



**FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**“USO DE *Arundo donax* L. ECOTIPO “COSTA VERDE” EN CONDICIONES
DE ESTRÉS HÍDRICO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA”**

Tesis para optar al Título Profesional de:
Ingeniero Ambiental

Bach. MAURICIO SAEZ RAMIREZ

**Lima – Perú
2017**

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Lima, a los 12 días del mes de abril de 2017, siendo las 17:00 horas, con la asistencia del Jurado de Tesis, Presidido por Ing. Javier Francisco Alvarado Llerena, los miembros del jurado Ing. Victor Agustín Barrantes Santos y Blgo. Gustavo Ricardo Dreyfus Raymond y el Asesor de la Tesis Blga. Gladys Liliana Lino Villanueva, el Bachiller Mauricio Saez Ramirez, autor de la tesis Titulada: "Uso de *Arundo donax L.* ecotipo "Costa Verde" en condiciones de estrés hídrico para la producción de biomasa" con el fin de optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental.

Concluida la exposición, se procedió a la evaluación y deliberación por parte del Jurado correspondiente, habiendo sido *Aprobado* con el calificativo de *Muy Bueno*

Se extiende la presente acta en cinco originales y siendo las *18:00* horas, se da por concluido el Acto Académico de Sustentación.

| | | |
|---|--|---|
|  <hr/> <p>Presidente MSc. Javier Francisco Alvarado Llerena DNI 41332723</p> |  <hr/> <p>Miembro Ing. Victor Agustín Barrantes Santos DNI 22314976</p> |  <hr/> <p>Miembro Blgo. Gustavo Ricardo Dreyfus Raymond DNI 07840274</p> |
|  <hr/> <p>Asesor Dra. Gladys Liliana Lino Villanueva DNI 44363627</p> | | |

AGRADECIMIENTO

A la Dra. Gladys Lino, por la amistad, la paciencia, por todas las cosas que aprendo de ti todos los días, por brindarme la oportunidad de poder desarrollar esta investigación y por todos los ánimos de siempre.

A la Dra. Joyce y al profesor Alvis por brindarme siempre con las mejores intenciones el laboratorio de biología molecular y estar dispuestos a siempre dar un buen consejo.

Al profesor Armando y Elvis por darme siempre todas las facilidades para ingresar y utilizar el laboratorio de Ingeniería Ambiental con la mejor disposición y voluntad. También a Emerson por facilitarme siempre la llave del invernadero y por cubrirme siempre cuando la olvidaba dentro.

A Rosabel, Zdenka y Gabriela, por darme una mano (y realmente muchas manos) para la fase experimental. ¡De verdad se pasaron, se hizo un poco más llevadero gracias a ustedes!

A todas las grandes personas y amigos que conocí en la Universidad Científica: Gustavo, Roxana, Alfonso, Anna, Javier, Paola, Mapi, Malau, Ana, José, Héctor, Javier, Jitka, Eka, Ana, Samantha, Carlos, Jorge, Yanina y Paola. Porque cada uno de ustedes me animó en todo el proceso y lo valoro mucho.

A mis padres, hermanos y cuñados por ser mi soporte emocional. Les agradezco de todo corazón cada una de sus palabras de aliento en los momentos complicados, todos sus consejos y por siempre preguntarme “¿Qué tal va la tesis?”, realmente me transmitían muchas cosas. Gracias por haberme aguantado todos estos meses y por toda la comprensión.

Y a Rosa, por siempre escucharme, estar siempre detrás de mí para darme calma y fuerzas en los días difíciles. Aprecio mucho tus ganas de ayudarme siempre e involucrarte en esto, al punto que me acompañaste un día completo para trasplantar, sí que fue agotador.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| RESUMEN..... | 8 |
| I. INTRODUCCIÓN | 9 |
| 1.1. Objetivos de la investigación | 11 |
| II. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES | 12 |
| 2.1. Cambio climático | 12 |
| 2.1.1. Sequía | 15 |
| 2.2. Bioenergía | 17 |
| 2.3. Biocombustibles..... | 18 |
| 2.3.1. Bioetanol..... | 21 |
| 2.4. Biomasa..... | 24 |
| 2.5. Gramineas perennes | 26 |
| 2.6. Arundo donax | 26 |
| 2.6.1. Poblaciones de A. donax en Perú..... | 29 |
| 2.7. A. donax como alternativa para reemplazar a los biocombustibles de primera generación..... | 30 |
| III. MATERIALES Y MÉTODOS | 32 |
| 3.1. Evaluación de Temperatura y Humedad relativa | 32 |
| 3.1.1. Exterior del invernadero..... | 32 |
| 3.1.2. Interior del invernadero | 32 |
| 3.2. Materiales | 32 |
| 3.2.1. Material vegetal | 32 |
| 3.2.2. Equipos..... | 33 |
| 3.2.3. Espectrofotometría..... | 33 |
| 3.2.4. Otros | 34 |
| 3.3. Métodos | 34 |
| 3.3.1. Crecimiento..... | 34 |
| 3.3.2. Estrés..... | 35 |
| 3.3.2.1. Medidas de crecimiento, parámetros de biomasa y parámetros fisiológicos | 37 |
| 3.3.2.1.1. Peso fresco (PF) (g)..... | 37 |
| 3.3.2.1.2. Peso seco (PS) (g)..... | 38 |
| 3.3.2.1.3. Altura (m) | 39 |
| 3.3.2.1.4. Número de brotes | 39 |
| 3.3.2.1.5. Área foliar (m ²)..... | 39 |
| 3.3.2.1.6. Contenido hídrico relativo (CHR) (%)..... | 40 |

| | |
|--|----|
| 3.3.2.1.7. Contenido de clorofila (Unidades SPAD) | 41 |
| 3.3.2.1.8. Cuantificación de pigmentos | 41 |
| 3.3.2.2. Pruebas estadísticas..... | 43 |
| IV. RESULTADOS | 44 |
| 4.1. Condiciones ambientales y de invernadero | 44 |
| 4.2. Medidas de crecimiento y parámetros de biomasa..... | 46 |
| 4.3. Parámetros fisiológicos..... | 53 |
| V. DISCUSIÓN | 57 |
| VI. CONCLUSIONES..... | 61 |
| VII. RECOMENDACIONES | 62 |
| VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 63 |
| IX. GLOSARIO..... | 74 |
| X. ANEXOS | 76 |
| Anexo 1: Solución nutritiva, la cual contó como fuentes de fertilización: nitrato de amonio, nitrato de potasio, nitrato de calcio, sulfato de potasio, sulfato de magnesio, ácido fosfórico (60 %), mezcla de microelementos, quelato de hierro, ácido bórico, sulfato de zinc y molibdato de amonio..... | 76 |
| Anexo 2: Concentración de pigmentos en A. donax. clorofila A (A), clorofila B (B), clorofila total (C) y carotenoides (D) en µg/mg..... | 76 |
| Anexo 3: Evaluación del CHR. Frascos con 10 mL de agua destilada refrigerados por 24 horas para obtener el peso fresco turgente. | 77 |
| Anexo 4: Proceso de secado en la estufa a 60 °C durante 72 horas a fin de obtener el parámetro evaluado de peso seco..... | 77 |
| Anexo 5: Molienda de hojas en acetona para cuantificar concentración de clorofila y carotenoides. | 78 |
| Anexo 6: Termohigrómetro marca Coolbox ubicado en el interior del invernadero..... | 78 |
| Anexo 7: Resultados de las pruebas estadísticas de ANOVA y test de Duncan | 79 |
| Anexo 8: Fase de aclimatación (25 julio – 25 setiembre). La imagen izquierda corresponde al día de trasplante, mientras que la imagen derecha corresponde al día previo al inicio del estrés..... | 87 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Curva de Keeling. Expresa la concentración de CO ₂ en la atmósfera desde 1700 hasta la actualidad. Las lecturas a partir de 1960 corresponden a análisis de muestras de aire de la estación meteorológica ubicada en la localidad de Mauna Loa, Hawái. La data colectada antes de 1960 representa muestras de aire contenidas en las capas de hielo a diferentes profundidades (Keeling et al., 2001). | 12 |
| Figura 2. Consumo de bioetanol anual proyectado por región en el periodo 2010 – 2030. | 21 |
| Figura 3. Tipos de biomasa de acuerdo a su clasificación. | 24 |
| Figura 4. Mapa de distribución mundial de <i>A. donax</i> | 27 |
| Figura 5. Posibles usos y componentes derivados de <i>A. donax</i> en diferentes sectores industriales. Compuestos derivados después de pre tratamientos (a), biomasa utilizada como materia prima (b) y componentes extraíbles (c). | 28 |
| Figura 6. <i>A. donax</i> colectado en uno de los extremos de la vía del circuito de playas, en la costa de la ciudad de Lima – Perú. | 33 |
| Figura 7. <i>A. donax</i> en fase de crecimiento en almácigo bajo condiciones de invernadero. | 35 |
| Figura 8. Fase de estrés bajo condiciones de invernadero. | 36 |
| Figura 9. Diseño experimental. CC: Control (Capacidad de maceta=200 mL de riego), SM: Sequía moderada (50 % Capacidad de maceta= 100 mL de riego), SS: Sequía severa (25 % Capacidad de maceta= 50 mL de riego). T0: Día 1; T1: Día 15; T2: Día 30. Dónde: a = b = c. Unidad experimental: Individuos incluidos dentro de una maceta. | 36 |
| Figura 10. Corte transversal de un rizoma acompañado de las raíces..... | 37 |
| Figura 11. Secciones subterránea y aérea de <i>A. donax</i> . Momento previo al pesaje fresco. | 38 |
| Figura 12. Pesaje en seco de sección aérea de <i>A. donax</i> | 39 |
| Figura 13. Condiciones ambientales correspondientes a las etapas de aclimatación y estrés del experimento (25 julio – 24 octubre de 2016). La línea continua representa la temperatura ambiental exterior al invernadero y los puntos representan el porcentaje de humedad relativa exterior al invernadero. | 44 |
| Figura 14. Condiciones de invernadero correspondiente a la etapa de estrés del experimento. La línea continua representa la temperatura ambiental interior del invernadero y los puntos representan el porcentaje de humedad relativa interior del invernadero..... | 45 |
| Figura 15. Número de brotes de la especie <i>A. donax</i> en T0 (día 1), T1 (día 15) y T2 (día 30). Los valores muestran el promedio de diez repeticiones (n=10). CC (tratamiento Control), SM (Sequía moderada) y SS (Sequía severa). Letras mayúsculas indican diferencias significativas (P<0.05) entre tiempos y letras minúsculas diferencias (P<0.05) entre tratamientos dentro de un mismo tiempo. | 46 |
| Figura 16. Altura de las plantas de <i>A. donax</i> evaluadas en T0 (día 1), T1 (día 15) y T2 (día 30). Los valores muestran el promedio de diez repeticiones (n=10). CC (tratamiento Control), SM (Sequía moderada) y SS (Sequía severa). Letras mayúsculas indican diferencias significativas (P<0.05) entre tiempos y letras minúsculas diferencias (P<0.05) entre tratamientos dentro de un mismo tiempo. | 47 |

Figura 17. Peso fresco de raíz de *A. donax* evaluados en T0 (día 1), T1 (día 15) y T2 (día 30). Los valores muestran el promedio de diez repeticiones (n=10). CC (tratamiento Control), SM (Sequía moderada) y SS (Sequía severa). Letras mayúsculas indican diferencias significativas (P<0.05) entre tiempos y letras minúsculas diferencias (P<0.05) entre tratamientos dentro de un mismo tiempo.

..... 48

Figura 18. Peso fresco de la sección aérea de *A. donax* evaluados en T0 (día 1), T1 (día 15) y T2 (día 30). Los valores muestran el promedio de diez repeticiones (n=10). CC (tratamiento Control), SM (Sequía moderada) y SS (Sequía severa). Letras mayúsculas indican diferencias significativas (P<0.05) entre tiempos y letras minúsculas diferencias (P<0.05) entre tratamientos dentro de un mismo tiempo.

..... 49

Figura 19. Peso seco de raíz de *A. donax* evaluados en T0 (día 1), T1 (día 15) y T2 (día 30). Los valores muestran el promedio de diez repeticiones (n=10). CC (tratamiento Control), SM (Sequía moderada) y SS (Sequía severa). Letras mayúsculas indican diferencias significativas (P<0.05) entre tiempos y letras minúsculas diferencias (P<0.05) entre tratamientos dentro de un mismo tiempo.

..... 50

Figura 20. Peso seco de la sección aérea de *A. donax* evaluados en T0 (día 1), T1 (día 15) y T2 (día 30). Los valores muestran el promedio de diez repeticiones (n=10). CC (tratamiento Control), SM (Sequía moderada) y SS (Sequía severa). Letras mayúsculas indican diferencias significativas (P<0.05) entre tiempos y letras minúsculas diferencias (P<0.05) entre tratamientos dentro de un mismo tiempo.

..... 51

Figura 21. Hojas de *A. donax* analizadas con el software Easy Leaf Area para el cálculo de área foliar. La imagen izquierda presenta el escaneado de las hojas previo al análisis y la imagen derecha el resultado de la identificación de las hojas resaltado en verde claro permitiendo el cálculo del área foliar.

..... 52

Figura 22. Índice de área foliar (IAF) de *A. donax* evaluado en T0 (día 1), T1 (día 15) y T2 (día 30). Los valores muestran el promedio de diez repeticiones (n=10). CC (tratamiento Control), SM (Sequía moderada) y SS (Sequía severa). Letras mayúsculas indican diferencias significativas (P<0.05) entre tiempos y letras minúsculas diferencias (P<0.05) entre tratamientos dentro de un mismo tiempo.

..... 53

Figura 23. Contenido de clorofila de *A. donax* en unidades SPAD evaluado en T0 (día 1), T1 (día 15) y T2 (día 30). Los valores muestran el promedio de diez repeticiones (n=10). CC (tratamiento Control), SM (Sequía moderada) y SS (Sequía severa). Letras mayúsculas indican diferencias significativas (P<0.05) entre tiempos y letras minúsculas diferencias (P<0.05) entre tratamientos dentro de un mismo tiempo.

..... 54

Figura 24. Contenido hídrico relativo (CHR) de *A. donax* evaluado en T0 (día 1) y T1 (día 15) y T2 (día 30). Los valores representan la media de diez réplicas (n=10) en porcentajes. CC (tratamiento Control), SM (tratamiento de Sequía moderada) y SS (tratamiento de Sequía severa). Letras mayúsculas indican diferencias significativas (P<0.05) entre tiempos y letras minúsculas diferencias (P<0.05) entre tratamientos dentro de un mismo momento de medición.

..... 56

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Emisiones de gases de efecto invernadero en Perú para el sector transporte (Gg de CO ₂ eq) entre los años 1994 y 2010..... | 14 |
| Tabla 2. Tipos de bioenergía utilizados en el Perú (líquidos). | 20 |
| Tabla 3. Parámetros a considerar para Producción más limpia en el proceso de obtención de biomasa. | 25 |
| Tabla 4. Clasificación taxonómica de <i>A. donax</i> | 27 |
| Tabla 5. Evaluación de los parámetros: número de brotes, altura y SPAD, de acuerdo a los tiempos y tratamientos respectivos según la Figura 9. | 37 |

RESUMEN

La presente investigación estudió el comportamiento de un ecotipo peruano de *A. donax* frente a condiciones de estrés hídrico en invernadero analizando parámetros fisiológicos y de crecimiento. La especie fue sometida a condiciones de sequía correspondientes a un riego diario de 200 mL para el control, 100 mL para sequía moderada (SM) y 50 mL para sequía severa (SS) en macetas de 9.5 L durante un periodo de cuatro semanas. Se identificó una ligera reducción del contenido hídrico relativo (CHR), una reducción en el índice de área foliar (IAF) y un favorable incremento en el peso seco tanto de raíz como de la sección aérea de la planta. Si bien se observó una reducción de la concentración de clorofila A y B, en términos generales la especie respondió favorablemente a la sequía. De esta manera, *A. donax* surge como una alternativa ambientalmente viable para el desarrollo del sector bioenergético del Perú sin comprometer la seguridad alimentaria y contribuyendo a la adaptación al cambio climático en la agricultura.

ABSTRACT

The present study assessed the behavior of a Peruvian ecotype of *A. donax* in relation to water stress conditions in greenhouse, analyzing physiological and growth parameters. The species was submitted to drought conditions corresponding to a daily water of 200 mL for the control, 100 mL for moderate drought (SM) and 50 mL for severe drought (SS) in pots of 9.5 L during a period of four weeks. A slight reduction of the relative water content (RWC), a reduction in leaf area index (LAI) and a favorable increase in the dry weight of both root and aerial section of the plant were identified. Although a reduction of chlorophyll A and B concentration was observed, in general terms the species responded favorably to drought. In this way, *A. donax* emerges as an environmentally viable alternative for the development of the bioenergy sector of Peru without compromising food security and contributing to adaptation to climate change in agriculture.

I. INTRODUCCIÓN

En los próximos años, los cambios en el clima como la desertificación y la disponibilidad de agua, serán graves consecuencias del cambio climático que afectarán directamente a las actividades humanas. Actualmente el Perú se encuentra entre los diez países más vulnerables ante eventos climáticos junto a países como Bangladesh, Honduras, entre otros (Brooks & Adger, 2003).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC; 2007) establece que numerosas áreas semiáridas padecerán una disminución de sus recursos hídricos por efecto del cambio climático. Las áreas afectadas por sequías aumentarían en extensión y ello podría repercutir negativamente en múltiples sectores, sobre todo la agricultura. A nivel regional, la demanda de agua de riego aumentaría sustancialmente por efecto del cambio climático y por el aumento de la población mundial que demanda más alimento, la cual según las Naciones Unidas será de aproximadamente 9.15 billones de habitantes para el año 2050 (Alexandratos & Bruinsma, 2012).

Además, el incremento de la demanda energética mundial, acompañado de la reducción de las reservas de combustibles fósiles, han despertado el interés por desarrollar nuevas tecnologías en el ámbito de las energías renovables (Jurišić et al., 2014). Los combustibles fósiles cubren cerca del 80.3 % de la energía primaria consumida a nivel mundial, y el 57.7 % de esta es usada en el sector transporte (International Energy Agency, 2006), por lo cual es considerado como uno de los principales sectores contribuyentes a la emisión de gases de efecto invernadero (GEIs). De acuerdo con Pilu et al. (2013) esto se debe básicamente a dos contundentes motivos: El primero hace referencia al consumo de combustibles fósiles, tales como el petróleo, el gas natural y el carbón, los cuales, debido a su constante explotación para cubrir la importante demanda está desembocando en un agotamiento forzado de estos recursos. Precisamente el tiempo de agotamiento estimado será de aproximadamente 50 años para el petróleo, 70 años para el gas natural y 170 años para el carbón (International Energy Outlook, 2006). Mientras que el segundo, son los grandes volúmenes de

GEIs que están siendo emitidos actualmente. Desde el año 1870, las emisiones anuales de CO₂ atribuidas a la combustión de combustibles incrementó dramáticamente desde cero hasta 29 Gton en el año 2007 (International Energy Agency, 2009).

A partir de dichos acontecimientos, la comunidad científica ha tomado gran interés en la investigación de fuentes de energía alternativa que contribuyan a la mitigación del cambio climático, las cuales, en sinergia, satisfarán la demanda energética en un futuro afectado en diferente magnitud por este fenómeno.

Existen diversas evidencias que sugieren que alternativas bioenergéticas con bajas emisiones (algunas ya disponibles actualmente) pueden reducir la emisión de GEIs (IPCC, 2014). Tal es el caso de la producción de biomasa con fines energéticos, cuyos principales puntos críticos a considerar, según el Panel son entre otros, y además de lo concerniente a emisión de GEIs, evitar interferir en la seguridad alimentaria usando suelo agrícola, los recursos hídricos y la conservación de la biodiversidad. Por otro lado, se sugiere que a partir de la biomasa se puede obtener cerca de un tercio de la energía necesaria en África, Asia y Latinoamérica (Somerville, 2007; IEA, 2009).

Por otro lado, en los últimos años ha surgido la disyuntiva de utilizar cultivos tales como el maíz, la soya, el girasol, el trigo, la caña de azúcar, etc. a favor de la seguridad alimentaria o la obtención de energía. Dichos cultivos, también conocidos como “cultivos alimenticios”, impactan directamente en la disponibilidad de alimento cuando son usados para producir biocombustibles, alterando los precios de los alimentos y generando un efecto de sustitución. Es por ello que surge la necesidad de utilizar cultivos energéticos de segunda generación que no representen dicho costo de oportunidad, además de mitigar el cambio climático y permitan una alternativa viable para el uso de suelos inhóspitos.

El cultivo de *Arundo donax* aparece como una alternativa promisoriosa para la generación de biocombustibles como el bioetanol, gracias a su alta producción de biomasa, su bajo costo (0.5 euros = 1.90 soles por propágulo) en comparación

con otras especies que pretenden el mismo uso, su capacidad de crecer en ambientes inhóspitos es un criterio favorable debido a que podría no ser aplicado en terrenos cuyo fin es la producción de alimentos, evitando su competencia en parcelas destinadas a la seguridad alimentaria (Pilu, Manca & Landoni, 2013).

1.1. Objetivos de la investigación

General

- Estudiar *Arundo donax* L. ecotipo “Costa Verde” en condiciones de estrés hídrico para la producción de biomasa.

Específicos

- Evaluar la capacidad de respuesta de *A. donax* L. frente al estrés hídrico.
- Determinar la producción de materia seca en *A. donax* L.
- Comparar parámetros de crecimiento entre los tratamientos.
- Determinar la cantidad de clorofila entre tratamientos.

II. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

2.1. Cambio climático

El IPCC (2007) define al cambio climático como el cambio en los valores medios y/o en la variabilidad de las propiedades del clima, el cual persiste en un prolongado periodo de tiempo y es verificable por medio de la estadística en tiempos comparables. Este cambio puede ser atribuido a la actividad humana o a la variabilidad natural.

Asimismo, este cambio está estrechamente ligado al calentamiento de la atmosfera y el incremento de la temperatura media de la Tierra, como consecuencia de la creciente emisión de gases de efecto invernadero, principalmente el dióxido de carbono (Figura 1).

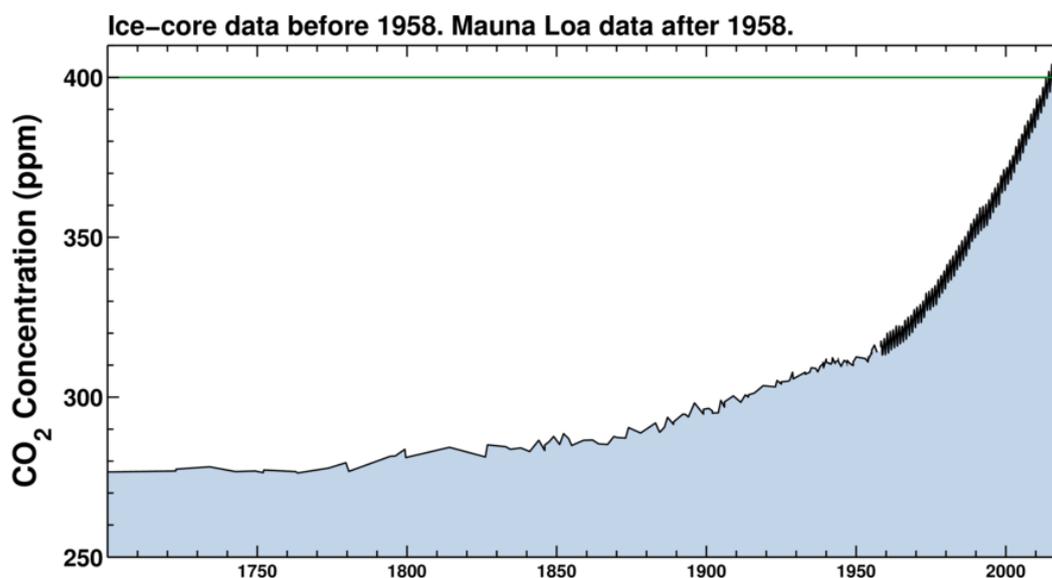


Figura 1. Curva de Keeling. Expresa la concentración de CO₂ en la atmósfera desde 1700 hasta la actualidad. Las lecturas a partir de 1958 corresponden a análisis de muestras de aire de la estación meteorológica ubicada en la localidad de Mauna Loa, Hawái. La data colectada antes de 1958 representa muestras de aire contenidas en las capas de hielo a diferentes profundidades (Keeling et al., 2001).

El informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (2007) establece por consenso de sus científicos, con más del 95 % de certeza, que la mayor parte del calentamiento global es causado por las crecientes concentraciones de gases de efecto invernadero.

Por otro lado, el IPCC (2007) estableció que las actividades humanas son responsables del aumento de la temperatura atmosférica, acidificación progresiva del océano, el incremento del nivel del mismo, la alteración en el ciclo hidrológico y consecuencias graves hacia la biodiversidad por el aumento la temperatura media de la tierra entre 2 y 4 °C. Además, los procesos del ciclo del carbono agudizarían el incremento de CO₂ en la atmósfera.

El acuerdo de París, ratificado en abril de 2016, consolidó los compromisos de los gobiernos priorizando la reducción de las emisiones de GEIs después del año 2020. A través de las contribuciones nacionales (INDCs, por las siglas en inglés de *Intended Nationally Determined Contributions*) se busca adaptarse, evitar y hacer frente al cambio climático, manteniendo el incremento de la temperatura global promedio por debajo de 2 °C sobre los niveles preindustriales y posteriormente limitar el aumento de la temperatura a 1.5 °C por encima de los niveles preindustriales (Rogelj et al., 2016).

Las emisiones de CO₂ acumuladas determinarán en gran medida el calentamiento medio global a finales del siglo XXI y posterior a dicho periodo. La mayoría de los aspectos del cambio climático perdurarán durante siglos, incluso aunque cesaran las emisiones de CO₂, lo que supone una notable persistencia del cambio climático durante mucho tiempo como consecuencia las emisiones de CO₂ pasadas, presentes y futuras (Stocker et al., 2013).

En el Perú, las emisiones nacionales de CO₂ provenientes del sector transporte han ido incrementando en cuanto a su representatividad con respecto al total de emisiones correspondientes al sector energético y también al total emitido a nivel nacional.

Estos representaron en 1994, el 8.1 % de los gases de efecto invernadero (CO₂ eq) emitidos dicho año. Posteriormente para el año 2000, se identificó que dicha representatividad aumentó ligeramente a 8.3 %, a pesar de que el total de emisiones correspondientes al sector energético se vieron disminuidas. En el año 2009, las emisiones atribuidas al sector transporte fueron de 14,848.27 Gg de CO₂ eq, correspondiente al 61.8 % de las emisiones del sector energético y significando un 10.1 % de la emisión nacional anual. Finalmente, 2010 fue el año registrado con el mayor volumen de CO₂ eq emitido. El sector transporte significó el 12.3 % del total de emisiones a nivel nacional y el 37.4 % del sector energético (Tabla 1).

Tabla 1. Emisiones de gases de efecto invernadero en Perú para el sector transporte (Gg de CO₂ eq) entre los años 1994 y 2010.

| Año | Total | Sector Energía | Transporte | Fuente |
|------|------------|----------------|------------|--------------|
| 1994 | 98,816.30 | 32,053.09 | 7,969.79 | CONAM (2001) |
| 2000 | 120,023 | 25,400 | 9,938 | MINAM (2010) |
| 2009 | 146,782.54 | 24,026.94 | 14,848.27 | INEI (2013) |
| 2010 | 124,109.14 | 40,605.24 | 15,205.69 | MINAM (2014) |

Fuente: Elaboración propia

La importancia de la mitigación de los gases de efecto invernadero, principalmente del CO₂, radica en diversificar la matriz energética mediante el aporte de distintas fuentes de energía, ya sea solar, eólica, geotérmica o bioenergética para así lograr reducir las concentraciones emitidas a la fecha.

2.1.1. Sequía

Como una de las principales consecuencias del cambio climático, la sequía representa un desafío para la humanidad tanto en el ámbito agrícola como en la disponibilidad de agua para consumo humano. Es un evento climático extremo que ocurre actualmente en diferentes territorios alrededor del mundo en zonas áridas y húmedas principalmente que repercute directamente sobre el agua disponible sobre el suelo, en el suelo y en el subsuelo, el cual está caracterizado por la ocurrencia de precipitaciones por debajo de las condiciones normales locales durante un periodo de meses o años (Dai, 2011).

Por otro lado, Heim (2002) define a la sequía como un marcado déficit y ausencia prolongada de precipitación y un periodo anormal de clima seco lo suficientemente prolongado, lo cual causa considerables desbalances hidrológicos.

Wilhite (2000) y la Sociedad Americana de Meteorología (1997) plantean clasificar a la sequía de acuerdo a tres categorías descritas a continuación:

- Sequía meteorológica:

Es causada por persistentes anomalías en los patrones de circulación atmosférica a gran escala que son provocadas por temperaturas anómalas en la superficie del océano tropical, entre otras condiciones. Corresponde a un periodo de meses o años con precipitaciones por debajo de lo normal y acompañado generalmente por temperaturas superiores a los valores promedio correspondientes, el cual puede ocasionar otros tipos de sequía.

La evaporación y la reducción de la humedad asociadas con suelos secos y altas temperaturas suelen aumentar las anomalías previamente mencionadas.

- Sequía agrícola:

Corresponde a un periodo con suelos secos como resultado de precipitaciones por debajo del promedio, probablemente intensas, pero menos frecuentes o evaporación por encima de lo normal. Significa un déficit importante de humedad en el suelo principalmente a una profundidad correspondiente a la zona radicular. Todo ello conduce a una reducción en la producción de cultivos y al crecimiento de las plantas.

- Sequía hidrológica:

Sucede cuando los sistemas de flujo de agua superficial como los ríos y los grandes sistemas de almacenamiento como los lagos, reservorios o acuíferos bajan considerablemente su disponibilidad de agua con respecto a sus valores promedio en un largo periodo de tiempo. Este se desarrolla lentamente debido a que se ve involucrada agua almacenada la cual es utilizada pero no reabastecida. La falta de precipitaciones desencadena generalmente sequía agrícola y sequía hidrológica. Sin embargo, otros factores como una gestión inadecuada del recurso hídrico y la erosión pueden causar o intensificar estas sequías.

La sequía fuerza a los gobiernos hoy en día a tomar decisiones que conlleven a practicar una agricultura que reduzca la brecha hacia la adaptación frente al cambio climático. Si bien establecer medidas de mitigación, es decir, plantear mecanismos para reducir la concentración de gases de efecto invernadero en la atmosfera, es fundamental; de igual modo es necesario determinar el cultivo de especies capaces de tolerar las condiciones adversas planteadas por el cambio climático como lo son la salinidad y la sequía.

2.2. Bioenergía

Nos encontramos en un momento de la historia en el que somos testigos de la escasa aplicación del concepto de sostenibilidad desde la revolución industrial, la cual, acompañada de la alta demanda energética actual, ha conllevado al agotamiento de los combustibles fósiles (indicados anteriormente con su tiempo de agotamiento). La IEO (2013) pronostica un aumento del 56 % en el consumo energético mundial entre los años 2010 y 2040.

Además, entre los años 2008 y 2010, cerca del 2 % de las tierras cultivables del mundo fueron usadas con fines de producción de materias primas bioenergéticas (FAO, 2013). Es por ello que una economía basada en la bioenergía, la cual encuentra en la agricultura y silvicultura su principal fuente de biomasa para elaborar biocombustibles, se abre paso hoy en día como una de las alternativas más viables para su sustitución.

Según Paschalidou, Tsatiris y Kitikidou (2016) es la energía derivada proveniente de la biomasa. La bioenergía puede producirse a partir de una variedad de materias primas orgánicas, como biomasa, incluidos los residuos forestales, agrícolas y cultivos energéticos. A través de una variedad de procesos, estas materias primas se pueden utilizar para producir electricidad o calor directamente o para elaborar combustibles, ya sean gaseosos, líquidos o sólidos. Por otro lado, para el Ministerio del Ambiente de Perú (2010) es aquella energía renovable no convencional de origen biológico, en donde a partir de la biomasa, es posible producir combustibles líquidos, gaseosos y sólidos.

Además, las materias primas usadas para producir energía mediante tres vías distintas. Estas pueden ser: combustión directa, producción de bioetanol como combustible o generación de biogás. A su vez, es uno de los tipos de energía renovable que puede reemplazar un porcentaje del consumo de combustibles fósiles en el futuro. Contribuye además a la diversificación energética de los países y a la apropiación de tecnologías de energías emergentes, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y promoviendo la sustitución de combustibles (Islas et al., 2007). Según la Agencia Internacional de Energía,

actualmente, la bioenergía proporciona el 10 % del suministro mundial de energía primaria.

En el Perú, la bioenergía, como parte de las energías renovables, desempeñará un rol fundamental en continuar abasteciendo la demanda energética en los próximos años, la cual ha venido creciendo a ritmos importantes desde la década de los 90s.

2.3. Biocombustibles

Los biocombustibles son combustibles líquidos y gaseosos producidos a partir de biomasa, tales como el alcohol de azúcar fermentada, madera, residuos orgánicos, etc. Según algunos autores, éstos permitirán una mayor eficiencia que la obtenida a partir de los combustibles derivados del petróleo en motores de combustión interna (Lapuerta, Hernández, Ballesteros & Duran, 2003).

Los biocombustibles, según Verbruggen (2011) se pueden clasificar, de acuerdo a su generación, de la siguiente manera:

Primera generación (1G): Son aquellos biocombustibles producidos a base de azúcares (Banat, Nigam, & Marchant, 1992), granos o semillas (Gibbons & Westby, 1989), los cuales necesitan procesos relativamente simples para obtener el producto final. El más conocido entre ellos es el bioetanol, el cual es extraído a partir de cultivos alimenticios y producido a través de la fermentación de sus azúcares (pentosas o hexosas).

A nivel mundial, los biocombustibles 1G más utilizados actualmente para la producción de bioetanol son principalmente el maíz y caña de azúcar. Dichas especies corresponden a cultivos alimenticios, principal característica de dicha generación de biocombustibles.

Actualmente existe una controversia respecto al uso de los biocombustibles 1G, la cual consiste en que a pesar de ser los más utilizados hoy en día, éstos representan un obstáculo para la preservación de la seguridad alimentaria, pues

reduce la oferta de alimento (Giselrød, Patil & Tran, 2008). Su principal desventaja radica en que eleva el precio de los alimentos como resultado de la producción de combustibles a base de estos (Laursen, 2006).

Segunda generación (2G): Son aquellos producidos a partir de la lignocelulosa (lignina, celulosa y hemicelulosa) contenida en la biomasa mediante procesos biológicos o termoquímicos principalmente. Corresponde a los residuos del cultivo de alimentos e industria maderera y a los cultivos energéticos (Singh & Singh, 2011).

Si bien la biomasa obtenida a partir de los biocombustibles 2G puede ser quemada a fin de obtener electricidad y calor, su máximo potencial se evidencia cuando son utilizados para producir biocombustibles líquidos (Naik, Goud, Rout & Dalai, 2010).

Una de sus principales ventajas radica en que esta generación no representa un desafío en el mercado de alimentos, puesto que su producción está basada principalmente en cultivos no alimenticios o de los residuos resultantes de la cosecha de alimentos (Nigam & Singh, 2011) y ya no en especies destinadas principalmente para el consumo humano.

Tercera generación (3G): Corresponden a aquellos derivados de microorganismos como levaduras, hongos (en su mayoría heterótrofos) o microalgas (autótrofas y/o heterótrofas; Singh & Singh, 2011) que aparecen como alternativa al uso de cultivos en tierra. Uno de los beneficios más importantes relacionado al uso de microalgas es que no compiten con los cultivos terrestres en cuanto a suelo y espacio y no requiere de riego con agua dulce para su cultivo.

Si bien a través de otros procesos biológicos como digestión anaerobia y fermentación alcohólica es posible obtener combustibles como biogás o bioetanol (Grant, 2009), el principal potencial de esta generación está orientada a la producción de biodiesel.

Cabe indicar que dicha generación de biocombustibles en la actualidad presenta una particularidad en el caso del uso de algas para fines energéticos, la cual indica que deben evitarse condiciones anóxicas luego de su extracción.

Haciendo referencia al sector transporte, éste se verá favorecido por el desarrollo de las fuentes de bioenergía orientadas a producir combustibles líquidos (Tabla 2) establecidos en el Plan de Agroenergía 2009 - 2020.

Tabla 2. Tipos de bioenergía utilizados en el Perú (líquidos).

| Tipo | Insumos | Zona de producción | Usos del biocombustible | |
|------------------------|-------------------------------|--|--|--|
| 1era generación | Biodiesel | Palma aceitera Piñón blanco, higuera, colza Colza | Amazonía Costa y Amazonía deforestada | |
| | Aceite vegetal carburante | Palma aceitera | Sierra Amazonía deforestada | Transporte Generación de electricidad en comunidades aisladas |
| | | Piñón blanco, higuera, colza | Costa y Amazonía deforestada | |
| | | Colza | Amazonía deforestada | |
| | Etanol anhidro | Caña de azúcar Sorgo dulce | Costa norte principalmente Costa | Transporte |
| Etanol hidratado | Caña de azúcar Sorgo dulce | Costa norte principalmente Costa | | |
| 2da generación | Etanol | Residuos forestales Residuos agrícolas de cultivos como caña de azúcar, arroz u otros | Aserraderos en todo el país Zonas productoras de estos cultivos en todo el país | |
| | Aceite de pirolisis | Caña brava, residuos forestales, biomasa vegetal en general | Amazonía, costa | Generación de electricidad Calor |

Adaptado de: Plan de Agroenergía. Ministerio de Agricultura (2009).

En menos de una década, la producción mundial de biocombustibles se incrementó en cinco veces, desde menos de 20 billones de litros por año en 2001 a por encima de 100 billones de litros por año en 2011 (HLPE, 2013), en gran medida gracias a las metas trazadas por los países para reemplazar a los biocombustibles en lugar de combustibles fósiles.

2.3.1. Bioetanol

Entre los biocombustibles, es el bioetanol el producto más estudiado, debido a que es uno de los complementos o sustitutos principales de la gasolina para favorecer el funcionamiento de motores del sector vehicular. Además, su consumo se está incrementando considerablemente a nivel mundial (Figura 2) y en América Latina consecuentemente.

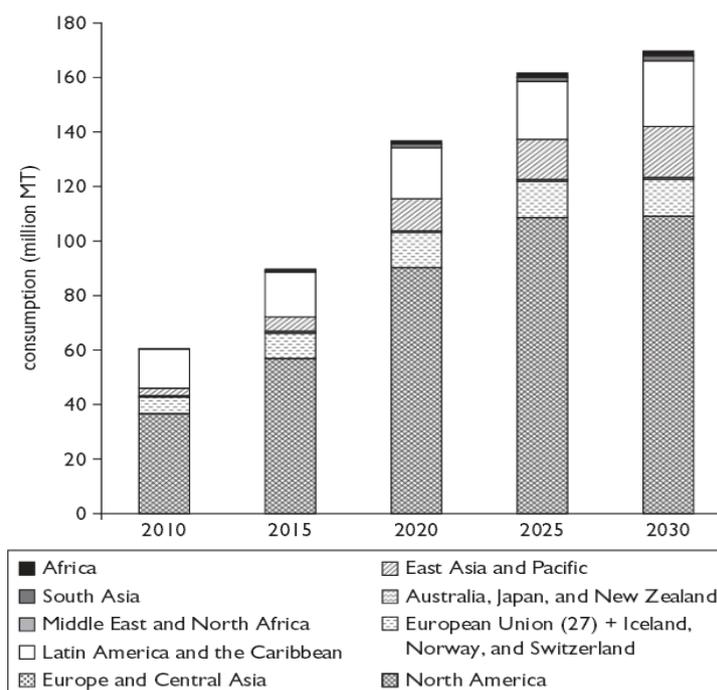


Figura 2. Consumo de bioetanol anual proyectado por región en el periodo 2010 – 2030.

Fuente: Cushion, Whiteman y Dieterle (2010).

En un primer momento consta de un pretratamiento, generalmente termoquímico, con la finalidad de separar la lignina de los polisacáridos que serán precursores del etanol, producto del proceso. Posteriormente, es necesaria la hidrólisis enzimática, a fin de obtener monómeros de glucosa, galactosa, manosa, xilosa y arabinosa. La actividad de la enzima celulasa permite romper los enlaces glucosídicos.

Luego el proceso continúa con la fermentación alcohólica de los monómeros recuperados por medio de microorganismos anaerobios a través de sus procesos metabólicos. Estos utilizan monosacáridos para liberar etanol como

sub producto, Finalmente, un proceso de destilación con la finalidad de purificar el sustrato, permite obtener el biocombustible más importante.

Por otro lado, según Chandel et al. (2013), la producción de bioetanol a partir de la biomasa consta a grandes rasgos, de tres pasos fundamentales para el desarrollo del proceso: (1) la despolimerización de la holocelulosa, es decir, celulosa más hemicelulosa en monómeros fermentables, (2) fermentación del sustrato despolimerizado anteriormente y (3) la destilación del fermentado obteniendo etanol anhidro.

Se conoce gracias a Berg (2004) y Kim y Dale (2004), que la producción anual alcanzó los 40 GL de bioetanol en el año 2004. En dicho año Estados Unidos, explotando maíz y Brasil, explotando caña de azúcar representaron el 60 % de la producción total. Adicionalmente, data más reciente de la OCDE y FAO (2015) estableció que en 2014 la producción anual de bioetanol llegó a 114 GL y se proyecta una producción de 134.5 GL para 2024.

En el mundo, las concentraciones de mezcla de bioetanol que se encuentran con mayor frecuencia en el mercado corresponden a los siguientes dos grandes grupos:

- Entre 5 y 15 % del volumen de bioetanol en gasolina, en donde el bioetanol participa como componente estándar. Las bajas concentraciones de bioetanol permiten que el combustible sea utilizado de manera directa por usuarios que se encuentran circulando y no requieran modificar el motor para su correcto funcionamiento. Estas mezclas combustibles de bioetanol más gasolina son denominadas combustibles E5, E10 y E15.

- Entre 20 y 85 % de volumen de bioetanol en gasolina. Bajo dichas condiciones, el bioetanol es el combustible más representativo de la mezcla. Cabe indicar que estas proporciones sí ameritan una modificación en los motores de los vehículos que lo utilizan. Estos son denominados combustibles E20, E85 y sus demás correspondientes.

La modificación corresponde a una migración a los denominados motores *flex fuel* o *powerflex*, los cuales permiten un correcto desempeño del motor sin producir problemas de corrosión sin importar la proporción de la mezcla. El costo de la modificación del motor de acuerdo al mercado es de aproximadamente US\$ 100. Por otro lado, para el año 2014 en Estados Unidos el 50 % de la producción de motores para el sector automotriz de las compañías General Motors, Ford y Chrysler correspondió a estas clases de motores (ePURE, 2013), que conformaron el 25 % de la venta total anual de autos.

