



Facultad de Ciencias Agrarias
Universidad Nacional del Nordeste



Trabajo Final de Graduación Modalidad Tesina

Tolerancia a inundación y sequía en *Acroceras macrum* (Pasto Nilo)

Autor: Santiago José Theisen

Asesora: Doctora Ferrari Usandizaga, Silvana Consuelo

Año: 2024

ÍNDICE

Agradecimientos.....	
.....	3
Introducción.....	
.....	4
Objetivos	
.....	
.....	7
Materiales y Métodos	
.....	
.....	8
Resultados	
.....	
.....	14
Discusión	
.....	
.....	37
Conclusiones.....	
.....	39
Bibliografía.....	
.....	40

AGRADECIMIENTOS

Esta tesina es dedicada a toda mi familia, que desde sus lugares me han apoyado, y en especial a aquellos que, sin estar más me han brindado la fortaleza y motivación que fueron necesarias para afrontar todas las adversidades que implica llegar hasta esta instancia de aprendizaje.

Un agradecimiento a todos los profesores que he tenido a lo largo de este camino y en particular a la Doctora Ferrari Usandizaga, Silvana Consuelo que, como directora me ha orientado, apoyado y corregido con la mejor predisposición en esta labor y para el grupo de trabajo de Forrajes del INTA EEA Corrientes, por su predisposición para las labores y la ayuda incondicional.

INTRODUCCIÓN

La ganadería en la provincia de Corrientes utiliza los campos naturales como principal recurso forrajero. Este tipo de manejo se caracteriza por dividir la superficie total en parcelas con baja carga animal, que no son explotadas al máximo potencial productivo. En toda la región del NEA, estos campos tienen un predominio de gramíneas megatérmicas del tipo C_4 , con diferentes grados de calidad, pero en general con mayor contenido de fibras, menor porcentaje proteico y una digestibilidad inferior a las especies del tipo C_3 que predominan en las regiones templadas. Es habitual que, por periodos extensos, las condiciones climáticas limiten la calidad forrajera e impacten negativamente en la producción.

Una proporción importante de los suelos de la provincia se caracterizan por ser de baja permeabilidad, con horizontes superficiales de textura fina, que resultan en un paisaje característico denominado malezal con anegamiento permanente o semipermanente y alto grado de erosión. A los malezales se suman regiones con tendencia al anegamiento que durante los periodos de grandes volúmenes pluviales pueden pasar hasta 6 meses anegadas. En esas condiciones no sólo es impracticable la agricultura convencional, sino que también se afecta el crecimiento y persistencia de las especies forrajeras (Grimoldi y Striker, 2016). El fenómeno ENSO (El Niño Southern Oscillation) o llamado únicamente El Niño, se ha manifestado con mayor frecuencia en los últimos años en la región NEA, con un importante aumento de las precipitaciones previamente al periodo seco característico de la región, provocando incrementos drásticos de las áreas anegadas por periodos extensos. Estas situaciones alteran la calidad edáfica de los suelos por compactación, erosión y lixiviación de las capas superficiales del suelo y el provocan el deterioro de la calidad del pastizal con un aumento en la dominancia de especies de baja calidad (Goode et al., 2019). Debido al cambio climático, se espera que estos fenómenos ocurran con mayor frecuencia (IPCC, 2013). Esto podría resultar en degradación y descenso del rendimiento de los pastizales y condicionar la productividad en los años en que se presenten (Goode et al., 2019).

Una de las alternativas para aumentar la producción es la implantación de especies que aporten calidad y volumen forrajero y a su vez posean mecanismos que les permitan adaptarse a las condiciones ambientales como lo hacen las especies nativas de baja calidad. *Acroceras macrum*, es una especie forrajera de origen africano recomendada para suelos con baja permeabilidad. Presenta buena tolerancia en condiciones de inundación y continúa su crecimiento más allá del inicio del invierno (Rhind y Goodenough, 1979). Tiene una anatomía foliar que la clasifica dentro del grupo de gramíneas C₃ (Zuloaga et al., 1988), en relación a lo cual presenta mayor digestibilidad, contenido proteico, y palatabilidad respecto a las gramíneas C₄ que crecen en los mismos ambientes. Su rendimiento es similar a los obtenidos con *Brachiaria*, *Setaria*, *Chloris* o *Panicum* en Corrientes, especialmente si se aplica la fertilización de fósforo y nitrógeno recomendada para la región (Gándara et al., 2016).

Actualmente solo existe un cultivar registrado de esta especie, el Cedara Select, producto de un programa de mejoramiento africano de la década del 70. En el año 1995 se introdujeron en el NEA líneas de *A. macrum* con importante diversidad genética y de comportamiento agronómico. Con éstas se dio origen a un programa de mejoramiento genético que actualmente se está desarrollando en conjunto entre el EEA INTA El Sombrerito y el IBONE (Ferrari Usandizaga, 2017.) En paralelo, también hay iniciativa de desarrollo de nuevas tecnologías específicas en términos de maquinaria agrícola, que faciliten su implantación en ambientes con exceso hídrico. Hasta el momento no existen datos experimentales que permitan calcular el tiempo que esta especie es capaz de tolerar el anegamiento o si tiene la capacidad de adaptación a la alternancia entre anegamiento y sequía, frecuente en el NEA. Menos aún se conoce de los mecanismos de los que pueda valerse para aclimatarse frente a la alternancia del estrés o para soportar condiciones permanentes de estrés, como lo es el anegamiento en los malezales y otros ambientes del NEA.

Las plantas que pueden mantener la homeostasis durante periodos de estrés no permanentes, presentan plasticidad fenotípica. Esto implica cambios en la expresión de ciertos genes, pero no involucra cambios genéticos permanentes. Esto les permite una

aclimatación mediante respuestas bioquímicas o morfológicas, que se revierten una vez que el estrés se retira. La adaptación a condiciones permanentes puede implicar que existan características genéticas diferentes en la especie que podrían asociarse a características fenotípicas distintivas y permanentes (Ördög y Molnár, 2011).

El presente trabajo apunta a evaluar por primera vez el comportamiento de *Acroceras macrum* en condiciones prolongadas tanto de anegamiento como de sequía, mediante la observación de cambios morfo-anatómicos y de crecimiento y otras variables de interés agronómico. Esperando obtener una aproximación inicial y una mejor comprensión de su capacidad de adaptación a las condiciones ambientales a las que están sujetos los suelos del NEA para los cuales interesa el uso de forrajero de esta especie.

OBJETIVOS

GENERALES

- ✓ *Evaluar la capacidad de tolerar períodos medios de sequía y anegamiento de un grupo selecto de plantas de *Acroceras macrum*, en condiciones similares a los que suelen presentarse en algunos ambientes del NEA que son utilizados para ganadería.*

PARTICULARES

- ✓ *Obtener una población de *Acroceras macrum* que represente la variabilidad del comportamiento frente a diferentes contenidos hídricos del suelo.*
- ✓ *Evaluar las respuestas morfológicas, anatómicas, fisiológicas y fenológicas relacionadas a la capacidad de tolerar períodos de sequía y anegamiento en condiciones controladas de aplicación de estos estreses.*
- ✓ *Evaluar la diversidad de comportamiento, tolerancia y/o velocidad de recuperación post estrés tanto de anegamiento como de sequía.*

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Se seleccionaron 11 líneas de pasto Nilo (*Acroceras macrum*) para representar la variabilidad morfológica, fisiológica y anatómica de una colección de germoplasma conservada en la Estación Experimental INTA Corrientes (27°40'25.87"S 58°45'18.40"O) (figura. N° 1) la que contiene 13 familias y 154 genotipos (Ferrari Usandizaga et al., 2018). Las líneas (genotipos) selectas fueron: AmCo32, AmCo38, AmCo58, AmCo59, AmCo63, AmCo94, AmCo96, AmCo112, AmCo132, AmCo133, AmCo145. Como especie de comparación se utilizó Tangola (*Urochloa arrecta* × *Urochloa mutica*). Las réplicas, 3 por genotipo por tratamiento, fueron clones de multiplicación agámica obtenidos por división de planta entera. Una porción de planta de cada genotipo selecto, extraído de la colección viva, se mantuvo en invernáculo, en macetas de 10 litros con riego regular durante 14 días. Las plantas se recuperaron del estrés post extracción y desarrollaron raíces y rizomas. Transcurrido el periodo de recuperación, se extrajeron de las macetas de cada línea 9 porciones de sustrato y planta de aproximadamente 6cm x 6cm x 6cm (figura N° 2) que se trasplantaron en macetas de 3 litros. El sustrato utilizado estuvo compuesto por 1/3 de arena, 1/3 de tierra de corral y 1/3 de tierra de monte y presentó las siguientes características físicoquímicas (determinadas por el Laboratorio de Suelos de INTA Corrientes): pH=7,89 CE= 0,43 Cmol/cm MO=4,33 CO=2,51 NT=0,22 Ca=8,7 Cmol/kg Mg=3,41 Cmol/kg K=0,77 Cmol/kg P=43,84 ppm.



Figura 1. Colección viva de germoplasma de A. macrum de La estación experimental INTA Corrientes.



Figura 2. Porción de planta utilizada para replicación del material vegetal. La regla milimétrica es una referencia del volumen de material que se replicó en macetas.

Tratamientos

Se aplicaron tres tratamientos:

1- Control, 3 réplicas de cada genotipo se mantuvieron con riego a capacidad de campo durante todo el ensayo (periodo de 90 días consecutivos).

2- Sequía, 3 réplicas de cada genotipo se mantuvieron con el sustrato a punto de marchitez permanente, con solo el riego calculado por peso de agua en la maceta que supla la evaporación diaria. Las macetas se mantuvieron en un ciclo de 30 días en el punto de marchitez permanente y con un periodo de tres días de recuperación con riego para evitar la muerte de las plantas. Finalizado el periodo de recuperación se reinició el tratamiento de 30 días en el punto de marchitez permanente. De esta manera se continuó hasta completar los 90 días totales de tratamiento.

3- Anegamiento, réplicas de cada genotipo se mantuvieron en condiciones de anegamiento dentro de un contenedor plástico, manteniendo una lámina de agua de 5cm por encima del nivel de la base de la maceta (figura N° 3). Se conservaron bajo este tratamiento durante 90 días, sin periodo de recuperación.

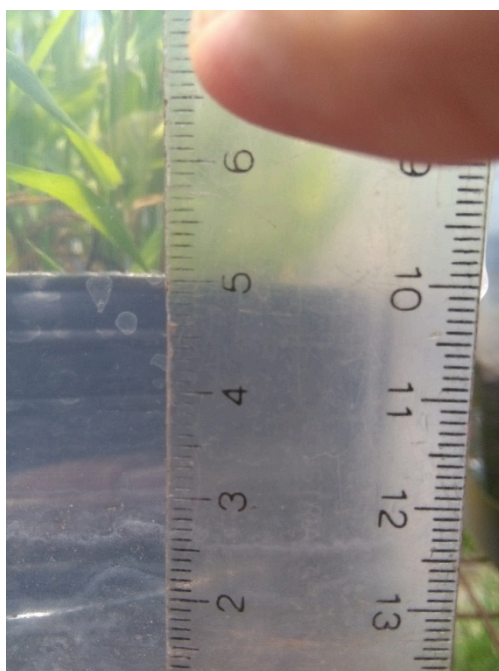


Figura 3. Maceta del tratamiento inundación colocada dentro de un recipiente que se usó para simular las condiciones de anegamiento desde la base del contenedor hasta los 5 cm que marca la regla.

Evaluaciones

Una vez iniciado los tratamientos, se realizaron periódicamente evaluaciones de las siguientes variables, cada 7 días, durante 7 semanas:

Tasa de crecimiento

Se tomaron mediciones semanales de la altura de todas las plantas desde la base de la parte aérea hasta el ápice de la hoja más sobresaliente de la misma sin manipular ninguna hoja o estirla.

Con los valores de altura se calcularon las tasas de crecimiento entre semanas consecutivas.

$$\frac{\text{Altura Final} - \text{Altura Inicial}}{7 \text{ días}} = \text{Tasa de crecimiento (cm/día)}$$

Ancho y longitud de lámina foliar

Se tomaron al azar 3 hojas por cada maceta, donde fueron medidos con una regla milimétrica (+/- 0,1 cm) el ancho en la base de la lámina (por sobre la lígula) y su longitud desde la base al ápice. Es importante señalar que en cada medición se utilizó un conjunto diferente de hojas.

Área Foliar

Con los valores de ancho y longitud foliar se calculó un área rectangular que varía en forma proporcional al área foliar (Tessi et al., 2015). Se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Parámetro de área foliar} = L \times A$$

Número de macollos

Se contabilizaron el número total de macollos por planta.

Biomasa aérea (BA)

Se realizó un corte de la parte aérea de las plantas a las 2 semanas de haber iniciado el tratamiento, luego de realizar las mediciones correspondientes, aproximadamente a 5cm del nivel de sustrato. El material cortado fue colocado en bolsas de papel, pesado en una balanza de precisión (peso húmedo) y llevados a estufa a 105°C grados hasta peso constante, obteniendo el peso seco.

