



unl

Universidad
Nacional
de Loja

FACULTAD AGROPECUARIA Y DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

**IMPACTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN LA ANATOMÍA DE LA
MADERA Y MORFOLOGÍA DE *Acacia macracantha* WILLD. Y
Cinchona officinalis L. BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO**

TESIS DE GRADO PREVIA A
LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENERO FORESTAL

AUTOR: **CESAR EMILIANO FEIJOO FEIJOO**

DIRECTOR: **ING. DARWIN ALEXANDER PUCHA COFREP Ph.D.**

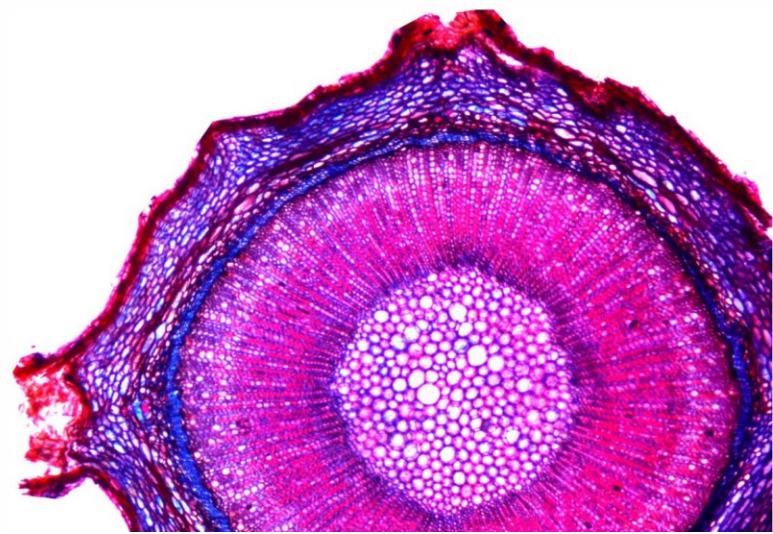
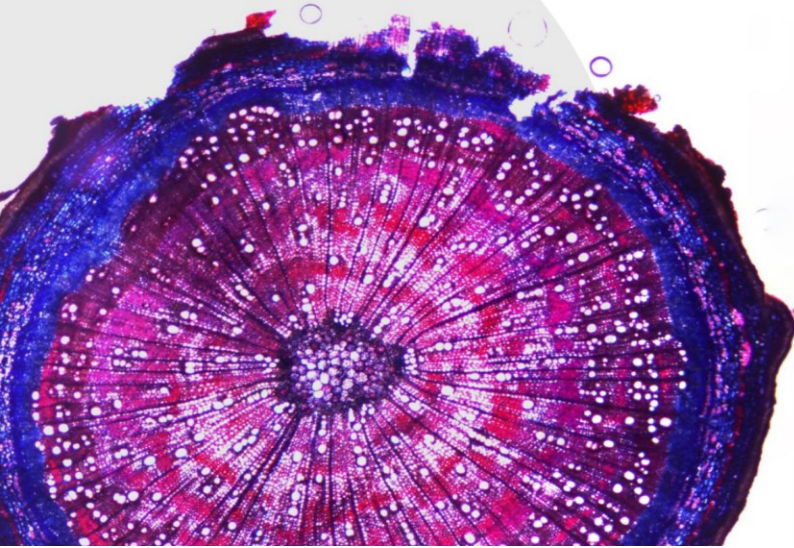
LOJA-ECUADOR
2020



unl

Universidad
Nacional
de Loja

Laboratorio
de Anatomía de
Maderas Tropicales





Docente investigador
Ing. Darwin Pucha Cofrep Ph.D.
Ciudadela Universitaria “Guillermo Falconí
Espinosa”
Teléfono (secretaría): (07) 254-5072
Celular: 0988118716
darwin.pucha@unl.edu.ec
<http://unl.edu.ec/>

Que en calidad de director de la tesis titulada **“IMPACTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN LA ANATOMÍA DE LA MADERA Y MORFOLOGÍA DE *Acacia macracantha* WILLD. Y *Cinchona officinalis* L. BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO”**, de autoría del señor egresado de la Carrera de Ingeniería Forestal **Cesar Emiliano Feijoo Feijoo**, con número de cédula 1150357778, ha sido **Dirigida, Revisada Y Concluida** dentro del cronograma aprobado; por tal razón autorizo su presentación y publicación.

Loja, 30 de marzo de 2020

Atentamente,



.....
Ing. Darwin Alexander Pucha Cofrep Ph.D.
C.I.: 1104031529
DIRECTOR DE TESIS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
FACULTAD AGROPECUARIA Y DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

Ing. Johana Cristina Muñoz Chamba Mg. Sc.

PRESIDENTA DEL TRIBUNAL CALIFICADOR DE LA TESIS

CERTIFICA:

En calidad de presidenta del Tribunal de Calificación de la Tesis titulada "IMPACTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN LA ANATOMÍA DE LA MADERA Y MORFOLOGÍA DE *Acacia macracantha* WILLD. Y *Cinchona officinalis* L. BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO" de autoría del señor egresado de la Carrera de Ingeniería Forestal Cesar Emiliano Feijoo Feijoo, portador de la cédula N° 1150357778, se informa que la misma ha sido revisada e incorporadas todas las observaciones realizadas por el Tribunal Calificador, y luego de su revisión se ha procedido a la respectiva calificación. Por lo tanto, autorizo la versión final de la tesis y la entrega oficial para la sustentación pública.

Loja, 27 de julio de 2020

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
JOHANA
CRISTINA MUNOZ
CHAMBA

.....
Ing. Johana Cristina Muñoz Chamba Mg. Sc.
PRESIDENTA



Firmado electrónicamente por:
ZHOFRE HUBERTO
AGUIRRE MENDOZA

.....
Ing. Zhofre Huberto Aguirre Mendoza Ph.D.
VOCAL

DARIO ALFREDO
VEINTIMILLA RAMOS

Firmado digitalmente por DARIO
ALFREDO VEINTIMILLA RAMOS
Fecha: 2020.07.29 10:09:54
-05'00'

.....
Ing. Darío Alfredo Veintimilla Ramos Mg. Sc.
VOCAL

AUTORÍA

Yo, Cesar Emiliano Feijoo Feijoo declaro ser autor del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos o acciones legales, por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepo y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional-Biblioteca Virtual.

Autor: Cesar Emiliano Feijoo Feijoo

CESAR
EMILIANO
FEIJOO FEIJOO



Digitally signed by CESAR
EMILIANO FEIJOO FEIJOO
Date: 2020.07.29 10:13:08
-05'00'

Firma:

Cédula: 1150357778

Fecha: Loja 29 de julio del 2020

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO

Yo, Cesar Emiliano Feijoo Feijoo, declaro se autor, de la tesis titulada "**IMPACTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN LA ANATOMÍA DE LA MADERA Y MORFOLOGÍA DE *Acacia macracantha* WILLD. Y *Cinchona officinalis* L. BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO**" como requisito para optar al grado de: Ingeniero Forestal, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja, para que, con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja a los 29 días del mes de julio del dos veinte, firma el autor.

CESAR EMILIANO FEIJOO FEIJOO
Digitally signed by CESAR EMILIANO FEIJOO FEIJOO
Date: 2020.07.29 10:13:39 -05'00'

Firma:

Autor: Cesar Emiliano Feijoo Feijoo

Número de Cédula: 1150357778

Dirección: Cdla. Del Chofer Labanda (Pedro de Vergara entre Jimbilla y Landangui 37-29)

Teléfono: 2540559

Correo electrónico: cefeijoof@unl.edu.ec

Celular: +593980179568

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director de Tesis: Ing. Darwin Alexander Pucha Cofrep, Ph.D.

Tribunal de Grado: Ing. Johana Cristina Muñoz Chamba, Mg. Sc.	Presidente
Ing. Zhofre Huberto Aguirre Mendoza, Ph.D.	Vocal
Ing. Dario Alfredo Veintimilla Ramos, Mg. Sc.	Vocal

AGRADECIMIENTO

Expreso mi agradecimiento a quienes hicieron posible y contribuyeron para que este trabajo investigativo sea posible.

Primeramente; a mi familia, principalmente a mis padres y hermanos por el apoyo incondicional que me han brindado; a mis amigos y compañeros.

Al Ing. José Castillo e Ing. Víctor Hugo Eras Guamán les agradezco por su importante colaboración y generosidad al haber facilitado las plántulas e infraestructura para este estudio.

A la Universidad Nacional de Loja, la Facultad Agropecuaria y Recursos Naturales Renovables, un especial agradecimiento al proyecto de investigación “Impacto de las variaciones climáticas en la fijación de carbono en ecosistemas forestales al sur de Ecuador” del Laboratorio de Anatomía de Maderas Tropicales,

A todos los docentes por haber compartido sus enseñanzas y experiencias durante mi formación profesional.

A los distinguidos miembros del tribunal por las observaciones realizadas y el tiempo dedicado.

Finalmente, expreso mis más sinceros agradecimientos al Dr. Darwin Pucha PhD., por el conocimiento transmitido y guía en esta etapa de mi vida.

Cesar Emiliano Feijoo Feijoo

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación, lo dedico a mis padres Ángel Feijoo y Glenda Feijoo, quienes con amor, sabiduría y esfuerzo me han educado y enseñado a salir adelante; además, a mis hermanos: Ángel, Diego, Juan y Víctor por su comprensión y apoyo en todo momento.

Y a todos quienes creyeron en mí, por apoyarme y por darme palabras de aliento para seguir adelante durante esta etapa de mi vida, sin la ayuda de todos ellos no habría sido posible este logro.

