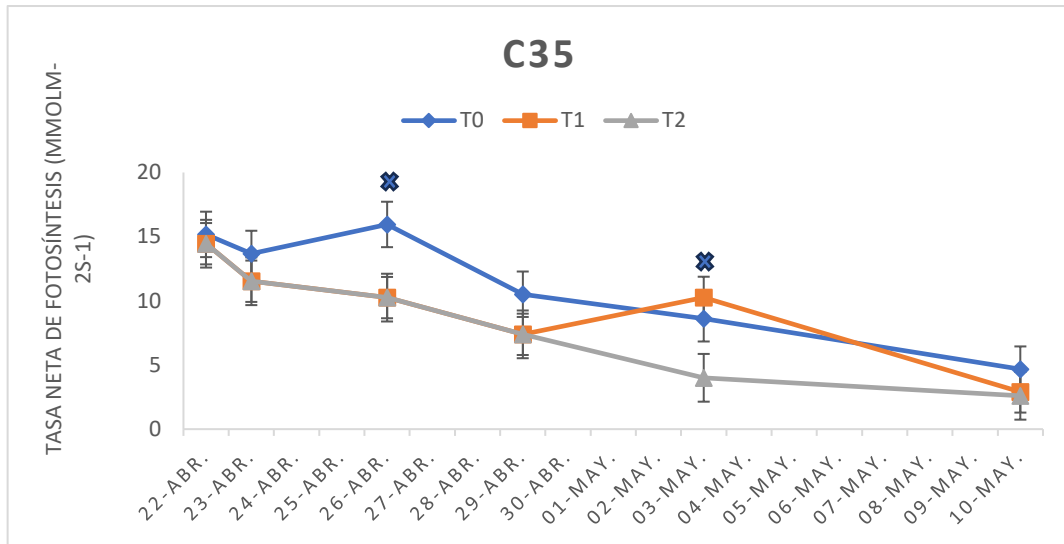


Figura 3 Evolución de la tasa fotosintética neta en los portainjertos de C35

En la figura 4 se puede observar cómo los portainjertos de C22 funcionaron de una manera muy similar a los de C35 (Figura 3). Como se ve en el gráfico, el T0 siempre obtuvo los valores máximos de actividad fotosintética neta teniendo valores significativamente superiores al resto para el 23/4 y el 29/4. Lo que también que es muy remarcable es la baja capacidad de recuperación que presentó tras quitar las plantas T1 del agua, puesto que estas no sufrieron ninguna subida respecto a la tendencia que tenían, y no existieron diferencias significativas para sus valores en ninguna medida.

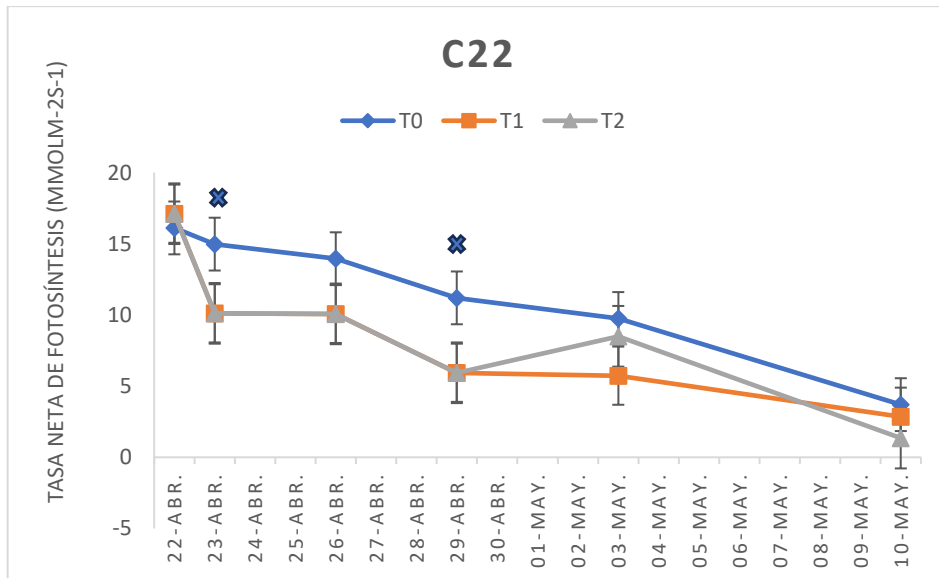


Figura 4 Evolución de la tasa fotosintética neta en los portainjertos de C22

5.2 Análisis de los Gráficos de Conductancia Estomática

En general, todos los tratamientos (T0, T1, T2) mostraron un incremento notable en la conductancia estomática alrededor del 26 de abril, seguido de una marcada disminución y estabilización en niveles bajos hacia finales de abril. Entre el 25 y el 27 de abril, los tratamientos T1 (7 días de anegamiento) y T2 (30 días de anegamiento) exhibieron una conductancia estomática significativamente más alta en comparación con el control (T0). Sin embargo, después del período de anegamiento, es decir, después del 29 de abril, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos. Estos resultados sugieren que la respuesta inicial al estrés por anegamiento podría haber provocado un aumento temporal en la conductancia estomática, posiblemente como un mecanismo para maximizar la fotosíntesis y la transpiración, como se ha observado en estudios previos como los de Kozłowski (1984) y Bradford y Yang (1981). La posterior reducción en la conductancia estomática indica una adaptación fisiológica para mitigar la pérdida de agua y evitar daños mayores debido a la hipoxia en las raíces, según discuten Jackson y Drew (1984) y Else et al. (1996).

Para Rubidoux (Figura 5) y Citrumelo (Figura 6), todos los tratamientos muestran un pico en la conductancia estomática alrededor del 26 de abril, seguido de una marcada disminución. Entre el 25 y el 27 de abril, los tratamientos T1 (7 días de anegamiento) y T2 (30 días de anegamiento) exhibieron una conductancia estomática ligeramente superior a la del tratamiento T0. Sin embargo, después del período de cese de anegamiento, los valores se estabilizaron y no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos, lo que sugiere que los cambios en los valores no se pueden asociar al tratamiento.

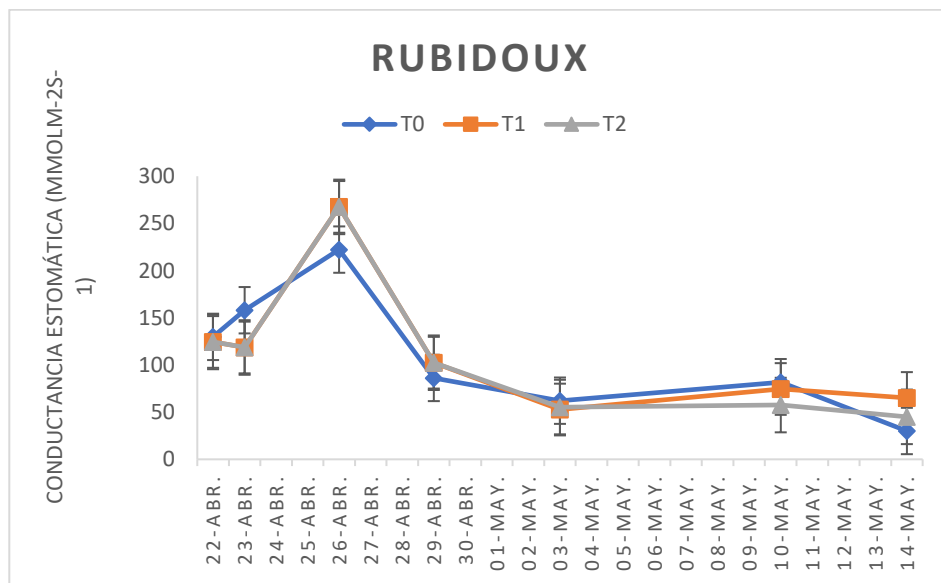


Figura 5 Evolución de la conductancia estomática en los portainjertos de Rubidoux