Biomasa subterránea (BS)

Una vez terminado el tratamiento a la séptima semana, se extrajeron las plantas de sus macetas. Se lavaron las raíces y rizomas, se los separó de la porción aérea, se secó al aire el

agua del lavado y se obtuvieron los correspondientes pesos húmedos. Posteriormente, se las colocó sobre bandejas de aluminio y se las mantuvo en estufa a 105°C grados hasta peso constante, obteniendo el peso seco (PS BS).

Rebrote

Se midió la altura del rebrote como la altura de los nuevos tallos emergentes o que presentaron crecimiento con nuevos entrenudos y hojas emergentes después del corte de la semana 2. Las mediciones se realizaron desde la base de la planta hasta el ápice de la hoja en el rebrote más largo.

Análisis de microscopia

Se seleccionaron al azar 5 raíces de apariencia joven y diámetros similares (color claro, no amarillento y textura suave sin pelos) por cada genotipo, las que fueron fijadas en una mezcla de alcohol-agua-formol-ácido acético (FAA) (Zarlavsky, 2014) hasta su procesamiento posterior. A partir de ese material se obtuvieron cortes transversales de 2-3 mm de espesor de cada raíz aproximadamente 10 cm desde el ápice que fueron conservadas en alcohol 70°. Las secciones transversales fueron procesadas para la observación con Microscopio Electrónico de Barrido (MEB). Los cortes fueron deshidratados en serie de acetona ascendente, luego secados a punto crítico con CO₂, y posteriormente montados en láminas de aluminio mediante cinta bifaz y metalizados con oro paladio (O'Brien and McCully, 1981). Las observaciones y obtención de imágenes se realizaron con el equipo MEB JEOL 5800 LV, perteneciente al Servicio de Microscopía Electrónica de la UNNE. Las imágenes digitales se analizaron con el software ImageJ® (Schneider et al., 2012) para obtener las siguientes variables anatómicas: porcentaje de aerénquima en relación al área total de la raíz, diámetro de los vasos del metaxilema y densidad de pelos radiculares para lo cual se estimó un índice visual de 4 puntos donde 1 corresponde a la menor densidad y 4 a la mayor densidad.

Análisis estadístico

Las variables estudiadas se analizaron usando el software estadístico InfoStat®. Se realizaron análisis de la varianza con comparación de medias según el test de Tukey, se obtuvieron las medidas promedio de las variables y las gráficas semanales o de comparación de medias, según corresponda. También se realizaron análisis multivariados. El primer análisis multivariado fue la obtención de un dendograma de distancias según Gower comparando el comportamiento de los genotipos analizados (líneas de *A. macrum* y Tangola) en todas las variables estudiadas para cada uno de los tratamientos. El dendograma obtenido y sus agrupamientos se plasmó en un Análisis de Componentes Principales que permitió discernir, por sus correlaciones con las variables originales, las variables más influyentes en los agrupamientos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos obtenidos ofrecen un análisis detallado de las variables agronómicas estudiadas, incluyendo mediciones cuantitativas como la altura de la planta, el área foliar, el rebrote y la biomasa aérea y subterránea. Además, el análisis microscópico ha permitido medir el área total y foliar en los cortes transversales radiculares, junto con una evaluación visual de la densidad de raíces secundarias.

Altura de planta

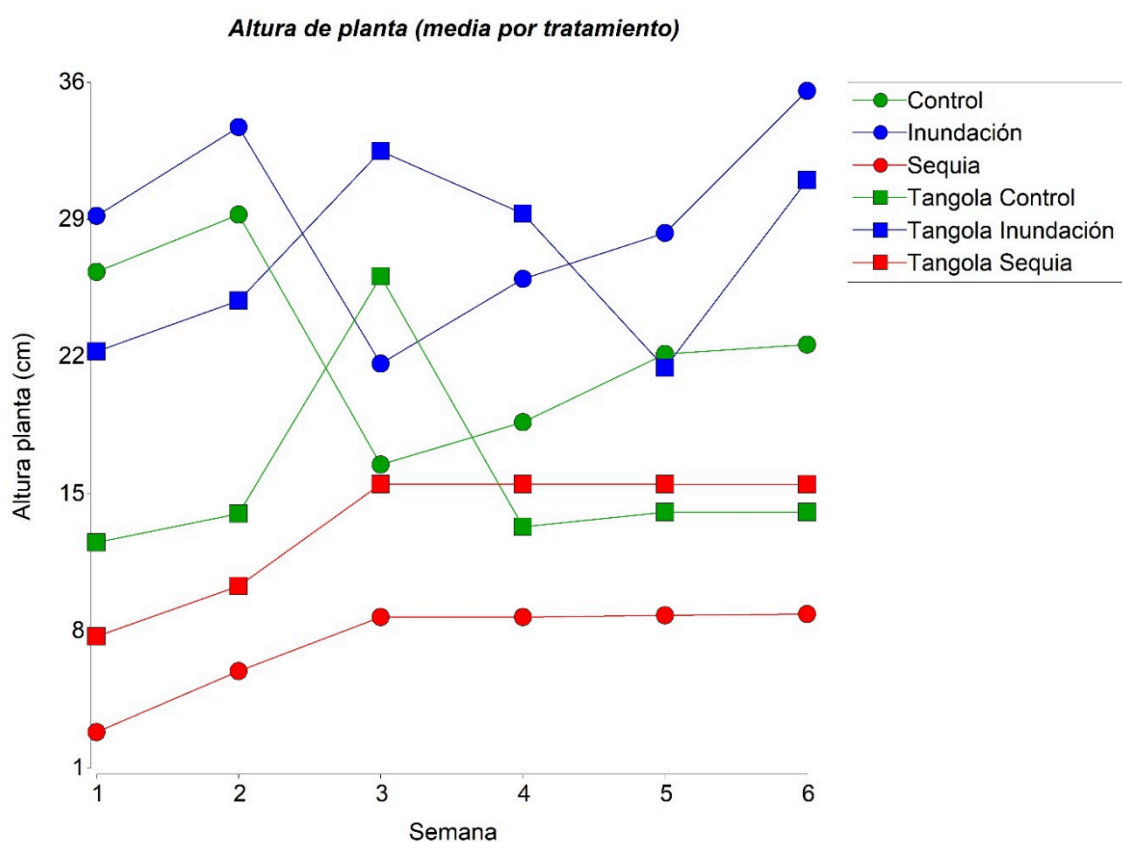


Figura 4. Comparación de las medias de altura de planta de *A. macrum* y *Urochloa arrecta* × *Urochloa mutica* (Tangola) para cada tratamiento en función del tiempo. Los distintos colores representan los distintos tratamientos para ambas especies.

Tratamiento Control: las medias de *A. macrum* se incrementaron entre la primera y la segunda semana. Luego, se observa una caída que corresponde al corte, tras lo cual las plantas presentan una tendencia a la recuperación en lo que resta de tratamiento con una velocidad de crecimiento similar a la de la primera semana. En Tangola, una semana antes

del corte se observa un incremento de la velocidad de crecimiento, sin embargo, la velocidad de recuperación es baja al igual que en la primera semana de tratamiento (Figura 4).

Tratamiento Inundación: la velocidad inicial de crecimiento de *A. macrum* es más alta que en el control y se mantienen tras el corte hasta el final del tratamiento. En Tangola, los incrementos en altura iniciales fueron fluctuantes con tendencia a ser más altos que los del tratamiento control, sin embargo, tras el corte la velocidad de crecimiento se incrementa superando incluso la velocidad de crecimiento de *A. macrum* en inundación (Figura 4).

Tratamiento Sequía: Las medias de *A. macrum* y Tangola presentaron comportamientos similares, superando la altura de las primeras semanas y manteniendo en un valor constante a partir de la semana 3 (Figura 4).

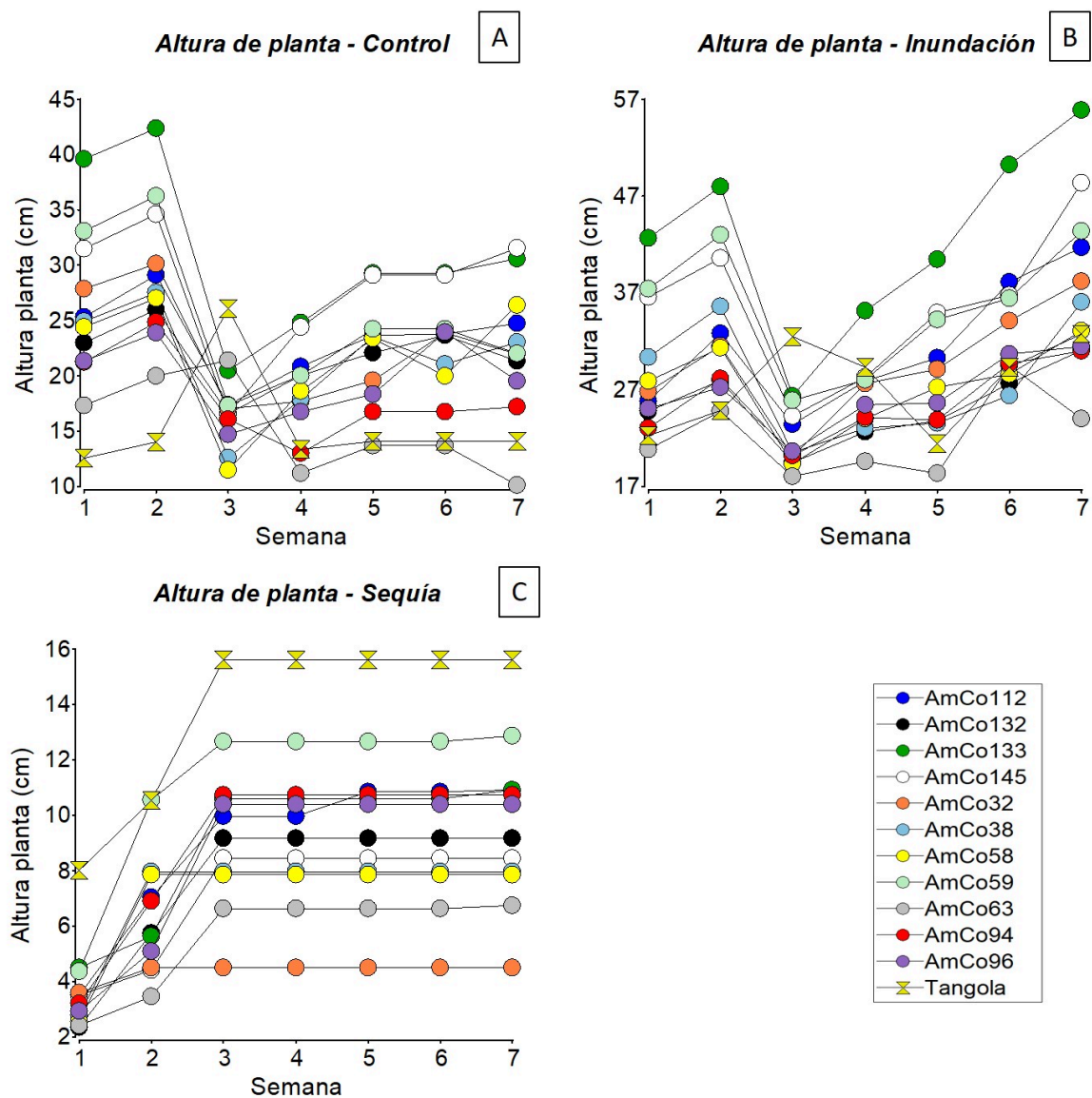


Figura 5. Evolución en el tiempo de la variable altura de planta de las líneas estudiadas para el tratamiento Sequía. Gráficos A, B, C corresponden a los tratamientos de Control, Inundación y Sequía.

Tratamiento Control: La tendencia fue incrementar la altura a mayor velocidad post-corte hasta alcanzar un valor máximo. AmCo133 y #145 presentaron las mayores pendientes luego del corte (mayor velocidad de crecimiento en altura). En Tangola, las velocidades de incremento en altura antes y después del corte son menores a las observadas en líneas de *A. macrum* (Figura 5).

Tratamiento Inundación. El corte estimuló el crecimiento en altura en los genotipos de *A. macrum*. AmCo133 alcanzó los valores más altos de altura de planta y de velocidad de crecimiento y AmCo63 los más bajos (Figura 5).

Tratamiento Sequía. Los genotipos de *A. macrum* presentaron respuestas similares. Luego del corte, incrementaron la altura a menor velocidad que en el control o inundación hasta un valor muy por debajo del de los otros tratamientos (Figura 5).