Cesar Emiliano Feijoo Feijoo

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Pág.
PORTADA.....	I
CERTIFICACIÓN.....	II
APROBACIÓN.....	III
AUTORÍA.....	IV
CARTA DE AUTORIZACIÓN.....	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
DEDICATORIA.....	VII
ÍNDICE GENERAL.....	VIII
RESUMEN.....	XVIII
1. INTRODUCCIÓN	22
2. REVISIÓN DE LITERATURA	28
2.1. MORFOLOGÍA DE LAS PLANTAS	28
2.1.1. Importancia.....	28
2.1.2. Atributos morfológicos.....	28
<i>a. Variables dasométricas.....</i>	<i>29</i>
<i>b. Variables ecológicas.....</i>	<i>29</i>
2.2. ANATOMÍA DE LA MADERA.....	31
2.2.1. Definición.....	31
2.2.2. Importancia y variabilidad anatómica intraespecífica	31
2.2.3. Estructura y características anatómicas	32
<i>a. Xilema.....</i>	<i>32</i>
<i>b. Floema.....</i>	<i>33</i>
<i>c. Vasos</i>	<i>34</i>

<i>d. Anillos de crecimiento</i>	34
<i>e. Parénquima</i>	34
<i>f. Fibras</i>	35
<i>g. Radios leñosos</i>	35
<i>h. Inclusiones</i>	35
<i>i. Médula</i>	35
<i>j. Cambium vascular</i>	35
2.2.4. Estructura química de la madera	36
<i>a. Lignina</i>	36
<i>b. Celulosa</i>	37
2.2.5. Xilogénesis	38
2.3. ESTRÉS HÍDRICO EN PLANTAS	40
2.3.1. Impacto del estrés hídrico inducido a los árboles	40
2.3.2. Deficiencia hídrica y resistencia a la sequía de las plantas	41
2.3.3. Cambios anatómicos de la madera por estrés hídrico	42
2.4. FERTILIZACIÓN DE ESPECIES FORESTALES	43
2.4.1. Importancia	43
2.4.2. Efecto de los Fertilizantes sobre los árboles	44
2.4.3. Tipos de Fertilizantes	44
<i>a. Fertilizantes orgánicos</i>	44
<i>b. Fertilizantes inorgánicos comerciales</i>	44
<i>b.1. Fertilizantes Nitrogenados</i>	44
<i>b.2. Fertilizantes Fosfatados</i>	45
<i>b.3. Fertilizantes de Potasio</i>	45
<i>c. Fertilizante Completo</i>	45
2.5. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS ESPECIES FORESTALES	46
2.5.1. <i>Acacia macracantha Willd.</i>	46
<i>a. Descripción anatómica</i>	46

b. <i>Requerimientos ecológicos</i>	47
c. <i>Importancia y usos</i>	48
2.5.2. <i>Cinchona officinalis L.</i>	48
a. <i>Descripción anatómica</i>	49
b. <i>Requerimientos ecológicos</i>	50
c. <i>Importancia y usos</i>	50
3.METODOLOGÍA	51
3.1. ÁREA DE INVESTIGACIÓN	51
3.2. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN	51
3.2.1. <i>Obtención y procedencia de las plántulas</i>	51
3.2.2. <i>Sustrato y replante</i>	52
3.2.3. <i>Establecimiento del diseño experimental</i>	54
3.3. DETERMINACIÓN DE LOS CAMBIOS ANATÓMICOS EN LA MADERA DE <i>ACACIA MACRACANTHA WILLD.</i> <i>Y CINCHONA OFFICINALIS L. A CAUSA DE ESTRÉS HÍDRICO Y FERTILIZACIÓN</i>	61
3.2.1. <i>Análisis anatómico de la madera</i>	61
a. <i>Selección de individuos</i>	61
b. <i>Cortes transversales del tallo</i>	61
c. <i>Tinción, lavado y deshidratación de las muestras</i>	62
d. <i>Sellado permanente y secado de las muestras</i>	64
e. <i>Digitalización y captura de imágenes anatómicas</i>	64
f. <i>Determinación de porcentajes de celulosa y lignina</i>	65
3.4. EVALUACIÓN DE LOS CAMBIOS MORFOLÓGICOS EN <i>ACACIA MACRACANTHA WILLD.</i> Y <i>CINCHONA</i> <i>OFFICINALIS L. A CAUSA DE ESTRÉS HÍDRICO Y FERTILIZACIÓN</i>	67
3.4.1. <i>Monitoreo de datos morfológicos</i>	67
3.4.2. <i>Análisis estadístico de datos morfológicos</i>	68
3.4.3. <i>Visualización gráfica de variables morfológicas</i>	70
a. <i>Correlación de variables</i>	70

b. Diagrama de caja (BoxPlot)	71
c. PCA individuales	71
d. PCA Biplot.....	72
3.5. DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS A LOS ACTORES INVOLUCRADOS EN EL SECTOR FORESTAL.	72
4. RESULTADOS.....	73
4.1. PORCENTAJES DE LIGNINA Y CELULOSA EN EL XILEMA DE <i>ACACIA MACRACANTHA</i>	73
4.2. PORCENTAJES DE LIGNINA Y CELULOSA EN EL XILEMA DE <i>CINCHONA OFFICINALIS</i>	78
4.3. CAMBIOS ANATÓMICOS DE LA MADERA	83
4.4. CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES MORFOLÓGICAS DE <i>ACACIA MACRACANTHA</i>	84
4.5. CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES MORFOLÓGICAS DE <i>CINCHONA OFFICINALIS</i>	88
4.6. DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	92
5. DISCUSIÓN	94
5.1. PORCENTAJES DE LIGNINA Y CELULOSA EN EL XILEMA	94
5.2. CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES MORFOLÓGICAS	97
6. CONCLUSIONES	101
7. RECOMENDACIONES.....	103
8. BIBLIOGRAFÍA	105
9. ANEXOS.....	119

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Niveles del estado fitosanitario para plantas forestales en vivero	30
Tabla 2. Cronograma detallado de sequía para <i>Cinchona officinalis</i>	58
Tabla 3. Cronograma detallado del periodo de sequía para <i>Acacia macracantha</i> durante dos meses	59
Tabla 4. Matriz para la medición individual por cada tratamiento.....	68
Tabla 5. Mediciones tabuladas en Excel.	68
Tabla 6. Resumen de los datos morfológicos de trece mediciones durante seis meses continuos de monitoreo en el presente estudio.	69
Tabla 7. Áreas en mm ² (lignina + celulosa) y en porcentaje de las diferencias de lignina y celulosa en el xilema de <i>Acacia macracantha</i> antes y después de cada tratamiento bajo condiciones de invernadero	74
Tabla 8. Áreas en mm ² (lignina + celulosa) y en porcentaje de las diferencias de lignina y celulosa en el xilema de <i>Cinchona officinalis</i> antes y después de cada tratamiento bajo condiciones de invernadero	79

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Características macroscópicas de la madera.	33
Figura 2. Características microscópicas de la madera. a) Corte transversal de una pequeña rama 4x <i>C. officinalis</i> . b) Corte tangencial 10x <i>A. macracantha</i> ; V: vaso; R: radios; F: fibras. Escala 100 µm.	36
Figura 3. Componentes químicos de la madera.	38
Figura 4. Porceso de xilogénesis.....	39
Figura 5. Fotografía de un árbol de <i>Acacia macracantha</i>	46
Figura 6. Estructura anatómica de la madera de <i>Acacia macracantha</i> . a) Corte transversal 10x. b) Corte transversal 4x. c) Corte transversal 64x. d) corte transversal completo.....	47
Figura 7. Fotografía de un árbol de <i>Cinchona officinalis</i>	48
Figura 8. Estructura anatómica de la madera de <i>Cinchona officinalis</i> . a) Corte transversal 20x. b) Corte tangencial 20x. c) Corte radial 20x. d) Placas de perforación 100x. e) Punteaduras 100x. f) corte transversal completo.....	49
Figura 9. Preparación del sustrato para el repique de las plántulas.....	52
Figura 10. Repique de las plántulas de las especies estudiadas	53
Figura 11. Traslado de las plántulas de las especies estudiadas al Invernadero.....	53
Figura 12. Diseño experimental para el establecimiento de los tratamientos y el control aplicado a las especies estudiadas. x = plántulas.....	55
Figura 13. Esquema de las incisiones realizadas a las plántulas de los cuatro tratamientos y el control para generar una guía de seguimiento. (a) Marcas de control (incisiones) que se realizaron en cada individuo antes de aplicar cada uno de los tratamientos esta	

establecidos, (b) detalle del plano vertical del tallo indicando las dos incisiones a las plántulas.	56
Figura 14. Riego de las plántulas para mantenerlas a una humedad al 100 %.....	57
Figura 15. Marchitez de las plántulas como reacción a la sequía	58
Figura 16. Presencia de patógenos en las plántulas.....	60
Figura 17. Cronograma de riego y sequía de plántulas bajo invernadero	60
Figura 18. Individuo seleccionado de <i>Cinchona officinalis</i>	61
Figura 19. (a) Vista de las marcas en un plano transversal del tallo. (b) Ejemplo sistemáticos de cómo serían las marcas hasta llegar al xilema en un corte transversal de <i>Cinchona officinalis</i>	62
Figura 20. Selección, montaje y etiquetado de las muestras en portaobjetos.....	62
Figura 21. Tinción y reposo de las muestras.....	63
Figura 22. Lavado y deshidratado de las muestras.....	63
Figura 23. Visualización en el microscopio de la muestra.....	65
Figura 24. Imagen con escala de la sección transversal.....	66
Figura 25. Base de datos para determinar porcentajes antes del tratamiento y después del tratamiento.....	67
Figura 26. Incremento del área total (lignina + celulosa) antes y después de cada tratamiento en <i>Acacia macracantha</i>	75
Figura 27. Crecimiento total (lignina + celulosa) en porcentaje de <i>Acacia macracantha</i> durante seis meses de crecimiento tomando como referencia del 100 % al T0.	76
Figura 28. Cortes transversales con corteza de <i>Acacia macracantha</i> de tres repeticiones por cada tratamiento.....	78