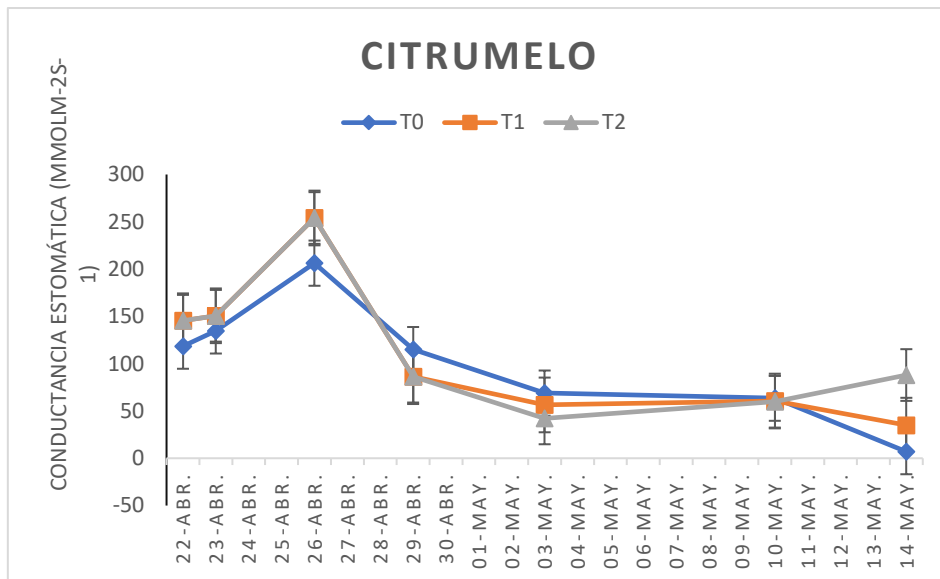


Figura 6 Evolución de la conductancia estomática en los portainjertos de Citrumelo

El C35 (Figura 7) muestra un patrón de respuesta similar a otros portainjertos, con un pico en la conductancia estomática alrededor del 26 de abril seguido de una disminución posterior. Entre el 25 y el 27 de abril, los tratamientos T1 y T2 exhibieron conductancias significativamente más altas que el tratamiento T0. Sin embargo, después del período de anegamiento, hacia finales de abril, las diferencias entre los tratamientos se redujeron y los valores mostraron niveles comparables. Este patrón sugiere que la respuesta inicial al estrés por anegamiento podría haber causado un aumento temporal en la conductancia estomática, en línea con observaciones previas de Kozlowski (1984) y Bradford y Yang (1981). La posterior disminución en la conductancia estomática refleja una adaptación fisiológica para mitigar el estrés hídrico, como discuten Jackson y Drew (1984) y Else et al. (1996).

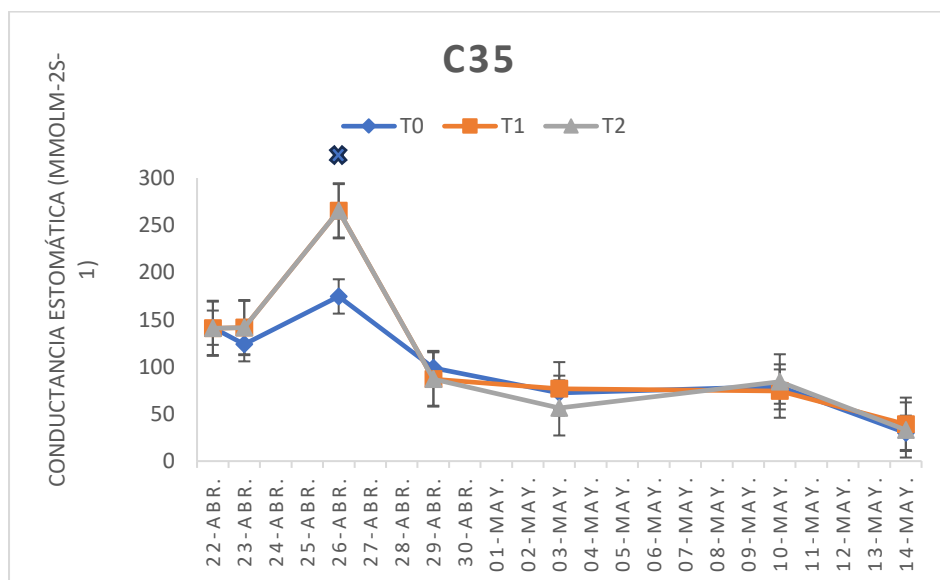


Figura 7 Evolución de la conductancia estomática en los portainjertos de C35

El C22 (Figura 8) muestra una tendencia general similar a la observada en el resto de figuras, donde no existen diferencias significativas durante todo el experimento a falta de la última medición la cual presenta un valor significativamente superior de T1. Esta situación se puede deber a las condiciones específicas del día ya que ambos valores para T0 y T2 fueron nulos.

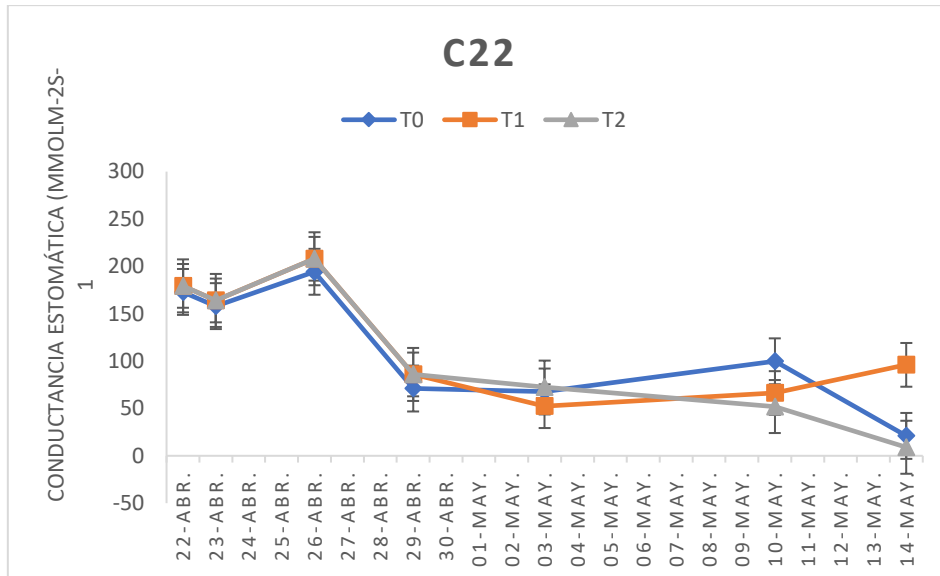


Figura 8 Evolución de la conductancia estomática en los portainjertos de C22

5.3 Evaluación del Potencial Hídrico

Los datos revelan que el tratamiento de control mantuvo consistentemente valores normales, característicos de plantas sanas, a lo largo del período de estudio. Por otro lado, los tratamientos experimentales T1 y T2, mostraron valores similares entre sí en los primeros días, indicando una respuesta similar frente al estrés hídrico inducido por el encharcamiento. Además, se observó una notable capacidad de recuperación en las plantas T1 una vez finalizado el período de estrés hídrico. Este aspecto se destaca especialmente en el retorno rápido de los valores del potencial hídrico a niveles idénticos a los del control (T0), tras el cese de las condiciones de encharcamiento. Estos hallazgos subrayan la resiliencia y la adaptabilidad de las plantas estudiadas frente a eventos de estrés hídrico, ofreciendo importantes perspectivas para la comprensión de sus mecanismos de regulación hídrica y su capacidad de recuperación.

En el gráfico inferior (Figura 9) correspondiente a Rubidoux, se observa que los tratamientos T0 (control), T1 (7 días de anegamiento) y T2 (30 días de anegamiento) muestran diferencias en el potencial hídrico a lo largo del tiempo. En un primer momento, T1 y T2 mantiene valores más altos de potencial hídrico en comparación con T0. Posterior al período de cese de anegamiento, específicamente a partir del 30 de abril, T2 muestra un potencial hídrico significativamente superior al de T0 y T1. Esta diferencia se atribuye a la rápida capacidad de recuperación de T1, y los valores elevados de T2 se atribuyen al efecto del anegamiento prolongado, que promueve una mayor retención de agua en las raíces, como lo sugieren estudios previos como los de Kozlowski (1984) y Bradford y Yang (1981).