Ancho de lámina foliar

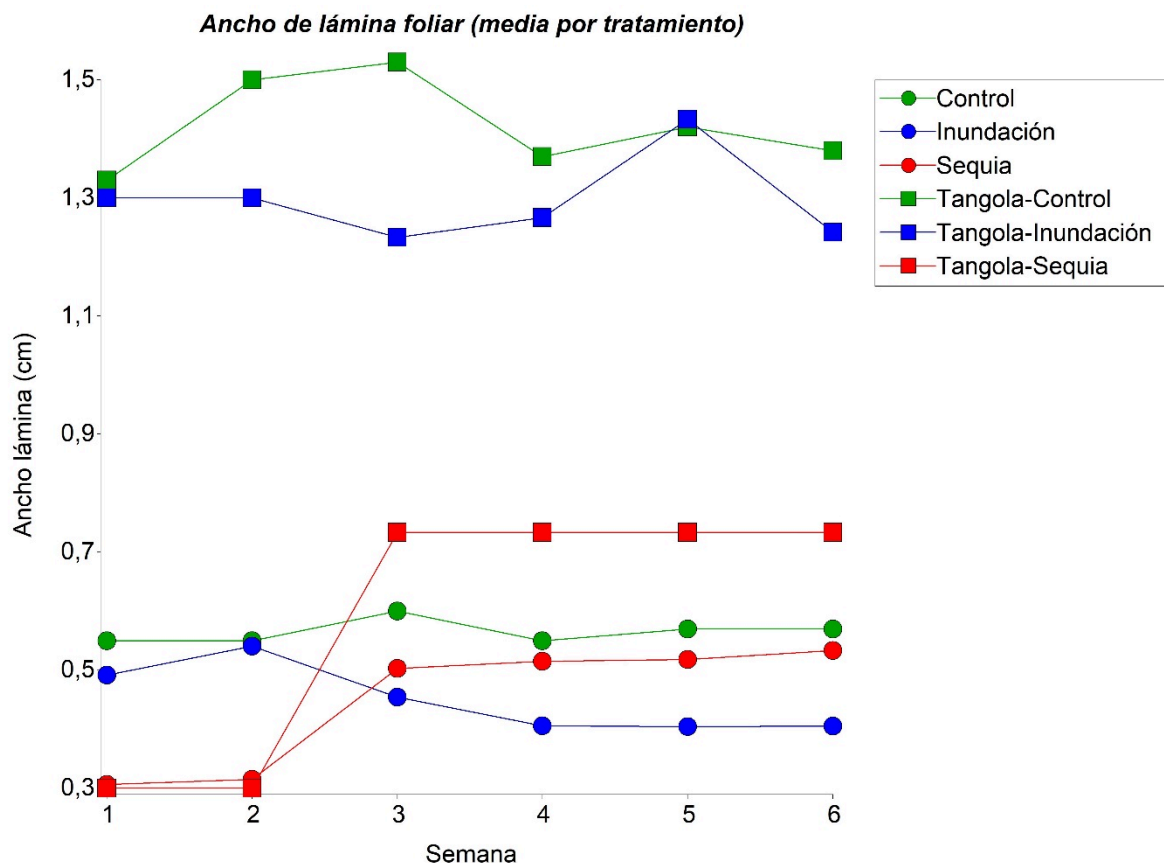


Figura 6. Media de la especie para la variable ancho de lámina foliar comparadas en función del tiempo para *A. macrum* y *U. arrecta* × *U. mutica* (Tangola). Los diferentes colores representan diferentes tratamientos.

Tratamiento Control: las medias de *A. macrum* y Tangola presentaron una tendencia a mantenerse constante durante todo el tratamiento (Figura 6).

Tratamiento Inundación: Las medias de *A. macrum* presentan una leve tendencia a disminuir. En Tangola, hay fluctuación, pero la tendencia es a mantener un ancho constante (Figura 6).

Tratamiento Sequía: Las medias de *A. macrum* y Tangola presentaron comportamientos similares, con tendencia a aumentar el ancho a un valor superior constante (Figura 6).

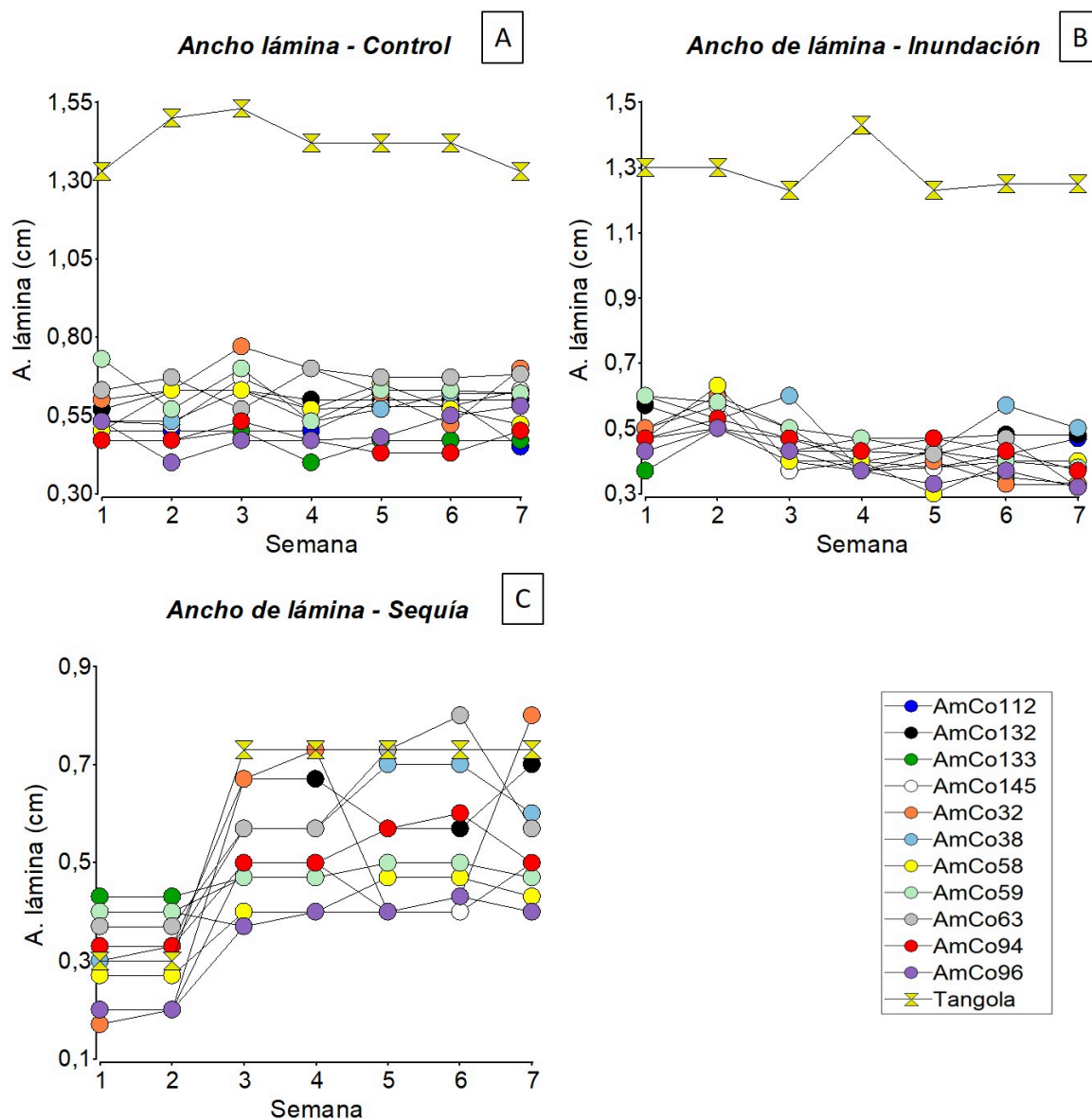


Figura 7. Evolución en el tiempo (promedios semanales) del ancho de lámina foliar de las líneas estudiadas para el tratamiento Sequía. Gráficos A, B y C corresponden a los tratamientos A, B, C.

Tratamiento Control. En las líneas de *A. macrum* la tendencia fue a mantener constante el ancho foliar durante todo el tratamiento. El genotipo AmCo#32 fue la que mayor ancho presentó (Figura 7).

Tratamiento inundación. Tras del corte, se observó disminución del ancho de lámina foliar en *A. macrum*. El genotipo AmCo59 fue la que mayor disminución y los genotipos AmCo38 y #132 las que menor disminución en esta variable presentaron-(Figura 7).

Tratamiento Sequía. La tendencia fue aumentar el ancho de la lámina foliar hasta alcanzar un valor máximo. Los genotipos AmCo32 y #132 presentaron mayor ensanchamiento, mientras que AmCo59 y #133 se mantuvieron un ancho casi constante durante el tratamiento (Figura 7).

Longitud de lámina foliar

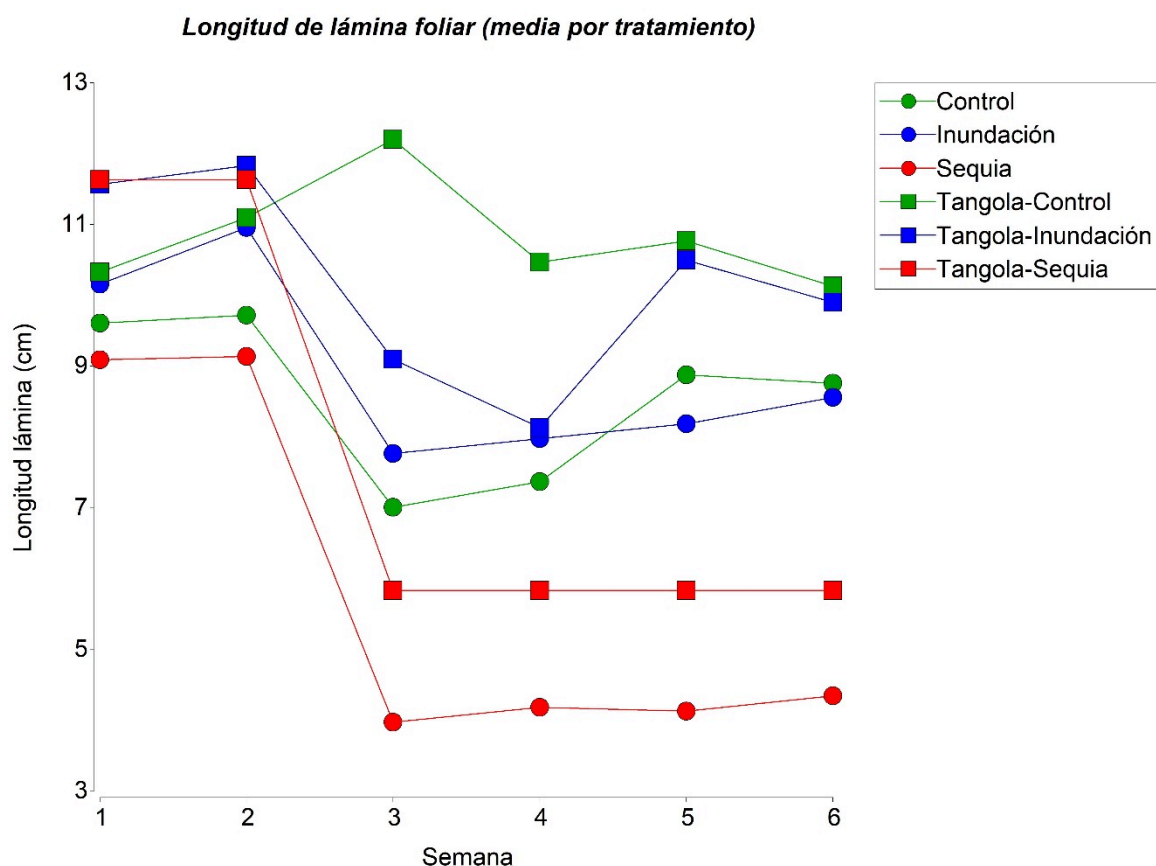


Figura 8. Media de la especie de la variable ancho de lámina foliar comparadas en función del tiempo para *A. macrum* y *U. arrecta* × *U. mutica* (Tangola). Los gráficos A, B y C corresponden a Control, Inundación y Sequía respectivamente.

Tratamiento control. La longitud de lámina foliar de ambas especies disminuyó con el corte y se fue incrementando hacia el valor inicial (Figura 8).

Tratamiento Inundación. *A. macrum* presentó una disminución de las medias general de esta variable. Tangola tuvo fluctuaciones, con tendencia a mantener el valor de largo inicial, tras el corte (Figura 8).

Tratamiento Sequía: En ambas especies, las medias disminuyeron hasta un valor que se mantuvo constante hasta el final del tratamiento (Figura 8).