Figura 29. Incremento del área total (lignina + celulosa) antes y después de cada tratamiento de <i>Cinchona officinalis</i>	81
Figura 30. Crecimiento total (lignina + celulosa) en porcentaje de <i>Cinchona officinalis</i> durante seis meses de crecimiento tomando como referencia del 100 % al T0	81
Figura 31. Cortes transversales con corteza de <i>Cinchona officinalis</i> de tres repeticiones por cada tratamiento.....	83
Figura 32. Matriz de correlación de variables morfológicas de <i>Acacia macracantha</i> bajo condiciones de invernadero durante el periodo de estudio. p-value=0,05	85
Figura 33. Diagramas de caja (<i>Box plot</i>) del incremento promedio de las cinco variables morfológicas en plántulas de <i>Acacia macracantha</i> obtenido en los diferentes tratamientos bajo condiciones de invernadero en el periodo del estudio	86
Figura 34. Análisis de componentes principales individuales de <i>Acacia macracantha</i>	87
Figura 35. Análisis de componentes principales promedio de <i>Acacia macracantha</i>	88
Figura 36. Matriz de correlación de variables morfológicas de <i>Cinchona officinalis</i> bajo condiciones de invernadero durante el periodo de estudio. p-value = 0,05.	89
Figura 37. Diagramas de caja (<i>Box plot</i>) del incremento promedio de las cinco variables morfológicas en plántulas de <i>Cinchona officinalis</i> obtenido en los diferentes tratamientos bajo condiciones de invernadero en el periodo del estudio.....	90
Figura 38. Análisis de componentes principales individuales de <i>Cinchona officinalis</i>	91
Figura 39. Análisis de componentes principales promedio de <i>Cinchona officinalis</i>	92
Figura 40. Socialización de los resultados de la investigación en la UNL, mediante un póster científico.....	93

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Características Anatómicas de la madera de <i>Acacia macracantha</i> y <i>Cinchona officinalis</i>	119
Anexo 2. Mapa de ubicación del sitio de estudio. A. Laboratorio de anatomía de Maderas Tropicales UNL, La Argelia, B. Invernadero de Investigación UNL, La Argelia.....	120
Anexo 3. Cronograma detallado de riego/sequía, fumigaciones, mediciones morfológicas, y actividades en plántulas bajo invernadero	121
Anexo 4. Pre procesamiento de la imagen	122
Anexo 5. Proceso de separación de colores	122
Anexo 6. Formulario de variables morfológicas	126
Anexo 7. Código R utilizado para la obtención de las herramientas gráficas: Matriz de correlación	127
Anexo 8. Código R utilizado para la obtención de las herramientas gráficas: <i>Box Plot</i> . PCA Individual, PCA <i>Biplot</i>	132
Anexo 9. Box plot del incremento real de las cinco variables morfológicas en plántulas de <i>Acacia macracantha</i> obtenido en los diferentes tratamientos bajo condiciones de invernadero en el periodo del estudio.....	137
Anexo 10. Box plot del incremento real de las cinco variables morfológicas en plántulas de <i>Cinchona officinalis</i> obtenido en los diferentes tratamientos bajo condiciones de invernadero en el periodo del estudio	138
Anexo 11. Poster científico y certificado de participación en el evento organizado por la Universidad Nacional de Loja	139

**“IMPACTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN LA ANATOMÍA DE LA MADERA Y
MORFOLOGÍA DE *Acacia macracantha* WILLD. Y *Cinchona officinalis* L. BAJO
CONDICIONES DE INVERNADERO”**

RESUMEN

La productividad de los ecosistemas forestales desde el punto de vista ecológico está relacionada directamente con la producción de biomasa, y desde el punto de vista comercial con la producción de madera. Este estudio busca entender cómo las variaciones climáticas y en especial el estrés hídrico influye en la fijación de carbono o formación de celulosa, así como en los cambios morfológicos de especies forestales. Para ello, plántulas de *Cinchona officinalis* y *Acacia macracantha* dentro de un invernadero fueron sometidas a varios tratamientos de estrés hídrico, y una incisión vertical en el xilema fue realizada con un bisturí como referencia del inicio del tratamiento. Se utilizó un tratamiento de control o testigo (T0), dos tratamientos de sequías moderadas con y sin fertilizante (T1, T3), y dos tratamientos de sequías severas con y sin fertilizante (T2 y T4). Luego de un monitoreo semanal continuo después de seis meses de abril a octubre de 2019, se realizó finos cortes transversales microscópicos del tallo de las plántulas en el Laboratorio de Anatomía de Maderas Tropicales de la UNL. A través de la diferencia de colores del Astrablau y Safranina en los cortes anatómicos se pudo cuantificar los porcentajes de lignina y celulosa con la ayuda del software de bioanálisis de imágenes ICY utilizando ocho filtros de separación de colores. Adicionalmente, se analizó los cambios en variables morfológicas (altura, diámetro, estado fitosanitario, número de hojas y mortalidad) con análisis de componentes principales, diagramas de caja, y gráficas de correlación con la ayuda de la plataforma de programación estadística R.

Los resultados permitieron determinar que la resistencia hídrica, los porcentajes de lignina y celulosa, y la reacción de las variables morfológicas dependen principalmente de cada especie y de su procedencia. *Cinchona officinalis* demostró ser mucho más sensible al estrés

hídrico que *Acacia macracantha*. En *C. officinalis* se evidenció considerablemente una disminución en la fijación de carbono (celulosa) a causa del estrés hídrico, pero tuvo un cambio morfológico más homogéneo entre individuos. Al contrario *A. macracantha* presentó mayor producción de celulosa, pero tuvo mayores cambios morfológicos entre tratamientos e individuos a causa del estrés hídrico. El fertilizante no influyó en la resistencia del estrés hídrico, tanto a nivel anatómico como morfológico; al contrario, se pudo evidenciar que los individuos que contenían fertilizante tuvieron mayor mortalidad dentro de las dos especies. *Cinchona officinalis* no soportó periodos de sequía con más de cuatro semanas, mientras *Acacia macracantha* soportó sequías de hasta ocho semanas. Investigaciones de este tipo permiten conocer las adaptabilidad y resiliencia de especies forestales a fuertes impactos climáticos. Por ello, es necesario complementar futuras investigaciones relacionadas al impacto del estrés hídrico en la fijación de carbono (celulosa) y producción de madera, así como la determinación de los cambios morfológicos en especies forestales, para contribuir a la generación de conocimiento de especies nativas resistentes al calentamiento global con sequías prolongadas.

Palabras clave: lignina, celulosa, variables morfológicas, estrés hídrico, fijación de carbono.

ABSTRACT

The productivity of forest ecosystems from an ecological point of view is directly related to the production of biomass, and from a commercial point of view to the wood production. This study tries to understand how climate variations and especially water stress influences the carbon fixation or cellulose formation, as well as morphological changes in forest species. For this purpose, seedlings of *Cinchona officinalis* and *Acacia macracantha* within a greenhouse were subjected to several water stress treatments, and a vertical incision in the xylem was made with a scalpel as a reference for the beginning of the treatment. A control treatment (T0), two treatments of moderate drought with and without fertilizer (T1, T3), and two treatments of severe drought with and without fertilizer (T2 and T4) were used. After continuous weekly monitoring after six months from April to October 2019, fine microscopic cross sections of the seedlings' stems were made at the UNL Tropical Wood Anatomy Laboratory. Through the color difference of Astrablau and Safranina in the anatomical cuts it was possible to quantify the percentages of lignin and cellulose with the help of ICY image bioanalysis software using eight color separation channel filters. Additionally, changes in morphological variables (height, diameter, phytosanitary status, number of leaves and mortality) were analyzed with principal component analysis, boxplots, and correlation charts with the help of the R statistical programming platform.

The results allowed us to determine that water resistance, lignin and cellulose percentages, and the reaction of morphological variables depend mainly on each species and its origin. *Cinchona officinalis* proved to be much more sensitive to water stress than *Acacia macracantha*. In *C. officinalis*, a decrease in carbon (cellulose) fixation due to water stress was considerably evident, but it had a more homogeneous morphological change among

individuals. On the contrary, *A. macracantha* presented greater cellulose production, but had greater morphological changes between treatments and individuals due to hydric stress. Fertilizer did not influence the resistance to water stress, both anatomically and morphologically; on the contrary, it was possible to show that individuals containing fertilizer had higher mortality within both species. *Cinchona officinalis* did not support drought periods longer than four weeks, while *Acacia macracantha* supported droughts of up to eight weeks. Research of this type allows us to know the adaptability and resilience of forest species to strong climatic impacts. Therefore, it is necessary to complement future research related to the impact of water stress on carbon fixation (cellulose) and wood production, as well as the determination of morphological changes in forest species, in order to contribute to the generation of knowledge of native species resistant to global warming with prolonged droughts.

Keywords: lignin, cellulose, morphological variables, water stress, carbon sequestration

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático se refiere a las alteraciones surgidas en los fenómenos atmosféricos del planeta, tales como la temperatura, la precipitación y la intensidad de las tormentas. Los efectos que inciden en dichas alteraciones son cambios en el nivel del mar, en las nubes, en la emisión de aerosoles a la atmósfera; el aumento de emisiones de dióxido de carbono, el gas y los hidratos de metano (Miller, 2007).