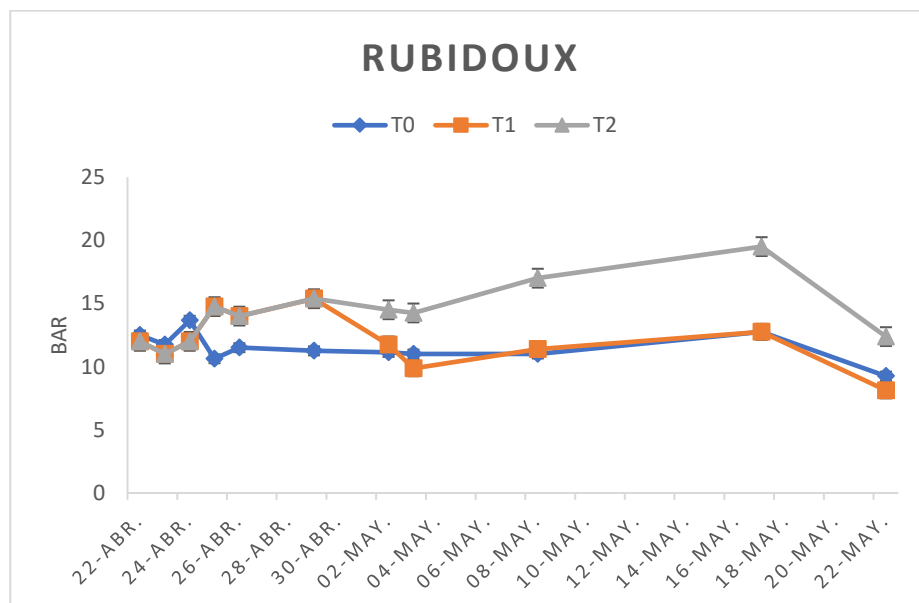


Figura 9 Evolución del Potencial hídrico de los portainjertos de Rubidoux



25/4	26/4	29/4
------	------	------

Ilustración 3 Evolución apariencia de un brote

Como se observa en la ilustración 8, en un primer momento hubo un rápido cambio en la apariencia de algunos brotes de plantas encharcadas, que en tan solo 3 días tras el encharcamiento, ya presentaban claros indicios de daño que inclinaban a pensar que las plantas no serían capaces de aguantar la situación de anoxia. Desde el día 25/4 las plantas comenzaron a recuperarse y se dejaron de percibir los síntomas del estrés, en este punto fue cuando se estabilizó la diferencia de potencial entre las plantas encharcadas y el control, que se mantuvo durante todo el experimento. Este fenómeno se puede deber a una adaptación al estrés para minimizar la pérdida de agua (Jackson, M. B., & Colmer, T. D. (2005)).

En el gráfico correspondiente al Citrumelo (figura 10) se observa un funcionamiento muy similar al resto de gráficos donde los tratamientos T0, T1 y T2 muestran variaciones en el potencial hídrico a lo largo del estudio. T2, que experimenta anegamiento durante 30 días, mantiene valores consistentemente más altos de potencial hídrico en comparación con T0 y T1. Después del periodo de anegamiento, cuando T1 deja de estar encharcado, específicamente a partir del 2 de mayo, T2 presenta un potencial hídrico significativamente superior al de T0 y T1 y no existe diferencia entre los mismos.

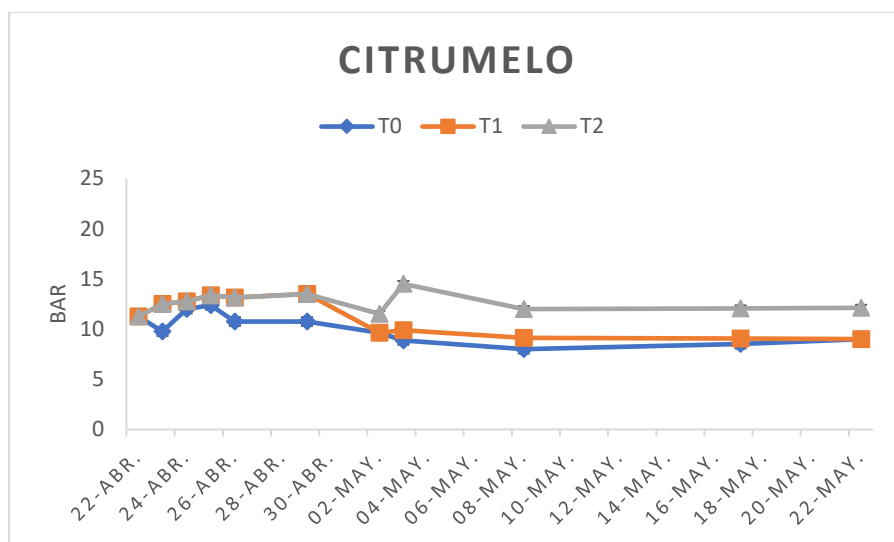


Figura 10 Evolución del Potencial hídrico de los portainjertos de Citrumelo

Los gráficos que representan la evolución del potencial hídrico para C35 y C22 (figura 11 y 12) también siguen el mismo esquema visto en los gráficos anteriores (figura 9 y 10) donde en un primer momento los valores de T1 y T2 se mantienen significativamente superiores al control y tras el día 29/4 (donde las plantas de T1 se sacan del agua) los valores del potencial de estas rápidamente se recuperan y se igualan a las de T0, demostrando la rápida recuperación de las plantas (Pérez-Pérez JG, 2009).