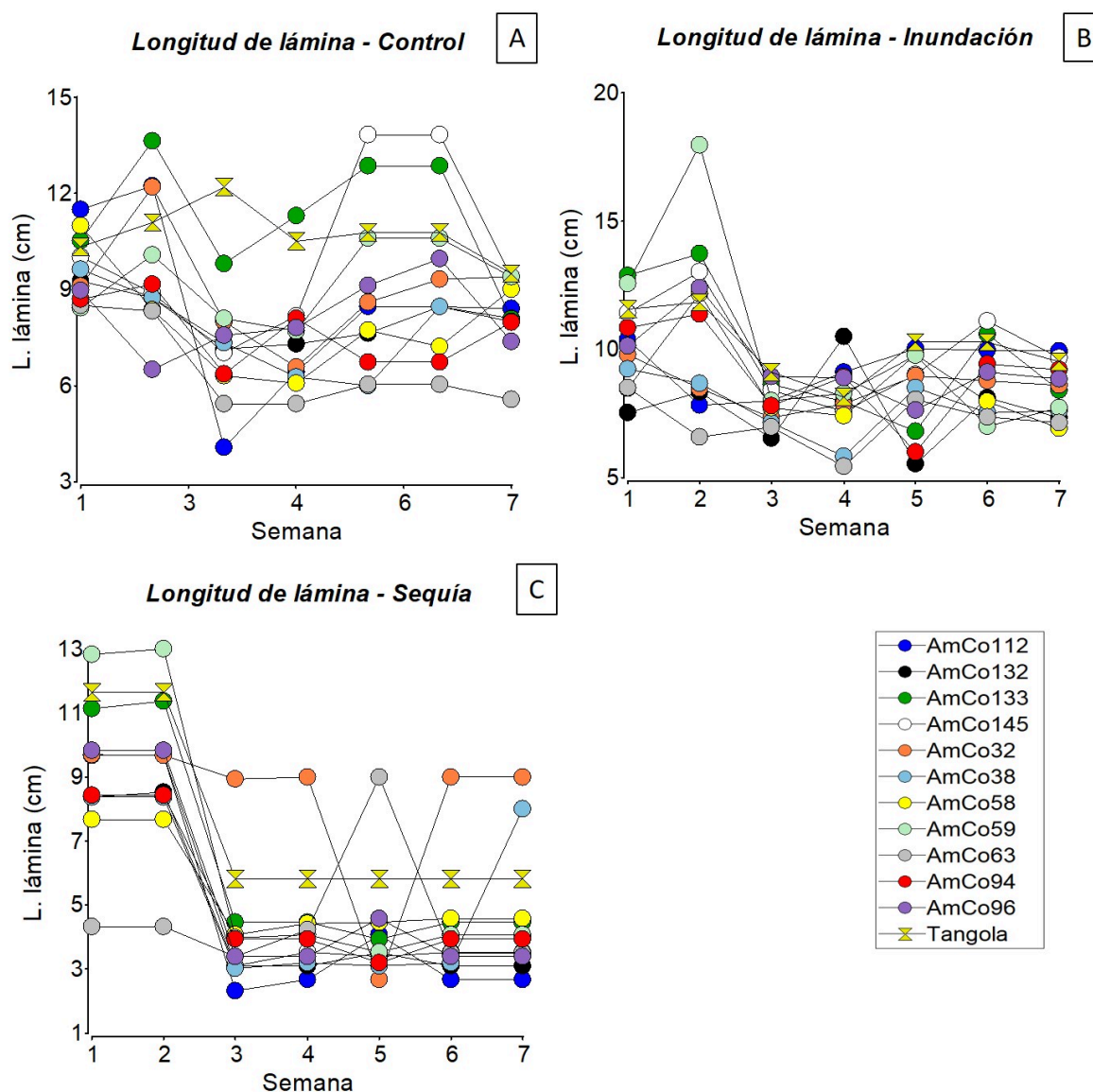


Figura 9. Evolución en el tiempo (promedios semanales) de la longitud de lámina foliar de las líneas estudiadas para el tratamiento sequía. Los gráficos A, B y C corresponden al Control, Inundación y Sequía.

Tratamiento Control. La tendencia general de las líneas de *A. macrum* fue fluctuante. Tangola tuvo una tendencia a mantener su valor constante (Figura 9).

Tratamiento Inundación. La tendencia general fue el decrecimiento en la longitud de las líneas de *A. macrum* estudiadas respecto del valor inicial antes del corte (Figura 9). A partir de la semana 4, los genotipos AmCo145 y #133 y Tangola presentaron una tendencia moderada a recuperar la longitud de lámina.

Tratamiento Sequia. La tendencia fue disminuir la longitud de lámina a un valor constante más bajo que el original. Los genotipos AmCo96 y #38 presentaron una moderada recuperación a partir de la semana 5. Los genotipos AmCo32 y #63 conservaron su longitud original (Figura 9).

Área Foliar

Las variaciones del área foliar a lo largo del tratamiento se evaluaron a partir de los valores aproximados obtenidos del producto entre ancho y la longitud de la lámina.

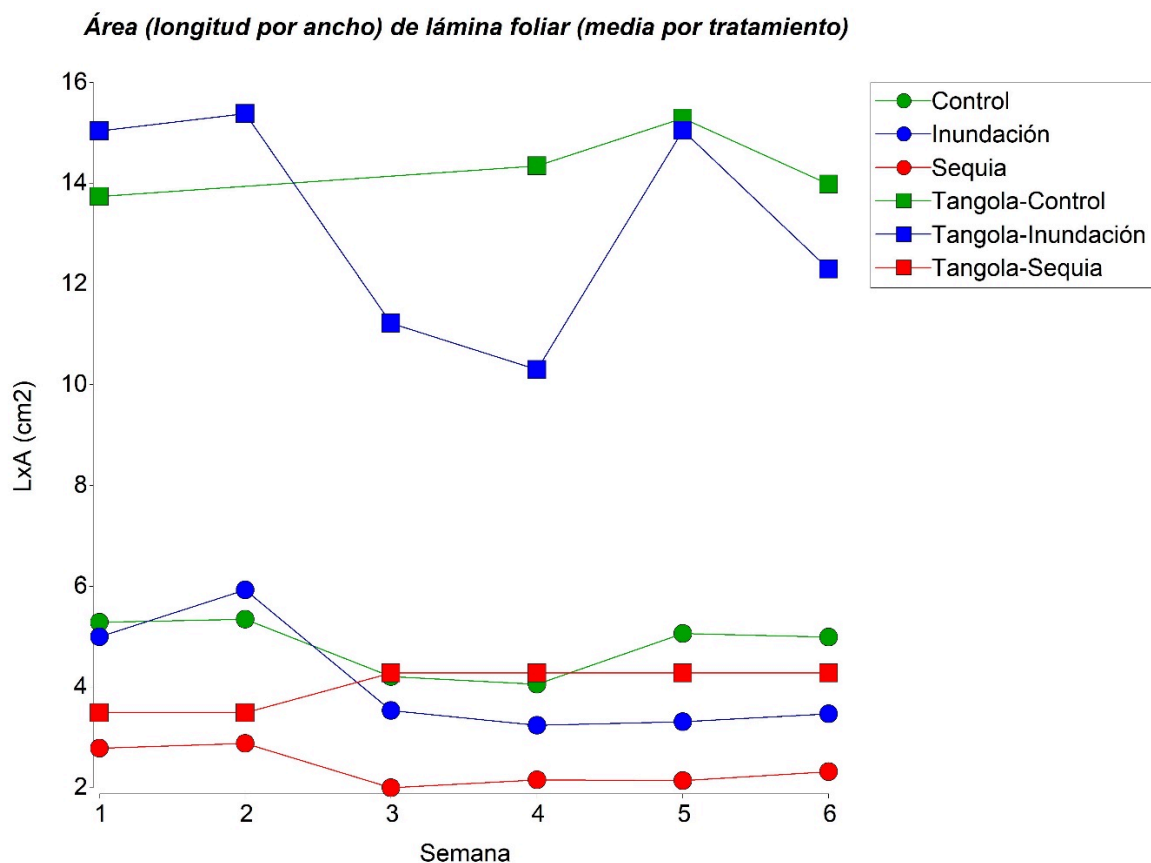


Figura 10. Media de la especie para el área foliar aproximada (longitud x ancho de lámina) comparadas en función del tiempo para *A. macrum* y *U. arrecta* x *U. mutica* (Tangola). Los distintos colores representan los distintos tratamientos.

Tratamiento Control. La media de ambas especies tiende a mantener los valores iniciales durante todo el tratamiento (Figura 10).

Tratamiento Inundación. En *A. macrum* se observó una tendencia a disminuir el área foliar tras del corte de la parte aérea de la planta. En Tangola hubo fluctuaciones (Figura 10).

Tratamiento Sequía. *A. macrum* presentó un descenso de área foliar hasta un valor mínimo constante. Tangola presentó la tendencia opuesta, alcanzando un máximo (Figura 10).

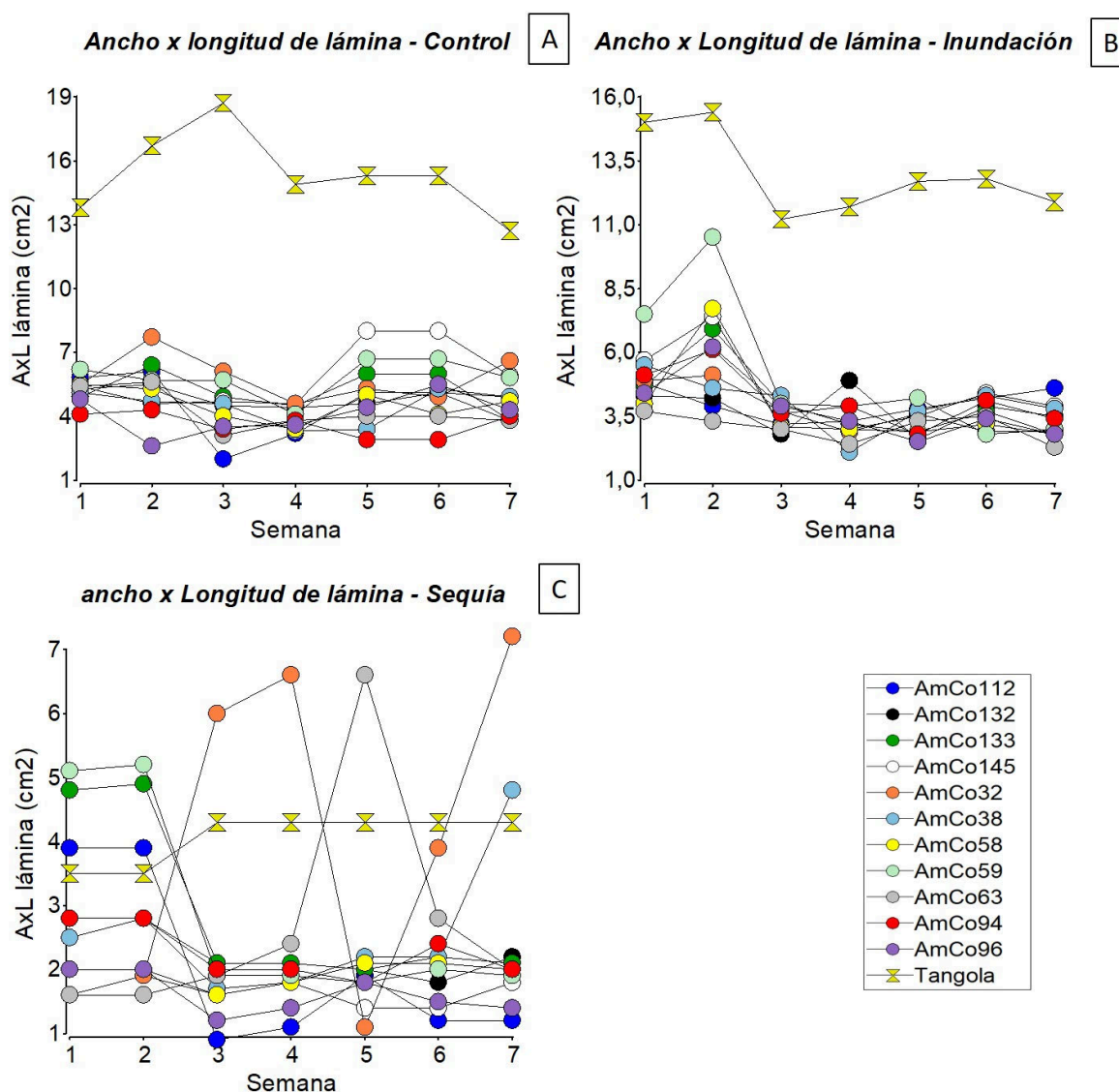


Figura 11. Evolución en el tiempo (promedios semanales) del área foliar estimada a partir de la longitud x ancho de lámina para las líneas de *A. macrum* estudiadas en el tratamiento sequía. Los gráficos A, B y C representan a los tratamientos Control, Inundación, Sequía respectivamente.

Tratamiento Control. Las líneas presentaron fluctuaciones, si bien la tendencia general fue a mantener medias cercanas al valor original. El genotipo AmCo145 incrementó su área foliar a partir de la semana 4 y los genotipos AmCo58, y #132 tuvieron una leve tendencia decreciente. La línea que menores fluctuaciones presentó fue AmCo94 (Figura 11).

Tratamiento Inundación. A partir del corte del vástago, el área foliar descendió para todas las líneas hasta un valor que se mantiene constante. Las líneas AmCo63 y #112 mantuvieron valores de área foliar constante, aunque menores que las demás (Figura 11).

Tratamiento Sequía. Las líneas AmCo59, #112 y #133 presentaron un descenso de la variable a partir de la semana 2, manteniendo el mínimo alcanzado hasta el final del tratamiento. AmCo32, por el contrario, presentó un aumento del área foliar en la semana 2 alcanzando un valor máximo constante hasta el final del tratamiento. El resto de las líneas presentó una tendencia a mantenerlo constante o con variaciones poco pronunciadas (Figura 11).