Para el Perú, la normativa vigente relacionada corresponde a la Ley N° 28054, “Ley de promoción del mercado de Biocombustibles”, el Decreto Supremo N° 013-2005-EM, “Reglamento de Ley de promoción del mercado de Biocombustibles” y el Decreto Supremo N° 021-2007-EM, “Reglamento para la comercialización de Biocombustibles”. A partir del último, se establecen las proporciones de mezcla vigentes de gasolina – etanol para la comercialización de biocombustibles a nivel nacional según el Artículo 7 del reglamento, descrito este a continuación:

“Artículo 7.- Porcentaje de la mezcla de Alcohol Carburante con gasolinas El porcentaje en volumen de Alcohol Carburante en la mezcla gasolina - Alcohol Carburante que podrá comercializarse en el país será de 7.8 % (siete coma ocho por ciento) y se le denominará Gasohol, según el grado de octanaje: Gasohol 97 Plus, Gasohol 95 Plus, Gasohol 90 Plus y Gasohol 84 Plus.”

Los principales beneficios ambientales brindados por el uso del bioetanol como combustible son la diversificación de la demanda energética y la mitigación al cambio climático.

2.4. Biomasa

La biomasa representa una de los recursos biológicos más abundantes y menos utilizados en el planeta (Naik et al., 2010), la cual es considerada como cualquier materia orgánica originada por medio de un proceso biológico utilizable como fuente de energía, entre ellos se encuentran la materia proveniente de plantas o animales en una base renovable. La biomasa incluye: madera, cultivos agrícolas, cultivos herbáceos, cultivos energéticos leñosos, residuos orgánicos municipales, estiércol.

De Lucas y Del Peso (2012) establecen una clasificación de los tipos biomasa según su origen, composición y estado (Figura 3). De acuerdo dicha clasificación, *A. donax* corresponde a biomasa sólida según su estado, lignocelulósica por su composición y cultivo energético según su origen.

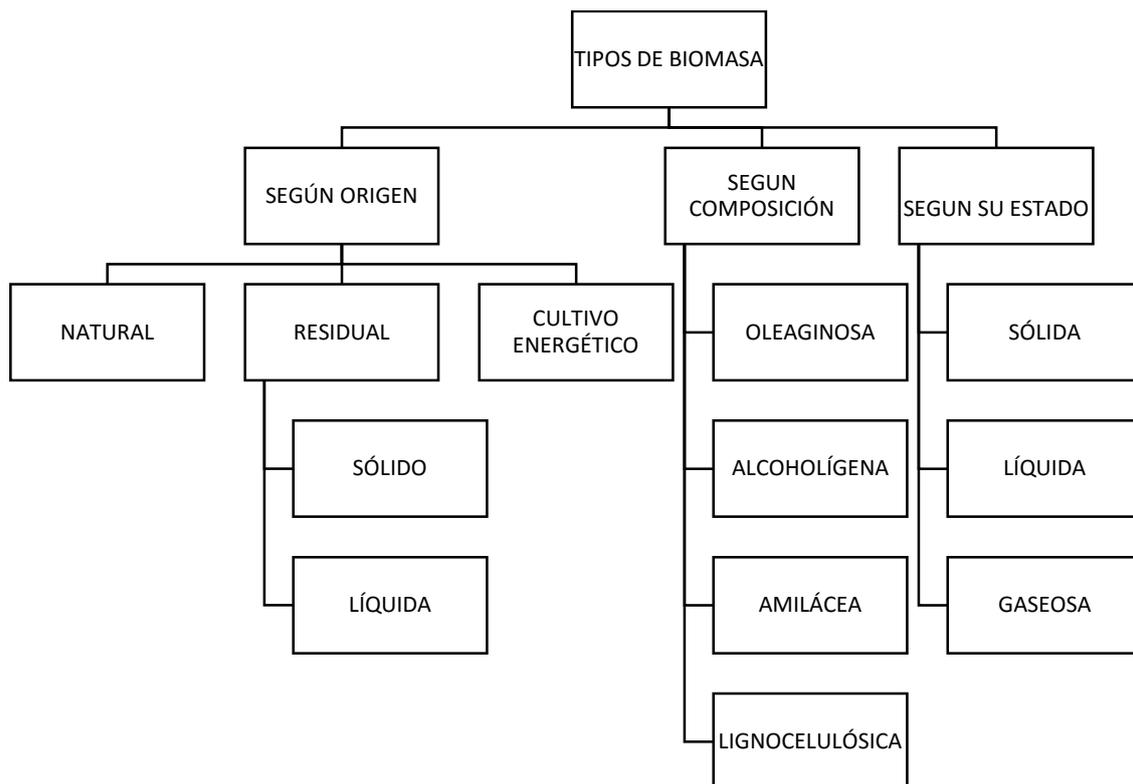


Figura 3. Tipos de biomasa de acuerdo a su clasificación.

Fuente: De Lucas y Del Peso (2012).

Asimismo, De Lucas y Del Peso (2012) establecen ventajas del uso de la biomasa para fines energéticos, tales como:

- Disminución de emisiones de dióxido de carbono con respecto a los combustibles fósiles convencionales.
- No emite contaminantes nitrogenados o sulfurados.
- Mejoramiento económico del medio rural.
- Nuevas oportunidades para el sector agrario.
- Diversificación energética.
- Disminución de la dependencia de los combustibles fósiles.

Existen parámetros a considerar a fin de seleccionar la especie óptima para producir biomasa de manera ambientalmente viable, optimizando así el uso de fertilizantes y reduciendo el uso de agua para riego. La Tabla 3 además de presentar dichos parámetros para cuatro posibles especies destinadas a la producción de biomasa, presenta adicionalmente el rubro de producción de bioetanol, biocombustible generado a partir de la planta estudiada en la presente investigación.

Tabla 3. Parámetros a considerar para Producción más limpia en el proceso de obtención de biomasa.

| PARÁMETRO | | <i>Triticum aestivum</i> | <i>Arundo donax</i> | <i>Miscanthus giganteus</i> | <i>Saccharum officinarum</i> |
|--------------------------------|---|--------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Fertilizante (kg/ha) | N | 175 ⁵ | 100 ⁷ | 100 ⁷ | 200 ⁶ |
| | P | 150 ⁵ | 100 ⁷ | 100 ⁷ | 150 ⁶ |
| | K | 125 ⁵ | 100 ⁷ | 100 ⁷ | 150 ⁶ |
| Agua (m3/ha) | | - | 0 ⁷ | 0 ⁷ | - |
| Suelo | | Tierra agrícola | Tierra marginal Tierra agrícola | Tierra marginal Tierra agrícola | Tierra agrícola |
| Rendimiento de biomasa (Mg/ha) | | 6.1 ² | 45 ⁴ | 22.1 ³ | 254 ¹ |
| Producción de bioetanol (L/ha) | | 2750 ² | 12690 -15228 ⁴ | 8812 ³ | 4000–8000 ¹ |

Fuente: Elaboración propia

- 1 Duku et al. (2011).
- 2 Rosenberger et al. (2002).
- 3 Qin et al. (2011).
- 4 Melis (2010).
- 5 Malghani et al. (2010).
- 6 Ayub, Ahmad, Tanveer, Ahmad y Sharar (1999).
- 7 Angelini et al. (2009).

2.5. Gramineas perennes

Las especies forrajeras se dividen principalmente en gramíneas y leguminosas. Dentro de las gramíneas, se establece que las que tienen la capacidad de conservarse durante las estaciones anuales (perennes), cumplen con ciertas características que las hacen atractivas como fuente de biomasa para la producción de biocombustibles. Entre ellas están, según (Jaradat, 2010; Ceotto et al., 2013):

- Su alta capacidad fotosintética (mayor capacidad de fijar CO₂).
- Su alto potencial de rendimiento.
- Altos contenidos de azúcares como lignina y celulosa.
- Su bajo impacto ambiental en comparación con otros cultivos anuales.

Estas especies, de las cuales se tiene conocimiento de su veloz crecimiento y alta acumulación de biomasa a través de investigaciones en su genética y fisiología, están siendo explotadas y utilizadas con mayor frecuencia cada vez. Además, son capaces de crecer de manera natural en suelos degradados (Lewandowski et al., 2003) y requieren un manejo del suelo limitado en términos de siembra y labranza, fomentando el aumento del carbono en suelo (Lewandowski & Schmidt, 2006).

2.6. *Arundo donax*

Originaria del este asiático, es una gramínea perenne perteneciente a la familia Poaceae (Tabla 4). Se encuentra ampliamente distribuida en diversos países situados en la región subtropical (Figura 4). La caña común, como se le conoce por su nombre común o *giant reed* (por su nombre común en inglés), puede llegar a medir 8 m de altitud, siendo una de las plantas herbáceas más altas del mundo (Perdue, 1958).

Tabla 4. Clasificación taxonómica de *A. donax*.

Fuente: Compendio de especies invasoras, (2015).

| | |
|-------------------|---------------------|
| Dominio: | Eukaryota |
| Reino: | Plantae |
| Phylum: | Spermatophyta |
| Subphylum: | Angiospermae |
| Clase: | Monocotyledonae |
| Orden: | Cyperales |
| Familia: | Poaceae |
| Género: | <i>Arundo</i> |
| Especie: | <i>Arundo donax</i> |

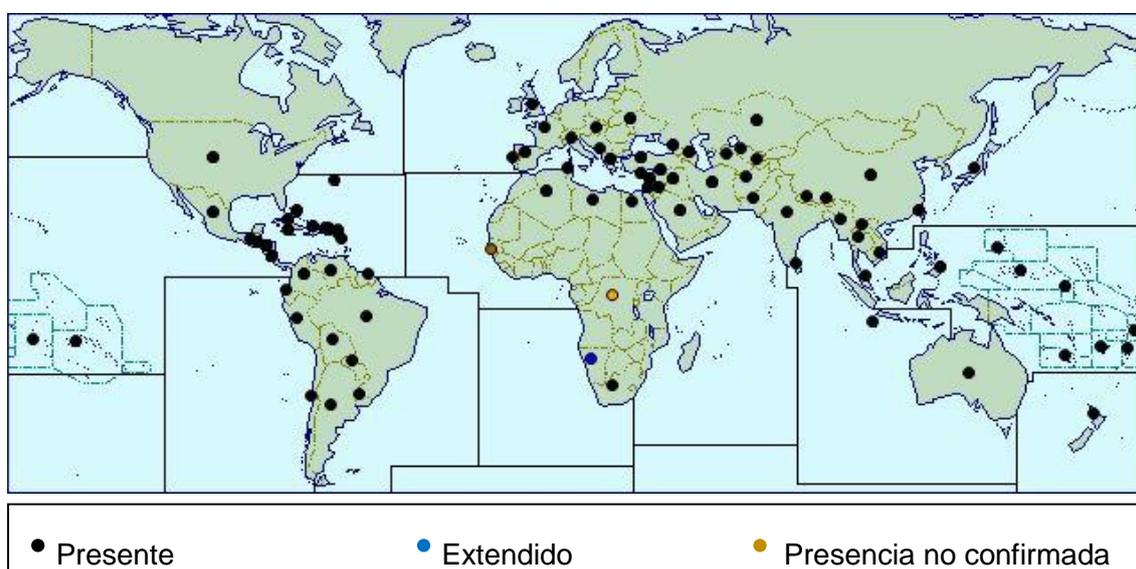


Figura 4. Mapa de distribución mundial de *A. donax*.

Fuente: Compendio de especies invasoras (2015).

Asimismo, es utilizada tanto como materia prima para la construcción, obtención de energía (Aponte & Cano, 2013) y cuenta con componentes extraíbles como la xilosa o la arundamina (Figura 5), las cuales son usadas para fines alimenticios y medicinales. Además, bajo ambientes adecuados, su tasa de crecimiento puede llegar a ser de 5 cm/día (Perdue, 1958; Pilu et al., 2012) y sus raíces pueden tener una profundidad de hasta cinco metros dependiendo de la edad del cultivo.

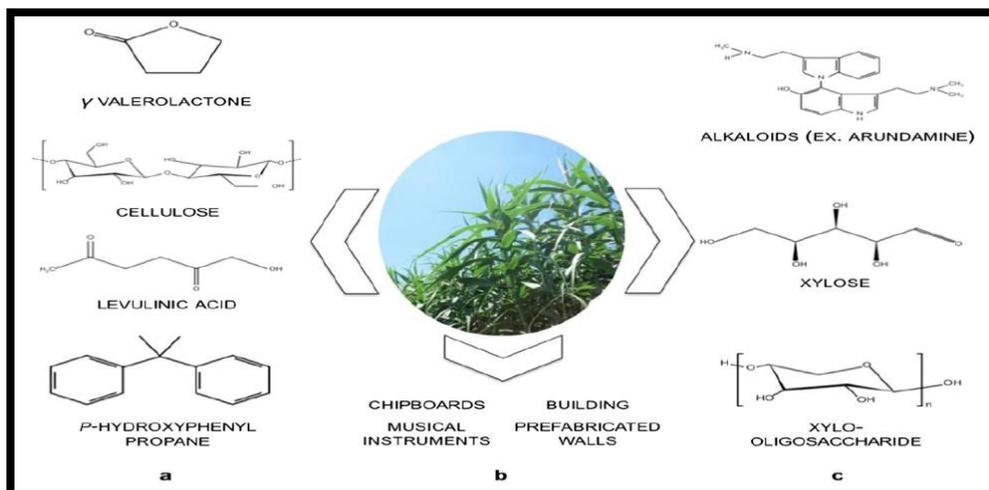


Figura 5. Posibles usos y componentes derivados de *A. donax* en diferentes sectores industriales. Compuestos derivados después de pre tratamientos (a), biomasa utilizada como materia prima (b) y componentes extraíbles (c).

Fuente: Corno et al. (2014).

Si bien es considerada una planta acuática emergente, también es capaz de crecer en suelos inhóspitos o marginales (Cook, 1990). Adicionalmente, después del primer año de crecimiento, se vuelve relativamente tolerante a la sequía, pero también sobrevive en sitios muy húmedos (Mann, Barney, Kyser y Ditomaso, 2013) y en suelos salinos (Pilu, Bucci, Cerino Badone & Landoni, 2012), lo que la convierte en una alternativa ambientalmente viable para la producción de biocombustibles.

Su reproducción es vegetativa y se da a través de dos formas: por medio de la propagación espontánea de sus rizomas mediante fragmentación y, por medio de los cortes de caña (Pilu et al, 2013). La especie cuenta con nodos, los cuales pueden ser hallados cada 15-20 cm aproximadamente en un ejemplar maduro. Cada uno de los cortes es capaz de generar un nuevo ejemplar bajo condiciones húmedas (Ceotto & Di Candilo, 2010). Adicionalmente, cabe indicar que, a pesar de producir inflorescencia, la cual puede llegar a medir incluso un metro de longitud y contar con miles de flores hermafroditas, se trata de una planta estéril (Mariani et al, 2010; Pilu et al, 2012).

Por otro lado, el veloz crecimiento y la habilidad de producir biomasa, son las características más importantes que distinguen a esta especie de otras plantas herbáceas, convirtiéndola en un prometedor y valioso cultivo energético.

Debido a su alto potencial en su valor EROEI (*Energy returned on energy invested*) (Pilu et al., 2013), *A. donax* ha conseguido el interés de la comunidad científica, gracias a su gran productividad de biomasa y a que esta especie puede ser cultivada utilizando bajas cantidades de insumos como agua o fertilizantes (Angelini, Ceccarini, Nassi o Di Nasso & Bonari, 2009).

2.6.1. Poblaciones de *A. donax* en Perú

A nivel nacional, la especie ha sido identificada mayoritariamente en los ecosistemas de humedales costeros y zonas aledañas a la costa. Algunas investigaciones realizadas en el Perú, muestran la amplia distribución de la especie a lo largo de nuestro país.

Por ejemplo, en los humedales de Puerto Viejo, ubicados al sur de Lima en la provincia de Cañete y en el humedal de Santa Rosa, situado al norte de Lima en la provincia de Huaral, Aponte y Cano (2013). Asimismo; León, Young y Cano (1996) observaron a la especie en la costa central del Perú, la cual incluye el sur de la región Ancash y la franja costera de las regiones Lima e Ica.

Del mismo modo, Montesinos y Mondragón (2013) realizaron otro estudio de composición florística realizado en la cuenca costera del río Acarí y sus alrededores, ubicada en la provincia de Caravelí, al oeste de la región Arequipa. Señalaron que la especie se encuentra distribuida en las tres zonas de estudio correspondientes a la investigación: Acarí, Bella Unión y Chocavent. Caracterizadas principalmente por sus grandes extensiones de laderas arenosas, dunas, desiertos llanos, quebradas rocosas áridas y monte ribereño.

Sin embargo, también es posible hallar *A. donax* en zonas alto andinas. Un estudio desarrollado por Gutiérrez y Castañeda (2014) reportó a la especie en la región Huancavelica, la cual se encuentra entre los 3200 y 3260 m.s.n.m., presente en áreas de humedad permanente, en las riberas de los ríos y cercana a campos de cultivo.

2.7. A. *donax* como alternativa para reemplazar a los biocombustibles de primera generación

Como se ha mencionado anteriormente, la capacidad de *A. donax* de poder desarrollarse correctamente con limitados insumos como agua y fertilizantes (Angellini et al., 2013), su capacidad de producir favorables cantidades de biomasa y cumplir con la condición de no ser un cultivo alimenticio; son las características más importantes que convierten a los biocombustibles 2G en la mejor alternativa sustituta a los biocombustibles 1G o cultivos alimenticios usados para fines energéticos.

De acuerdo al diagrama bioclimático de Holdridge (Holdridge, 1982), la región Piura (principal zona de producción de bioetanol en el Perú) presenta un promedio de precipitación total anual que varía entre 81 y 260 mm, además de una estacionalidad marcada de acuerdo al régimen de lluvias (con 9 meses secos y 3 meses de lluvias) presentando además un constante déficit hídrico.

En dicha región se cultiva la caña de azúcar como principal cultivo para la producción de bioetanol. Además, de acuerdo con FAO (2012) son necesarios por los menos 850 mm de agua al año para mantener una producción sostenible de este cultivo en condiciones de secano. Es por ello que, dado el evidente déficit de agua provista por las lluvias, es necesario implementar sistemas de riego para favorecer la producción óptima de caña de azúcar, el cual puede llegar a significar un volumen de 17000 m³ por hectárea al año, de acuerdo a la investigación realizada por Urteaga-Crovetto (2016), teniendo este un costo de 475 soles en el año 2013.

Es importante señalar, que la producción de biomasa seca de la caña de azúcar corresponde a aproximadamente 23 ton/ha, un dato inferior a la producción obtenida por *A. donax*, el cual oscila entre las 37 ton/ha (Lewandowski et al., 2003), siendo el primero un cultivo que evidentemente requiere de considerables volúmenes de agua para riego. Adicionalmente, considerando que es conocido que el proceso de fotosíntesis en las hojas de caña de azúcar es sensible al estrés hídrico (Du et al., 1996), dicha producción podría verse afectada como

consecuencia de la escasez y la reducción de la disponibilidad de agua para riego en la región.

Por otro lado, el maíz es un cultivo el cual requiere de grandes cantidades de fertilizantes. Aproximadamente el 40 % de todo el nitrógeno destinado a fertilizantes a nivel mundial es usado para la producción de maíz. Además, este requiere de 1000 mm de agua (García, 2008), puesto que del mismo modo sería necesario utilizar sistemas de riego para su producción.

Actualmente es posible obtener 3.1 m³ de bioetanol por hectárea a partir del maíz, mientras que utilizando el cultivo de *A. donax*, 2.8 m³ por hectárea, teniendo en consideración su producción en suelos no aptos para la agricultura.

Es por ello que, además de considerar el potencial uso futuro de *A. donax* gracias a su tolerancia a climas y condiciones desfavorables, es importante tener en cuenta los ahorros que su uso implican, tanto a nivel monetario como de recursos (fertilizantes y agua para riego). Dichas características, sumadas a su alta producción de biomasa y fundamentalmente al no ser un cultivo que compite por preservar la seguridad alimentaria en el mundo, hacen de esta especie una oportunidad atractiva frente al desafío que implica la producción de biocombustibles en el siglo XXI.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Evaluación de Temperatura y Humedad relativa

Los valores de temperatura y humedad relativa fueron evaluados dentro y fuera del invernadero desde la etapa del trasplante a macetas (25 de julio) hasta el final del periodo de estrés (24 de octubre).

3.1.1. Exterior del invernadero

Los datos fueron obtenidos del portal web de la empresa *AccuWeather* de Estados Unidos, la cual presta servicios comerciales de pronóstico del tiempo en todo el mundo desde 1971. La información de la temperatura exterior al invernadero fue tomada desde el trasplante a macetas hasta concluir el periodo de estrés, todos los días a las 10:00 am.

3.1.2. Interior del invernadero

Los datos fueron obtenidos utilizando un Termohigrómetro marca *Coolbox* (Anexo 6), colocado en el interior del invernadero. Fueron anotados los datos presentados en la pantalla del equipo correspondientes a la temperatura al interior y porcentaje de humedad relativa a las 10:00 am. A diferencia de los datos de temperatura y humedad relativa del exterior del invernadero, éstos fueron tomados sólo durante la fase de estrés y no durante la aclimatación.

3.2. Materiales

3.2.1. Material vegetal

Se colectaron individuos de *A. donax* (Figura 6), en la ciudad de Lima en el distrito de Chorrillos ($12^{\circ}09'38.9''S$ $77^{\circ}01'29.7''W$), en la zona de “circuito de playas”, la cual está ubicada a escasos metros de las orillas del Océano Pacífico.



Figura 6. *A. donax* colectado en uno de los extremos de la vía del circuito de playas, en la costa de la ciudad de Lima – Perú.

Fuente: Elaboración propia.

Se cortaron secciones de caña cada 20 cm como indica Pílu et al. (2013), con presencia de un nodo por cada sección, capaces de desarrollar una nueva raíz y una nueva planta.