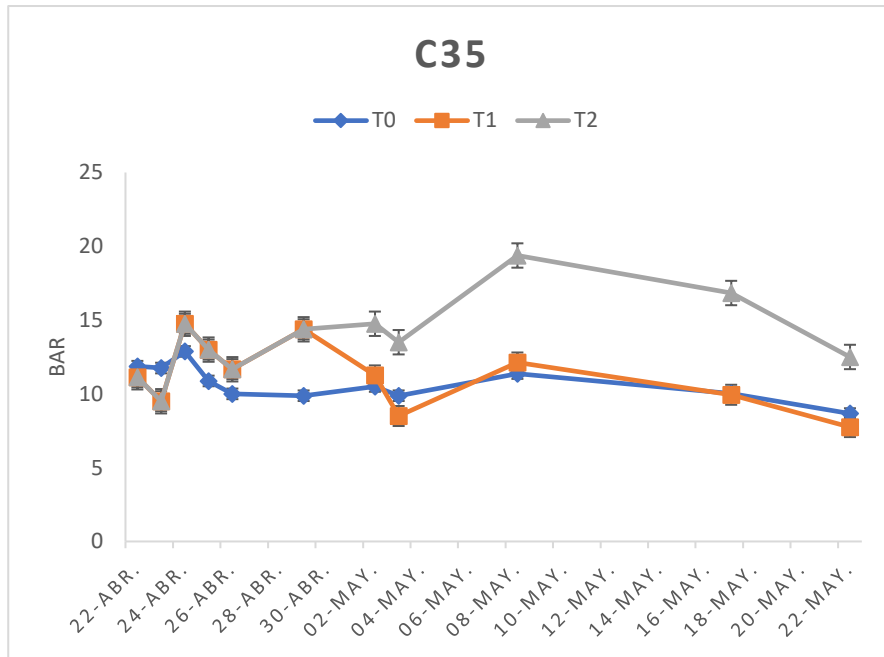


Figura 11 Evolución del Potencial hídrico de los portainjertos de C35

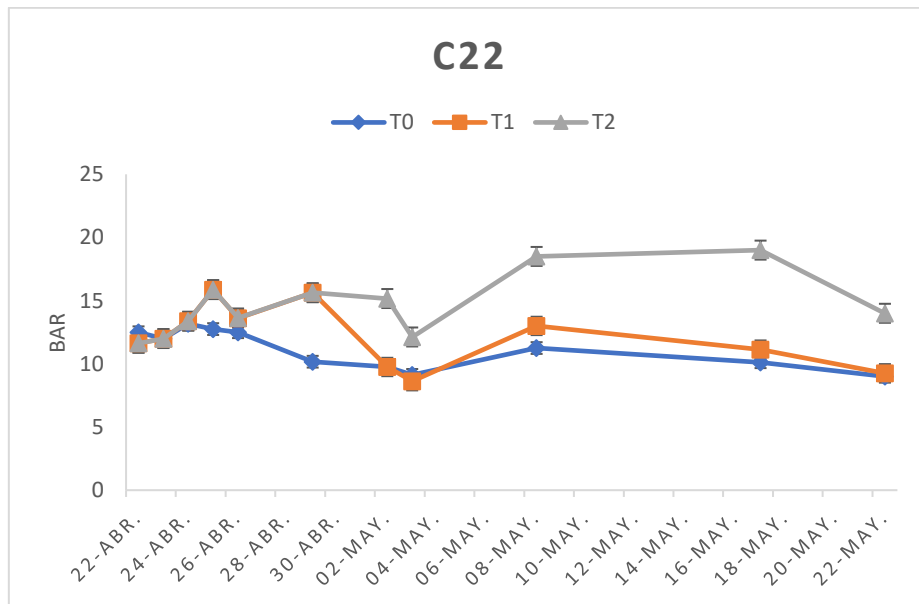


Figura 12 Evolución del Potencial hídrico de los portainjertos de C22

5.4 Contenido relativo en clorofila

En lo referente a la evolución de la clorofila, los gráficos inferiores (Figura 13, 14, 15 y 16) muestran una tendencia clara a la baja para todos los tratamientos, siendo los valores de T2 han sido los que han experimentado un mayor descenso. Pese a dicha tendencia, no existen diferencias significativas entre los tratamientos y por ello no se puede asociar el descenso en el contenido de clorofila con los tratamientos en cuestión. Estos resultados no concuerdan con lo esperado puesto que varios estudios (Taiz, L., & Zeiger, E. (2010)) de fisiología vegetal, correlacionan una exposición de las plantas al estrés con un descenso de su contenido en clorofila. Es importante señalar que la concentración de clorofila puede estar influida por la entrada del otoño, el descenso de las temperaturas, la edad, la posición y tamaño de las hojas disminuyendo esta sustancia (El-jendoubi et al., 2011)

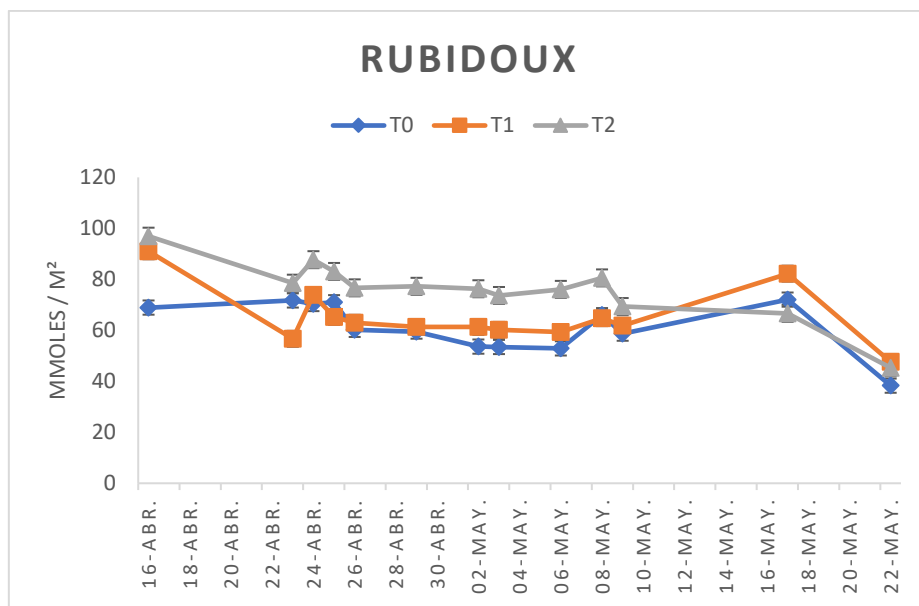


Figura 13 Evolución Contenido relativo de clorofila en hoja adulta del portainjerto Rubidoux.

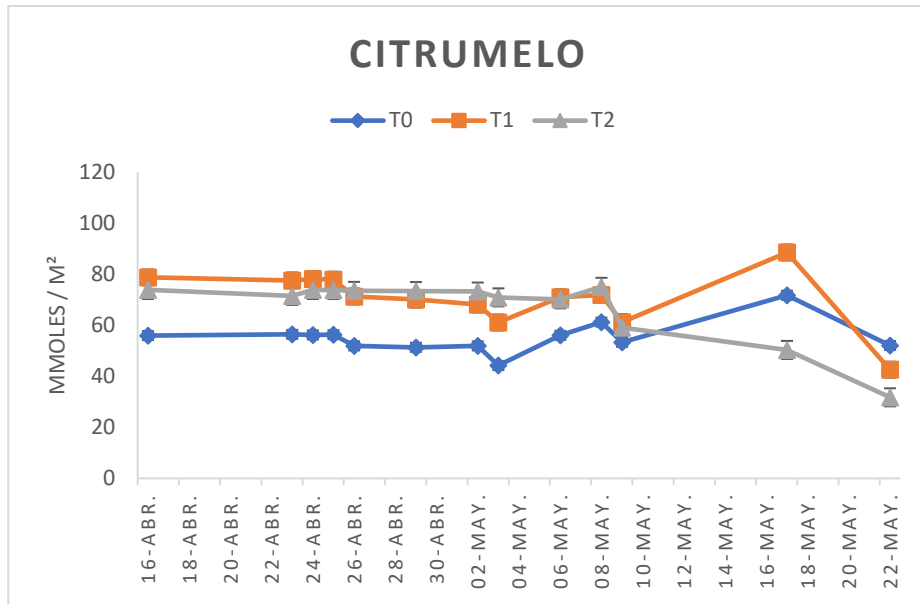


Figura 14 Evolución Contenido relativo de clorofila en hoja adulta del portainjerto Citrumelo.

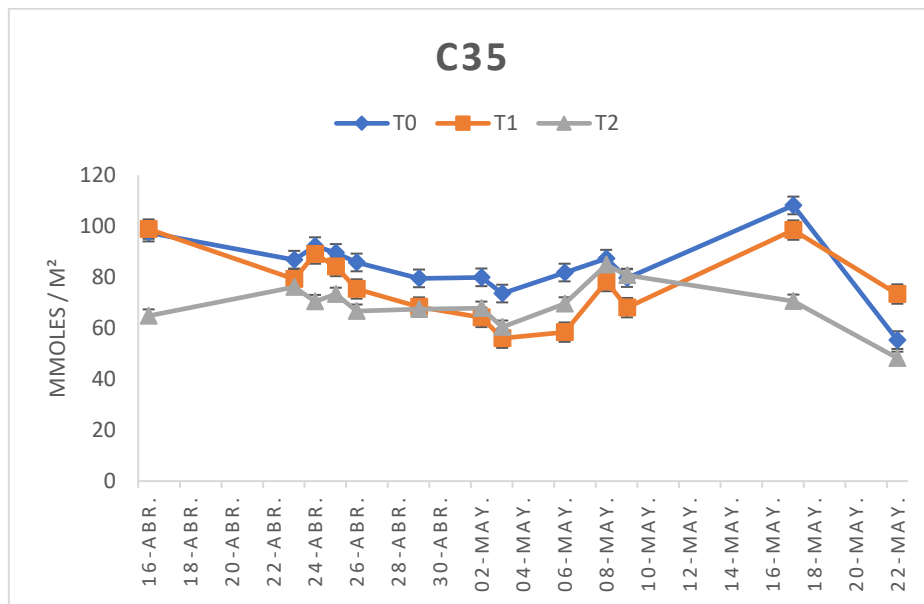


Figura 15 Evolución Contenido relativo de clorofila en hoja adulta del portainjerto C35.