Rebrote

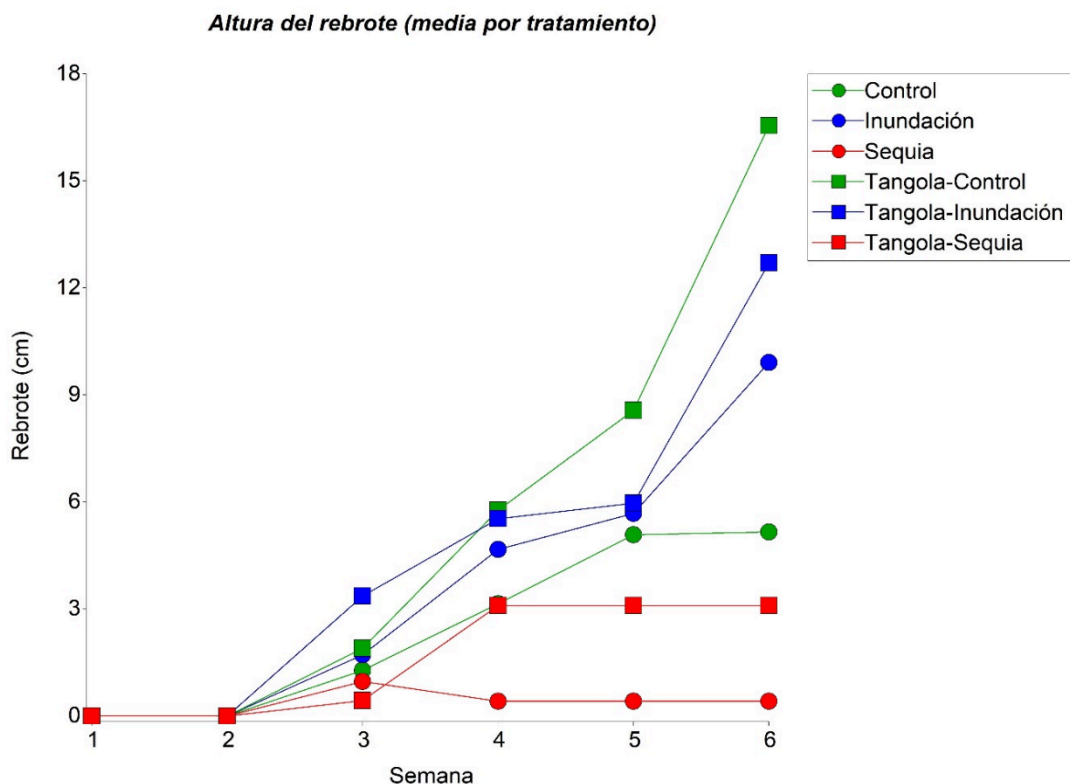


Figura 12. Media de la especie para la variable rebrote, comparadas en función del tiempo para *A. macrum* y *U. arrecta* × *U. mutica* (Tangola). Los distintos colores representan los diferentes tratamientos.

Tratamiento Control. En ambas especies se observó un incremento pos corte (a partir de semana 3) que continuó hasta el final del tratamiento (Figura 12).

Tratamiento Inundación. Comportamiento similar entre especies, y al control de Tangola. El rebrote se incrementa rápidamente a partir del corte del vástago (Figura 12).

Tratamiento Sequía. En *A. macrum* se observaron cambios poco significativos. En Tangola hubo un incremento desde la semana 3 a la 4, posteriormente no se visualizaron cambios (Figura 12).

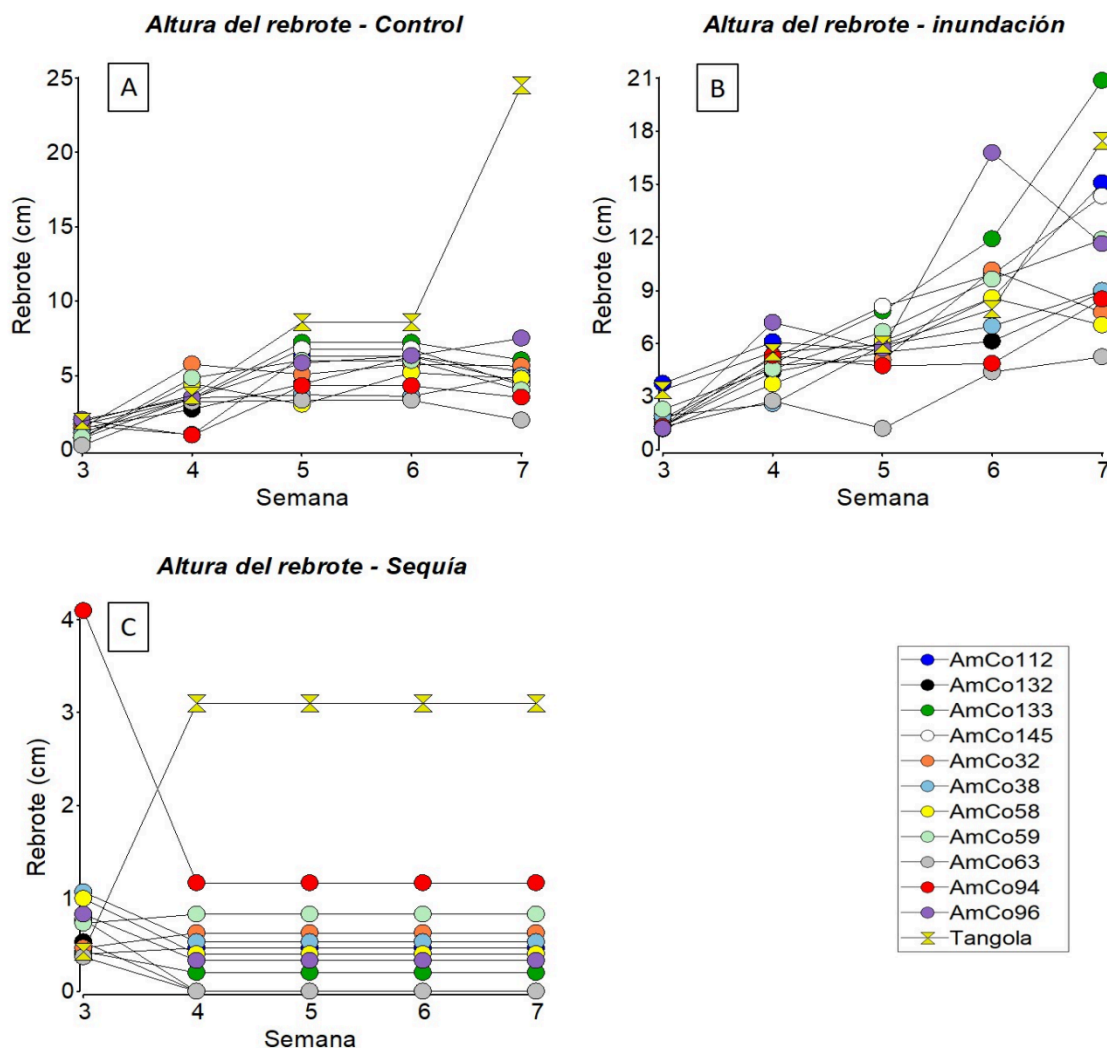


Figura 13. Evolución en el tiempo (promedios semanales) de la altura del rebrote, evaluado a partir de la semana del corte, para las líneas de *A. macrum* estudiadas en el tratamiento Sequía. Los gráficos A, B y C representan a los tratamientos de Control, Inundación y Sequía respectivamente.

Tratamiento Control: La tendencia general fue a aumentar el rebrote a partir del corte. El genotipo AmC#96 presentó el valor más alto (Figura 13).

Tratamiento Inundación. Las velocidades de rebrote dependieron del genotipo, las mayores se observaron para las líneas AmCo 133 y #112 y las menores para AmCo58, #63 y #98 (Figura 13).

Tratamiento Sequía. Todos los genotipos se mantuvieron con una velocidad de rebrote casi nula (Figura 13).

Número de macollos

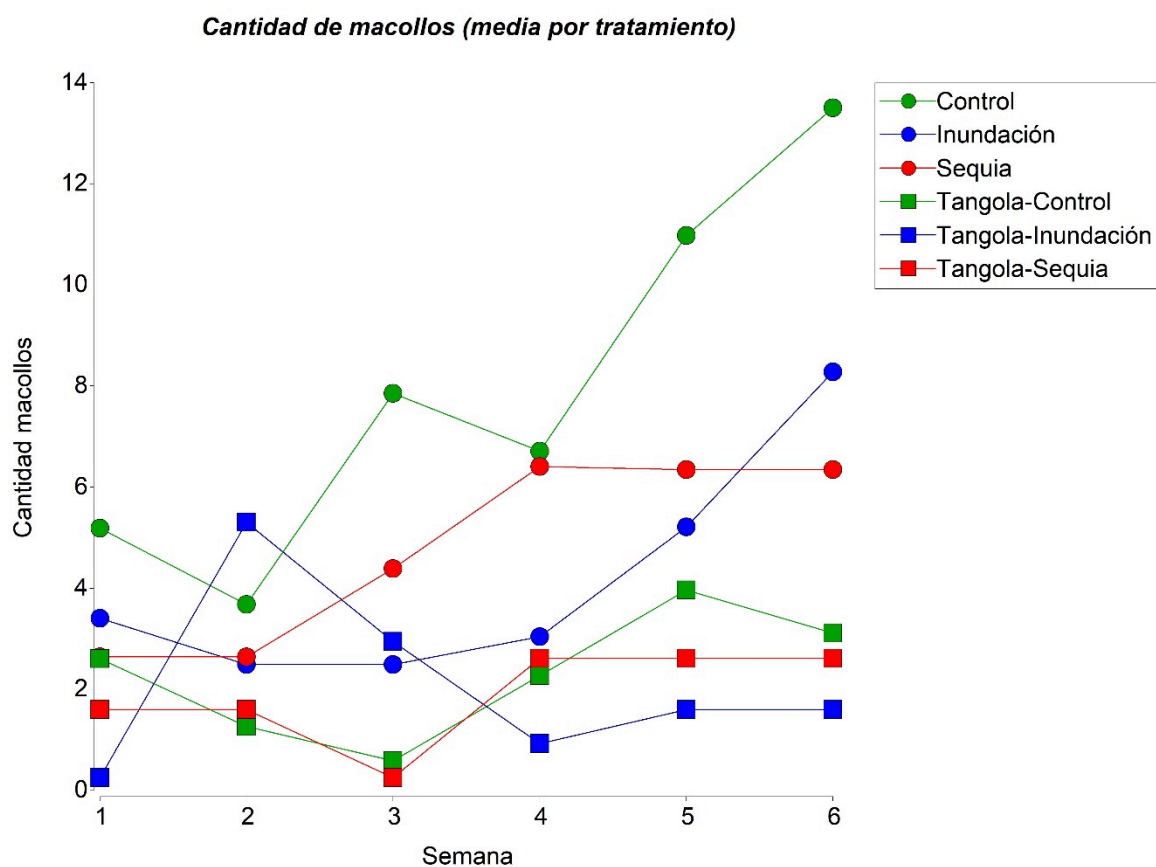


Figura 14. Media de la especie de la variable cantidad de macollos por planta, comparadas en función del tiempo para *A. macrum* y *U. arrecta* × *U. mutica* (Tangola). Los distintos colores representan los diferentes tratamientos

Tratamiento control. *A. macrum* presentó una tendencia a incrementar la velocidad de rebrote. Tangola presentó fluctuaciones aparentemente sin tendencia definida (Figura 14).

Tratamiento inundación. *A. macrum* incrementó la cantidad de macollos exponencialmente, con una velocidad que se empieza a volver más alta a partir de la semana 4. En Tangola no hubo un cambio neto significativo en la cantidad de macollos a partir de algunas fluctuaciones en la medición (Figura 14).

Tratamiento sequía. Ambas especies presentaron un comportamiento similar, aumentando la cantidad de macollos a velocidad, baja pero constante, hasta la semana 4 (Figura 14).