3.2.2. Equipos

- Balanza analítica (Sartorius® ED224S)
- Estufa (Binder®)
- Cinta métrica
- Escáner Canon® CanoScan LiDE 220
- Medidor de clorofila Minolta® SPAD 502, Plainfield, IL, USA
- Espectrofotómetro mrc® UV-16
- Calculadora

3.2.3. Espectrofotometría

- Cubetas de Espectrofotómetro
- Centrífuga (Sigma® 2-16)
- Acetona 80 %
- Tubos de centrífuga

- Morteros
- Pipetas
- Matraces
- Hielo

3.2.4. Otros

- 70 Macetas de 9.5 L.
- Bandeja para almácigos
- Arena gruesa
- Pipeta Pasteur de 3 mL
- Soluciones nutritivas A y B (Anexo 1)
- Sustrato: Musgo, perlita, vermiculita (2:1:1)
- *Software: Easy Leaf Area*
- *software IBM SPSS 22.0*

3.3. Métodos

3.3.1. Crecimiento

La fase de crecimiento y aclimatación de *A. donax* se desarrolló en el Invernadero de Ingeniería Ambiental de la Universidad Científica del Sur (12°13'23.3"S 76°58'41.2"W). Las secciones de tallos se establecieron en almácigos durante un tiempo estimado de cuatro meses considerados entre los meses de marzo a julio de 2016 y dos meses en maceta durante julio – setiembre de 2016 (Figura 7 y 8).

Siguiendo con la metodología de Ceotto y Di Candilo (2010), los cortes de caña fueron cultivados en bandejas para almácigos, manteniéndose húmedos permanentemente. Se utilizó como sustrato arena gruesa para favorecer su futuro trasplante y se regó con 100 mL de agua potable (pH de 7.1 y conductividad eléctrica de 2.3 mS/cm) además de 3 mL solución nutritiva A+B (Anexo 1) a una concentración de 5 mL/L (2.5 mL de cada solución).



Figura 7. *A. donax* en fase de crecimiento en almácigo bajo condiciones de invernadero.

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Estrés

La fase de estrés inició luego de los cuatro meses de la fase de crecimiento y aclimatación en almácigo y dos meses en maceta (julio – setiembre de 2016) y tuvo una duración de un mes (setiembre – octubre de 2016). Los individuos desarrollados fueron trasplantados a macetas de 9.5 L para brindar un mayor espacio y favorecer a su crecimiento (Figura 8) en sustrato de musgo - perlita - vermiculita. Se establecieron dos tratamientos: sequía moderada (SM) y severa (SS), además de un control (CC). Las evaluaciones se dieron en tres tiempos (T0, T1 y T2) correspondientes a los días: 1, 15 y 30 de evaluación.

Los tratamientos de sequía moderada y severa no fueron analizados en T0 debido a que en dicho momento no había iniciado la fase de estrés, cuyo efecto pudo ser observado a partir del T1 de evaluación, es decir a partir del día 15 de estrés.

Por otro lado, los tratamientos de SM y SS sí contaron con 10 macetas para cada uno de los tiempos de evaluación, a fin de observar el efecto del estrés hídrico durante todo el periodo a analizar (Figura 9).



Figura 8. Fase de estrés bajo condiciones de invernadero.

Fuente: Elaboración propia

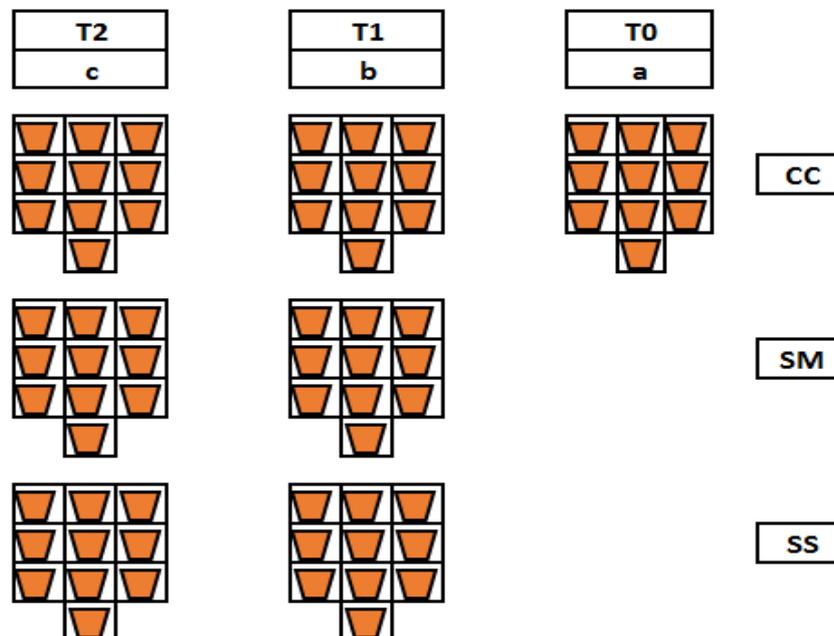


Figura 9. Diseño experimental. CC: Control (Capacidad de maceta=200 mL de riego), SM: Sequía moderada (50 % Capacidad de maceta= 100 mL de riego), SS: Sequía severa (25 % Capacidad de maceta= 50 mL de riego). T0: Día 1; T1: Día 15; T2: Día 30. Dónde: a = b = c. Unidad experimental: Individuos incluidos dentro de una maceta.

Asimismo, los parámetros de número de brotes, altura y contenido de clorofila fueron analizados en todos los tiempos para todos los tratamientos establecidos puesto que estos no son pruebas destructivas (Tabla 5).

Tabla 5. Evaluación de los parámetros: número de brotes, altura y SPAD, de acuerdo a los tiempos y tratamientos respectivos según la Figura 9.

| Tiempo | Bloques analizados |
|--------|--------------------|
| T0 | a b c |
| T1 | b c |
| T2 | c |

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.1. Medidas de crecimiento, parámetros de biomasa y parámetros fisiológicos

3.3.2.1.1. Peso fresco (PF) (g)

Se retiró la planta de su respectiva maceta descartando el sustrato. A continuación, se lavaron las raíces y fueron escurridas al aire libre durante cinco minutos. Luego se cortó la sección aérea separándola de las raíces y el rizoma (Figuras 10 y 11).



Figura 10. Corte transversal de un rizoma acompañado de las raíces.

Fuente: elaboración propia



Figura 11. Secciones subterránea y aérea de *A. donax*. Momento previo al pesaje fresco.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se rotularon cada una de los empaques de papel *kraft* que contenían cada una de las unidades experimentales correspondientes a su tiempo, tratamiento y número de repetición.

Finalmente, fueron pesadas cada una de las unidades experimentales correspondientes al tiempo de análisis en la balanza analítica ubicada en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Científica del Sur.

3.3.2.1.2. Peso seco (PS) (g)

Luego del análisis del PF, cada una de las unidades experimentales correspondientes al tiempo a analizar fueron colocadas y distribuidas en la estufa ubicada en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Científica del Sur dentro de bolsas de papel *kraft* a 60 °C durante un tiempo de 72 horas (Anexo 4) o hasta corroborar un peso constante.

Concluido el proceso de secado fueron pesadas las plantas determinando el peso seco de la sección aérea y raíz de cada unidad experimental (Figura 12).

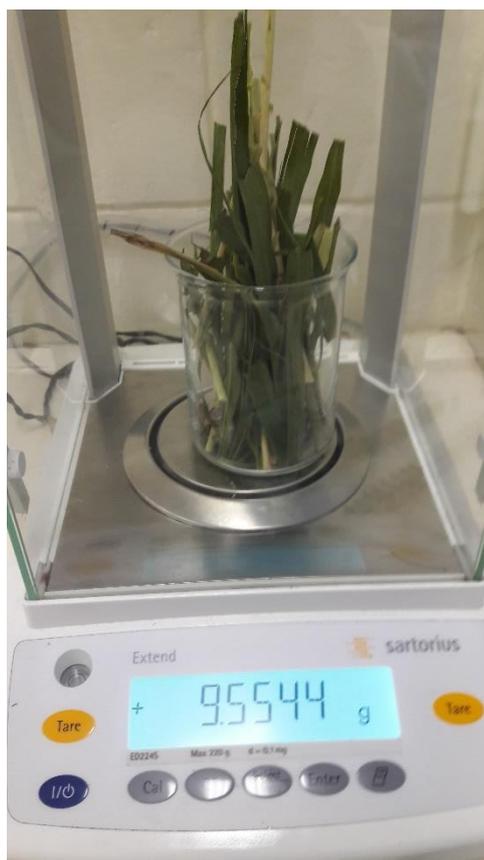


Figura 12. Pesaje en seco de sección aérea de *A. donax*.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.1.3. Altura (m)

Por medio de una cinta métrica se midió la altura de las plantas para todos los tratamientos durante los tres momentos de medición (T0, T1 y T2).

3.3.2.1.4. Número de brotes

Se observaron y contabilizaron los brotes nuevos adicionales que aparecieron en cada una de las unidades experimentales, para todos los tratamientos durante los tres momentos de medición (T0, T1 y T2).

3.3.2.1.5. Área foliar (m²)

Inicialmente se colectaron las hojas de todos los individuos de cada maceta, cortándolas con una tijera. Luego se colocaron las hojas en la Escáner Canon® CanoScan LiDE 220, posteriormente se procedió a realizar el escaneado y los archivos fueron guardados como formato de imagen (JPG).

Utilizando el programa *Easy Leaf Area*, fue hallada y calculada el área foliar de las unidades experimentales a partir de las imágenes en donde fueron escaneadas las hojas.

El funcionamiento del programa está dado por la relación de color de cada pixel del patrón de 4 cm² color rojo, con el color verde correspondiente a las hojas. De esta manera el *software* construye un área conformada por la sumatoria de los pixeles identificados de color verde, de igual manera expresado en cm². Dicho proceso evita la necesidad de desarrollar cálculos de distancia de cámara o escala manual, necesarios para otros *softwares* que buscan calcular el mismo parámetro.

3.3.2.1.6. Contenido hídrico relativo (CHR) (%)

Es un indicador del estado de la planta, en términos de hidratación celular (Slatyer, 1967).

Se etiquetaron tubos de centrifuga de 10 mL (tres réplicas por muestra). Posteriormente se seleccionaron hojas jóvenes y desarrolladas de la planta, de las cuales se seccionaron cuadrados de 1 cm² de tejido y se colocaron en el tubo de 10 mL.

Luego, fueron pesadas cada una de las tres muestras de 1 cm² por tratamiento y por tiempo. Se obtuvo el valor de PF. Se transfirieron los cuadrados de hoja a tubos de 10 mL con agua destilada. Los tubos se dejaron durante 24 horas en una cámara fría a 4 °C para permitir la absorción de agua por el tejido (Anexo 3).

Posteriormente se retiraron las secciones de tejido vegetal de los tubos con agua y, con papel absorbente, se retiró el exceso de agua sobre su superficie y se pesaron de nuevo, obteniendo el Peso Fresco Turgente (PFT).

Luego, los cuadrados fueron envueltos y rotulados en papel *kraft* y colocados en la estufa del laboratorio de Ingeniería Ambiental a 60 °C durante 48 horas. Después del secado se volvió a pesar el tejido para obtener el valor de PS.

El CHR se calculó aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{CHR} = \left[\frac{(\text{PF} - \text{PS})}{(\text{PFT} - \text{PS})} \right] \times 100$$

3.3.2.1.7. Contenido de clorofila (Unidades SPAD)

Utilizando el equipo Minolta SPAD 502, se midió el contenido de clorofila tres veces en una misma hoja por cada unidad experimental de acuerdo a los tres tiempos establecidos.

Se determinó aleatoriamente una hoja por maceta para la evaluación del parámetro. Dicha hoja seleccionada fue analizada 3 veces estableciendo un dato promedio. Cabe indicar que la evaluación de este parámetro fue reforzada y complementada con la evaluación del contenido de clorofila a través de espectrofotometría.

3.3.2.1.8. Cuantificación de pigmentos

El procedimiento se desarrolló de acuerdo a la metodología de Nogués y Bergareche (2011) descrita a continuación:

Se separaron y pesaron por medio de una balanza analítica, 100 mg de hojas desarrolladas y secas de la especie *A. donax* (fue anotado el peso exacto).

Se utilizó un mortero de cerámica en baño de hielo, al cual se le añadieron los 100 mg de muestras de hoja seca pesados anteriormente. Luego se agregaron 5 mL de acetona al 80 %, triturando y homogenizando la muestra de hoja (Anexo 5). Posteriormente se agregaron 5 mL de acetona al 80 % adicionales con el fin de remover y considerar los restos de muestra y solución adheridos al mortero. Habiendo aplicado ya un total de 10 mL de acetona, se procedió a trasvasar la solución al tubo de centrifuga. Luego, fueron centrifugadas las muestras a 3000 rpm por cinco minutos. Una vez concluido el proceso se vertieron las muestras a matraces rotuladas.

Los pigmentos se calcularon determinando la absorbancia de las muestras centrifugadas anteriormente por medio de un espectrofotómetro (mrc® UV-16).

Cada una de las muestras contenidas en los matraces fue trasvasada a las cubetas de espectrofotometría.

En primer lugar, se determinó la absorbancia de las muestras a 750 nm a fin de establecer si era posible continuar con las mediciones de absorbancia o si era necesario regresar al centrifugado. Si el valor de absorbancia resultaba mayor a 0.05, era necesario regresar al proceso de centrifugado nuevamente a fin de reducir la turbidez. Si la absorbancia resultaba menor a 0.05 se podía continuar con el procedimiento, permitiendo calcular la absorbancia a 750 nm, 663 nm, 647 nm y 470 nm respectivamente.

Una vez obtenidos los valores de absorbancia (A) de las muestras, fue posible determinar la concentración de clorofilas (CL) y carotenoides (CAR) en las hojas de *A. donax* a través de las siguientes ecuaciones (Lichtenthaler, 1987):

$$CL A (\mu\text{g/mL}) = 12.25 \times A_{663} - 2.79 \times A_{647}$$

$$CL B (\mu\text{g/mL}) = 21.50 \times A_{647} - 5.10 \times A_{663}$$

$$CL \text{ TOTAL } (A + B) = 7.15 \times A_{663} + 18.71 \times A_{647}$$

$$CAR (\mu\text{g/mL}) = \frac{(1000 \times A_{470} - 1.82 \times \mu\text{g/ml CL A} - 85.02 \times \mu\text{g/ml CL B})}{198}$$

A partir de los valores obtenidos en las ecuaciones de Lichtenthal (1987) y del PS del material empleado para la extracción de los pigmentos fotosintéticos, se calcula el contenido de los pigmentos como mg de clorofila o carotenoides por mg de peso seco:

$$\frac{(\mu\text{g pigmentos} / \text{ml} \times 10 \text{ ml de extracto})}{\text{mg de peso seco}} = \frac{\mu\text{g pigmentos}}{\text{mg PS}}$$

Cabe señalar que las letras “a”, “b” y “c” corresponden al análisis de los parámetros: número de brotes, altura y SPAD. La evaluación de estos parámetros en los todos los tratamientos disponibles se dio debido a que no son pruebas destructivas y fue factible realizarlo de dicha manera.

3.3.2.2. Pruebas estadísticas

Para el análisis de los resultados se utilizaron las siguientes pruebas estadísticas con un nivel de confianza $p \leq 0.05$ utilizando el *software* IBM SPSS 22.0:

- Análisis de Varianza (ANOVA) para medir la significación estadística de las diferencias entre las medias de los tratamientos.
- Test de Duncan para comparar las medias de los t niveles de un factor después de haber rechazado la hipótesis nula de igualdad de medias mediante la técnica ANOVA.

El Anexo 7 presenta el procesamiento de los datos de acuerdo a las pruebas mencionadas.

IV. RESULTADOS

4.1. Condiciones ambientales y de invernadero

Las condiciones ambientales, tales como temperatura y humedad relativa fueron evaluadas fuera del invernadero desde la etapa del trasplante a macetas hasta el final del periodo de estrés. Los datos fueron obtenidos del portal web *AccuWeather* (Figura 13).

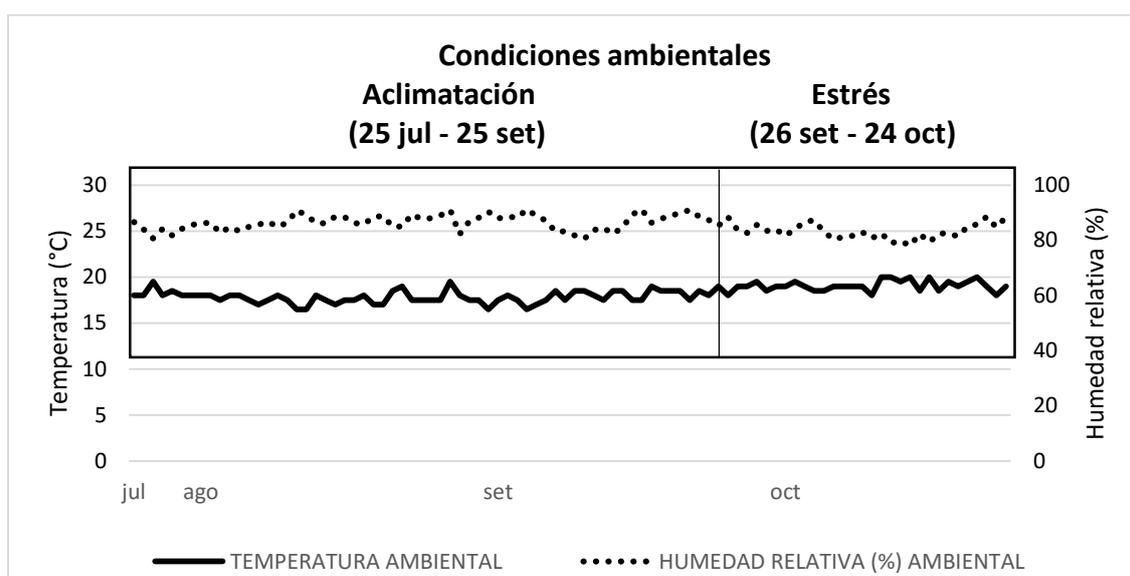


Figura 13. Condiciones ambientales correspondientes a las etapas de aclimatación y estrés del experimento (25 julio – 24 octubre de 2016). La línea continua representa la temperatura ambiental exterior al invernadero y los puntos representan el porcentaje de humedad relativa exterior al invernadero.

Fuente: Elaboración propia.

Sólo durante la etapa de estrés, fueron evaluadas también tanto la temperatura como la humedad relativa dentro del invernadero, durante las cuatro semanas correspondientes (26 de setiembre a 24 de octubre). Los datos fueron obtenidos de un Termohigrómetro marca *Coolbox* (Anexo 6) ubicado en el interior del invernadero (Figura 14).

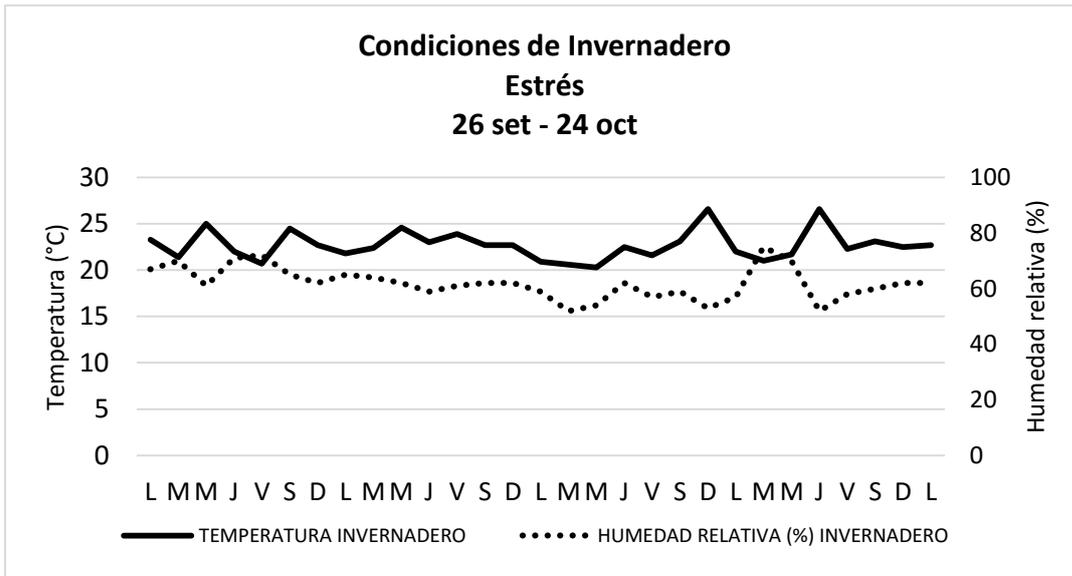


Figura 14. Condiciones de invernadero correspondiente a la etapa de estrés del experimento. La línea continua representa la temperatura ambiental interior del invernadero y los puntos representan el porcentaje de humedad relativa interior del invernadero.

Fuente: Elaboración propia.

Las figuras 13 y 14 permiten observar efectivamente que en el interior del invernadero durante la fase de estrés se presentó una menor humedad relativa y un ligero incremento de la temperatura.

Dentro del invernadero pudieron observarse dos picos máximos de 26.6 °C, considerando que las fechas corresponden a periodos iniciales de época de primavera.

4.2. Medidas de crecimiento y parámetros de biomasa

El número de brotes de *A. donax* se mantuvo constante para el tratamiento CC a lo largo del experimento mientras que en T2, los valores de los tratamientos SM y SS aumentaron (Figura 15). No se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los tiempos T1 y T2 ni entre los tratamientos dentro de dichos tiempos.