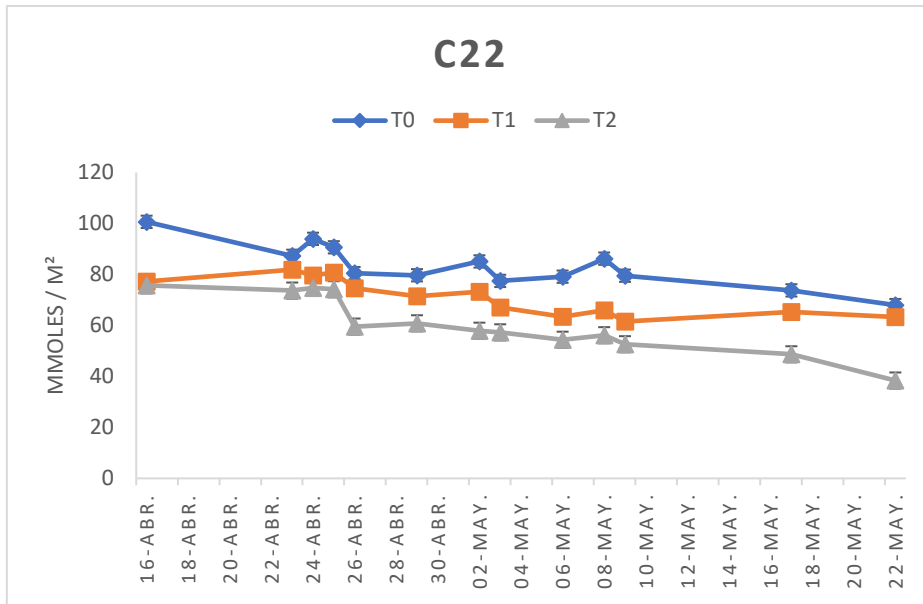


Figura 16 Evolución Contenido relativo de clorofila en hoja adulta del portainjerto C22.

5.5 Número de hojas

En las figuras siguientes se representan los datos del número total de hojas para cada fecha indicada. Como se puede observar los dos portainjertos que se vieron más afectados por el estrés de anoxia fueron el Rubidoux y el C35. Ambos presentaron valores inferiores al control donde en las plantas de Rubidoux los valores más bajos los alcanzó el T1 y en C35 fueron los del T2.

En la figura 17 se plasma la evolución del número de hojas de las plantas de Rubidoux. En este gráfico se observa como el primer día no existía diferencia significativa entre los tratamientos y que finalmente tras 1 mes se observan diferencias significativas entre los mismos, donde los valores máximos los alcanza el control y los mínimos el T1 seguido de cerca del T2, pero existiendo una diferencia significativa entre ellos. Esta situación, se puede deber al efecto del ácido abscísico que se ha generado en la planta durante el periodo de estrés, y que al volver a tener condiciones favorables en el caso de T1, haya ascendido hasta las hojas causando una mayor defoliación (Agustí M., 2020).

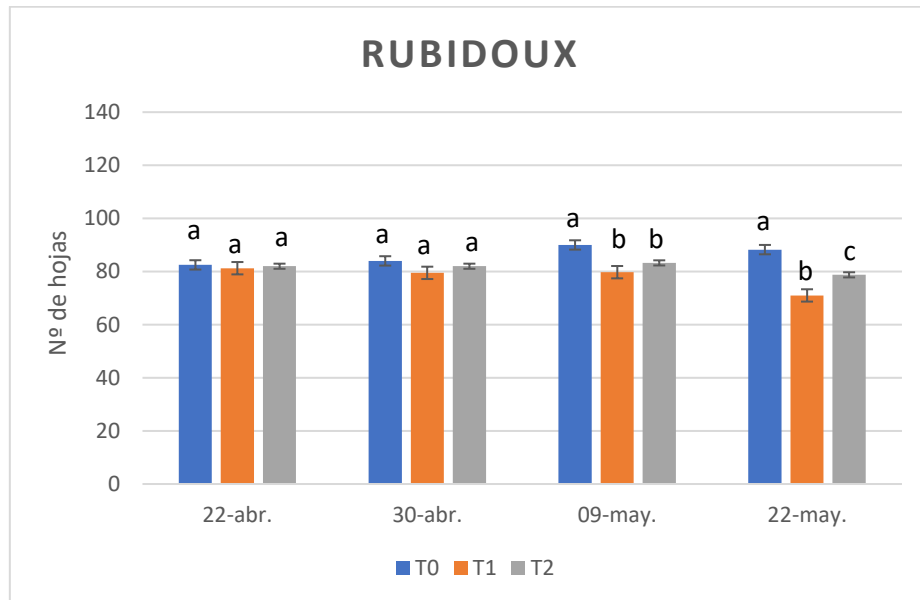


Figura 17 Evolución del número de hojas de las plantas del portainjerto Rubidoux.

La Figura 18 exhibe la variación en el número de hojas de las plantas de Citrumelo. En este gráfico, se observa que no se ha detectado ninguna alteración significativa en el conteo de hojas entre los diferentes tratamientos.

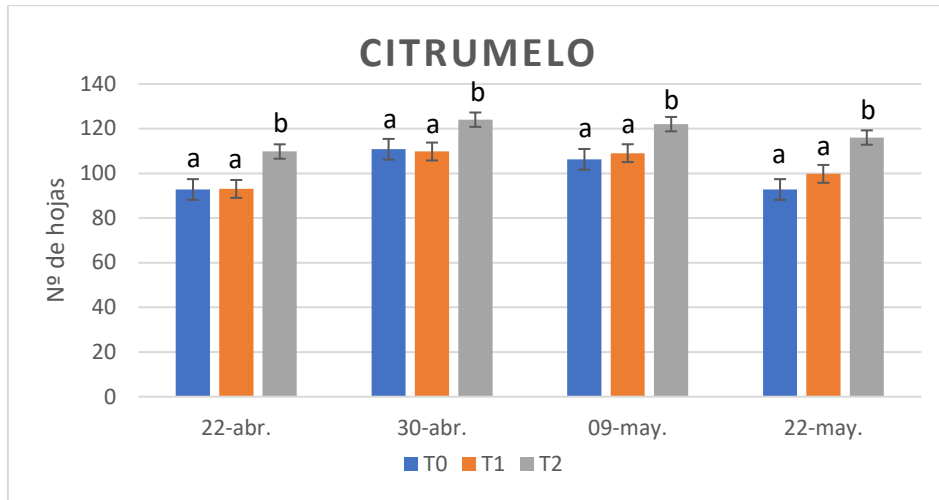


Figura 18 Evolución del número de hojas de las plantas del portainjerto Citrumelo.

La Figura 19 presenta la evolución del número de hojas en las plantas de C35. En este gráfico se puede observar que al inicio del experimento no había grandes diferencias entre los tratamientos. Sin embargo, después de un mes, se observan diferencias significativas entre los tratamientos, donde el control alcanza los valores máximos seguidos por los valores de T1 y los valores de T2 fueron los más bajos, con una diferencia estadísticamente significativa entre ellos.