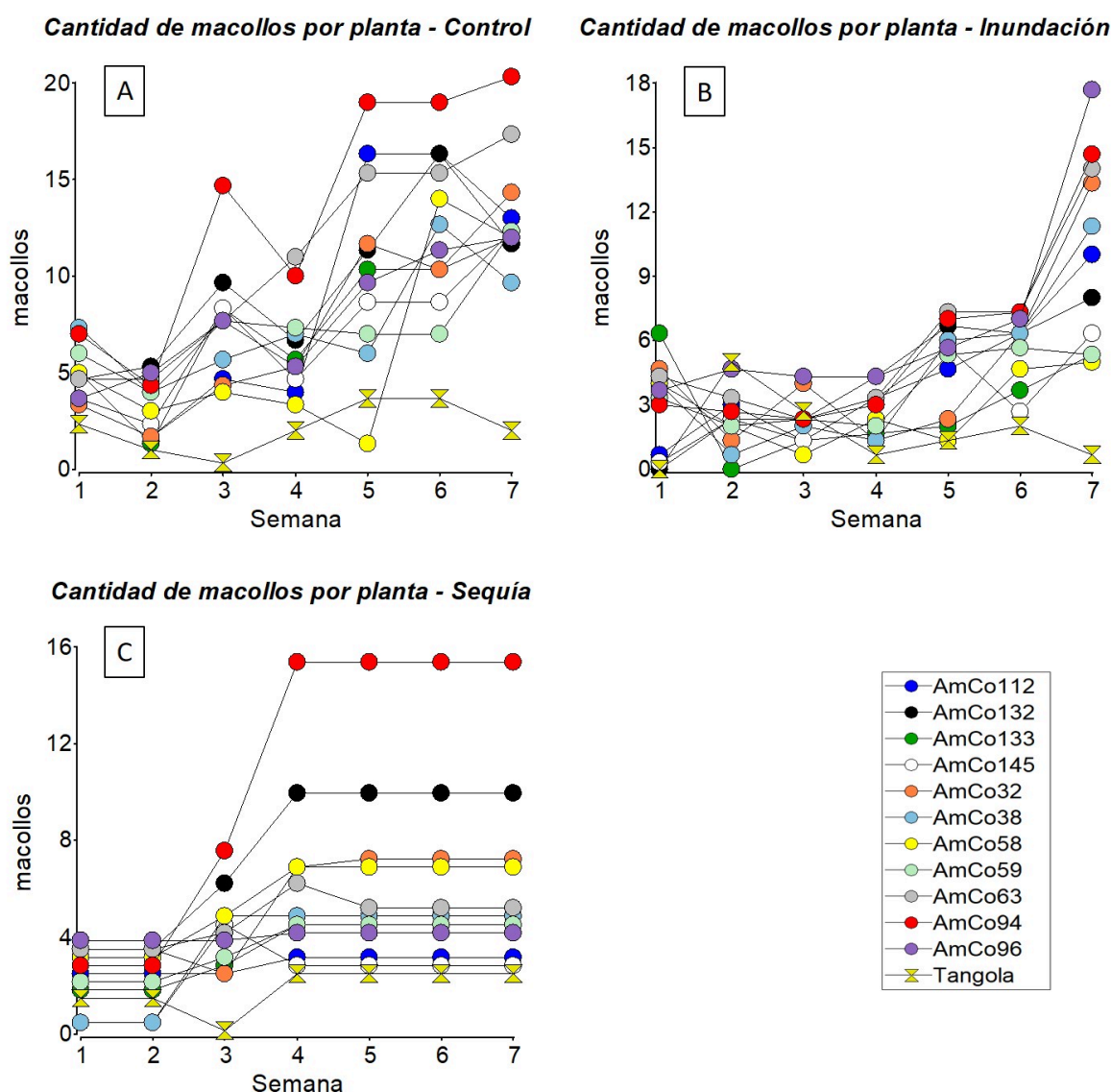


Figura 15. Evolución en el tiempo (promedios semanales) del número de macollos por planta, para las líneas de *A. macrum* estudiadas en el tratamiento sequía. Los gráficos A, B y C corresponden a los tratamientos Control, Inundación, Sequía respectivamente.

Tratamiento Control. Las líneas presentaron una tendencia a incrementar la cantidad de macollos, que en general se volvió menos pronunciada hacia el final del tratamiento. Líneas como AmCo63, #94, #112 y #132 presentaron los mayores incrementos, en tanto AmCo59 y #96 fueron las que menores incrementos presentaron (Figura 15).

Tratamiento Inundación. El comportamiento de las líneas fue más definido en este tratamiento, con un crecimiento exponencial en que la velocidad de aparición de macollos se vuelve mayor a partir de la semana 4. Las líneas AmCo32, #38, #63, #94 y #96 presentaron mayores incrementos netos. Las líneas AmCo58, #59, #133 y #145 presentaron muy baja o ninguna variación en el número de macollos (Figura 15).

Tratamiento Sequía. El número de macollos se incrementó entre las semanas 2 y la 4. A partir de la semana 4 no hubo incremento en el número de macollos. El comportamiento de todas las líneas fue similar siendo AmCo 94, #132, #32 y #54 las que mayores incrementos netos presentaron. Para el resto de las líneas los incrementos en esta variable fueron poco importantes (Figura 15).

Biomasa Aérea (BA), Subterránea (BS)

Tabla 1. Porcentajes de materia seca de la BA y BS promedio de los genotipos de A. macrum para los tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas según el test LSD Fisher ($p < 0,05$)

	%MS BA	%MS BS
Sequía	72,9 ^A	40,2 ^A
Control	34,2 ^B	39,0 ^A
Inundación	27,9 ^C	24,3 ^B
*DMS: 5,8. CV: 14,7		DMS:9,54. CV:31,8

Tabla 2. BA y BS promedio de los genotipos de *A. macrum* para los tratamientos, en peso seco expresados en gramos (g). Letras diferentes indican diferencias significativas según el test LSD Fisher ($p < 0,05$)

	Biomasa aérea (g)	Biomasa subterránea (g)
Inundación	2,3 ^A	9,5 ^A
Control	2,0 ^A	4,0 ^B
Sequía	1,0 ^B	2,5 ^B

*DMS: 0,42. CV: 27,7

Según el Test LSD Fisher ($p < 0.05$) el %MS (masa seca) de BA del tratamiento sequía fue significativamente mayor que la del control e inundación, y la del tratamiento inundación fue significativamente menor a las otras dos. El %MS de BS del tratamiento sequía y control no presentaron diferencias significativas, el de inundación fue significativamente menor a los otros dos (Tabla 1).

Según el Test LSD Fisher ($p < 0.05$) no se observaron diferencias significativas entre la BA del tratamiento inundación y control, la del tratamiento sequía fue significativamente menor. La BS del tratamiento de inundación fue significativamente mayor a los otros dos, las de los tratamientos control y sequía no presentaron diferencias significativas (Tabla 2).

Relación de biomasa aérea y subterránea

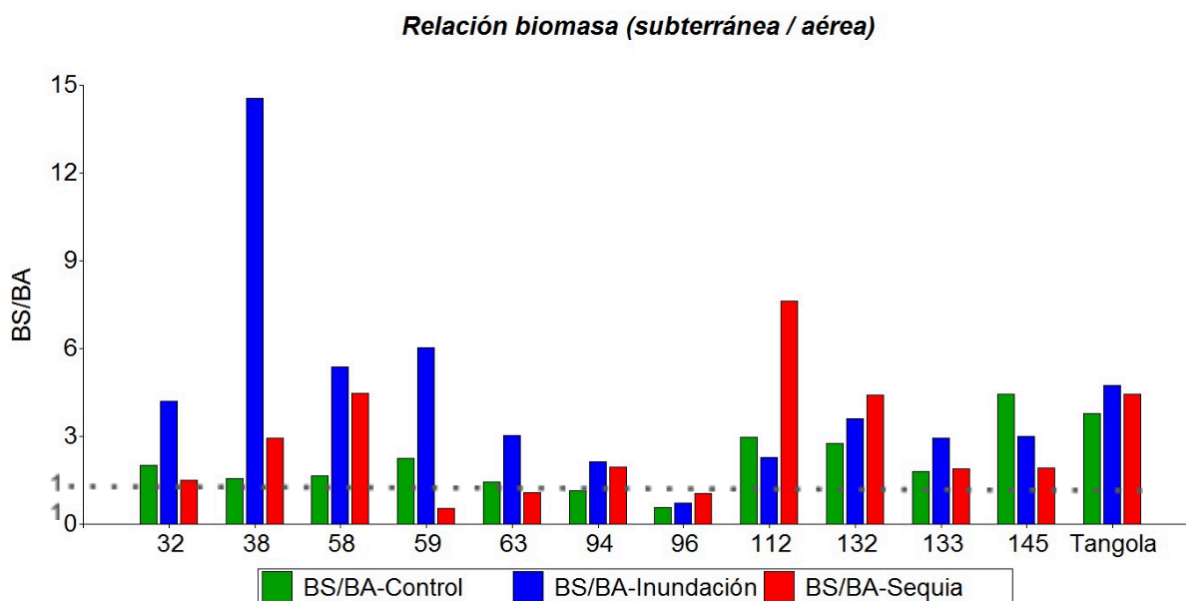


Figura 16. Relación entre biomasa subterránea y aérea de las líneas estudiadas, para los 3 tratamientos. La línea punteada corresponde al valor 1: BS=BA

Se observa la tendencia general a que la relación BS/BA es mayor en el tratamiento inundación y sequía y más cercana a 1 en el tratamiento control. El genotipo AmCo38 presenta una BS casi 15 veces mayor que BA en inundación y el genotipo Amco112 una relación 9 para BS/BA en sequía (Figura 16).

Tratamiento Inundación. Las BS fueron mayores que las BA (Figura 16). AmCo 38 presentó una BS mayor que los demás genotipos y #96 la menor BS (Figura 17).

Tratamiento Control. La mayoría de las líneas presentaron BS similar a BA (Figura 16), con menores valores de BS que en el tratamiento inundación y valores de BA similares a los de la inundación (Figura 17). Sin embargo, AmCo 112, #132 y #145 que presentaron más del doble de BS en comparación con BA (Figura 16), con valores de BA y BS muy similares a los que presentaron en el tratamiento inundación (Figura 20). El porcentaje de aerénquima fue menor que el observado para inundación para casi todos los genotipos, con un rango de 5% (AmCo 133) a 45% (AmCo 132) y una moda que ronda el 20%. AmCo 32 y #132 tuvieron porcentajes de aerénquima mayores que los observados en inundación y AmCo 112 tuvo porcentajes de 45% de aerénquima en los tres tratamientos (Figura 17).

Tratamiento Sequía. La mitad de las líneas estudiadas presentaron valores de BS que superaron a BA (Figura 16). AmCo 32, #59, #63, #96 y #133 presentaron valores de BS similares a los de BA (Figura 16). Tanto BS como BA fueron menores que los valores del control, excepto AmCo 63, #94 y #96 cuyos valores de BA y BS fueron similares a los observados en el tratamiento control (Figura 17). Los porcentajes de aerénquima fueron del 2% (AmCo 59) a 45% (AmCo 112) con una moda de alrededor de un 10% y menores a los de los otros tratamientos (Figura 17).

Análisis de microscopía

Como se puede observar en las Figura 18 y 19 los cortes transversales de raíces de *A. macrum* presentan aerénquima, en el tratamiento inundación tanto con el control. El tratamiento sequía también presenta el tejido, pero en menor medida.

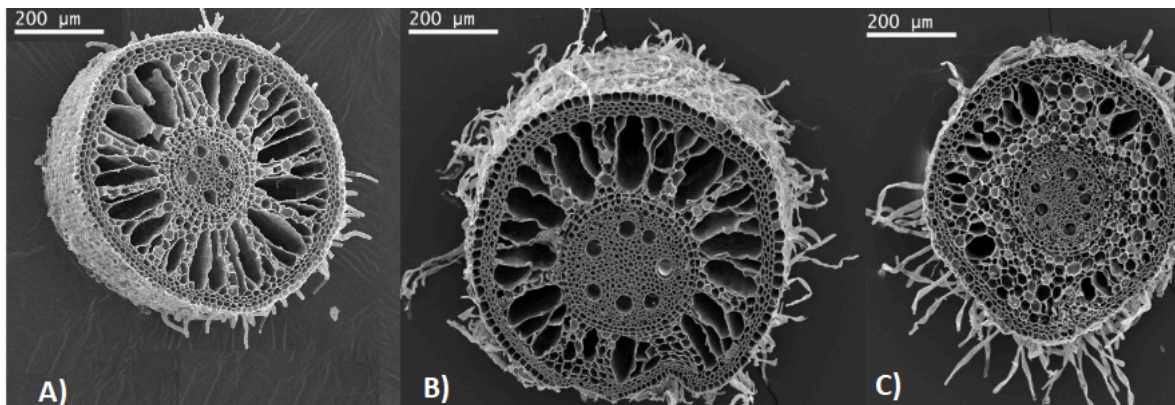


Figura 17. Cortes de raíz en MEB de *A. macrum* correspondientes al genotipo AmCo#145. Las letras A, B y C corresponden a los tratamientos Inundación, Control y Sequía respectivamente.

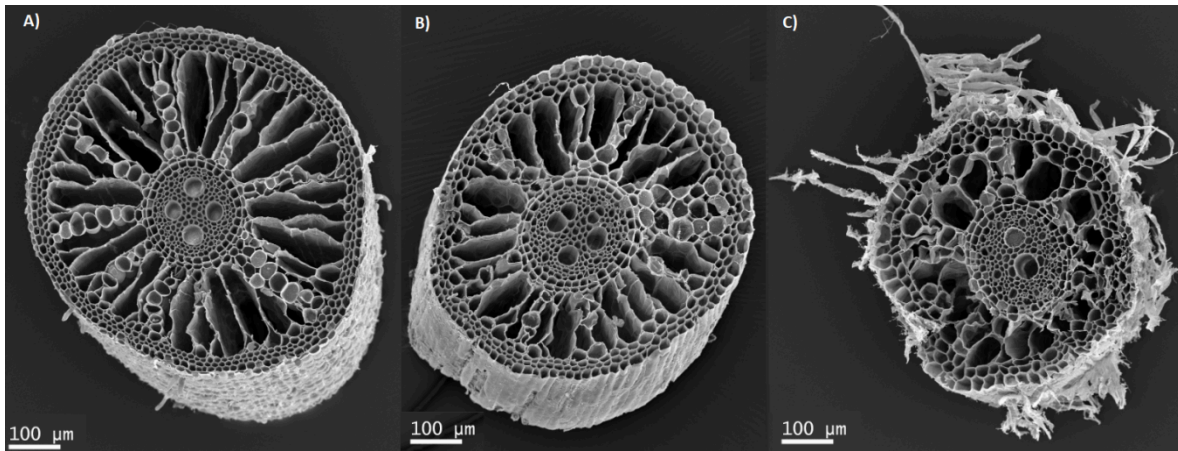


Figura 18. Cortes en MEB de *A. macrum* correspondientes al genotipo AmCo#58. De izquierda a derecha los puntos A, B y C corresponden a los tratamientos Inundación, Control y Sequia respectivamente.