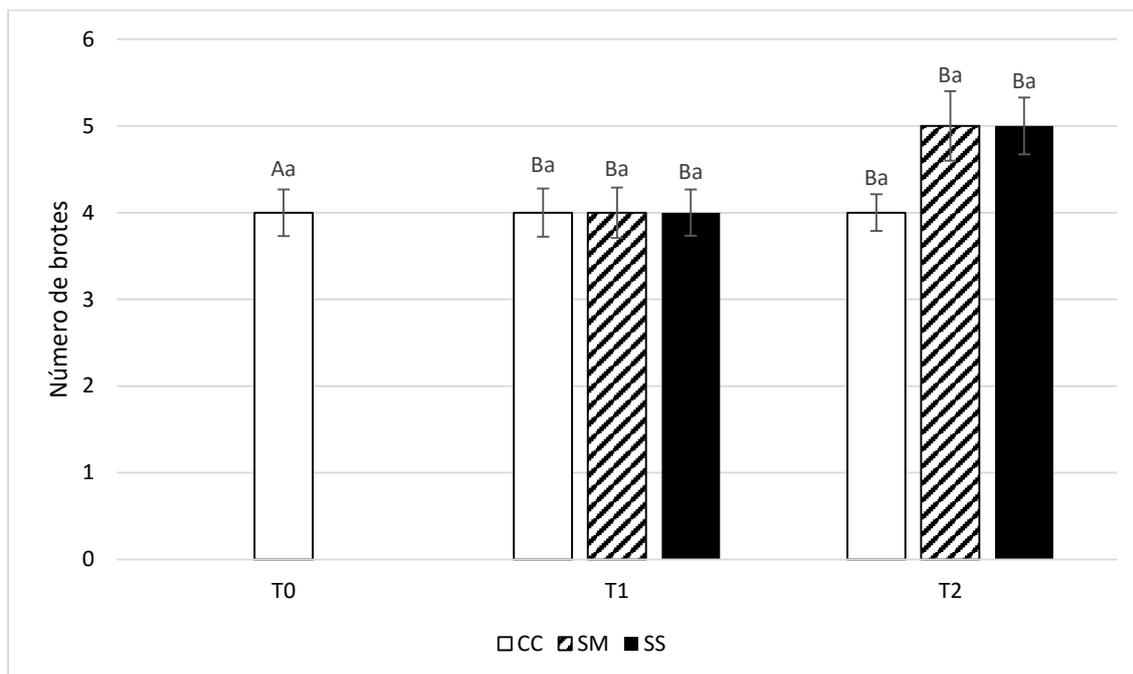


Figura 15. Número de brotes de la especie *A. donax* en T0 (día 1), T1 (día 15) y T2 (día 30). Los valores muestran el promedio de diez repeticiones ($n=10$). CC (tratamiento Control), SM (Sequía moderada) y SS (Sequía severa). Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tiempos y letras minúsculas diferencias ($P < 0.05$) entre tratamientos dentro de un mismo tiempo.

La altura de la especie presentó tendencia natural a incrementar en los tres tratamientos (Figura 16), sin encontrarse diferencias significativas ni entre los tiempos ni entre los tratamientos. Sin embargo, el crecimiento más importante fue manifestado por el tratamiento SS en T2, aumentando un 36.5 % respecto a T1.

El Anexo 8 permite observar el contraste de crecimiento desde el trasplante hasta el día previo al inicio del estrés. Cabe señalar que dicho periodo corresponde a aproximadamente dos meses.

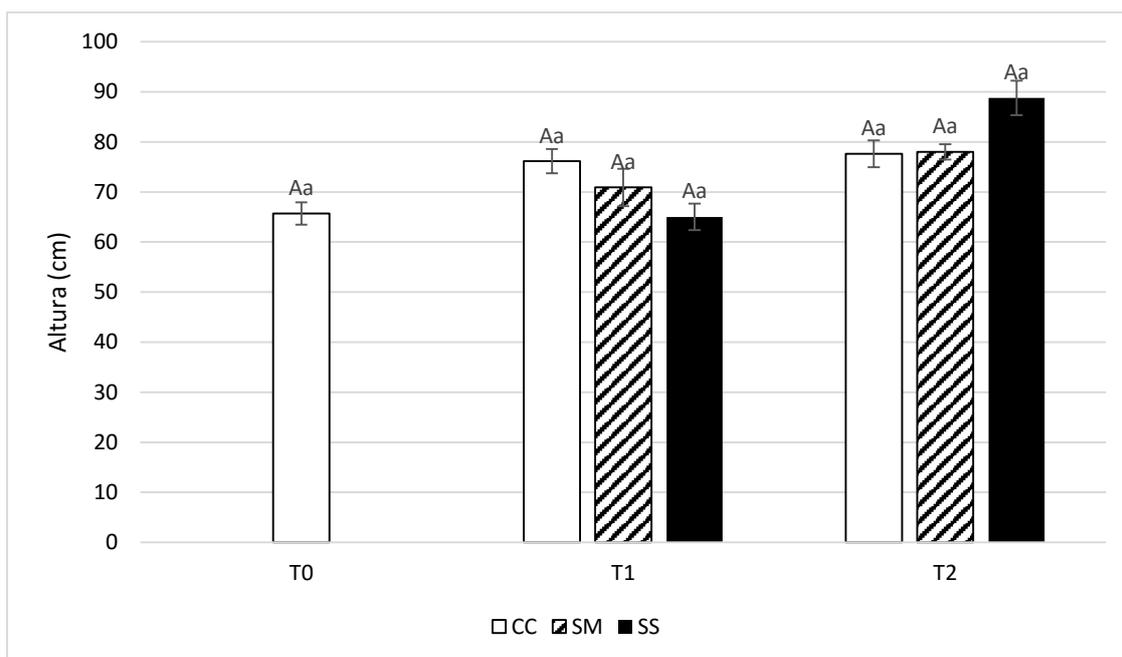


Figura 16. Altura de las plantas de *A. donax* evaluadas en T0 (día 1), T1 (día 15) y T2 (día 30). Los valores muestran el promedio de diez repeticiones (n=10). CC (tratamiento Control), SM (Sequía moderada) y SS (Sequía severa). Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tiempos y letras minúsculas diferencias ($P < 0.05$) entre tratamientos dentro de un mismo tiempo.

Los resultados del peso fresco de raíz revelan claras diferencias significativas entre los tiempos analizados mas no así para los tratamientos en cada uno de ellos (Figura 17). Es decir, no se presentaron diferencias entre tratamientos para los tiempos T1 y T2.

Luego de 30 días de la fase de estrés (T2), el incremento dado entre los tiempos T1 y T2 de acuerdo a los tratamientos analizados fue de 41.9 %, 25.4 % y 24.4 % para CC, SM y SS respectivamente.

De igual modo, es importante remarcar el notable incremento de peso fresco de raíz del tratamiento CC entre los tiempos T0 y T2, el cual, a pesar de no corresponder a las mismas unidades experimentales, fue de 251.9 %.

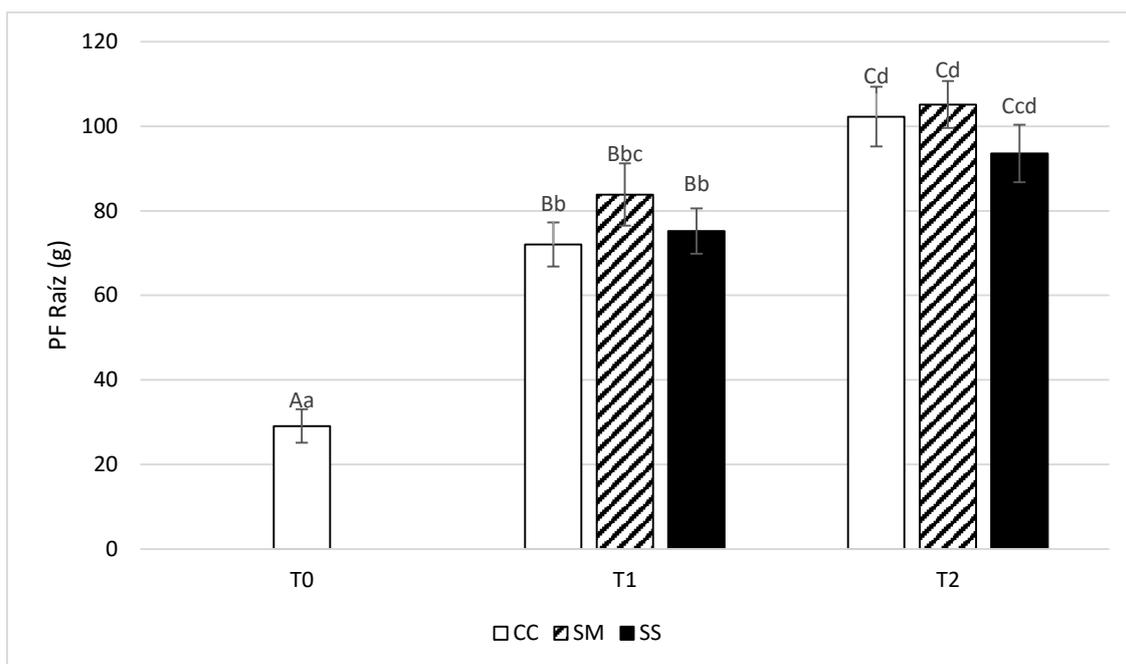


Figura 17. Peso fresco de raíz de *A. donax* evaluados en T0 (día 1), T1 (día 15) y T2 (día 30). Los valores muestran el promedio de diez repeticiones (n=10). CC (tratamiento Control), SM (Sequía moderada) y SS (Sequía severa). Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tiempos y letras minúsculas diferencias ($P < 0.05$) entre tratamientos dentro de un mismo tiempo.

El peso fresco aéreo mantuvo la misma tendencia de crecimiento, siendo esta menos intensa a medida que se agudiza el nivel de sequía a lo largo del tiempo de evaluación, como se describe en la Figura 18. Los tiempos T1 y T2 no presentaron diferencias significativas entre ellos, lo que no ocurrió en T0.

Por otro lado, haciendo referencia a los tratamientos, SM y SS no presentaron diferencias significativas de manera independiente con respecto a CC para el T1. Mientras que en T2, los tratamientos de SM y SS no presentaron diferencias significativas entre sí y CC presentó diferencias significativas respecto a ambos tratamientos de sequía. Asimismo, después de 30 días de verse sometido a estrés hídrico, SS evidenció una reducción de 19.6 % respecto a CC.

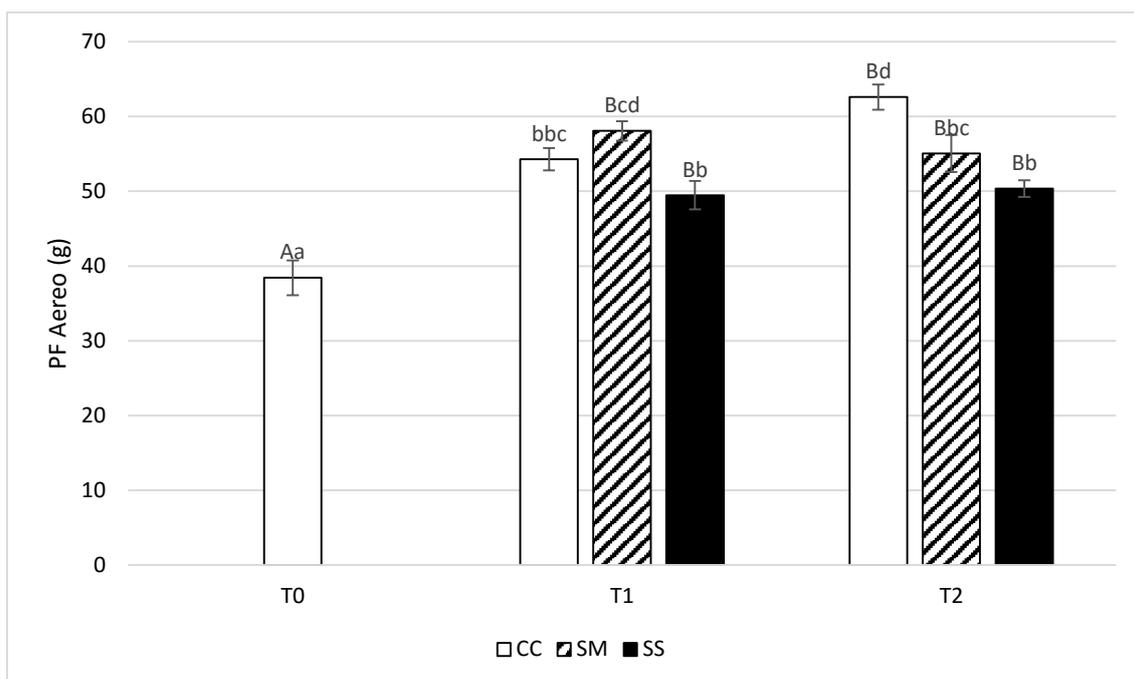


Figura 18. Peso fresco de la sección aérea de *A. donax* evaluados en T0 (día 1), T1 (día 15) y T2 (día 30). Los valores muestran el promedio de diez repeticiones (n=10). CC (tratamiento Control), SM (Sequía moderada) y SS (Sequía severa). Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tiempos y letras minúsculas diferencias ($P < 0.05$) entre tratamientos dentro de un mismo tiempo.

Con respecto al peso seco de raíz, este parámetro mostró un comportamiento el cual aparenta duplicar aproximadamente el peso evaluado con respecto al tiempo anterior. De acuerdo con la Figura 19, se observaron diferencias significativas entre los tres tiempos de evaluación, mientras que todos los tratamientos, es decir: CC, SM y SS, no presentaron diferencias significativas entre sí para cada uno de los tiempos de evaluación.

Además, los tratamientos de sequía, tanto SM como SS, mostraron un peso ligeramente superior con respecto al tratamiento CC.

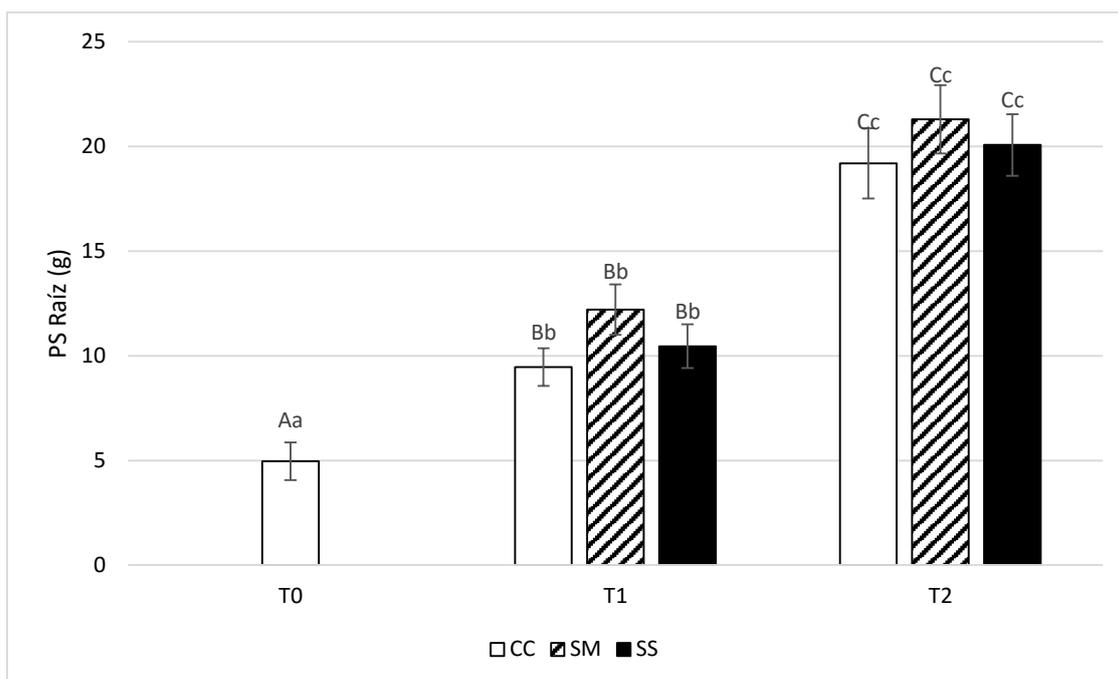


Figura 19. Peso seco de raíz de *A. donax* evaluados en T0 (día 1), T1 (día 15) y T2 (día 30). Los valores muestran el promedio de diez repeticiones (n=10). CC (tratamiento Control), SM (Sequía moderada) y SS (Sequía severa). Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tiempos y letras minúsculas diferencias ($P < 0.05$) entre tratamientos dentro de un mismo tiempo.

El peso seco aéreo, representado en la Figura 20, permitió observar notables diferencias significativas entre los tiempos estudiados y una tendencia a aumentar durante el experimento. Respecto a los tratamientos correspondientes al tiempo T1, no se encontraron diferencias significativas entre SS y CC, mas sí entre el tratamiento SM y los dos ya mencionados de manera individual. Cabe remarcar que, en dicho tiempo, SM presentó el mayor peso seco entre los tres tratamientos.

No obstante, en T2 el comportamiento fue opuesto. De manera individual, el tratamiento SM no presentó diferencias significativas con respecto a CC y SS respectivamente, pero CC y SS sí reflejaron claras diferencias significativas entre dichos tratamientos. En este caso fue CC el tratamiento que presentó el mayor peso seco, significando 8.2 % y 15 % en relación a SM y SS respectivamente.

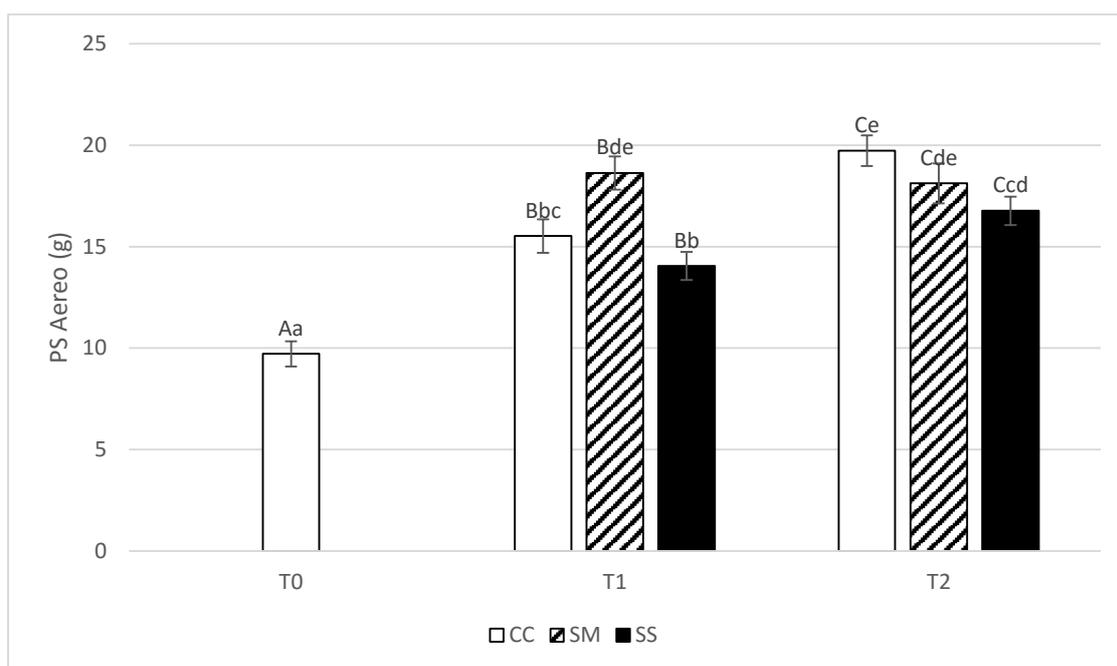


Figura 20. Peso seco de la sección aérea de *A. donax* evaluados en T0 (día 1), T1 (día 15) y T2 (día 30). Los valores muestran el promedio de diez repeticiones (n=10). CC (tratamiento Control), SM (Sequía moderada) y SS (Sequía severa). Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tiempos y letras minúsculas diferencias ($P < 0.05$) entre tratamientos dentro de un mismo tiempo.

El análisis del área foliar mediante el *software Easy Leaf Area* (Figura 21), permitió identificar la respuesta a nivel estructural de las hojas de *A. donax* frente al estrés hídrico. Los datos de los tiempos T1 y T2 para este parámetro fueron determinados a través de una extrapolación de los datos en relación al peso seco determinado previamente, a partir de tres datos al azar de área foliar.

El índice de área foliar no presentó diferencias significativas entre los tiempos analizados como se describe en la Figura 22. Asimismo, tampoco fueron presentadas diferencias entre los tratamientos SM y SS correspondientes a T1. También se presentó una reducción en el tratamiento CC en T1 con respecto al tiempo anterior (T0), tratamiento con el que sí se identificaron diferencias con respecto a los de sequía.

Por otro lado, T2 evidenció un incremento en el área foliar para el tratamiento CC, lo cual permitió que fuese aquel tratamiento que presentó mayor área en ese tiempo. Dicho tratamiento presentó diferencias significativas tanto con SM

como con SS. Además, entre ambos tratamientos de sequía (SM y SS) no se evidenciaron diferencias, manifestando SS una ligera superioridad. Los tratamientos de sequía moderada y severa (SM y SS), presentaron una reducción de su área foliar de 29.7 % y 23.3 % respectivamente en comparación al control, y de 28.5 % y 12.5 % respectivamente en relación a los mismos tratamientos analizados en el tiempo anterior (T1).