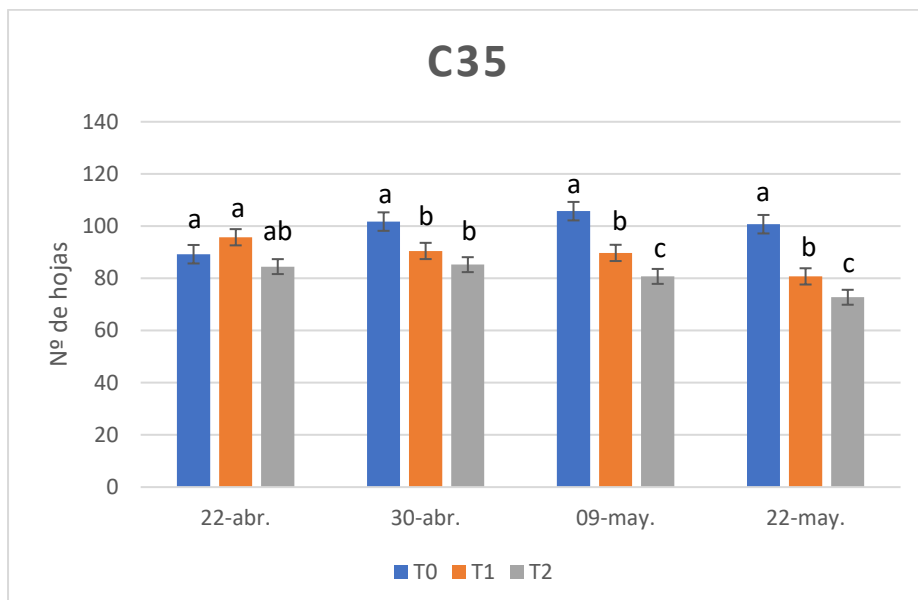


Figura 19 Evolución del número de hojas de las plantas del portainjerto C35.

La Figura 20 muestra cómo cambia el número de hojas en las plantas de C22 a lo largo del estudio. En el gráfico, no se observa ninguna diferencia notable en el recuento de hojas entre los distintos tratamientos.

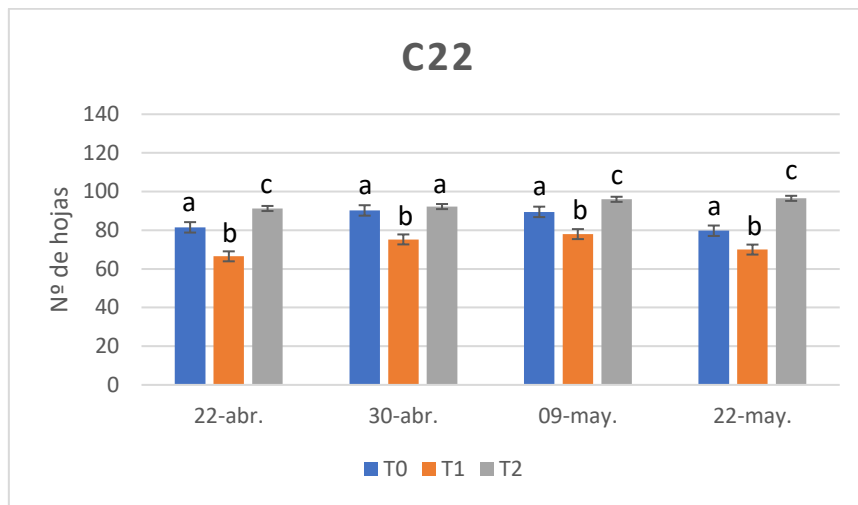


Figura 20 Evolución del número de hojas de las plantas del portainjerto C22.

5.6 Participación de biomasa

En las figuras inferiores se presentan los valores de biomasa total de los árboles y sus diferentes partes, desglosadas en: hojas, tallo y raíces, obtenidos mediante análisis destructivos, así como las figuras que muestran la distribución de la materia seca en porcentaje total entre las distintas partes de la planta según el tratamiento. Como se puede observar en los gráficos inferiores, no se detecta ninguna diferencia significativa en el desarrollo entre los tratamientos aplicados.

En resumen, se puede concluir que en los patrones: Rubidoux, Citrumelo, C35 y C22, el efecto del encharcamiento, tal como se refleja en la partición de biomasa, no causa ningún impacto significativo ni en la masa total ni en la distribución del porcentaje de materia seca entre hojas, tallos y raíces ni en la conversión entre masa fresca y masa seca, bajo las condiciones del ensayo.

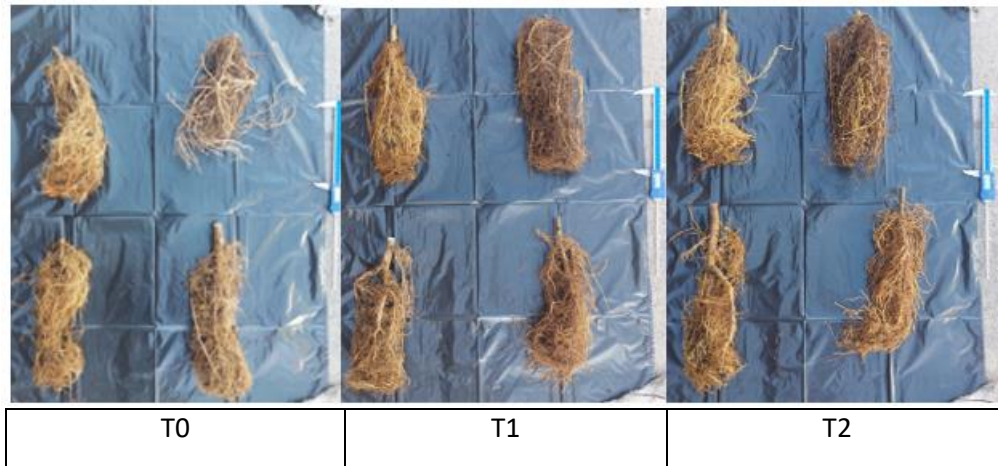


Ilustración 4 Raíces de Rubidoux, Citrumelo, C35 y C22 tras los tratamientos

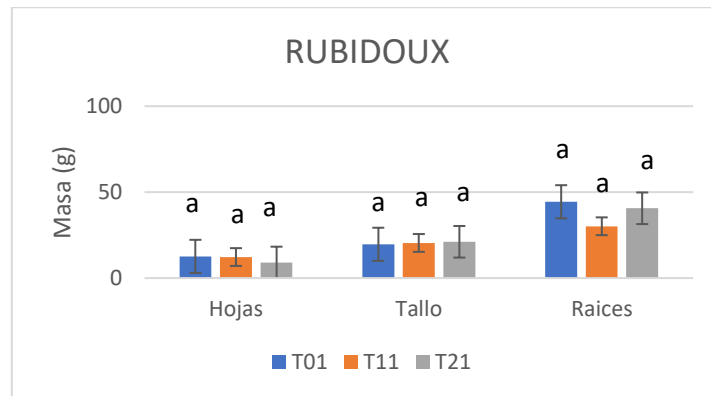


Figura 21 Masa de los portainjertos de Rubidoux separada en Hojas, Tallo y Raíces.

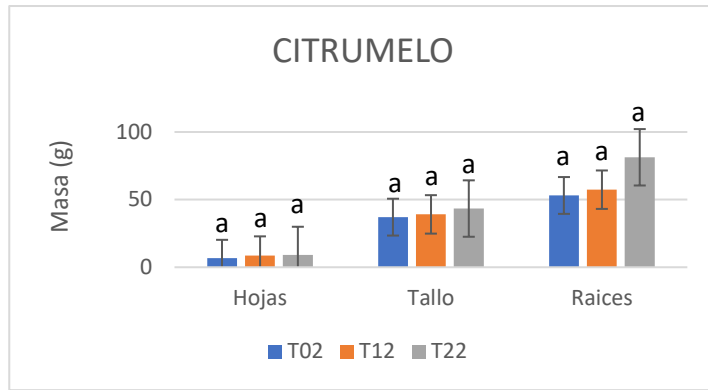


Figura 22 Masa de los portainjertos de Citrumelo separada en Hojas, Tallo y Raíces