Se ha demostrado que en las últimas décadas el incremento de las emisiones del dióxido de carbono ha sido del 1 % anual y, como consecuencia de esto, se ha estimado que el 43 % de las especies forestales que habitan en regiones tropicales desaparecerían, debido a que sus distribuciones potenciales se alterarían drásticamente (Miles, Grainger y Phillips, 2004). En estas regiones los fenómenos climáticos extremos, como las sequías, serán cada vez más frecuentes y prolongados, y pondrían en riesgo a los ecosistemas naturales; por ello, para salvar los árboles es primordial saber cómo se comportan estos ante los eventos adversos que se derivarán del calentamiento global (Villa, 2018).

Con relación a la precipitación, estudios recientes, como el realizado por Pucha-Cofrep, Peters y Bräuning (2015), indican que eventos climáticos extremos, como las altas precipitaciones durante temporadas del fenómeno de El Niño, pueden provocar que se duplique el crecimiento diamétrico de especies forestales de bosque seco, lo cual se refleja en un mayor almacenamiento de carbono. Según Bonan (2008), este almacenamiento es aproximadamente el 45 % del carbono terrestre, y cuyo aporte a la producción primaria neta es del 50 %. Hay que destacar, que el cambio climático está ligado directamente a la productividad y a la fijación de carbono en las plantas, lo cual ocurre a través de procesos

fotosintéticos; sin embargo, fisiológicamente aún se desconoce en qué medida y de qué manera este fenómeno impacta sobre las especies forestales (Pucha-Cofrep et al., 2015).

Las variaciones climáticas, ya sean de origen natural o antropogénico, causan distintos impactos sobre los ecosistemas naturales. Como consecuencia de esas variaciones podrían presentarse cortos periodos de sequía que afectan severamente el crecimiento de los árboles, sobre todo, en especies de bosques lluviosos, que no están adaptadas a sequías prolongadas, tal cual ocurre en sitios estacionales como son los bosques secos y los bosques andinos del sur de Ecuador (Butz et al. 2017). En estos bosques, especies de interés comercial como *Acacia macracantha* Willd. se verán reducidas en su crecimiento dasométrico a pesar de tener una alta adaptabilidad, por el hecho de estar restringidas a zonas que son muy sensibles a variaciones climáticas (Aguirre et al. 2017). En el caso de *Cinchona officinalis* L. se encuentra distribuida en el centro y norte de los Andes dentro de la depresión de Huacabamba del Ecuador, siendo su presencia escasa, y limitada solo a una pequeña área de bosque andino (Andersson, 1998).

Además, del calentamiento global otra amenaza a la que se enfrentan las especies forestales es la sobreexplotación por su alto valor que representa a la economía de la región. *Acacia macracantha* Willd., se caracteriza por su importancia en la provisión de diversos bienes y servicios ambientales como forraje, sombra, carbón y postes; y *Cinchona officinalis* L. por las propiedades medicinales de la corteza de gran aplicación en la industria farmacéutica. El uso del *Cinchona officinalis* como medicina natural contra problemas respiratorios pone en alto riesgo su existencia, ya que para ello se extrae toda su corteza causando la mortalidad inmediata de esta especie forestal.

En la actualidad, debido a la diversidad y a la complejidad de la dinámica de crecimiento de los ecosistemas forestales, muy poco se conoce, en términos cuantitativos, el impacto de las variaciones climáticas (precipitación, temperatura, humedad relativa y radiación) sobre el crecimiento y la xilogénesis de las especies *Acacia macracantha* y *Cinchona officinalis*.

En la región los árboles durante el año tienen un crecimiento que es interrumpido por la estacionalidad climática o por estrés a causa de factores externos. El crecimiento en bosques templados con una estacionalidad bien definida permite la formación de anillos de crecimiento muy visibles. Sin embargo, en los árboles del trópico, la formación de anillos de crecimiento visibles sólo ocurre en áreas donde existen una estacionalidad climática bien marcada, ya sea por época seca y lluviosa, que inducen a periodos de dormancia del tejido cambial (Worbes 1999). Así, los árboles de los bosques secos tropicales pueden presentar anillos de crecimiento fáciles de identificar, ya que atraviesan por épocas marcadas de lluvia y otras de sequía, y más aún si las especies son deciduas (Brienen y Zuidema 2005). Datos como el ancho de los anillos de crecimiento, y el área total de los vasos y su densidad por anillos, permiten desarrollar cronologías precisas y evaluar la influencia del clima en el desarrollo de los anillos de crecimiento; a través de la Anatomía de la madera se puede determinar si los anillos son verdaderos o falsos (Giantomasi, Roig, Villagra y Srur, 2009).

Para determinar una planta forestal de calidad se consideran atributos morfológicos y fisiológicos con que se produce, para poder adaptarse al sitio de plantación (Wilson y Jacobs, 2006), bajo condiciones ecológicas y edafológicas del lugar donde se establecen (Ramírez y Rodríguez, 2004), lo que repercute en baja mortalidad y altas tasas de supervivencia, y crecimiento inicial (Orozco et al., 2010). Otro de los factores en el éxito de las plantaciones son la preparación del terreno, la disponibilidad de humedad, características del sitio, así

como el control de malezas (Navarro, del Campo y Cortina, 2006). La producción de plantas con atributos morfológicos (altura, diámetro, relación área-raíz) requiere de un proceso técnico adecuado en lo que respecta a la siembra, medios de crecimiento, nutrición, riego, prevención y control de plagas, además, del manejo del ambiente de producción (Prieto, Domínguez, Cornejo y Návar, 2007). En condiciones de vivero, aspectos como fertilización, sustratos y contenedores, así como condiciones específicas donde se planta y la especie por plantar son temas que a la fecha han sido poco estudiados (Robles, Rodríguez y Villanueva, 2017).

Actualmente se carece de un criterio único, basado en los aspectos morfológicos, que explique la variación en los resultados después de la plantación; pero el diámetro ha sido reconocido como un atributo inicial importante de las plantas de vivero, pues promueve la supervivencia (Tsakalidimi, Ganastzas y Jacobs, 2013) y tolerancia a condiciones climáticas y biológicas adversas en campo (Prieto et al., 2011), ya que su capacidad puede atribuirse, en parte, a la relación diámetro inicial, el volumen de la raíz y las raíces primarias (Jacobs, Salifu y Davis, 2009).

Por lo tanto, este proyecto busca entender cómo los cambios en la acumulación de carbono en las especies forestales, causados por las variaciones climáticas, influyen en el contenido de celulosa (carbono almacenado), lignina, vasos y anillos de crecimiento a través de un estudio anatómico de madera; así como, en las propiedades morfológicas altura, diámetro, número de hojas, mortalidad y estado fitosanitario. Cabe destacar, que la presente investigación es parte del proyecto ***“Impacto de las variaciones climáticas en la fijación de carbono en ecosistemas forestales al sur de Ecuador”***, que se desarrolla con el financiamiento de la Universidad Nacional de Loja, y dentro del cual la presente

investigación se corresponde al primer componente de este proyecto. A partir de ello, en el presente trabajo se planteó la siguiente pregunta de investigación:

¿En qué medida el estrés hídrico, bajo condiciones controladas, afecta la estructura anatómica y morfológica de dos especies forestales provenientes de distintos ecosistemas?

El poder responder a dicho problema es la oportunidad para llenar el vacío actual de conocimiento sobre la respuesta fisiológica y morfológica que muestran estas especies forestales al cambio climático, y en particular al estrés hídrico; a la vez que, generará información cuantitativa y cualitativa para conocer cual especie se adaptaría con mayor facilidad a eventuales cambios climáticos extremos. En base a la pregunta de investigación se plantearon las siguientes hipótesis:

- El estrés hídrico bajo condiciones controladas incide negativamente en la producción de celulosa y es favorable en la producción de lignina de *Acacia macracantha* Willd. y *Cinchona officinalis* L.
- El estrés hídrico bajo condiciones controladas influye en el desarrollo morfológico de *Acacia macracantha* Willd. y *Cinchona officinalis* L.

Para comprobar estas hipótesis se plantearon los siguientes objetivos de esta investigación:

Objetivo General

Conocer la variación anatómica de la madera y el desarrollo morfológico en plántulas de *Acacia macracantha* Willd. y *Cinchona officinalis* L. bajo tratamientos de estrés hídrico y fertilización.

Objetivos Específicos

- Determinar los cambios anatómicos en la madera de *Acacia macracantha* Willd. y *Cinchona officinalis* L. a causa del estrés hídrico y fertilización.
- Evaluar los cambios morfológicos en *Acacia macracantha* Willd. y *Cinchona officinalis* L. a causa del estrés hídrico y fertilización.
- Difundir los resultados de esta investigación a los grupos interesados del sector forestal.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Morfología de las plantas

2.1.1. Importancia

La morfología de una planta al salir del vivero, puede condicionar la capacidad de crecimiento y supervivencia de esta en el campo y sus efectos pueden durar varios años (Burdett, 1990). Las variables dasométricas que han tenido mejores resultados predictivos han sido la altura, el peso seco de la parte aérea, el diámetro en el cuello de la raíz y el peso seco radicular. Por tanto, estos atributos morfológicos pueden ser usados como indicadores del desarrollo potencial de las plantaciones forestales y también para clasificar las plantas en distintas categorías de calidad según sus características morfológicas (Navarro, Gálvez, Contreras y Del Campo, 1998).

En general, la relación entre la supervivencia y el tamaño de la parte aérea de la planta han sido una medida menos usada, y de menor precisión que las que se suelen observar entre el crecimiento y el tamaño de la parte aérea. Del mismo modo, la supervivencia y el crecimiento no presentan una relación con la altura tan buena, como medida del tamaño de la parte aérea, como la relación que presentan con el diámetro en el cuello de la raíz o con el peso seco aéreo (Carlson, 1986).