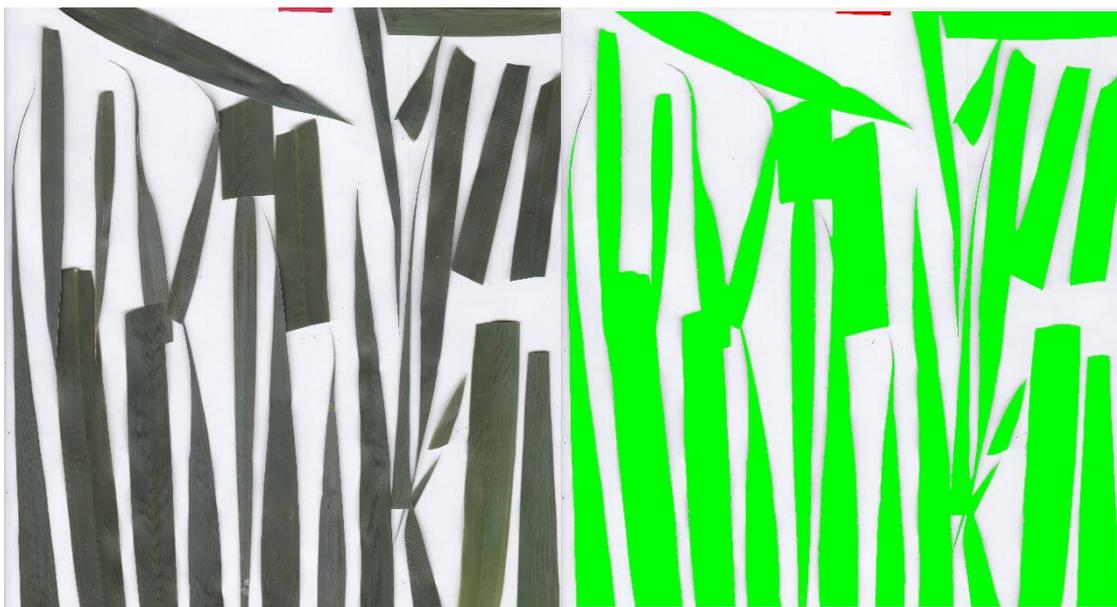


Figura 21. Hojas de *A. donax* analizadas con el software *Easy Leaf Area* para el cálculo de área foliar. La imagen izquierda presenta el escaneado de las hojas previo al análisis y la imagen derecha el resultado de la identificación de las hojas resaltado en verde claro permitiendo el cálculo del área foliar.

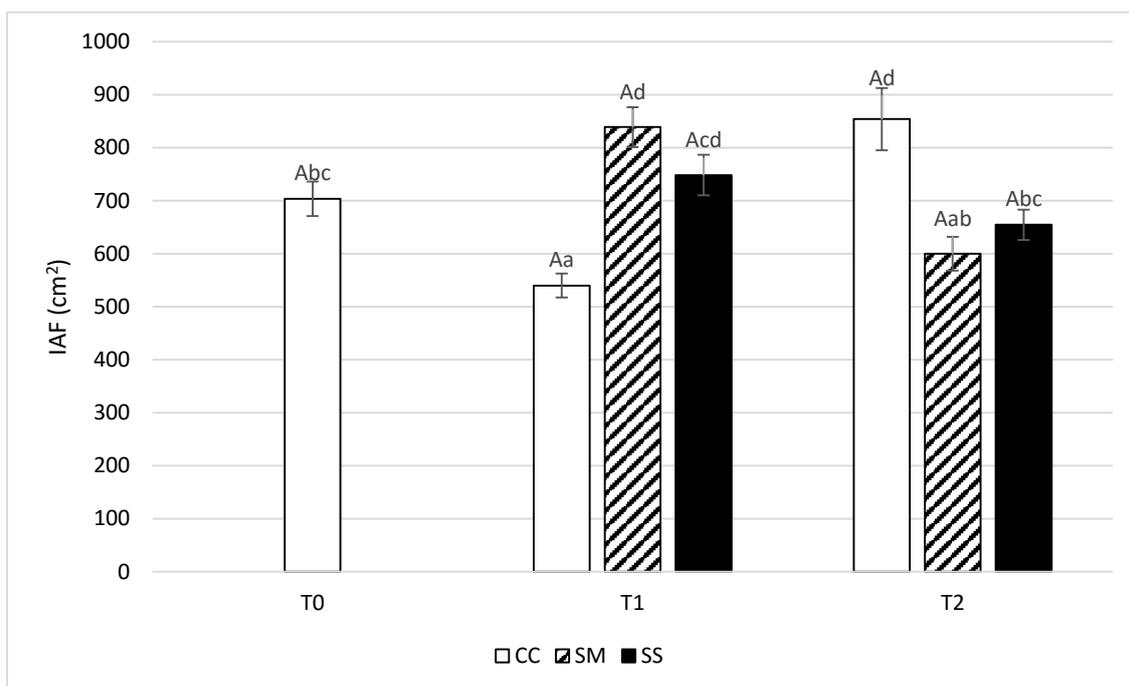


Figura 22. Índice de área foliar (IAF) de *A. donax* evaluado en T0 (día 1), T1 (día 15) y T2 (día 30). Los valores muestran el promedio de diez repeticiones (n=10). CC (tratamiento Control), SM (Sequía moderada) y SS (Sequía severa). Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tiempos y letras minúsculas diferencias ($P < 0.05$) entre tratamientos dentro de un mismo tiempo.

4.3. Parámetros fisiológicos

El contenido de clorofila (dado en unidades SPAD) manifestó diferencias significativas entre los tiempos de análisis establecidos en el experimento (Figura 23). La reducción del contenido de clorofila es evidencia de un síntoma de estrés, la cual se dio durante los 30 días de duración de la fase experimental.

En T1, el tratamiento de sequía severa (SS) no presentó diferencias significativas al compararse con los tratamientos control (CC) y sequía moderada (SM) de forma independiente. Asimismo, las diferencias significativas se dieron entre el tratamiento CC y SM.

Contrariamente, durante T2 los tres tratamientos no presentaron diferencias significativas, reflejando similitud entre los valores obtenidos, los cuales fueron en promedio desde 46.6 (SM) hasta 48.8 (CC) y SS (47.07) entre ambos.

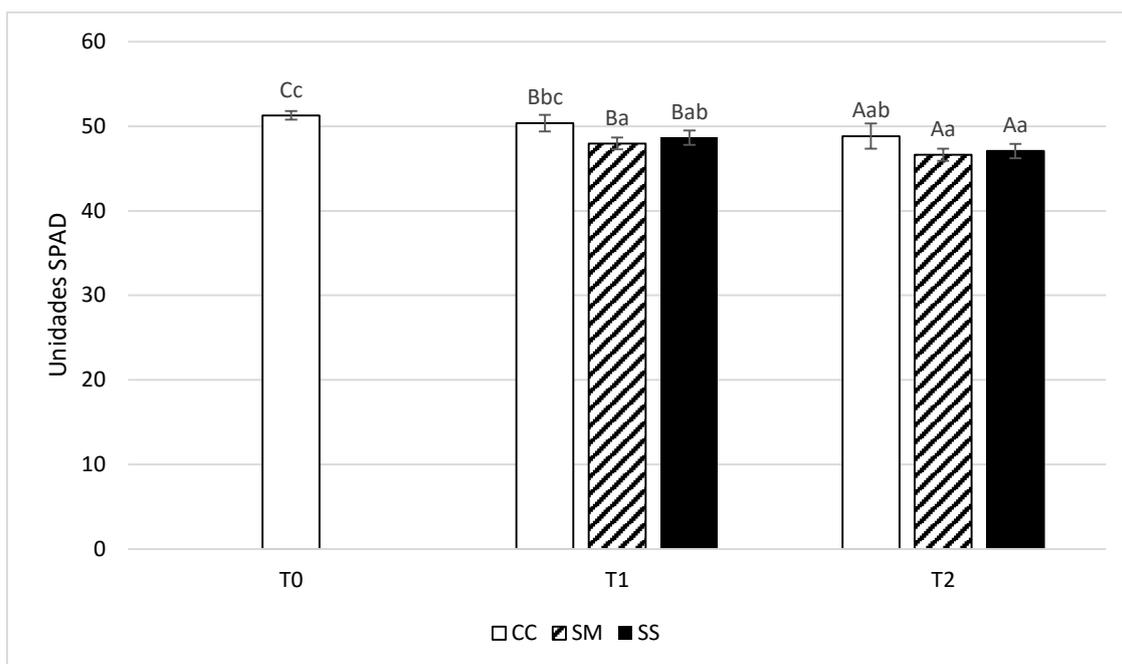


Figura 23. Contenido de clorofila de *A. donax* en unidades SPAD evaluado en T0 (día 1), T1 (día 15) y T2 (día 30). Los valores muestran el promedio de diez repeticiones (n=10). CC (tratamiento Control), SM (Sequía moderada) y SS (Sequía severa). Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tiempos y letras minúsculas diferencias ($P < 0.05$) entre tratamientos dentro de un mismo tiempo.

El Anexo 2 representa el resultado de concentración de clorofila A, B, total y carotenoides por mg de planta. No se presentaron diferencias entre los tiempos. No obstante, pudieron encontrarse claras diferencias significativas en todos los tratamientos estudiados, teniendo en cuenta que se identificó una diferencia menos rigurosa entre los tratamientos CC y SM durante T2. Asimismo, se apreció una reducción progresiva de contenido de clorofila a medida que se intensificó el nivel de sequía en los tratamientos en cada uno de los tiempos. La concentración de clorofila A para SS en T1 fue 61.1 % menor en relación con CC, mientras que en T2 la reducción de la concentración en SS respecto a CC fue de 43.3 %

Los tratamientos de sequía (tanto SM como SS) presentaron ligeros incrementos en T2 con respecto a T1, mientras que CC presentó un valor menor en T2 respecto a T1.

Por otro lado, la concentración de clorofila B presentó tendencias similares con respecto a la concentración de clorofila A. Del mismo modo, no se identificaron

diferencias significativas entre los tiempos analizados. Sin embargo, todos los tratamientos presentaron diferencias significativas, y siendo los tratamientos CC y SM aquellos que presentaron diferencias menos notables entre sí.

Se observó una tendencia a disminuir la concentración de clorofila B a medida que se intensificó el nivel de sequía en cada uno de los tiempos. La concentración de clorofila B para SS en T1 fue 75.4 % menor en relación con CC, mientras que en T2 la reducción de la concentración en SS respecto a CC fue de 51.6 %. Aun así, fue posible observar un aumento en la concentración de los tratamientos de sequía (SM y SS) para T2.

No se presentaron diferencias entre los tiempos analizados de la clorofila total. Tampoco fueron halladas diferencias significativas en todos los tratamientos estudiados. También se apreció una reducción progresiva de contenido de clorofila a medida que se agudizó el nivel de sequía en los tratamientos en cada uno de los tiempos. La concentración de clorofila A para SS en T1 fue 66 % menor en relación con CC, mientras que en T2 la reducción de la concentración en SS respecto a CC fue de 46.3 %

Los tratamientos de sequía (tanto SM como SS) presentaron ligeros incrementos en T2 con respecto a T1, mientras que CC presentó un valor menor en T2 respecto a T1.

Finalmente, la concentración de carotenoides evidenció diferencias significativas entre los tiempos T0 y T1, mientras que T2, de manera independiente no presentó diferencias con los tratamientos T0 y T1 respectivamente. Los tratamientos reflejaron notables diferencias significativas entre sí, tanto en T1 como en T2.

El tratamiento SS significó una reducción en la concentración de carotenoides del 68.5 % con respecto al tratamiento CC para T1. Por otro lado, en el tiempo T2, el tratamiento SS presentó una reducción del 27.2 % respecto al tratamiento SM, el cual fue aquel que presentó la mayor concentración de carotenoides para dicho tiempo evaluado.

El contenido hídrico relativo (CHR) presentó diferencias significativas entre T0 y T1 respecto de T2, mientras que T0 y T1 no evidenciaron diferencias. Mientras que, por el lado de los tratamientos, estos no presentaron diferencias tanto para T1 como para T2.

El tratamiento que presentó mayor CHR tanto para T1 como para T2 fue SM, sin embargo, dicha superioridad no expresa una notable diferencia con los tratamientos CC y SS, reflejando similitud (Figura 24).

La reducción del CHR en los tratamientos CC, SM y SS entre los tiempos T1 y T2 fue de 10.2 %, 9.6 % y 7.8 % respectivamente, expresando claramente la respuesta frente a los tratamientos de sequía.

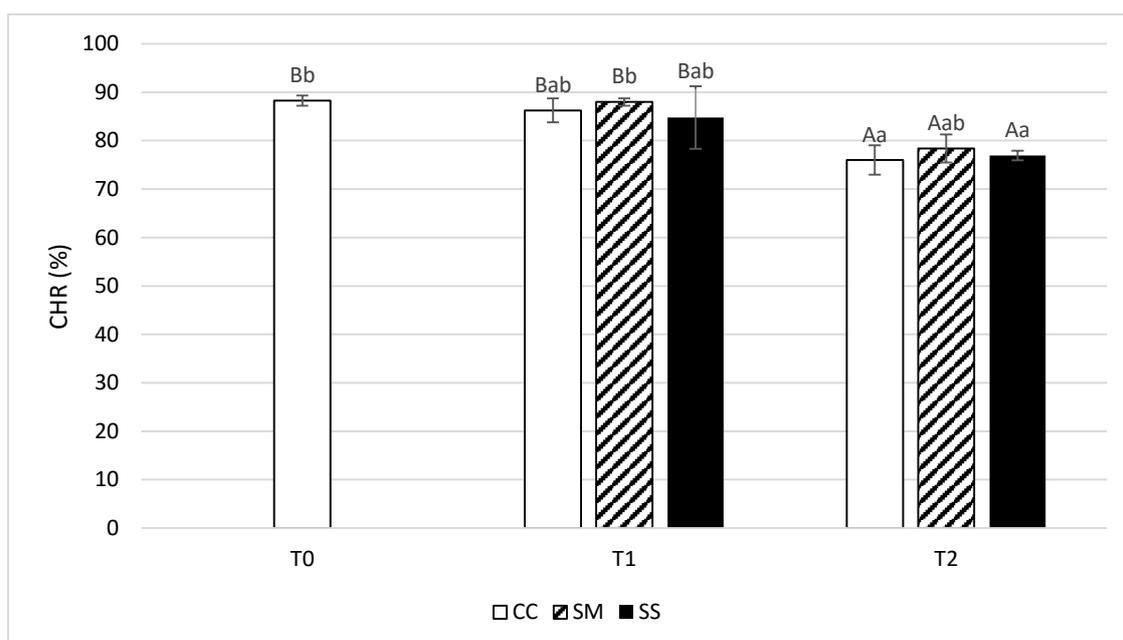


Figura 24. Contenido hídrico relativo (CHR) de *A. donax* evaluado en T0 (día 1) y T1 (día 15) y T2 (día 30). Los valores representan la media de diez réplicas (n=10) en porcentajes. CC (tratamiento Control), SM (tratamiento de Sequía moderada) y SS (tratamiento de Sequía severa). Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tiempos y letras minúsculas diferencias ($P < 0.05$) entre tratamientos dentro de un mismo momento de medición.

V. DISCUSIÓN

Diversas investigaciones confirman la tolerancia de *A. donax* a la sequía (Howorth et al., 2016; Cosentino, Scordia, Sanzone, Testa & Copani, 2014; Lino, 2016), por ello surge la necesidad de estudiar el comportamiento de un ecotipo peruano frente a uno de los principales efectos del cambio climático sobre el agro.

Después de 30 días de someter a *A. donax* a estrés por sequía, el número de brotes en ambos tratamientos de sequía (SM y SS) incrementó de 4 a 5 a pesar de la condición de estrés. Sin embargo, Sánchez et al. (2015) identificaron que entre ocho ecotipos estudiados, Piccoplant (Alemania) y Tortorici (Italia), fueron aquellos que presentaron mayor número de brotes en comparación a los demás. Redujeron el número de brotes de 5 a 4 y de 4 a 2.7 en promedio respectivamente, pero con ausencia de diferencias significativas para este parámetro entre ambos ecotipos. Confirmando así, que el número de brotes no sería un parámetro que se ve afectado por la sequía.

Por otro lado, la investigación realizada por Mann et al. (2013), en la cual se aplicaron volúmenes de riego similares a los nuestros, reveló una menor cantidad de brotes con respecto al control en *A. donax* de 28.4 % y 45.6 % para sequía moderada y severa respectivamente en un periodo de estrés hídrico de ocho semanas. Como ya se mencionó, después de cuatro semanas de estrés, los tratamientos de sequía de este trabajo no presentaron un menor número de brotes frente al control sino por el contrario, pero sin ser significativamente superior al control ni a los demás tiempos analizados. Esto podría deberse a que este efecto sería visible en el periodo comprendido entre la semana cuatro y la semana ocho de sometimiento a sequía.

A. donax no presentó diferencias en cuanto a la altura, concordando con los resultados obtenidos por Lino (2016), Howorth et al. (2016).

La pérdida de turgencia es el primer efecto biofísico generado por el estrés hídrico. Por ello, las actividades que dependen de la turgencia, como la expansión foliar se ven más sensibles frente a la reducción de esta a consecuencia del estrés hídrico (Taiz & Zeiger, 2006).

El área foliar se vio afectada por el efecto de la sequía, al igual que los resultados presentados por Sánchez et al. (2016) y Lino (2016), reafirmando la teoría que establece que, frente a la sequía, las hojas ven reducido su tamaño e incrementando su espesor a fin de reducir y controlar la pérdida de agua por evaporación (Erice, Louahlia, Irigoyen, Sánchez-Díaz & Avicé, 2010). La reducción del área foliar puede ser vista como una primera línea de defensa frente a la sequía, puesto que una menor área foliar transpira menos y permite conservar de forma eficaz un aporte limitado de agua en el suelo (Taiz & Zeiger, 2006).

Tomando como punto de partida al tratamiento CC en T0, en comparación al tratamiento SS en T2, es decir, después de encontrarse cuatro semanas sometido a un riego 75 % inferior al óptimo necesario (capacidad de maceta), el CHR se vio mermado en un 12.9 %, resultado que se asemeja al estudio en condiciones de campo realizado por Haworth et al. (2016), donde los porcentajes de CHR de los tratamientos de sequía de los ecotipos se vieron disminuidos en alrededor de 7 y 5 % respectivamente después de un periodo de estrés de 20 días.

Treinta días después del inicio del periodo de estrés (T2), no se identificaron diferencias entre los tratamientos CC y SS. Sin embargo, la investigación realizada por Sánchez et al. (2016), permitió observar diferencias entre el control y el tratamiento de estrés hídrico (sin estrés salino) pero a los 60 días de sometido a dicho estrés. Comparando ambos tratamientos control, es posible reconocer que la diferencia se establece debido a que nuestro tratamiento control presentó menor porcentaje de CHR respecto al tratamiento control de la investigación de Sánchez et al. (2016), acercándose más a nuestro tratamiento SS. Los tratamientos de estrés a 25 % de capacidad de maceta (en nuestro caso SS) presentaron un porcentaje semejante cercano al 75 %.

En contraste con los resultados obtenidos en la presente investigación, el trabajo realizado por Nackley, Vogt y Kim (2014), en donde la humedad inicial del sustrato se redujo a lo largo de los 28 días del experimento sin añadir riego adicional, evidenciando una reducción del CHR en más de 60 puntos porcentuales, encontrándose por debajo del 20 %.

El ácido abscísico es la hormona más ligada a las respuestas de las plantas frente al estrés (Xiong, Schumaker & Zhu, 2002). Zhang, Jia, Yang y Ismail (2006), Howorth et al. (2016) y Lino (2016) coinciden que la reducción en la pérdida de agua por evaporación está fuertemente ligada al cierre de los estomas, el cual es producto de un incremento de la concentración del ácido abscísico en las hojas.

Respecto a la fotosíntesis, Cornic y Massacci (1996) establecen que se ve afectada solo cuando el contenido de agua en las hojas decae y alcanza el 30 %. Por ello nuestros tratamientos de sequía moderada y severa no evidenciaron un daño bioquímico a nivel fotosintético puesto que su contenido hídrico relativo en hojas fue mayor al 75 % para ambos tratamientos.

Se evidenció una disminución en el contenido de clorofila (unidades SPAD) del 3 % en *A. donax* (Figura 20). En contraparte, Sánchez, Gil, Azcón-Bieto y Nogués (2016) identificaron una reducción en el parámetro en un 22.6 % bajo condiciones de sequía al 25 % de capacidad de maceta para la misma especie. Dicha diferencia en el porcentaje de reducción podría deberse a que el tiempo de duración del periodo de sequía en trabajo desarrollado por Sánchez et al. (2016) fue de 60 días mientras que en este trabajo fue de 30 días.

Si bien el incremento de la concentración de clorofila a y b se da entre tiempos, a nivel de tratamientos si se manifiesta una disminución a medida que se intensifica la sequía. Dicho efecto podría atribuirse a que la concentración es propensa a disminuir debido a la sequía del suelo, como afirma Farooq, Wahid, Kobayashi, Fujita y Basra (2009).

El incremento de la concentración de carotenoides en la especie podría ser indicio de que no existió una drástica reducción en la tasa fotosintética y deberse a que ellos cumplen un rol fundamental en la fotoprotección. Estos desactivan rápidamente el estado excitado de la clorofila, ya que, si esta energía no es almacenada fotoquímicamente, las membranas fotosintéticas pueden dañarse con facilidad (Taiz & Zeiger, 2006). Además, cabe agregar que *A. donax* cuenta con altos contenidos de sílice (Perdue, 1958), la cual cumple también la función de reducir la carga de calor en las hojas (Currie & Perry, 2007). Este hecho podría ser un motivo por el cual la concentración de carotenoides no se vio disminuida.