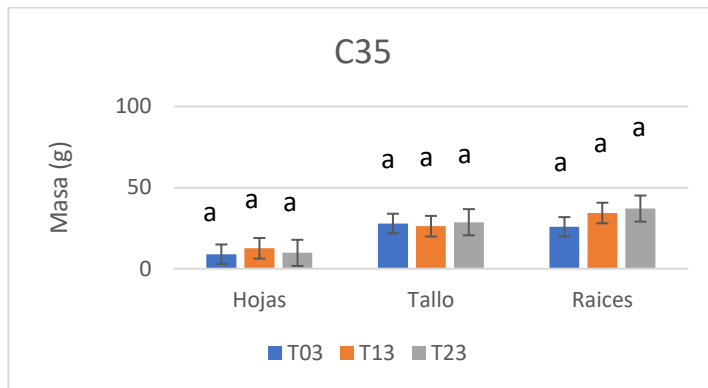


Figura 23 Masa de los portainjertos de C35 separada en Hojas, Tallo y Raíces

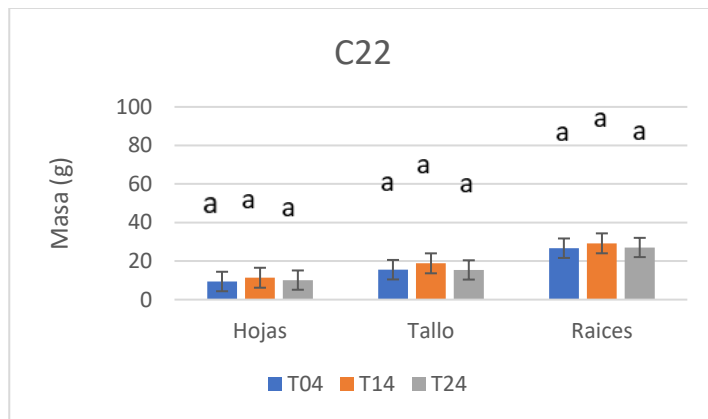


Figura 24 Masa de los portainjertos de C22 separada en Hojas, Tallo y Raíces

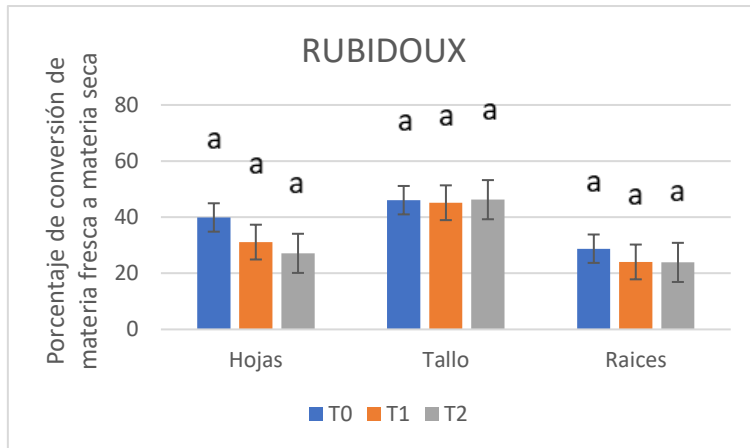


Figura 25 Porcentaje de conversión de materia fresca a materia seca de las distintas partes de las plantas de Rubidoux

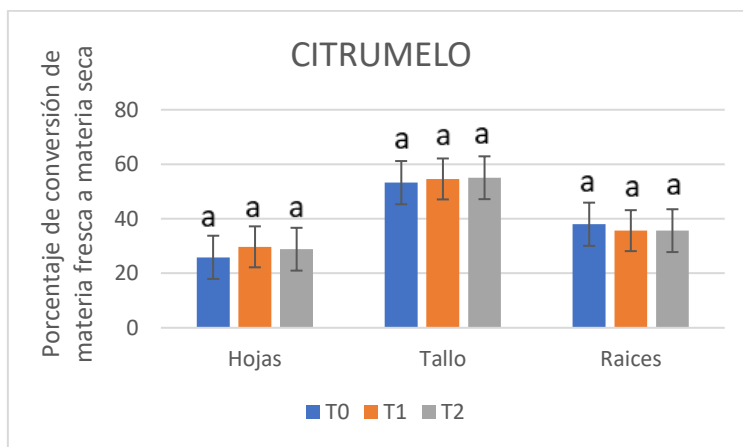


Figura 26 Porcentaje de conversión de materia fresca a materia seca de las distintas partes de las plantas de Citrumelo

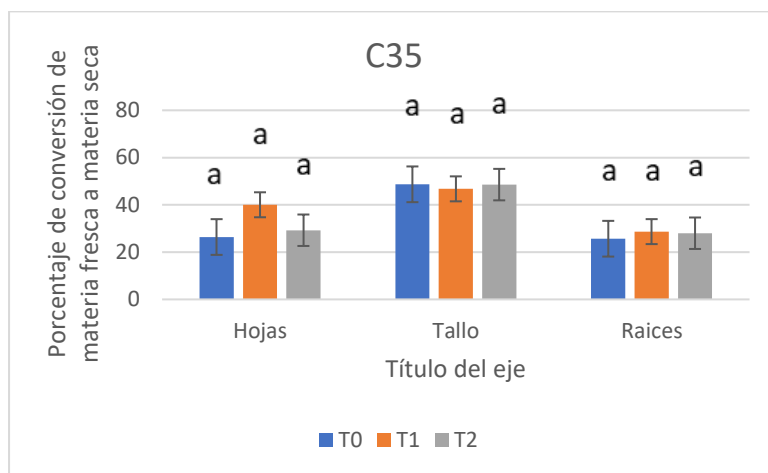


Figura 27 Porcentaje de conversión de materia fresca a materia seca de las distintas partes de las plantas de C35

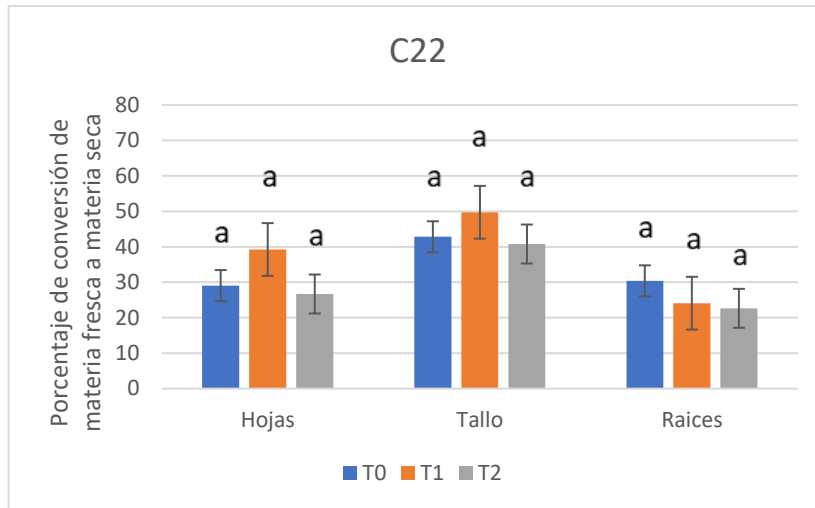


Figura 28 Porcentaje de conversión de materia fresca a materia seca de las distintas partes de las plantas de C22