La disposición que presentan los tejidos corresponde al denominado tipo de aerénquima radial lisígeno (Jung et al., 2008). Presente también en otras Monocotiledóneas como el arroz japónica (*Oryza sativa subsp. japonica*) así también como algunas Eudicotiledóneas y otras especies palustres como *Typha latifolia* (Jung et al., 2008).

Con respecto al cilindro vascular de los transcortes presentan una distribución de los cordones de xilema llamada poliarca típica de las Monocotiledóneas, variando en la cantidad de polos con los distintos genotipos como se ve en las Figura 17 y 18.

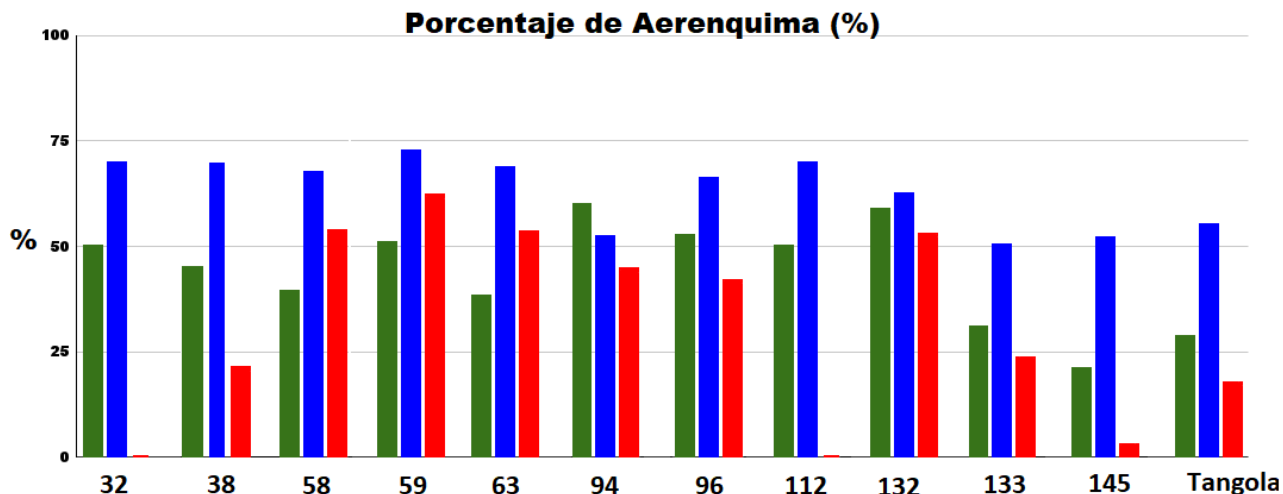


Figura 19. Porcentajes de aerénquima discriminado por genotipo y tratamiento. Los colores verde, azul y rojo representan los tratamientos Control, Inundación y Sequía respectivamente.

Los porcentajes de aerénquima en promedio fueron de entre 20% (AmCo 133) a 70% (AmCo 58) y una moda de alrededor del 45% (Figura 19). En algunos casos se ve un escaso desarrollo (AmCo 145) y otros casi nulos (AmCo 32 y 112).

En los genotipos AmCo32, #38, #96, #112, #132, #133, #145 y Tangola presentan en el tratamiento inundación valores superiores que el tratamiento control y menor que ambos en el tratamiento sequía. Los demás genotipos presentaron valores superiores de el tratamiento sequía con un porcentaje mayor al control, pero a su vez ambos menores al tratamiento inundación.

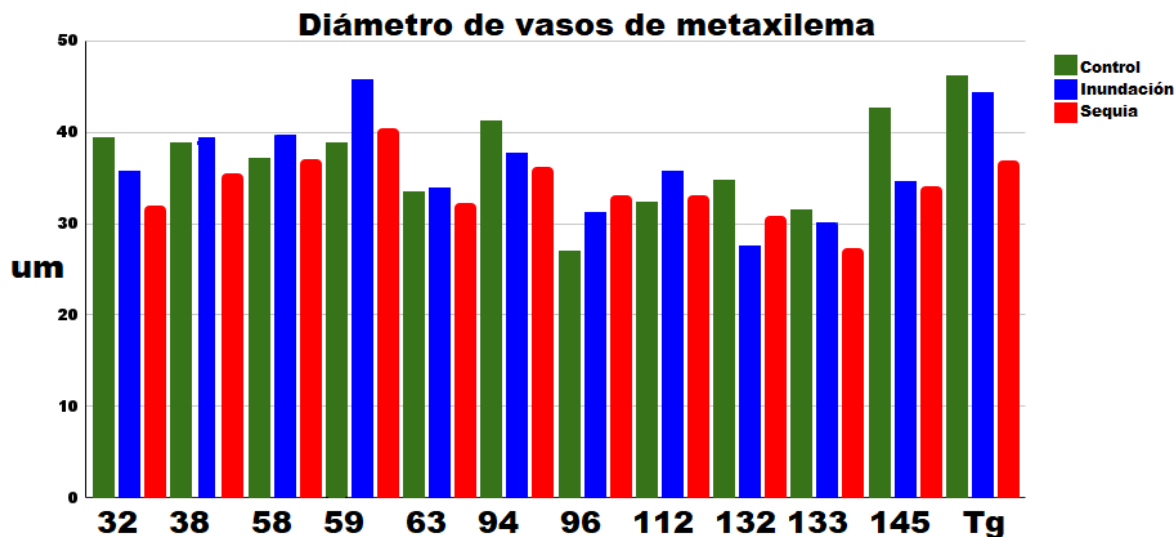


Figura 20. Promedio de valores de diámetro de vasos de metaxilema en micrómetros (μm) por genotipo y por tratamiento. Los colores verde, azul y rojo representan a los tratamientos Control, Inundación y Sequía respectivamente.

En los resultados obtenidos visualizados en la Figura 20, se observó que el tratamiento de inundación presentó un valor promedio de 43.5 μm , el tratamiento control registró un promedio de 40.23 μm , y el tratamiento de sequía exhibió un promedio de 38 μm en la medición realizada.

Para cada genotipo, se observa que AmCo38 y #58 exhiben un diámetro promedio superior en el tratamiento de inundación, un valor medio en el tratamiento control, y un valor menor en el tratamiento de sequía. Mientras que #59 y #96, se observa que el diámetro promedio es mayor en el tratamiento de inundación, mientras que los valores bajo los tratamientos de control y sequía son similares. Por otro lado, los genotipos #32, #94, #133, #145 y Tangola muestran los valores más altos en el tratamiento de control, seguidos de valores medios en el tratamiento de inundación y los más bajos en el tratamiento de sequía.

En los genotipos #59, #96 y #112, el valor del tratamiento de sequía es más alto que el del control, aunque el valor en el tratamiento de inundación sigue siendo superior.

Finalmente, el genotipo #132 es el único que muestra valores más bajos en el tratamiento de inundación en comparación con los otros dos tratamientos.

Raíces laterales

En la Figura 21 resultados visualizados se destaca el genotipo #59 presenta en todos los tratamientos un valor menor de cortes con escala 0. Así como también el genotipo #132 en el tratamiento inundación presenta valores menores en comparación con los demás observados.

Se destaca el genotipo #32 que presenta una mayor incidencia de cortes con una escala de severidad 3 tanto en el grupo de control como en el grupo sometido a sequía. En contraste, en el grupo de inundación, se registran valores inferiores en comparación con los dos grupos mencionados anteriormente.

Otra observación se puede ver en el genotipo #38 que los valores de la escala 3 bajo el tratamiento de inundación son menores con respecto a los demás estudiados.

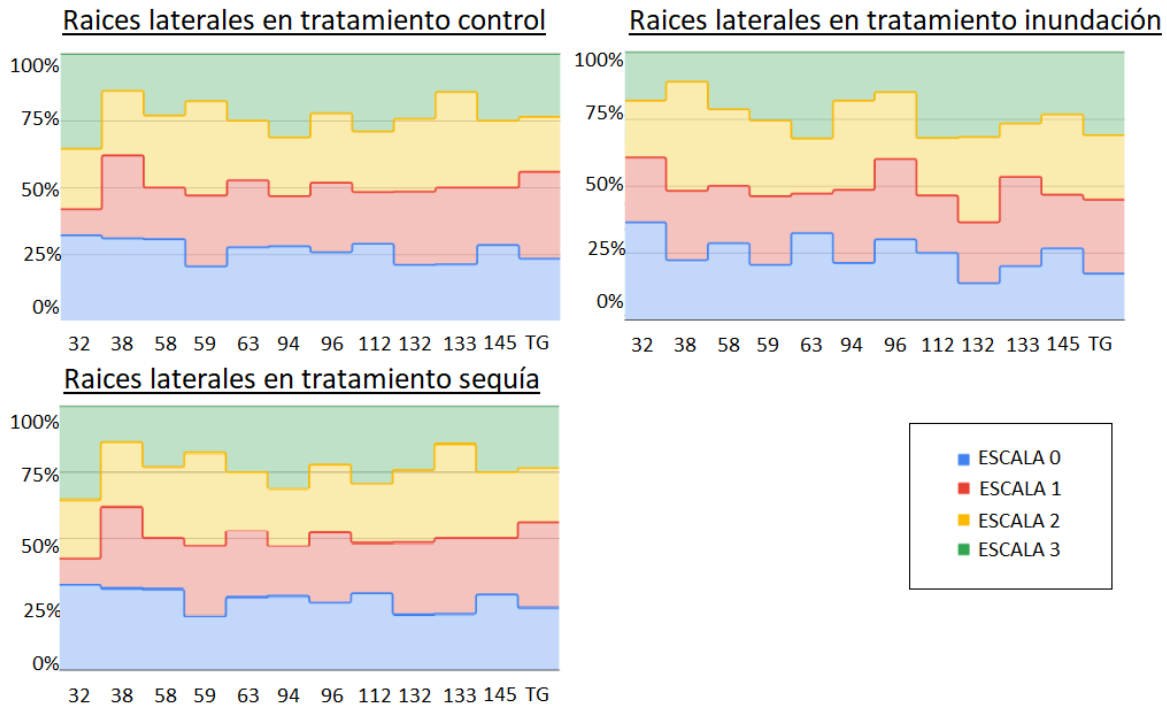


Figura 21. Presencia de raíces laterales por genotipo. El eje vertical corresponde a la cantidad total de cortes visualizados. El color azul corresponde a la escala 0 es decir sin presencia de raíces laterales, el color rojo a la escala 1 poca presencia de raíces laterales, el color amarillo a la escala 2 presencia de raíces laterales y el color verde a la escala 3, es decir con abundante presencia de raíces laterales.

Análisis multivariado

Análisis de conglomerados. En la Figura 22 se muestran los genotipos analizados para los diferentes tratamientos agrupados por todas las variables analizadas en 7 categorías según la distancia de Gower, con una Correlación cofenética de 0,883. El comportamiento de los genotipos en el tratamiento sequía los agrupó en una única categoría, que también incluyó a Tangola en sequía (Grupo amarillo). En el grupo celeste se incluyeron líneas de *A. macrum* con tratamiento inundación y control, destacándose que AmCo38, #63, #94, #96, #112 y #132 tuvieron un comportamiento similar bajo ambos tratamientos. Los genotipos

AmCo58, #59, #133 y #145 se separaron en un grupo diferente en el tratamiento inundación, con un comportamiento más distante del comportamiento en sequía que bajo el tratamiento control. El comportamiento de Tangola en el tratamiento control y en inundación fue distante de los de las líneas de *A. macrum* pero cercanos entre sí, posiblemente por las características estructurales propias de la especie y la poca variación que este tratamiento tuvo en ésta para las variables estudiadas.