Por otra parte, el crecimiento radicular es otro proceso que se ve alterado por el déficit hídrico. El incremento en el peso, tanto fresco como seco de la raíz, podría deberse a que *A. donax* es capaz de captar agua a profundidades hasta de 1.6 y 1.8 m del suelo en condiciones de riego y entre 1.4 y 1.6 m bajo condiciones de estrés por sequía (Cosentino et al., 2014), inclusive este formidable sistema radicular podría alcanzar una profundidad de 5 m (Perdue, 1958; Frandsen, 1997).

La raíz continúa su desarrollo mientras la parte aérea retarda su crecimiento a causa del estrés. Dicho comportamiento podría significar otro mecanismo de respuesta de la especie frente a la sequía, buscando agua a mayores profundidades y así poder combatir la sequía (Lewandowski et al., 2013; Potters, Pasternak, Guisez, Palme & Jansen, 2007; Shao, Chu, Jaleel & Zhao, 2008, Taiz & Zeiger, 2006).

Respecto a la disminución en la producción de biomasa, tanto en peso fresco como seco, es un efecto adverso común en cultivos sometidos a estrés hídrico (Farooq et al., 2009) y podría haberse visto afectada en los tratamientos de sequía debido a una reducción en la asimilación de carbono como consecuencia de una menor conductancia estomática (Lino, 2016).

Finalmente, la relación entre el crecimiento de la sección aérea y la raíz se ve afectada. Si bien no fue un parámetro evaluado, es posible distinguirlo basándonos en los resultados de peso seco aéreo y de raíz (Figuras 16 y 17

respectivamente). Una mayor reducción en el peso aéreo en relación al peso seco de la raíz es un comportamiento que ha podido ser evidenciado también en otras investigaciones (Lino, 2016; Sánchez et al., 2015; Mann et al., 2013).

VI. CONCLUSIONES

- El cierre de los estomas como respuesta al estrés hídrico, permite una reducción considerable en la pérdida de agua por transpiración de la planta. Dicho comportamiento se rige por efecto del incremento la concentración del ácido abscísico en las hojas.
- Se evidenció una reducción en el área foliar de *A. donax*, la cual significa un mecanismo de respuesta frente a la sequía.
- La producción de biomasa se desarrolló de manera favorable siendo levemente afectada por el efecto de la sequía, confirmando su alta producción de biomasa y aclimatación frente al estrés hídrico.
- El sistema radicular no se vio afectado por efecto de la sequía y su crecimiento significa otro mecanismo de aclimatación frente a dicha condición buscando fuentes de agua en capas de suelo más profundas.
- El número de brotes y la altura de *A. donax* no serían parámetros que se verían afectados por efecto de la sequía.
- La concentración de clorofila A y B disminuye a medida que se intensifica la sequía, mientras que el incremento de la concentración de carotenoides responde a que estos permiten controlar y reducir el calor almacenado en las hojas.

Los resultados de la investigación permitieron evidenciar una tolerancia al estrés hídrico por la planta, lo cual, sumado a su importante potencial de producción de biomasa evidenciado, permitiría pensar que *A. donax* sería un formidable sustituto en la región principal en cuanto a producción de bioetanol a nivel nacional se refiere, Piura (la cual es naturalmente una zona árida). En dicha región, las operaciones de empresas productoras de bioetanol a base de caña de azúcar generan un desbalance hídrico en la zona debido a los considerables

volúmenes que les fueron otorgados. Además de utilizar suelos con fines agrícola para producción de energía, no ha sido considerado el impacto del cambio climático en la realidad peruana y específicamente para el caso de la agricultura en la región norte de nuestro país.

VII. RECOMENDACIONES

- Estudiar el comportamiento de un ecotipo peruano de *A. donax* frente a la sequía en campo bajo condiciones no controladas, Siendo ideal realizar el proceso experimental en suelos degradados y de uso no agrícola.
- Complementar los análisis de parámetros fisiológicos realizados en la presente investigación con pruebas de biología molecular utilizando un ecotipo peruano a fin de profundizar conocimientos en la bioquímica de la especie.
- Evaluar la respuesta frente a la sequía de ecotipos ubicados en regiones altoandinas.
- Desarrollar investigaciones que permitan establecer el comportamiento de un ecotipo peruano de *A. donax* frente al estrés salino y posteriormente estudiar el efecto de ambas condiciones críticas del cambio climático en simultaneo.
- Comparar la respuesta de ecotipos colectados en diferentes regiones del país a fin de aproximar la identificación de un ideal ecotipo más tolerante a las condiciones de estrés.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alexandratos, N., Bruinsma, J. (2012). World agricultura, towards 2030/2050, The 2012 Revision. ESA Working Paper No. 12-03, Agric. Dev. Econ. Div. Food Agric. Organ. U. N. 1. Retrieved on 2015-03-25, http://www.fao.org/fileadmin/templates/esa/Global_perspectives/world_ag_2030_50_2012_rev.pdf.

American Meteorological Society (AMS). (1997). Meteorological drought—policy statement. Bull Amer Meteor Soc. 78:847–849. Disponible en: <http://www.ametsoc.org/policy/drought2.html>.

Angelini, L.G., Ceccarini, N., Di Nasso, N. & Bonari, E. (2009). Comparison of *Arundo donax* L. and *Miscanthus x giganteus* in a long-term field experiment in Central Italy: Analysis of productive characteristics and energy balance. Biomass and Bioenergy. 33(4): 635-643. DOI: 10.1016/j.biombioe.2008.10.005.

Aponte, H. & Cano, A. (2013). Estudio florístico comparativo de seis humedales de la costa de Lima (Perú): Actualización y nuevos retos para su conservación. Latin American Journal of conservation. 3(2): 15-27.

Ayub, M., Ahmad, R., Tanveer, A., Ahmad, H. & Sharar, M. (1999). Yield and Quality of Sugarcane (*Sacchrum officinarum* L.) As Affected by Different Levels If NPK Applications. Journal of Biological Sciences. 2(1):80-82.

Banat, I., Nigam, P. & Marchant, R. (1992) Isolation of a thermotolerant, fermentative yeasts growing at 52 C and producing ethanol at 45C&50 C. World J Microbiol Biotechnol. 8:(2):59-63.

Berg, C. (2004). World Ethanol Production. The Distillery and Bioethanol Network. Available at http://www.distill.com/world_ethanolproduction.htm

Brooks, N. y Adger, N. (2003). Country level risk measures of climate-related natural disasters and implications for adaptation to climate change. Reino Unido: Tyndall.

Ceotto, E. & Di Candilo, M. (2010). Shoot cuttings propagation of giant reed (*Arundo donax* L.) in water and moist soil: The path forward? *Biomass Bioenergy*. 34: 1614-1623.

Ceotto, E., Candili, D., Castelli, F., Badeck, F.W., Rizza, F., Soave, C., Volta, A., Villani, G. & Marletto, V. (2013). Comparing solar interception and use efficiency for the energy crops giant reed (*Arundo donax* L.) and sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Field Crops Research*, 149: 159-166.

Chandel, A. K., Es, C., Rudravaram, R., Narasu, M. L., Rao, L. V. & Ravindra, P. (2013). Economics and environmental impact of bioethanol production technologies: an appraisal. *Biotechnol. Mol. Biol. Rev.* 2: 14-32.

CONAM. (2001). Primera comunicación nacional del Perú a la Convención de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Lima: Consejo Nacional del Ambiente.

Cook, C.D.K. (1990). *Aquatic Plant Book*. SPB Academic Publishing, The Hague. The Netherlands, pp. 220.

Cornic, G. & Massacci, A. (1996). Leaf photosynthesis under drought stress. In: Baker NR (ed) *Photosynthesis and the environment*. Kluwer Academic, Dordrech, pp 347–366.

Corno, L., Pilu, R. & Adani, F. (2014). *Arundo donax* L.: A non-food crop for bioenergy and bio-compound production. *Biotechnology Advances*. 32: 1535–1549.

Cosentino, S., Scordia, D., Sanzone, E., Testa, G. & Copani, V. (2014). Response of giant reed (*Arundo donax* L.) to nitrogen fertilization and soil water

availability in semi-arid Mediterranean environment. *Europ. J. Agronomy*. 60:22–32.

Currie, H. & Perry, C. (2007). Silica in Plants: Biological, Biochemical and Chemical Studies. *Annals of Botany*. 100: 1383–1389.

Cushion, E., Whiteman, A. & Dieterle, G. (2010). Bioenergy Development: Issues and impacts for poverty and natural resource management. World Bank.

Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *WIREs Climate Change*. 2: 45-65.

De Lucas, A. & del Peso, C. (2012). Biomasa, Biocombustibles y Sostenibilidad. Bloque I: Materias Primas. Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario ITAGRA.CT. 216p.

Decreto Supremo N° 021-2007-EM. Reglamento para la comercialización de biocombustibles. Lima, Perú. 20 de Abril de 2007.

Du, Y., Kawamitsu, Y., Nose, A., Hiyane, S., Murayama, S., Wasano, K. & Uchida, Y. (1996). Water Stress on Carbon Exchange Rate and Activities of Photosynthetic Enzymes in Leaves of Sugarcane (*Saccharum sp.*). *Aust. J. Plant Physiol.* 23. 719-726.

Duku, M., Gu, S. & Hagan, E. (2011). A comprehensive review of biomass resources and biofuels potential in Ghana. *Renew Sustain Energy Rev.* 15:404–15.

ePURE's contribution to the public consultation on the Green Paper on a 2030 framework for climate and energy policies: Position paper. (2013). Epure. European renewable ethanol. p. 7.

Erice, G., Louahlia, S., Irigoyen, J., Sánchez-Díaz, M. & Avice, J. (2010). Biomass partitioning, morphology and water status of four alfalfa genotypes

submitted to progressive drought and subsequent recovery. *J Plant Physiol* 167:114–120. doi:10.1016/j.jplph.2009.07.016

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D. & Basra, S. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agron. Sustain. Dev.*, 29: 185–212.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i2800s.pdf>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2013). La Bioenergía y los Biocombustibles. Disponible en: <http://www.fao.org/3/ar589s.pdf>

Foody, B. (1988). "Ethanol from Biomass: The Factors Affecting It's Commercial Feasibility." Iogen Corporation, Ottawa, Ontario, Canada.

Gibbons, W. & Westby, C. (1989). Cofermentation of sweet sorghum juice and grain for production of fuel ethanol and distillers wet grain. *Biomass*. 18(1):43-57.

Giselrød, H., Patil, V. & Tran, K. (2008). Towards sustainable production of biofuels from microalgae. *Int J Mol Sci*. 9(11). 88-95.

Gutierrez, H. & Castañeda, R. (2014). Diversidad de las gramíneas (Poaceae) de Lircay (Angaraes, Huancavelica, Perú). *Ecología Aplicada*. 13(1): 23-33

Google. (2016). Imagen de circuito de playas, distrito de Chorrillos. Recuperado el 19 de noviembre, 2016, de: https://www.google.com.pe/maps/@-12.1585302,-77.0251588,3a,75y,93.69h,99.28t/data=!3m7!1e1!3m5!1sg-nTqQduw_6wkH_twl9MfQ!2e0!5s20130501T000000!7i13312!8i6656

Grant, B. (2009). Biofuels made from algae are the next big thing on alternative energy horizon. *Scientist*. 37-41.

Heim, R. (2002). A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. American Meteorological Society. 1149 – 1165.

IEA Report. (2009). International Energy Agency.

IEO Report. (2006). International Energy Outlook.

IEO Report. (2013). International Energy Outlook.

INEI. (2013). Anuario de Estadísticas Ambientales. Lima: Instituto Nacional de Estadística e Informática.

Ings, J., Mur, L., Robson, P. & Bosch, M. (2013). Physiological and growth responses to water deficit in the bioenergy crop *Miscanthus x giganteus*. *Frontiers in Plant Science*. 4(468). 1-12.

Compendio de especies invasoras, *Arundo donax*. Disponible en: www.cabi.org/isc/datasheet/1940 . Última modificación: 21 de octubre de 2015. Tomado: 21 de diciembre de 2016.

García, C. (2008). Biocombustibles ¿Energía o alimento? Universitat de Barcelona.

Holdridge, L. (1982). Life Zone Ecology. Tropical Science Center. San José, Costa Rica. pp. 149.

Islas, J., Manzini, F. & Masera, O. (2007). A prospective study of bioenergy use in Mexico. *Energy*. 32: 2306-2320.

IPCC. (2007). Climate Change 2007. Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, p. 49.

Jaradat, A.A. (2010). Genetic resources of energy crops: biological systems to combat climate change. *Australian Journal of Crop Science*, 4: 309-323.

Jurišić, V., Bilandžija, N., Krička, T., Leto, J., Matin, A. & Kuže, I. (2014). Fuel properties' comparison of all ochthonous *Miscanthus x giganteus* and autochthonous *Arundo Donax* L.: a study case in Croatia. *Agric Conspec Sci*; 79:7–11.

Keeling, C. D., Piper, S. C., Bacastow, R. B., Wahlen, M., Whorf, T. P., Hei, M. & Meijer, H. A. (2001). Exchanges of atmospheric CO₂ and ¹³CO₂ with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000. I. Global aspects, SIO Reference Series, No. 01-06, Scripps Institution of Oceanography, San Diego, 88 pages.

Kim, S., Dale, E. (2004). Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass Bioenergy* 26: 361–375.

Lapuerta M., Hernández J., Ballesteros R., Duran A. (2003) Composition and size of diesel particulate emissions from a commercial European engine tested with present and future fuels. *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 217, 907-919.

Laursen W. (2006). Students take a green initiative. *Chem Eng.* 32–4.

León, B., Young, K. & Cano, A. (1996). Observaciones sobre la flora vascular de la Costa Central del Perú. *Arnaldoa*. 4(1): 67-85.

Lewandowski, I., Scurlock, J., Lindvall, E., Christou, M. (2003). The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass Bioenergy*, 25: 335–361.

Lewandowski, I. & Schmidt, U. (2006) Nitrogen, energy and land use efficiencies of miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2006;112:335–46.

Lino, G. (2016). *Arundo donax* L. como gramínea perenne para la producción de biomasa en ambiente Mediterráneo. Memoria presentada para optar al título de Doctor por la Universidad de Barcelona, 170 pp.

Malghani, A., Malik, A., Sattar, A., Hussain, F., Abbas, G. & Hussain, J. (2010). Response of growth and yield of wheat to NPK fertilizer. *Sci. Int. (Lahore)*. 24(2):185-189.

Mann, J., Barney†, J., Kyser, G. & Ditomaso, J. (2013). *Miscanthus x giganteus* and *Arundo donax* shoot and rhizome tolerance of extreme moisture stress. *GCB Bioenergy*. 5: 693-700.

Mariani, C., Cabrini, R., Danin, A., Piffanelli, P., Fricano, A., Gomarasca, S., Dicandilo, M., Grassi, F. & Soave, C. (2010). Origin, diffusion and reproduction of the giant reed (*Arundo donax* L): a promising weedy energy crop. *Ann Appl Biol* 57: 191-202

Melis, M. (2010). Etanolo, buona la seconda. *Newton Oggi*. 9:76–7.

MINAM. (2010). Segunda comunicación nacional del Perú a la Convención de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Lima: Ministerio del Ambiente.

MINAM. (2014). Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Lima: Ministerio del Ambiente.

Ministerio del Ambiente. (2010). Avances en: energía, solar, hidráulica, geotérmica, bioenergía (biomasa). Disponible en: <http://cambioclimatico.minam.gob.pe/mitigacion-del-cc/avances-en-la-mitigacion/a-nivel-de-mecanismos-de-mitigacion/energias-renovables/avances-en-energia-solar-hidraulica-geotermica-bioenergia-biomasa/>.

Montesinos, D. & Mondragón, L. (2013). Flora y vegetación en tres localidades de una cuenca costeña: río Acarí, provincia de Caravelí (Arequipa, Perú). *Zonas Áridas*. 15(1): 11–30.

Nackley, L., Vogt, K. & Kim, S. (2014). Arundo donax water use and photosynthetic responses to drought and elevated CO₂. *Agricultural Water Management*. 136: 13-22.

Naik, S., Goud, V., Rout, P. & Dalai, A. (2010). Production of first and second generation biofuels: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 578-597.

Nigam, P. & Singh, A. (2011). Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy and Combustion Science*. 37: 52-68.

Nogués, S. & Bergareche, C. (2011). Guía de prácticas de la asignatura "Nutrición y Metabolismo Vegetal". Master en Agrobiología Ambiental. Departamento de Biología Vegetal, Facultad de Biología. Universitat de Barcelona.

Pachauri, R. K. , Allen, M. R. , Barros, V. R. , Broome, J. , Cramer, W. , Christ, R. , Church, J. A. , Clarke, L. , Dahe, Q. , Dasgupta, P. , Dubash, N. K. , Edenhofer, O. , Elgizouli, I. , Field, C. B. , Forster, P. , Friedlingstein, P. , Fuglestvedt, J. , Gomez-Echeverri, L. , Hallegatte, S. , Hegerl, G. , Howden, M. , Jiang, K. , Jimenez Cisneroz, B. , Kattsov, V. , Lee, H. , Mach, K. J. , Marotzke, J. , Mastrandrea, M. D. , Meyer, L. , Minx, J. , Mulugetta, Y. , O'Brien, K. , Oppenheimer, M. , Pereira, J. J. , Pichs-Madruga, R. , Plattner, G. K. , Pörtner, H. O. , Power, S. B. , Preston, B. , Ravindranath, N. H. , Reisinger, A. , Riahi, K. , Rusticucci, M. , Scholes, R. , Seyboth, K. , Sokona, Y. , Stavins, R. , Stocker, T. F. , Tschakert, P. , van Vuuren, D. and van Ypserle, J. P. (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / R. Pachauri and L. Meyer (editors), Geneva, Switzerland, IPCC, 151 p.102.*

Perdue, R. E. (1958). Arundo donax - source of musical reeds and industrial cellulose. *Econ Bot* 12: 368-404.

Pilu, R., Bucci, A., Cerino Badone, F., Landoni, M., (2012). Giant Reed (*Arundo donax* L): a weed plant or a promising energy crop? *Afr J Biotechnol* 11: 9163-9174.

Pilu, R., Manca, A. & Landoni, M. (2013). *Arundo donax* as an energy crop: pros and cons of the utilization of this perennial plant. *Maydica* 58: 54-59.

Plan Nacional de Agroenergía. (2009). Ministerio de Agricultura. 29p.

Potters, G., Pasternak, T., Guisez, Y., Palme, K. & Jansen, M. (2007). Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? *Trends Plant Sci.* 12(3), 99-105.

Powelson, D.S., Riche, A.B. & Shield, I. (2005). Biofuels and other approaches for decreasing fossil fuel emissions from agriculture. *Anal. Appl. Biol.* 146, 193–201.

Qin, Z., Zhuang, Q., Zhu, X., Cai, X. & Zhang, X. (2011). Carbon consequences and agricultural implications of growing biofuels crops on marginal agricultural lands in China. *Environ Sci Technol.* 45:10765–72.

Rogelj, J., den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., Schaeffer, R., Sha, F., Riahi, K. & Meinshausen, M. (2016). Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Perspective. Nature.* 534. 631-639.

Rosenberger, A., Kaul, H., Senn, T. & Aufhammer, W. (2002). Costs of bioethanol production from winter cereals: the effect of growing conditions and crop production intensity levels. *Ind Crop Prod.* 15:91–102.

Sánchez, E. Scordia, D., Lino, G., Arias, C., Cosentino, S.L., Nogués, S. (2015). Salinity and Water Stress Effects on Biomass Production in Different *Arundo donax* L. Clones. *BioEnergy Research.* 8(4): 1461-1479.

Sánchez, E., Gil, S., Azcón-Bieto, J. & Nogués, S. (2016). The response of *Arundo donax* L. (C3) and *Panicum virgatum* (C4) to different stresses. *Biomass and Bioenergy*. 85: 335-345.

Sánchez, F. & Escalante, R. (1988). Hidroponía. 3ª ed. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. 194 p.

Shao, H., Chu, L., Jaleel, C. & Zhao, C. (2008). Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *C.R. Biol.* 331: 215-225.

Singh, P. & Singh, A. (2011). Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy and Combustion Science* 37:52-68.

Slatyer, R. O. (1967). Plant-water relationships. Academic Press, New York, pp 336.

Somerville, C. (2007). Biofuels. *Curr. Biol.* 17:115-119.

Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Alexander, L.V., Allen, S.K., Bindoff, N.L., Bréon, F.M., Church, J.A., Cubasch, U., Emori, S., Forster, P., Friedlingstein, P., Gillett, N., Gregory, J.M., Hartmann, D.L., Jansen, E., Kirtman, B., Knutti, R., Krishna Kumar, K., Lemke, P., Marotzke, J., Masson-Delmotte, V., Meehl, G.A., Mokhov, I.I., Piao, S., Ramaswamy, V., Randall, D., Rhein, M., Rojas, M., Sabine, C., Shindell, D., Talley, L.D., Vaughan D.G., Xie, S.P. (2013). Resumen técnico. En: Cambio climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Taiz, L. & Zeiger, E. (2006). Fisiología vegetal. Universitat Jaume I.

Urteaga-Crovetto, P. Between Water Abundance and Scarcity: Discourses, Biofuels, and Power in Piura, Peru. (2016). *Antipode*. 0(0). 1-21.

Verbruggen, A., Moomaw, W. & Nyboer, J. (2011): Annex I: Glossary, Acronyms, Chemical Symbols and Prefixes In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. PichsMadruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Wilhite, D. (2000). Drought as a natural hazard: concepts and definitions. In: Wilhite DA, ed. *Droughts: Global Assessment*. London: Routledge;–18.

Xiong, L., Schumaker, K. & Zhu, J. (2002). Cell Signaling during Cold, Drought, and Salt Stress. *The Plant Cell*. 165-183.