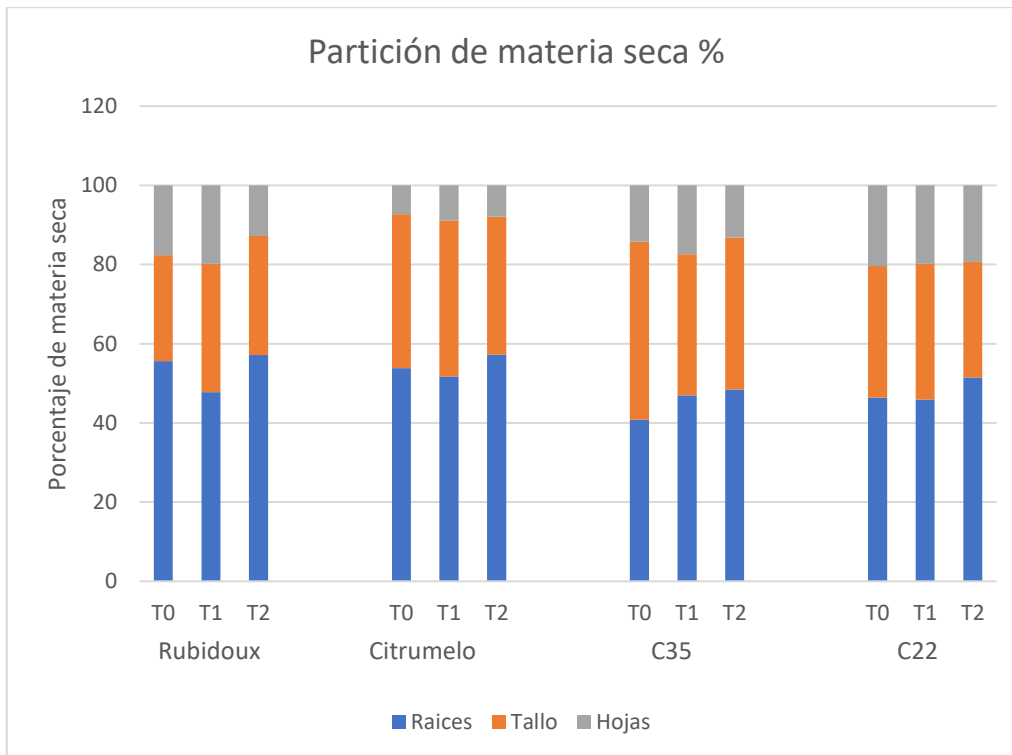


Figura 29 Porcentaje de materia seca de las distintas partes de las plantas de Rubidoux, Citrumelo, C35 y C22

6. Conclusiones

La investigación sobre los efectos del encharcamiento temporal y prolongado en diferentes portainjertos de cítricos reveló varias conclusiones significativas. Los portainjertos estudiados, incluyendo C35, C22, Rubidoux y Citrumelo, demostraron una notable capacidad para resistir condiciones de encharcamiento, aunque con variabilidad en su respuesta fisiológica y de desarrollo.

El portainjerto Rubidoux presentó una mayor sensibilidad al estrés de anoxia, reflejado en un menor número de hojas y mayor daño foliar en comparación con el control. Esta mayor sensibilidad demuestra que el portainjerto Rubidoux no es el más adecuado para resistir situaciones de encharcamiento.

El Citrumelo mostró la capacidad más robusta para regular el potencial hídrico durante el encharcamiento, manteniendo valores estables incluso bajo estrés prolongado, respondió muy bien al daño foliar y consiguió valores óptimos en el resto de los parámetros estudiados. Probablemente este aumento en la tolerancia al encharcamiento se debe a la porosidad constitutiva. Esto se puede demostrar con el peso superior en raíces y tallos del Citrumelo respecto al resto de portainjertos puesto que estos órganos se rellenan de agua para evitar los daños por encharcamiento.

El C35 obtuvo valores similares a Rubidoux aunque presentó un menor número de hojas y mayor daño foliar en comparación con el control, pero respecto al potencial hídrico presentó la menor diferencia de potencial entre el control y las plantas encharcadas después del Citrumelo.

Por último, el C22 no reveló diferencias notables entre los tratamientos en cuanto al daño foliar; sin embargo, se observaron marcadas disparidades en los valores de potencial hídrico entre las plantas de control y las sometidas a encharcamiento, sugiriendo que esta opción no resulta ideal para enfrentar situaciones de estrés debido al exceso de agua.

Estos hallazgos subrayan la importancia de seleccionar portainjertos adecuados para mitigar los efectos del encharcamiento en el cultivo de cítricos, especialmente en un contexto de cambio climático, donde eventos de lluvia intensa y esporádica son cada vez más frecuentes. Además, destacan la necesidad de continuar investigando las respuestas fisiológicas y mecanismos de adaptación de diferentes portainjertos de cítricos a condiciones de estrés hídrico para optimizar la producción y sostenibilidad agrícola en estos cultivos.

7. Bibliografía

Agustí, M. (2020). *Fruticultura*. Madrid, España: Mundi-Prensa.

Aleza, P., Forner-Giner, M. Á., & del Pino, Á. (2020). El panorama varietal y los nuevos patrones: Análisis de la situación actual. Centro de Citricultura y Producción Vegetal (IVIA) y ANECOOP S. Coop.

Arbona, V., Hossain, Z., López-Climent, M. F., Pérez-Clemente, R. M., & Gómez-Cadenas, A. (2008). Antioxidant enzymatic activity is linked to waterlogging stress tolerance in citrus. *Physiologia Plantarum*, 130, 452-466.

Arbona, V., Hossain, Z., López-Climent, M. F., Pérez-Clemente, R. M., & Gómez-Cadenas, A. (2009). La actividad fotosintética como indicador de la tolerancia de los cítricos al estrés provocado por la inundación del sustrato.

Ashraf, M. A. (2012). Waterlogging stress in plants: A review. Department of Botany, University of Agriculture.

Bradford, K. J., & Yang, S. F. (1981). Physiological responses of plants to waterlogging. *Journal of Horticultural Science*, 16, 25-30.

Camacho-B, S. E. (1972). Responses of four citrus species to soil flooding under greenhouse conditions. M.S. Thesis, University of California, Riverside.

Davis, F. S., & Albrigo, L. G. (1994). *Citrus*. CAB International, Wallingford, Oxon, UK.

Domingo, R., Pérez-Pastor, A., & Ruíz-Sánchez, C. (2002). Physiological responses of apricot plants grafted on two different rootstocks to flooding conditions. *Journal of Plant Physiology*.

El-Jendoubi, H., Melgar, J. C., Álvarez-Fernández, A., & Sanz, M. (2011). Setting good practices to assess the efficiency of iron fertilizers. Zaragoza: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Else, M. A., Tiekstra, A. E., Croker, S. J., Davies, W. J., & Jackson, M. B. (1996). Stomatal closure in flooded tomato plants involves abscisic acid and a chemically unidentified anti-transpirant in xylem sap. *Plant Physiology*, 112(1), 463-472.

Ford, H. W. (1968). Water management of wetland citrus in Florida. In *Proceedings of the 1st International Citrus Symposium* (Vol. 3, pp. 1759–1770).

Forner-Giner, M. Á. (1986). Comportamiento de patrones y variedades de cítricos ante situaciones extremas de asfixia radical. *Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetales*, 1(3-4), 415-425.

Jackson, M. B., & Colmer, T. D. (2005). Response and adaptation by plants to flooding stress. *Annals of Botany*, 96(4), 501-505.

Jackson, M. B., & Drew, M. C. (1984). Effects of flooding and drought on the anatomy of *Paspalum dilatatum*. *Annals of Botany*, 53(5), 653-661.

Kozlowski, T. T. (1984). Flood-tolerance and biosynthesis of ethanol in plants. *Annals of Botany*, 57(5), 495-506.

Pérez-Jiménez, M., Hernández, J. A., & Olmos, E. (2013). Role of mitochondria in plant response to floods: Is molecular oxygen the only player? *Plant Biology*, 15(4), 759-766.

Pérez-Pérez, J. G., Syvertsen, J. P., Botía, P., & García-Sánchez, F. (2009). Water relations, osmotic adjustment and gas exchange in Cleopatra mandarin and Carrizo citrange citrus rootstocks in response to drought stress. *Physiologia Plantarum*, 135(2), 162-173.

Rowe, R. N. (1966). Anaerobic metabolism and cyanogenic glycoside hydrolysis in differential sensitivity of peach, plum and pear roots to water-saturated conditions. Ph.D. Thesis, University of California, Davis.

Rowe, R. N., & Beardsell, D. V. (1973). Waterlogging of fruit trees. *Horticultural Abstracts*, 43(9), 533-548.

Sage, R. F., & Kubien, D. S. (2007). The temperature response of C3 and C4 photosynthesis. *Plant, Cell & Environment*, 30(9), 1086-1106.

Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology* (5th ed.). Sunderland, MA: Sinauer Associates, Inc.

Vu, J. C. V., & Yelenosky, G. (1991). Photosynthetic responses of citrus trees to soil flooding. *Physiologia Plantarum*, 81, 7-14.