2.1.2. Atributos morfológicos

El uso de atributos morfológicos es actualmente el único requisito de calidad de la planta recogido por la normativa forestal y, por tanto, exigible en los Pliegos de Condiciones Técnicas de los Proyectos de Repoblación Forestal (Scagel, Bowden, Madill y Kooistra, 1993). La aplicación más inmediata de los atributos morfológicos es la clasificación de lotes en función de su calidad morfológica. La calidad de un determinado lote de planta puede

clasificarse según tres criterios: la homogeneidad de sus atributos morfológicos, la capacidad relativa de supervivencia de las plantas, y el crecimiento en condiciones reales (Navarro et al., 1998).

a. Variables dasométricas

Las variables dasométricas son parte de la dasometría, que es una de la especialidad del ingeniero forestal, que sirve para determinar y estimar las dimensiones de medida en individuos arbóreos (Imaña, Silva y Kishi, 2002). En este estudio fueron consideradas especialmente el diámetro y la altura del árbol.

Diámetro del árbol: Se considera como medida fundamental junto con la circunferencia. Para el caso del diámetro se conocen dos tipos: (i) el diámetro a la altura del pecho (DAP) y (ii) el diámetro en la base del tronco (D_{base}). Del mismo modo, la circunferencia se puede medir a la altura del pecho (CAP) y en la base del tronco (C_{base}). Entre los instrumentos para medir esta variable destacan la cinta métrica, la cinta diamétrica, la forcípula forestal y el pie de rey (Imaña et al., 2014).

Altura del árbol: La altura del árbol es una variable dasométrica importante, necesaria para conocer e interpretar el proceso de crecimiento del árbol (Imaña et al., 2002). Las cintas métricas o flexómetros son los instrumentos usados para la medición de alturas de árboles de pequeño y mediano tamaño (Imaña et al., 2014).

b. Variables ecológicas

Se puede entender como variables ecológicas al conjunto de estrategias de reproducción y crecimiento que una especie presenta, y que la hace capaz de permanecer en un sitio determinado. Generalmente estas estrategias son la respuesta evolutiva de la especie ante la

acción de los elementos ambientales físicos y bióticos (Lozada y Arends, 2000). Para los propósitos de este estudio fueron consideradas como variables ecológicas el número de hojas, el estado fitosanitario y la mortalidad de la planta.

Número de hojas: Las hojas son consideradas como un órgano más sensible a cambios en las condiciones climáticas, que el tallo o la raíz; esto debido a que las hojas dan respuesta más clara a los efectos del estrés por condiciones del ambiente (Levitt, 1980).

Estado fitosanitario: De acuerdo con Castillo y Suzuarte (2010), el estado fitosanitario de una planta está dado por la presencia de plagas o enfermedades, y por del vigor de cada individuo, en el que puede haber resistencia al ataque de plagas, y por lo tanto la presencia de estas no representa riesgo para el rendimiento de la planta. También es factible encontrar situaciones en las que el tamaño poblacional de la plaga es elevado y amenaza seriamente el vigor y la sobrevivencia de la planta (Tabla 1).

Tabla 1. Niveles del estado fitosanitario para plantas forestales en vivero (Castillo y Suzuarte, 2010).

Estado Fitosanitario	Bueno 3	Plántulas sin presencia de plagas o enfermedades; sin evidencia de ataque, como debilidad, coloraciones extrañas, defoliación y heridas contaminadas; plántulas de vigor normal, color normal y desarrollo de hojas.
	Regular 2	Plántulas con alguna evidencia de problema en su sanidad, ya sea por coloración anómala (clorosis o amarillamiento), puntuaciones en las hojas, presencia de plagas.
	Malo 1	Plántulas con problemas serios de plagas o enfermedades, que ponen en riesgo su estabilidad o sobrevivencia. Puede haber pérdida de parte del follaje, muerte apical o defoliación severa.

Mortalidad: Puesto que los árboles crecen de forma relativamente lenta, pero pueden morir rápidamente, es sumamente importante evaluar el potencial y las consecuencias de un fenómeno de muerte regresiva inducida por el clima. Una sequía intensa puede matar árboles centenarios en pocos meses o años (Nepstad Stickler, Soares y Merry, 2008).

2.2. Anatomía de la Madera

2.2.1. Definición

Es una rama de la Biología encargada de estudiar el xilema, leño o madera con el fin de conocer y darle el uso adecuado, y además determinar la especie a la que pertenece (Richter, 2010).

León (2010) menciona que, en comparación con las coníferas, las maderas latifoliadas se especializan por presentar una mayor heterogeneidad en cuanto a tipo, proporción y distribución de tejidos xilemáticos. Esto hace que sea más complicado establecer relaciones anatómicas en comparación con las maderas de gimnospermas.

Kollman (1959) menciona que la estructura anatómica de las plantas frondosas es mucho más compleja; por ello su aspecto microscópico se complica y se hace irregular. Los vasos, que a simple vista parecen poros, dan un aspecto característico a la sección transversal y está constituida por fibras (JUNAC,1989).

2.2.2. Importancia y variabilidad anatómica intraespecífica

La investigación anatómica sirve para asociar las características estructurales con su posterior aplicación, las cuales pueden interpretarse a través de variables dendrométricas, físicas y anatómicas. Estas características estructurales y anatómicas varían según la especie y el género y, además, están vinculadas con el ambiente, lo que significa que la estructura de la

madera es el resultado de la influencia de factores intrínsecos (genéticos) y extrínsecos (ambientales). Por ello, su estudio debe realizarse a partir de varios individuos, para así poder considerar la variabilidad de las características de la madera de una especie, inherentes a tales factores (Zobel y Van Buijtenen, 1989).

Las variaciones anatómicas interespecíficas se deben a que las actividades fisiológicas del árbol son afectadas por factores ambientales, tales como la precipitación, la temperatura y los tratamientos silviculturales, de los cuales depende el suministro de agua y nutrientes al cambium. También destaca que las condiciones del sitio y la variabilidad climática pueden producir grandes modificaciones en las características de la madera, que son causadas no solamente por la variabilidad relativa al crecimiento, sino también por diferencias genéticas entre los individuos de la población, que permiten distinguirlos unos de otros, aún dentro de condiciones de sitio casi idénticas (Arroyo, 1983).

2.2.3. Estructura y características anatómicas

a. Xilema

Está constituido por células cilíndricas huecas, cuyas paredes se impregnan de lignina, lo que ocasiona la muerte de la célula. En este tejido existen dos tipos de células: las traqueidas, que son células alargadas y delgadas; y los vasos leñosos, que al impregnarse de lignina forman cilindros con diversas ornamentaciones (anillados, espirales o punteados). El xilema transporta la savia bruta (agua y sales minerales) desde las raíces hasta las hojas, en donde se lleva a cabo la fotosíntesis (Cervantes y Hernández, 2004). En este tejido, el transporte de agua y de los minerales ocurre sólo en una dirección: desde las raíces hacia arriba, a todas las partes de la planta (Audesirk, Audesirk, y Byers, 2012).

b. Floema

El floema está representado por las células cribosas, que son células vivas que pierden su núcleo al alcanzar la madurez, pero preservan su citoplasma. En el floema, el citoplasma de todas las células se comunica a través de pequeñas perforaciones de la pared celular, las cuales constituyen la criba. Las células o vasos cribosos permiten el transporte del alimento disuelto en el agua hacia las células de la planta. El agua y las sustancias nutritivas forman la savia elaborada que circula desde las hojas hasta todos los órganos del vegetal (Cervantes y Hernández, 2004). El floema transporta la glucosa de las células fotosintéticas, de las hojas y de la corteza externa de los tallos, hasta la raíz, la medula y la corteza interna, donde una parte de la glucosa se metaboliza para obtener la energía y otra parte se almacena en forma de almidón (Audesirk, Audesirk, y Byers, 2012) (Figura 1).

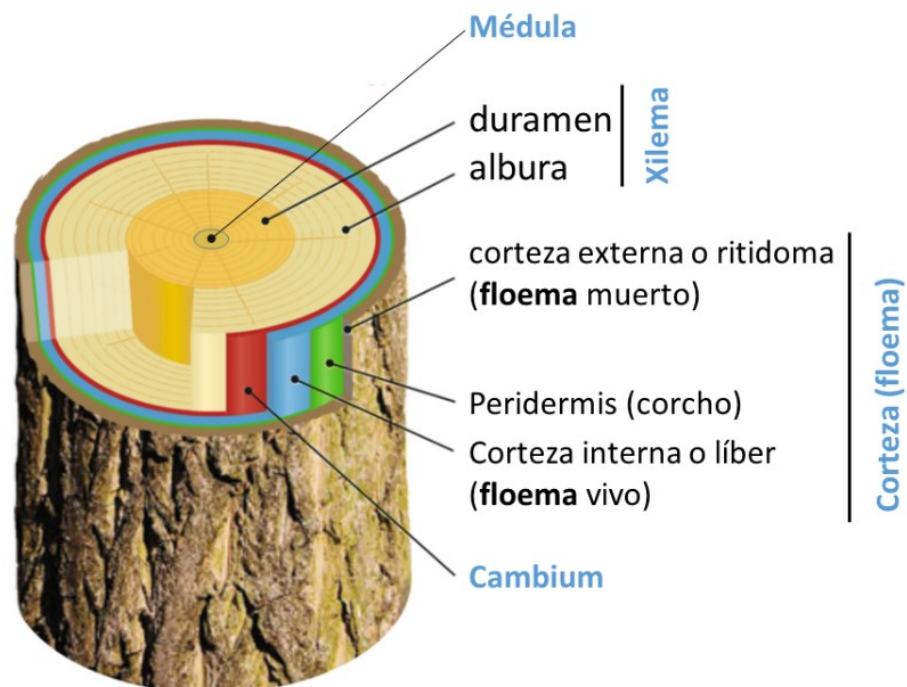


Figura 1. Características macroscópicas de la madera.