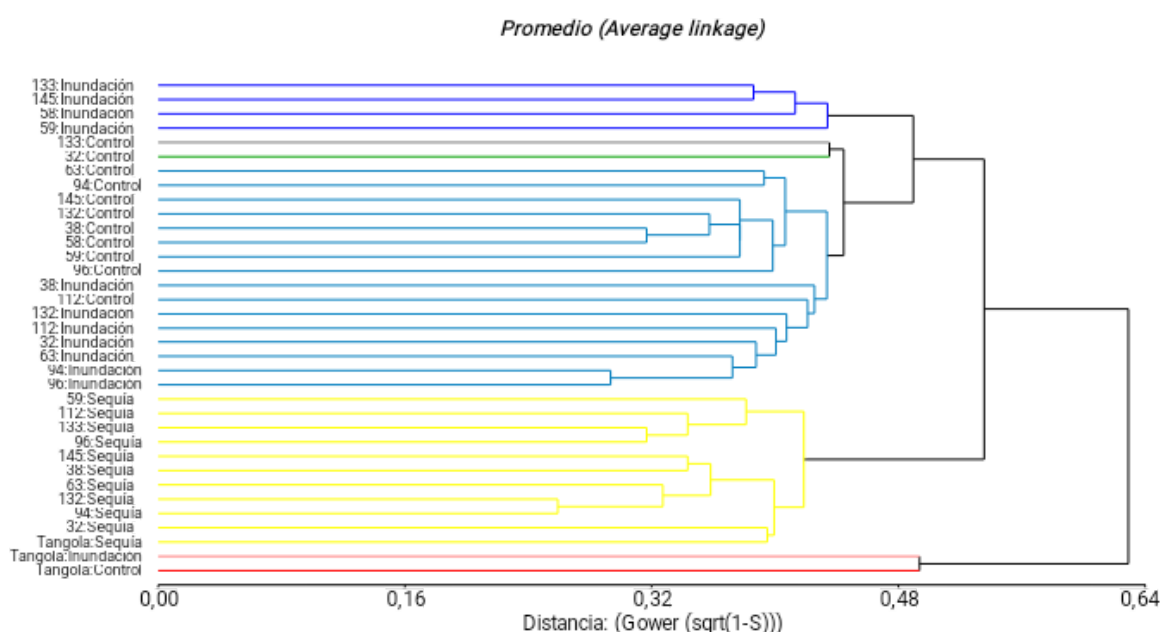


Figura 22. Distancias según Gower y siete agrupamientos obtenidos para todas variables estudiadas en 11 líneas de *A. macrum* y Tangola en los tres tratamientos aplicados. Correlación cofenética: 0,883.

Componentes Principales. Los agrupamientos representados en la Figura 22 como un dendrograma se representan en la Figura 23 como un análisis de los dos primeros Componentes Principales y representó el 48% de la variabilidad observada (CP1, representó el 31% de la variabilidad y CP2, representó el 18% de la variabilidad) con una alta Correlación cofenética de 0,969. El CP1 permitió separar los grupos de las líneas de *A. macrum* según las variables que tuvieron mayor variación por efecto del tratamiento y el CP2 separó según las variables dependientes de la especie y las variables que separaron el grupo AmCo58, #59, #133 y #145 en el tratamiento inundación del tratamiento control y sequía

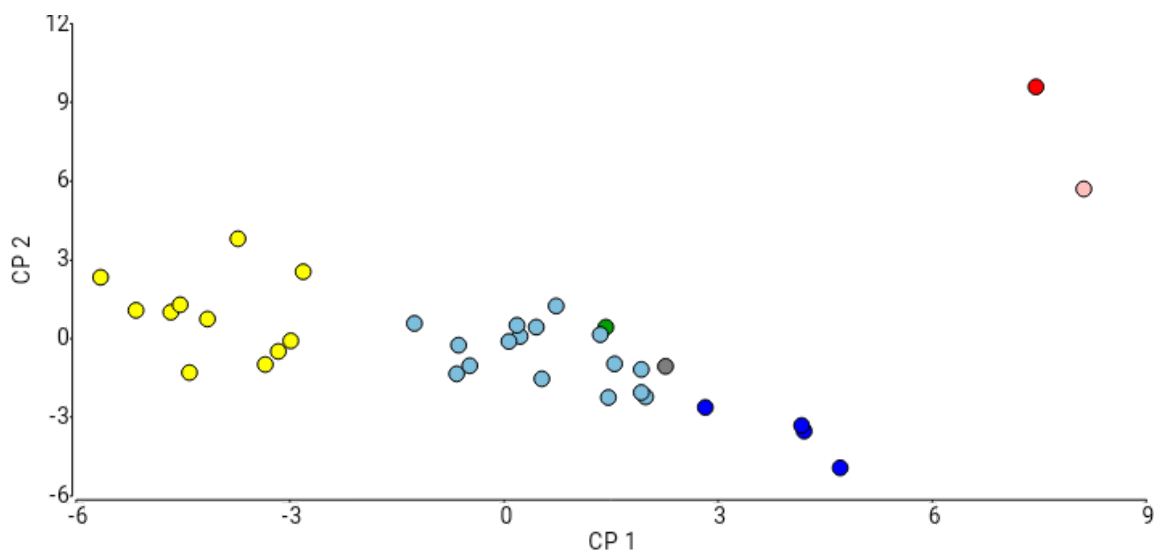


Figura 23. Gráfico para los dos primeros componentes del Análisis de Componentes Principales de siete agrupamientos obtenidos para todas variables estudiadas en 11 líneas de *A. macrum* y *Tangola* en los tres tratamientos aplicados. CP1: 31%, CP2: 18%. Correlación cofenética: 0,969.

En la Figura 23 se resumen las correlaciones importantes (con valores superiores a 0,5) entre CP1 y CP2 con las variables incluidas en este análisis. Las variables que mayor correlación presentaron con la separación observada sobre el CP1 fueron La biomasa aérea de la planta, la biomasa subterránea de la planta y su porcentaje de área de aerénquima, el largo de las láminas foliares (especialmente a partir de la cuarta semana de ensayo), el ancho de las láminas foliares (en las primeras 3 semanas de ensayo), el área foliar calculada según largo x ancho de lámina y la altura de planta, también el porcentaje de materia seca de la biomasa aérea tuvo una correlación importante pero de signo negativo. Las variables que mayor correlación presentaron con la separación observada sobre el CP2 fueron el ancho de las láminas foliares (especialmente a partir de la cuarta semana de ensayo), también la densidad de raíces pequeñas, el área radicular total y el área de aerénquima radical total y la altura de planta tuvieron una correlación importante, pero de signo negativo.

DISCUSIÓN

Los resultados del estudio muestran que variables como la velocidad de crecimiento en altura, la cantidad de macollos emergentes, morfología de las hojas (largo, ancho, pilosidad) y de la raíz (El porcentaje de superficie aerénquimatoso, densidad de raíces secundarias), así como la relación entre la biomasa aérea y subterránea y porcentaje de materia seca de dichas biomásas en *A. macrum* varían significativamente en función del tratamiento aplicado. Estas variaciones podrían tener un rol adaptativo al estrés aplicado y parecen en algunos casos depender del periodo de tiempo de aplicación del tratamiento y de eventos como el corte de biomasa. Se observó variabilidad en el comportamiento de los distintos genotipos de *A. macrum*, a la vez una diferencia de comportamiento respecto a la especie utilizada como comparación *U. arrecta* × *U. mutica* (Tangola).

Acroceras macrum parece adaptarse a diferentes condiciones ambientales ajustando su tasa de crecimiento tanto de la biomasa aérea como la subterránea y la producción de macollos, y también con diversos cambios de su morfología en órganos aéreos y subterráneos. Sin embargo, se necesitan más investigaciones para entender completamente estos mecanismos adaptativos.

Las líneas que parecen estar mejor adaptadas a largos periodos de inundación presentaron incremento en altura y cambios morfológicos en la BA con alargamiento y afinamiento de las hojas, los tallos se afinan y el área foliar total es mayor. La BA se incrementa respecto a BS y los otros tratamientos, los % MS descienden posiblemente en esto último contribuye el aumento del porcentaje de área de aerénquima en raíz. El porcentaje de aerénquima es mayor en inundación, pero el aerénquima está presente en todos los tratamientos. En estudios anteriores se estableció que tanto *Chloris gayana* como *Panicum coloratum* presentan un porcentaje constitutivo de aerénquima del 37% (Imaz et al., 2013). Para Tangola el porcentaje del tratamiento control en promedio fue de 28% siendo menor a las especies comparadas. En *A. macrum* el porcentaje fue mayor siendo un 42%.

Algunos genotipos al ser sometidos a sequía tienen mayor o igual porcentaje de aerénquima bajo esas condiciones respecto de los otros dos tratamientos, esto puede ser explicado por una deshidratación de las raíces que disminuye el área radicular total. En el tratamiento sequía en general el crecimiento se enlentece. Las líneas que consiguen seguir creciendo tras un periodo prolongado de déficit de agua presentan cambios morfológicos como el acortamiento y ensanchamiento de las hojas, la BS supera a la BA y los % de MS se incrementan casi al doble del tratamiento control por la deshidratación. El área fotosintética total disminuye porque se limita el desarrollo foliar posiblemente para disminuir la transpiración y favorecer el desarrollo de rizomas donde se puede conservar agua. Sin embargo, durante el periodo de pérdida o no crecimiento del área foliar algunas plantas expuestas a sequía aun producen macollos, posiblemente para recuperar hojas fotosintéticas sanas y modificadas morfológicamente para reducir la transpiración y evaporación de agua. No se observaron diferencias BA ni área radicular (de raíces principales) del tratamiento inundación y control, mientras que en el tratamiento sequía fueron significativamente menores. Esto puede deberse a una menor área foliar como estrategia para evitar excesos de evapotranspiración y en el caso del área radicular por un aumento de raíces pequeñas absorbentes y deshidratación de raíces grandes.

Es la primera vez que se realizan estudios de este tipo en esta especie. El potencial de adaptación observado amerita continuar con estudios y con el mejoramiento de estas características ya que podrían resultar materiales de gran calidad y rendimiento forrajero capaces de adaptarse y persistir en ambientes marginales y periodos climáticos extremos que ocurren con cada vez mayor frecuencia y sobre áreas de mayor superficie dentro del subtrópico húmedo.

CONCLUSIONES

- *Acroceras macrum* es una especie donde es posible encontrar genotipos con capacidad de adaptación a diferentes condiciones de estrés ambiental como inundación y sequía, mediante cambios en su crecimiento, morfología y biomasa.
- Los cambios observados en *A. macrum* podrían tener un rol adaptativo al estrés aplicado, como el aumento del área de aerénquima radical, el ajuste de la relación entre biomasa aérea y subterránea, y la modificación del tamaño y forma de las hojas y las raíces.
- Existe variabilidad entre los distintos genotipos de *A. macrum* en su respuesta al estrés ambiental, lo que sugiere una diversidad genética y fenotípica dentro de la especie. Algunas líneas presentan mayor tolerancia a la inundación o a la sequía que otras, así como una diferencia de comportamiento respecto a la especie *U. arrecta* × *U. mutica* (Tangola).

BIBLIOGRAFÍA

- Ferrari Usandizaga, S.C. 2017. Programa de Mejoramiento en *Acroceras macrum*. Pregon Agropecuario. <https://www.pregonagropecuario.com/cat.php?txt=9997>
- Gandara, L., M.M., Pereira, S. C., Ferrari Usandizaga, S. C., Luna, C., Fernández J.A. 2017. Efectos de la fertilización y densidad de plantación sobre la acumulación de biomasa aérea y valor nutritivo de Pasto Nilo (*Acroceras macrum*).
- Grimoldi, A.A., G. Striker. 2016. Especies tropicales de pasturas: Tolerancia a inundaciones. Actas del XXIV Congreso AAPRESID, Rosario, Santa Fe. Pp 1-8.
- Godde, C., K. Dizyee, A. Ash, P. Thornton, L. Sloat, E. Roura, B. Henderson, and M. Herrero. 2019. Climate change and variability impacts on grazing herds: Insights from a system dynamics approach for semi-arid Australian rangelands. *Global Change Biology* 25: 3091- 3109.
- Imaz, J., D. O., Giménez, A. A. Grimoldi, G.G., Striker. 2013. The effects of submergence on anatomical, morphological and biomass allocation responses of tropical grasses *Chloris gayana* and *Panicum coloratum* at seedling stage. *Crop and Pasture Science* 63(63): 1145-1155.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Jung, J., Lee, S. C., Choi, H. K. 2008. Anatomical Patterns of Aerenchyma in Aquatic and Wetland Plants. *Journal of Plant Biology* 51(6): 428-439.
- Rhind, J.M.L.C, Doodenough, D.C.W. 1979. A Review *Acroceras macrum* stapf (nylegras). *Proc. Grasid Soc. Sth. Afr.* 14: 27-36.
- O'Brien TP, Cully ME. 1981. The Study of Plant Structure. Principles and Selected Methods. Termarcarphi Pty., Melbourne
- Ördög, V., Molnár, Z. 2011. Plant Phisiology. Desarrollo curricular para la Maestría en Ingeniería Agrícola. Proyecto TÁMOP-4.1.2-08 / 1 / A-2009-0010.

- Schneider C.A., Rasband W.S., Eliceiri K.W. 2012. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat. Methods*. 9: 671–675.
- Tessi, T., Valdez, H., Ruolo, M.S., Pérez, H. 2015. Estimación de área foliar a partir de mediciones lineales en gramíneas megatérmicas. 38° Congr. Arg. Prod. Animal, La Pampa, Argentina. Pp 235.
- Zarlavsky, G.E. 2014. *Histología Vegetal: Técnicas simples y complejas*, 1a. ed. Sociedad Argentina de Botánica, Buenos Aires.
- Zuloaga, F.O., Morrone, O., Saenz, A.A. 1988. Estudio exomorfológico e histofoliar de las especies americanas del género *Acroceras* (Poaceae: Paniceae). *Darwiniana*, 28(1- 4): 191-217.