Zhang, J., Jia, W., Yang, J. & Ismail, A. (2006). Role of ABA in integrating plant responses to drought and salt stresses. *Field Crops Res.*;97(1):111–9. doi:10.1016/j.fcr.2005.08.018.

IX. GLOSARIO

| | |
|----------------------------|--|
| Biocombustible | Combustibles de origen biológico obtenido de manera renovable a partir de restos orgánicos. |
| Bioetanol | Combustible producido la fermentación de los azúcares contenidos en la materia orgánica de las plantas. |
| Biomasa | Cantidad de productos obtenidos por fotosíntesis, susceptibles de ser transformados en combustible útil para el hombre y expresada en unidades de superficie y de volumen. |
| Cambio climático | Cambio en los valores medios y/o en la variabilidad de las propiedades del clima, el cual persiste en un prolongado periodo de tiempo y es verificable por medio de la estadística en tiempos comparables. Este puede ser atribuido a la actividad humana o a la variabilidad natural. |
| Clorofila | Grupo de pigmentos verdes activos que absorben la luz en la fotosíntesis. |
| Contenido hídrico relativo | Es un parámetro utilizado para estimar el porcentaje de hidratación del tejido vegetal. |
| Estoma | Poros microscópicos en la epidermis de la hoja rodeado por un par de células guarda. Regulan el intercambio gaseoso de las hojas controlando las dimensiones del poro. |

| | |
|--------------------|---|
| Estrés | Influencia negativa ejercida sobre una planta por factores externos bióticos o abióticos. Puede medirse en relación a la supervivencia de la especie, la acumulación de biomasa, rendimiento o incorporación de dióxido de carbono. |
| Fotosíntesis | Proceso de conversión de energía luminosa en energía química mediante pigmentos fotosintéticos. Utiliza agua y dióxido de carbono para producir carbohidratos. |
| Fisiología Vegetal | Subdisciplina de la botánica dedicada al estudio de los procesos metabólicos. |
| Rizoma | Es un tallo subterráneo con varias yemas que crecen emitiendo raíces y brotes herbáceos de sus nudos. Los rizomas crecen indefinidamente. |
| Sequía | Marcado déficit y ausencia prolongada de precipitación y un periodo anormal de clima seco lo suficientemente prolongado, lo cual causa considerables desbalances hidrológicos. |

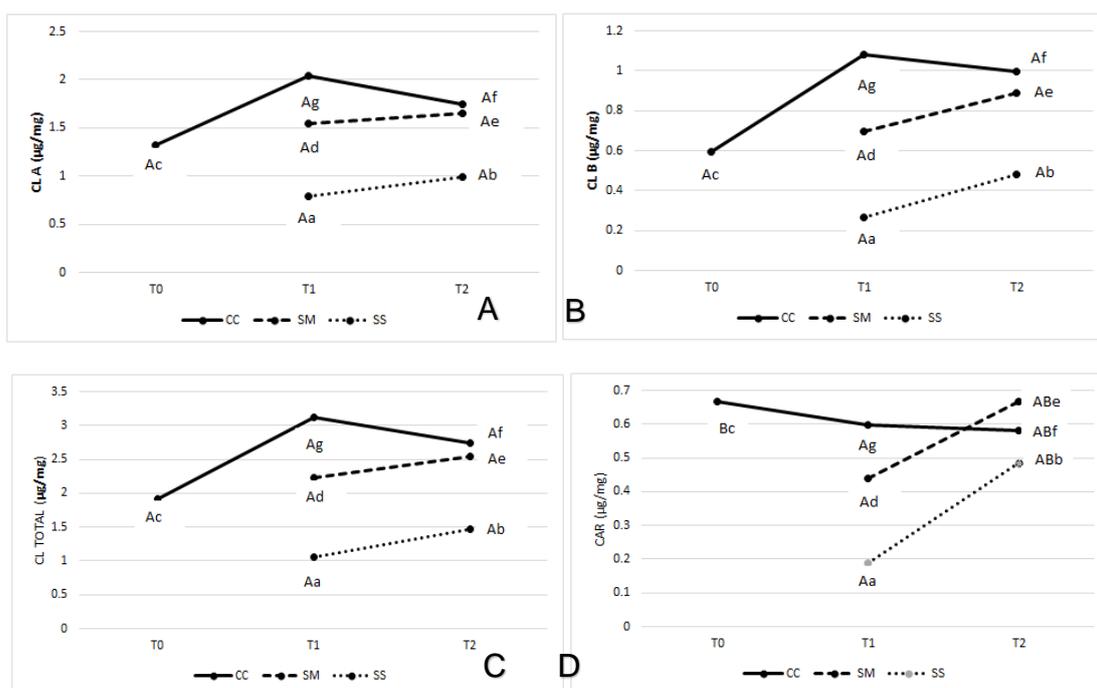
X. ANEXOS

Anexo 1: Solución nutritiva, la cual contó como fuentes de fertilización: nitrato de amonio, nitrato de potasio, nitrato de calcio, sulfato de potasio, sulfato de magnesio, ácido fosfórico (60 %), mezcla de microelementos, quelato de hierro, ácido bórico, sulfato de zinc y molibdato de amonio.

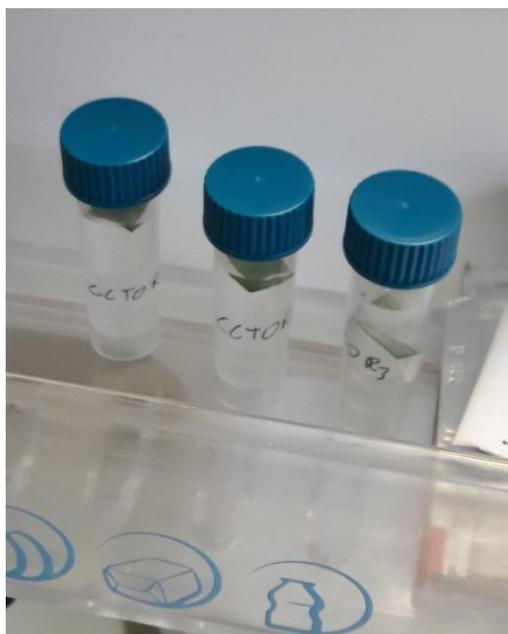
| Nutriente mg/L | |
|----------------|------|
| N | 170 |
| P | 60 |
| K | 271 |
| Ca | 200 |
| Mg | 45 |
| S | 120 |
| Fe | 2 |
| Mn | 0.5 |
| B | 0.5 |
| Zn | 0.4 |
| Cu | 0.18 |
| Mo | 0.1 |

Fuente: Sánchez y Escalante (1988).

Anexo 2: Concentración de pigmentos en *A. donax*. clorofila A (A), clorofila B (B), clorofila total (C) y carotenoides (D) en µg/mg



Anexo 3: Evaluación del CHR. Frascos con 10 mL de agua destilada refrigerados por 24 horas para obtener el peso fresco turgente.



Fuente: Elaboración propia

Anexo 4: Proceso de secado en la estufa a 60 °C durante 72 horas a fin de obtener el parámetro evaluado de peso seco.



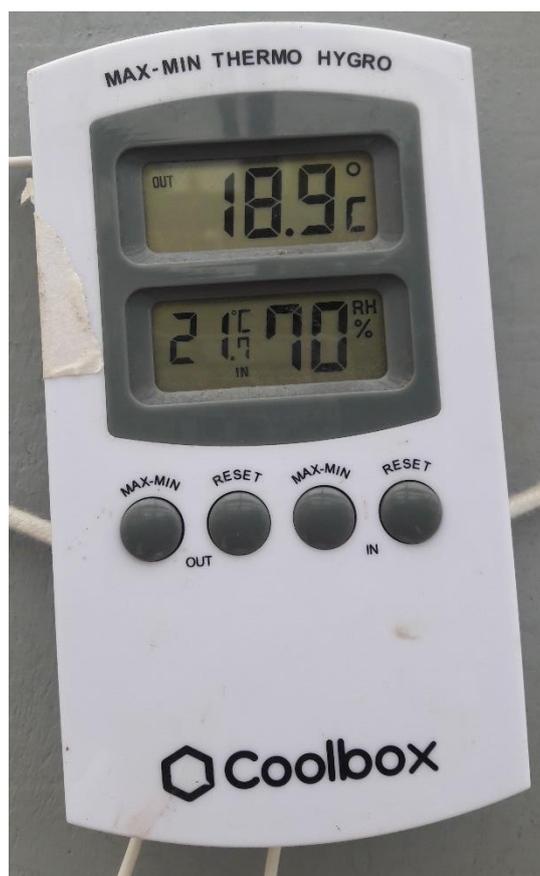
Fuente: Elaboración propia

Anexo 5: Molienda de hojas en acetona para cuantificar concentración de clorofila y carotenoides.



Fuente: Elaboración propia

Anexo 6: Termohigrómetro marca *Coolbox* ubicado en el interior del invernadero.



Fuente: Elaboración propia

Anexo 7: Resultados de las pruebas estadísticas de ANOVA y test de Duncan

Resultados de la prueba estadística de ANOVA

Resultados de ANOVA por tratamiento

| ANOVA | | | | | | |
|--------|----------------|----------------|-----|-------------|-------|------|
| | | Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
| Altura | Between Groups | 9441,214 | 6 | 1573,536 | ,802 | ,570 |
| | Within Groups | 300268,641 | 153 | 1962,540 | | |
| | Total | 309709,855 | 159 | | | |
| Brotos | Between Groups | 8,842 | 6 | 1,474 | 1,463 | ,195 |
| | Within Groups | 154,133 | 153 | 1,007 | | |
| | Total | 162,975 | 159 | | | |
| SPAD | Between Groups | 317,265 | 6 | 52,877 | 5,089 | ,000 |
| | Within Groups | 1589,831 | 153 | 10,391 | | |
| | Total | 1907,095 | 159 | | | |

| ANOVA | | | | | | |
|----------|----------------|----------------|----|-------------|--------|------|
| | | Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
| PF Raíz | Between Groups | 40070,743 | 6 | 6678,457 | 18,484 | ,000 |
| | Within Groups | 22762,644 | 63 | 361,312 | | |
| | Total | 62833,387 | 69 | | | |
| PF aéreo | Between Groups | 3542,987 | 6 | 590,498 | 17,814 | ,000 |
| | Within Groups | 2088,299 | 63 | 33,148 | | |
| | Total | 5631,286 | 69 | | | |
| PS Raíz | Between Groups | 2409,781 | 6 | 401,630 | 22,659 | ,000 |
| | Within Groups | 1116,680 | 63 | 17,725 | | |
| | Total | 3526,462 | 69 | | | |
| PS aéreo | Between Groups | 720,321 | 6 | 120,053 | 18,365 | ,000 |
| | Within Groups | 411,829 | 63 | 6,537 | | |
| | Total | 1132,150 | 69 | | | |
| IAF | Between Groups | 828047,634 | 6 | 138007,939 | 9,931 | ,000 |
| | Within Groups | 875527,610 | 63 | 13897,264 | | |
| | Total | 1703575,244 | 69 | | | |

ANOVA

CHR

| | Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|----------------|----------------|----|-------------|-------|------|
| Between Groups | 518,539 | 6 | 86,423 | 2,954 | ,045 |
| Within Groups | 409,620 | 14 | 29,259 | | |
| Total | 928,160 | 20 | | | |

Resultados de ANOVA por tiempo

ANOVA

| | | Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|--------|----------------|----------------|-----|-------------|--------|------|
| Altura | Between Groups | 485,653 | 2 | 242,827 | ,123 | ,884 |
| | Within Groups | 309224,202 | 157 | 1969,581 | | |
| | Total | 309709,855 | 159 | | | |
| Brotos | Between Groups | 12,549 | 2 | 6,274 | 6,549 | ,002 |
| | Within Groups | 150,426 | 157 | ,958 | | |
| | Total | 162,975 | 159 | | | |
| SPAD | Between Groups | 536,957 | 2 | 268,479 | 30,764 | ,000 |
| | Within Groups | 1370,138 | 157 | 8,727 | | |
| | Total | 1907,095 | 159 | | | |

ANOVA

| | | Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|----------|----------------|----------------|----|-------------|--------|------|
| PF Raíz | Between Groups | 38598,136 | 2 | 19299,068 | 53,354 | ,000 |
| | Within Groups | 24235,251 | 67 | 361,720 | | |
| | Total | 62833,387 | 69 | | | |
| PF aéreo | Between Groups | 2408,321 | 2 | 1204,160 | 25,032 | ,000 |
| | Within Groups | 3222,965 | 67 | 48,104 | | |
| | Total | 5631,286 | 69 | | | |
| PS Raíz | Between Groups | 2340,897 | 2 | 1170,449 | 66,146 | ,000 |
| | Within Groups | 1185,564 | 67 | 17,695 | | |
| | Total | 3526,462 | 69 | | | |
| PS aéreo | Between Groups | 541,744 | 2 | 270,872 | 30,739 | ,000 |
| | Within Groups | 590,405 | 67 | 8,812 | | |
| | Total | 1132,150 | 69 | | | |
| IAF | Between Groups | 642,290 | 2 | 321,145 | ,013 | ,987 |
| | Within Groups | 1702932,954 | 67 | 25416,910 | | |
| | Total | 1703575,244 | 69 | | | |

ANOVA

CHR

| | Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|----------------|----------------|----|-------------|--------|------|
| Between Groups | 494,703 | 2 | 247,352 | 10,272 | ,001 |
| Within Groups | 433,457 | 18 | 24,081 | | |
| Total | 928,160 | 20 | | | |

Resultados de la prueba del test de Duncan
Resultados del test de Duncan por tratamiento
Altura

Duncan

| Tratamiento | N | Subset for alpha = 0.05 |
|-------------|----|----------------------------|
| | | 1 |
| SS T1 | 20 | 65.025000 |
| CC T0 | 10 | 65.700000 |
| SM T1 | 20 | 70.900000 |
| CC T1 | 20 | 76.150000 |
| SM T2 | 30 | 78.033333 |
| CC T2 | 30 | 80.426000 |
| SS T2 | 30 | 88.766667 |
| Sig. | | ,149 |

Brotos

Duncan

| Tratamiento | N | Subset for alpha = 0.05 |
|-------------|----|----------------------------|
| | | 1 |
| CC T0 | 10 | 3,500000 |
| SS T1 | 20 | 3,500000 |
| CC T2 | 30 | 3,700000 |
| CC T1 | 20 | 3,800000 |
| SM T1 | 20 | 4,000000 |
| SS T2 | 30 | 4,033333 |
| SM T2 | 30 | 4,166667 |
| Sig. | | ,071 |

SPAD

Duncan

| Tratamiento | N | Subset for alpha = 0.05 | | |
|-------------|----|-------------------------|-----------|-----------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| SM T2 | 30 | 46.629933 | | |
| SS T2 | 30 | 47.073233 | | |
| SM T1 | 20 | 47.973300 | | |
| SS T1 | 20 | 48.658400 | 48.658400 | |
| CC T2 | 30 | 48.841100 | 48.841100 | |
| CC T1 | 20 | | 50.368300 | 50.368300 |
| CC T0 | 10 | | | 51.290100 |
| Sig. | | ,053 | ,115 | ,367 |

PF Raíz

Duncan

| Tratamiento | N | Subset for alpha = 0.05 | | | |
|-------------|----|-------------------------|-----------|-----------|------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| CC T0 | 10 | 29.065000 | | | |
| CC T1 | 10 | | 72.029000 | | |
| SS T1 | 10 | | 75.219000 | | |
| SM T1 | 10 | | 83.835000 | 83.835000 | |
| SS T2 | 10 | | | 93.563000 | 93.563000 |
| CC T2 | 10 | | | | 102.270000 |
| SM T2 | 10 | | | | 105.137000 |
| Sig. | | 1,000 | ,196 | ,257 | ,204 |

PF aéreo

Duncan

| Tratamiento | N | Subset for alpha = 0.05 | | | |
|-------------|----|-------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| CC T0 | 10 | 38.435000 | | | |
| SS T1 | 10 | | 49.479000 | | |
| SS T2 | 10 | | 50.351000 | | |
| CC T1 | 10 | | 54.290000 | 54.290000 | |
| SM T2 | 10 | | 55.057000 | 55.057000 | |
| SM T1 | 10 | | | 58.070000 | 58.070000 |
| CC T2 | 10 | | | | 62.602000 |
| Sig. | | 1,000 | ,050 | ,171 | ,083 |

PS Raíz

Duncan

| Tratamiento | N | Subset for alpha = 0.05 | | |
|-------------|----|-------------------------|-----------|-----------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| CC T0 | 10 | 4.965300 | | |
| CC T1 | 10 | | 9.456000 | |
| SS T1 | 10 | | 9.687900 | |
| SM T1 | 10 | | 12.206300 | |
| CC T2 | 10 | | | 19.192200 |
| SS T2 | 10 | | | 20.071900 |
| SM T2 | 10 | | | 21.297000 |
| Sig. | | 1,000 | ,173 | ,298 |

PS aéreo

Duncan

| Tratamiento | N | Subset for alpha = 0.05 | | | | |
|-------------|----|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| CC T0 | 10 | 9.712500 | | | | |
| SS T1 | 10 | | 13.476200 | | | |
| CC T1 | 10 | | 15.521600 | 15.521600 | | |
| SS T2 | 10 | | | 16.766700 | 16.766700 | |
| SM T2 | 10 | | | | 18.117500 | 18.117500 |
| SM T1 | 10 | | | | 18.626000 | 18.626000 |
| CC T2 | 10 | | | | | 19.732800 |
| Sig. | | 1,000 | ,078 | ,280 | ,130 | ,188 |

IAF

Duncan

| Tratamiento | N | Subset for alpha = 0.05 | | | |
|-------------|----|-------------------------|------------|------------|------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| CC T1 | 10 | 540.045000 | | | |
| SM T2 | 10 | 600.202000 | 600.202000 | | |
| SS T2 | 10 | | 654.638000 | 654.638000 | |
| CC T0 | 10 | | 703.500000 | 703.500000 | |
| SS T1 | 10 | | | 748.463000 | 748.463000 |
| SM T1 | 10 | | | | 839.093000 |
| CC T2 | 10 | | | | 854.020000 |
| Sig. | | ,258 | ,068 | ,097 | ,062 |

CHR

Duncan

| Tratamiento | N | Subset for alpha = 0.05 | |
|-------------|---|-------------------------|---------|
| | | 1 | 2 |
| CC T2 | 3 | 75.9863 | |
| SS T2 | 3 | 76.9393 | |
| SM T2 | 3 | 78.3563 | 78.3563 |
| SS T1 | 3 | 84.7767 | 84.7767 |
| CC T1 | 3 | 86.2260 | 86.2260 |
| SM T1 | 3 | | 87.9663 |
| CC T0 | 3 | | 88.2910 |
| Sig. | | ,053 | ,060 |

Resultados del test de Duncan por tiempo
Altura

Duncan

| Tiempo | N | Subset for alpha = 0.05 |
|--------|----|-------------------------|
| | | 1 |
| T0 | 70 | 75.841286 |
| T1 | 60 | 76.501000 |
| T2 | 30 | 80.544333 |
| Sig. | | ,633 |

Brotos

Duncan

| Tiempo | N | Subset for alpha = 0.05 | |
|--------|----|-------------------------|----------|
| | | 1 | 2 |
| T0 | 70 | 3,571429 | |
| T1 | 60 | | 3,983333 |
| T2 | 30 | | 4,300000 |
| Sig. | | 1,000 | ,120 |

SPAD

Duncan

| Tiempo | N | Subset for alpha = 0.05 | | |
|--------|----|-------------------------|-----------|-----------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| T2 | 30 | 45.053300 | | |
| T1 | 60 | | 47.914400 | |
| T0 | 70 | | | 50.039514 |
| Sig. | | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

PF Raíz

Duncan

| Tiempo | N | Subset for alpha = 0.05 | | |
|--------|----|-------------------------|-----------|------------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| T0 | 10 | 29.065000 | | |
| T1 | 30 | | 77.027667 | |
| T2 | 30 | | | 100.323333 |
| Sig. | | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

PF aéreo

Duncan

| Tiempo | N | Subset for alpha = 0.05 | |
|--------|----|-------------------------|-----------|
| | | 1 | 2 |
| T0 | 10 | 38.435000 | |
| T1 | 30 | | 53.946333 |
| T2 | 30 | | 56.003333 |
| Sig. | | 1,000 | ,377 |

PS Raíz

Duncan

| Tiempo | N | Subset for alpha = 0.05 | | |
|--------|----|-------------------------|-----------|-----------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| T0 | 10 | 4.965300 | | |
| T1 | 30 | | 10.450067 | |
| T2 | 30 | | | 20.187033 |
| Sig. | | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

PS aéreo

Duncan

| Tiempo | N | Subset for alpha = 0.05 | | |
|--------|----|-------------------------|-----------|-----------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| T0 | 10 | 9.712500 | | |
| T1 | 30 | | 15.874600 | |
| T2 | 30 | | | 18.205667 |
| Sig. | | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

IAF

Duncan

| Tiempo | N | Subset for alpha = 0.05 |
|--------|----|-------------------------|
| | | 1 |
| T2 | 30 | 702.953333 |
| T0 | 10 | 703.500000 |
| T1 | 30 | 709.200333 |
| Sig. | | ,913 |

CHR

Duncan

| Tiempo | N | Subset for alpha = 0.05 | |
|--------|---|-------------------------|---------|
| | | 1 | 2 |
| T2 | 9 | 77.0940 | |
| T1 | 9 | | 86.3230 |
| T0 | 3 | | 88.2910 |
| Sig. | | 1,000 | ,518 |

Anexo 8: Fase de aclimatación (25 julio – 25 setiembre). La imagen izquierda corresponde al día de trasplante, mientras que la imagen derecha corresponde al día previo al inicio del estrés.