Fuente: (Schweingruber, Steiger y Börner, 2019).

c. Vasos

Los vasos están formados por células de mayor diámetro y más redondeadas que las traqueidas (en las gimnospermas). Estas células se unen longitudinalmente unas a otras para formar tubos llamados vasos. A través de ellos el agua circula vía simplasto (por el interior de las células), y pasa de una célula a la siguiente por las perforaciones que se encuentran en sus paredes transversales (situadas en ambos extremos de la célula), denominadas placas perforadas, las cuales, en algunos vasos pueden estar ausentes. Además, el agua y sustancias disueltas pueden atravesar las punteaduras areoladas de sus paredes laterales y pasar a otras células del xilema. Los elementos de los vasos son el principal tipo celular conductor del xilema en las angiospermas (Spicer, 2014) (Figura 2b).

d. Anillos de crecimiento

Son capas concéntricas de crecimiento, producidas durante el desarrollo diametral del árbol por el cambium. Se observan en la sección trasversal con respecto al eje longitudinal del tronco. Para las zonas tropicales que tienen estaciones marcadas, los anillos de crecimiento se clasifican como estacionales (Puertas, Guevara y Espinoza, 2012).

e. Parénquima

Tejido que puede estar constituido por células que puede estar dispuestas de manera longitudinal o radial, dependiendo de la orientación de los elementos leñosos con respecto al eje del tronco. Estas células tienen como función el almacenamiento de sustancias de reserva, la distribución y segregación de los carbohidratos, así como, la producción de ciertas sustancias orgánicas. Este tejido puede estar junto o alejado de los vasos (Puertas et al., 2012).

f. Fibras

Son células largas y delgadas que cumplen la función de sostén y de resistencia mecánica del leño (Puertas et al., 2012) (Figura 2b).

g. Radios leñosos

Constituidos por células de parénquima dispuestas en dirección radial, perpendicular al eje del árbol, y realizan la función de conexión de las fibras longitudinales. Tienen importancia en las propiedades de la madera, como elemento de identificación y como responsables, en parte, de las propiedades de contracción de la madera (Puertas et al., 2012) (Figura 2b).

h. Inclusiones

Sustancias que se encuentran taponeando parcial o totalmente los vasos; estas pueden ser gomas, tilosis, sílice, entre otras. Tiene importancia porque alteran o afectan la preservación, secado y el procesamiento industrial de la madera (Puertas et al., 2012).

i. Médula

Es la porción central de los tallos de dicotiledóneas, de gimnospermas y de algunas pteridofitas. Está compuesta por parénquima fundamental y ocupa la parte interna del cilindro central, limitada al exterior por los haces vasculares (Camefort, 1972) (Figura 2a).

j. Cambium vascular

Se encuentra entre la corteza y la médula de los troncos de los árboles, específicamente entre el xilema y el floema, y tiene como función formar tejidos conductores del floema durante el año (Cervantes y Hernández, 2004) (Figura 2a).

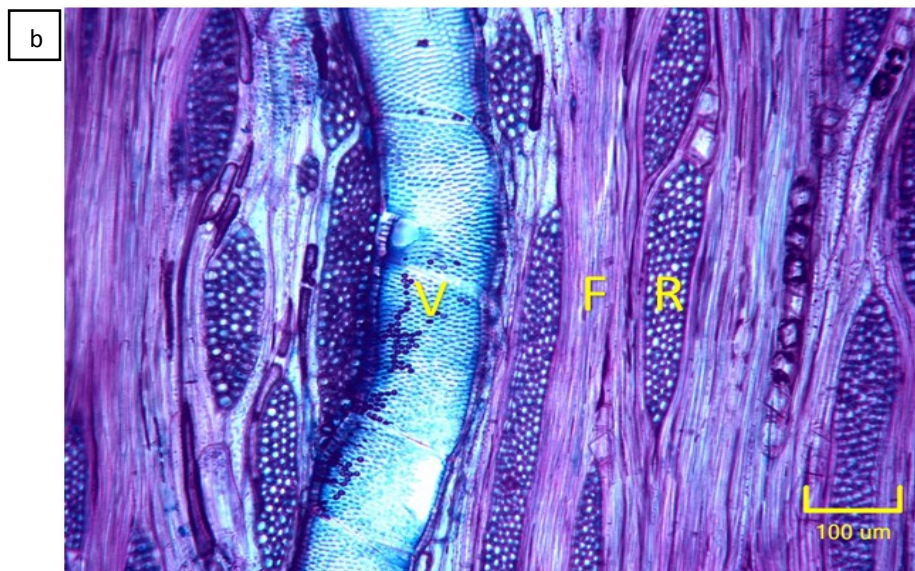
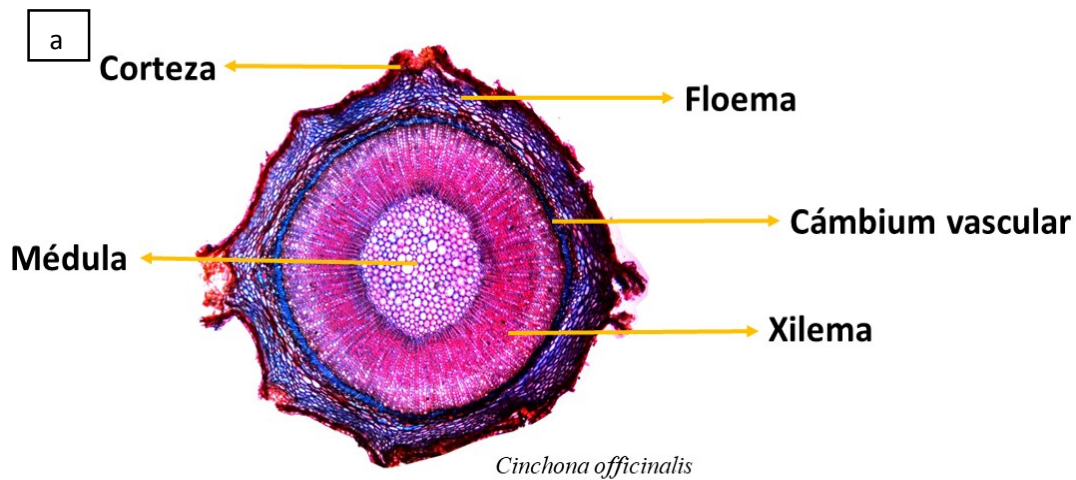


Figura 2. Características microscópicas de la madera. a) Corte transversal de una pequeña rama 4x *C. officinalis*. b) Corte tangencial 10x *A. macracantha*; V: vaso; R: radios; F: fibras. Escala 100 μm.

Fuente 2a: Elaboración propia; 2b: (Armijos, Cueva, Quiñonez, Rojas y Sisalima, 2018).

2.2.4. Estructura química de la madera

a. Lignina

La lignina (del latín *lignum*: madera) es un polímero polifenólico que se deposita en las paredes celulares secundarias, y a veces primarias, de las células de las plantas. Este

componente es muy abundante en las plantas leñosas y es el segundo biopolímero más abundante en la Tierra, después de la celulosa. Su aparición representó un avance evolutivo para las plantas terrestres. Los árboles pueden tener entre el 20 y 30 % de lignina, mientras que las hierbas contienen menos del 20 % (Barros, Serk, Granlundz y Pesquet, 2015). Según lo destacan estos autores, la lignina cumple varias funciones importantes, entre las que destacan las siguientes: (i) es una sustancia hidrofóbica que elimina agua de las paredes celulares, debido a que es el único polímero carbonado de la pared celular que no está formado por monómeros de carbohidratos, lo que la hace más impermeable al agua; (ii) limita la difusión lateral, que facilita el transporte longitudinal y refuerza la resistencia mecánica de los tejidos; (iii) le da resistencia a las células frente a ataques bacterianos; y (iv) aporta una gran resistencia mecánica a las paredes celulares (Figura 3).

Según Barros et al. (2015) la lignificación de la pared celular ocurre durante la diferenciación de las células, y también en respuesta a la acción de diversos factores ambientales. La lignina también se produce en función de efectos ambientales—como la presencia de heridas, la infección por patógenos, la sequía, baja temperatura, disminución de nutrientes o exposición a CO₂.

b. Celulosa

Según Evert (2006) este componente se caracteriza por lo siguiente: (i) Es el principal componente de las paredes vegetales (Figura 6). (ii) Es un polisacárido lineal formado por monómeros de glucosa unidos mediante enlaces tipo β (1-4). La fórmula es $(C_6 H_{10} O_5)_n$, donde n puede ser mayor a 500 por cadena de polisacárido. (iii) Las largas moléculas de celulosa se asocian entre sí mediante enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals para formar estructuras denominadas microfibrillas de celulosa, formadas por unas 50 moléculas

de celulosa orientadas con la misma polaridad. (iv) Las microfibrillas se asocian entre sí mediante enlaces formados entre ellas; también, por otros glúcidos, principalmente la hemicelulosa y las pectinas, que resultan en las fibrillas y fibras de celulosa, visibles al microscopio óptico. (v) Las fibras de celulosa pueden medir aproximadamente 0,5 μm de diámetro y 4 a 7 μm de longitud. La resistencia de las fibras de celulosa es similar a la del acero, y las uniones entre las moléculas de celulosa mediante puentes de hidrógeno hacen que las microfibrillas de celulosa tengan unas propiedades cristalinas en algunas regiones, mientras que el resto adquiere propiedades paracristalinas (Figura 3).

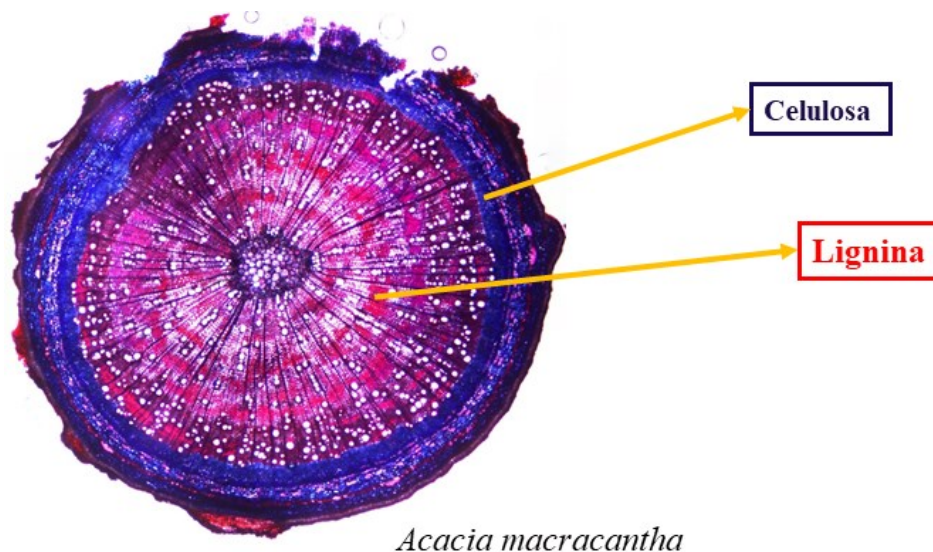


Figura 3. Componentes químicos de la madera.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.5. Xilogénesis

La xilogénesis es el proceso de formación de xilema realizado por plantas leñosas, que empieza por la división periclinal de una célula madre en el cambium vascular, en donde se deposita celulosa y hemicelosa para construir una pared celular secundaria, a su vez ocurre

la impregnación de las paredes celulares con lignina y finalmente la muerte celular programada (Ortega, Santini, Carvalho y Tomazello, 2019) (Figura 4).

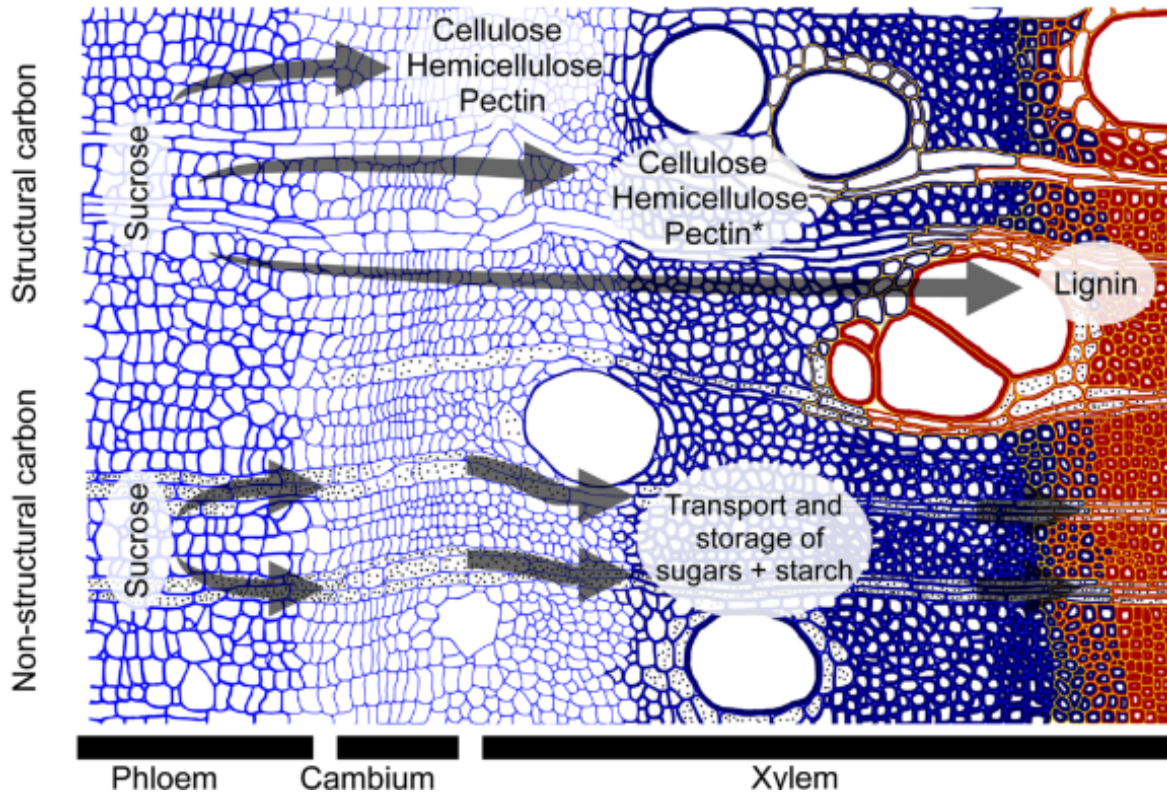


Figura 4. Proceso de xilogénesis.

Fuente: (Locosselli y Buckeridge, 2017).

Durante el proceso de xilogénesis, tanto el xilema (células conductoras de agua) como el floema (células conductoras de nutrientes) se someten a la autólisis cuando se diferencian y maduran. Además, puede inducir mediante cultivo la diferenciación de células del parénquima, lo cual también ha permitido hacer la diferenciación del xilema (Fukuda, 1994).

Además, se sabe que las heridas también pueden inducir a las células del parénquima cerca del sitio de la herida, para re-diferenciarse en xilema si los haces vasculares se rompen. Las plantas vasculares transportan agua en columnas de células muertas especializadas

denominadas elementos traqueales. La diferenciación de los elementos traqueales incluye la elongación celular; la deposición de componentes de la pared celular, incluida la lignina; y la autólisis. La autólisis comienza cuando el citoplasma y el núcleo se condensan y contraen, y termina cuando el citoplasma se rompe en pequeñas envolturas (Wodzicki y Humphreys, 1973).

2.3. Estrés hídrico en plantas

El estrés hídrico se define como uno de los factores externos que ejerce una influencia negativa sobre la planta. Los factores externos, en general, pueden ser bióticos (competencia, depredación, etc.) o abióticos (temperatura, agua, minerales etc.). El estrés hídrico es importante ya que limitará la distribución de ciertas especies vegetales, pues, este factor no tiene el mismo efecto estresante en todas las especies (Taiz y Zeiger, 2002).

Las plantas están expuestas a constante estrés ambiental, algunos factores ambientales, como la temperatura, pueden ser estresantes en poco tiempo; otros, como el contenido de agua en el sustrato, tardan días e incluso semanas; y factores como la deficiencia de minerales del suelo pueden tardar meses en ser estresantes (Boyer, 1982).

2.3.1. Impacto del estrés hídrico inducido a los árboles

El estrés hídrico inducido por el clima es causa indirecta de mortalidad de árboles debido a efectos agudos y de breve duración, tal como la interrupción irreversible de la columna de agua presente en el interior del tronco y las hojas (cavitación). La resistencia y vulnerabilidad de las especies de árboles a la cavitación es un factor clave de la resistencia a la sequía, y es sumamente variable. Los árboles sometidos a estrés hídrico minimizan el riesgo de cavitación mediante la obstrucción de estomas; consiguen así reducir la pérdida de agua y la

consiguiente tensión en el xilema. La oclusión estomática tiene su precio, ya que impide la difusión del CO₂ hacia el follaje y limita la fotosíntesis. El estrés hídrico crónico y prolongado debilita y provoca la muerte regresiva de los árboles, ya sea directamente por privación de carbono, o indirectamente por hacerlo más vulnerable al ataque de plagas, que aniquilan las defensas ya disminuidas de estos árboles (McDowell *et al.*, 2008).

El clima también afecta directamente a la dinámica de las poblaciones de insectos forestales y patógenos fúngicos (Hicke, Logan, Powell y Ojima, 2006). Por consiguiente, algunos brotes masivos de insectos que matan árboles son atribuibles al cambio climático (Raffa *et al.*, 2008). Independientemente del mecanismo que la determine, la muerte regresiva es a menudo un proceso no lineal; puede manifestarse abruptamente a escala regional, cuando las condiciones climáticas exceden el umbral fisiológico de tolerancia de la especie, o puede desencadenar brotes de plagas de insectos (Allen, 2007).

2.3.2. Deficiencia hídrica y resistencia a la sequía de las plantas

La deficiencia hídrica se asocia a la salinidad en la rizosfera y al estrés por calor en las hojas; este último resulta del proceso de descenso de enfriamiento pro-evaporación, debido a la baja transpiración; el enfriamiento y el congelamiento conducen a la reducción de la actividad hídrica y al aumento del estrés osmótico (Taiz y Zeiger, 2002). De acuerdo con estos autores, una reducción en el contenido hídrico en las plantas provoca las siguientes consecuencias: reducción del área foliar, extensión radicular, cierre de los estomas, aumento de la resistencia al flujo de agua en fase líquida, aumento de la deposición de cera en la superficie de las hojas y alteración en la disipación de la energía de las hojas.

2.3.3. Cambios anatómicos de la madera por estrés hídrico

El desarrollo del complejo sistema de tejidos de madera se modifica en respuesta a las condiciones ambientales, incluida la sequía, para equilibrar las compensaciones entre la eficiencia de la conducción del agua y riesgo de falla durante el estrés hídrico. Para entender las modificaciones, primero es necesario considerar cómo el agua es transportada a través de los tejidos leñosos de los tallos de los árboles (Rodríguez y Groover, 2019).

Estudios florísticos han demostrado que en zonas tropicales la evolución ha conducido a la existencia de plantas con tejido xilemático muy eficiente desde el punto de vista conductivo y muy vulnerables a la cavitación, y que las plantas de zonas desérticas presentan xilemas numerosos vasos de pequeño diámetro y muy resistentes a la cavitación, se han realizado numerosos estudios anatómicos del xilema buscando las causas de las diferencias en la vulnerabilidad a la cavitación de las plantas, pensando que el diámetro de los elementos de vasos podría ser un elemento de gran importancia a la hora de determinar la vulnerabilidad a la cavitación y la capacidad de crecimiento de la planta, pues dentro de una planta si se ha comprobado que existe vasos de mayor tamaño (Hacke y Sperry, 2001). Además, la relación entre el diámetro de vaso y la mayor vulnerabilidad de éstos a la cavitación; por ejemplo, en climas fríos, hay una selección natural de especies con vasos de diámetros pequeños (Schreiber, Hacke, Hamann y Thomas, 2011). Sin embargo, en el caso de las plantas sometidas a estrés hídrico, no está claro que las plantas cuyos vasos presenten mayor diámetro sean más vulnerables a la cavitación y es frecuente encontrar falta de correlación entre la vulnerabilidad a la cavitación y el diámetro de vasos (Tyree, Davis y Cochard, 1994).

Las especies que vegetan en sitios áridos presentan vasos de diámetros menores que las especies que vegetan en sitios húmedos lo que hace pensar que pudiera existir una relación

entre el diámetro del vaso y las características de las punteaduras, de forma que los vasos de mayor tamaño tuvieran punteaduras más débiles que las especies de vaso de menor diámetro, pues cuando existe un suministro de agua abundante la división celular es rápida, la demanda de carbohidratos también, y la pared primaria se deposita con menos medios materiales y mayores presiones debido a una mayor presión de turgencia de los tejidos que en el caso de suministro limitante de agua, caso en el que la demanda de hidratos de carbono es menor y las paredes primarias que forman las membranas de las punteaduras pueden percibir una mayor cantidad de materia prima y presentar una menor porosidad (Tyree y Sperry, 1989).

2.4. Fertilización de especies forestales

2.4.1. Importancia

Generalmente se asocia la necesidad de fertilizar una plantación forestal con la deficiencia de elementos nutritivos en el suelo. Ello es válido, pero sólo en forma parcial, ya que la aplicación de fertilizantes debe considerar todos los factores de la fertilidad del suelo: espacio arraigable, régimen de agua, régimen de aire, régimen calórico y, por supuesto, el régimen nutritivo (Thiers, Reyes, Gerding y Schlatter, 2014). Una decisión de fertilizar basada únicamente en la evaluación del régimen nutritivo del suelo, puede entregar resultados nulos o incluso negativos para el crecimiento, en vez de incrementarlo. Con el objetivo de ubicar a la fertilización en un contexto adecuado en el manejo forestal se deben considerar los factores relevantes de la silvicultura que influyen en el crecimiento de una plantación y que pueden determinar la necesidad de una fertilización, como también su posible éxito o fracaso calidad de las plantas (incluyendo su genética), preparación del sitio, técnica de plantación, cuidados culturales (control sanitario, competencia de malezas, intervenciones en el rodal como raleos y podas, etc.) y el sitio (Donoso y Soto 2010).

2.4.2. Efecto de los Fertilizantes sobre los árboles

Según (Domínguez, 1984), la respuesta física de los árboles a la fertilización varía en conveniencia con los factores como son: la especie, edad para el turno, elemento y época de aplicación, competencia con las malezas u otras especies arbóreas.

Según (Pritchett, 1986), la respuesta de los árboles a los fertilizantes se expresa en términos de una mayor altura, DAP y crecimiento en términos de volumen.

2.4.3. Tipos de Fertilizantes

En el mercado existe actualmente una gran variedad de fertilizantes, y de acuerdo a Pritchett (1986) éstos se pueden clasificar de la siguiente manera:

a. Fertilizantes orgánicos

Están compuestos por material orgánico como abono animal, abono vegetal y composta, que se aplican a tierras cultivadas, como fuente de nutrientes vegetales.

b. Fertilizantes inorgánicos comerciales

Son mezclas comercialmente preparadas de nutrimentos vegetales, como nitratos, fosfatos y potasio que se aplican al suelo para restaurar su fertilidad y aumentar el rendimiento forestal y agrícola.

b.1. Fertilizantes Nitrogenados

Existe una amplia variedad de fertilizantes nitrogenados disponibles para el silvicultor. Estos varían considerablemente en cuanto a concentraciones de nutrientes y sus reacciones en el suelo. La Urea y el nitrato de amonio son las fuentes de nitrógeno más comunes en la silvicultura, sobre todo a causa de sus altos contenidos en nitrógeno. También posee buenas

propiedades físicas y, en consecuencia, son menos costosos en cuanto a su manejo y su aplicación que la mayor parte de las fuentes nitrogenadas.

b.2. Fertilizantes Fosfatados

Los depósitos de rocas fosfatadas, son las únicas fuentes de fósforo para fertilizantes. Molido hasta constituir un polvo fino, el fertilizante a menudo se utiliza sin un mayor procesamiento, pero se utiliza más comúnmente como materia prima para una variedad de compuestos de fertilizantes fosfatados.

b.3. Fertilizantes de Potasio

Las plantas absorben el potasio en cantidades relativamente grandes, pero como los árboles hacen circular el potasio de manera muy eficiente, raramente se encuentran deficiencias de este elemento en los suelos forestales. Las excepciones a éstos son algunos suelos de turbera y arenosos de deslave glacial y suelos costeros que están casi exentos de minerales primarios portadores de potasio, o que han agotado este elemento, por los efectos de la agricultura extensiva.

c. Fertilizante Completo

Fertilizante Complejo NPK alto en fósforo. Su alto contenido de este elemento, proveniente de fuentes altamente solubles, permite que sea asimilado rápidamente por las plantas y que su desperdicio sea mínimo. Aporta niveles balanceados de nitrógeno, potasio y calcio. Ideal para la etapa de siembra. El uso de los fertilizantes compuestos significa un adecuado uso de técnicas de fertilización; una vez conocidas las necesidades de nutrientes de los cultivos en cuanto a N-P-K-Mg-S se refiere. Estas fórmulas se ajustan a las necesidades de diferentes cultivos, deficiencias del suelo, eficiencia del fertilizante, etc. Las nuevas fórmulas contienen

Magnesio, Azufre, que también son macro elementos de fundamental importancia (Fertiza, 2012).

2.5. Descripción general de las especies forestales

2.5.1. *Acacia macracantha* Willd.

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Fabales

Familia: Fabaceae

Género: *Acacia*

Especie: *macracantha*



Figura 5. Fotografía de un árbol de *Acacia macracantha*.

Nombres comunes: “Faique”

a. Descripción anatómica

Según Silva, Blanco y Lindorf (1988) estudiaron la anatomía de *Acacia macracantha* en Venezuela donde encontraron las siguientes características (Figura 6): Anillos de crecimiento poco marcados, definidos por diferencia en el grosor de las fibras. Vasos microporos solitarios o en cadenas radiales cortas (2-6), rara vez en pequeños grupos 14 arracimados, perforación simple. Paredes terminales transversales u oblicuas, generalmente sin extensiones (colas). Tejido básico constituido por fibras gelatinosas y no gelatinosas que alternan en bandas. También se encuentran fibras septadas de 4-8 hasta 14 septos, conteniendo cristales. Parénquima axial diferenciado en parénquima interfibrilar y

parénquima paratraqueal de contacto. EI interfibrilar abundante, en disposición vasicéntrica, confluyente o aliforme, formado por series bicelulares, de células alargadas axialmente. Parénquima paratraqueal de contacto formando vainas completas o casi completas (3/4) de células de contorno irregular, alargadas axialmente. Punteaduras hacia el vaso son abundantes y rebordeadas. Radios vasculares uniseriados hasta triseriados. Homocelulares, constituidos por células procumbentes. Células de contacto predominantes, aunque en ocasiones éstas parecen faltar en una u otra zona. Cristales rómbicos presentes en las fibras septadas (Ver Anexo 1).

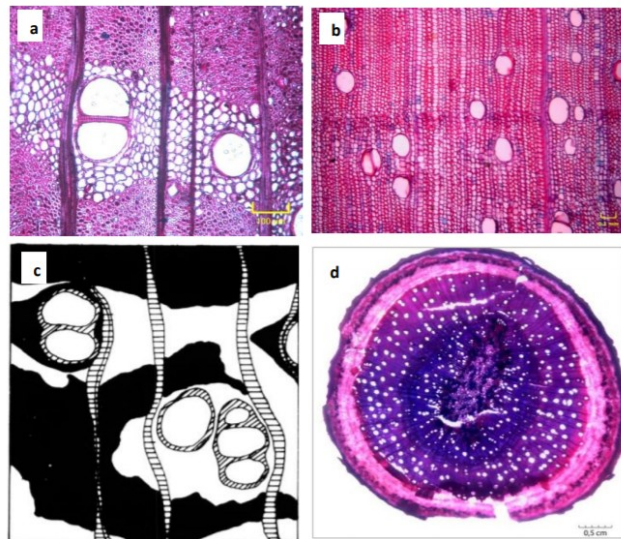


Figura 6. Estructura anatómica de la madera de *Acacia macracantha*. a) Corte transversal 10x. b) Corte transversal 4x. c) Corte transversal 64x. d) corte transversal completo.

Fuente: (Patiño, Guamán, Chalán y Pucha, 2017; Silva, Blanco y Lindorf, 1988).

b. Requerimientos ecológicos

Según Guerrero y López (1993) esta especie crece en suelos laderosos, pobres y arcillosos. En suelos fértiles y planos se observa un rápido crecimiento. Se dispersa por doquier debido

a que las semillas son diseminadas por los rumiantes a través de las heces, por tanto, su regeneración natural es abundante. Tiene una alta capacidad de rebrote. Requiere las siguientes formaciones ecológicas: bosque seco Tropical (bs-T), bosque seco muy tropical, (bs-PM) bosque seco premontano, bosque seco montano bajo (bs-MB).

c. Importancia y usos

Como hábitat importante para protección de biodiversidad. En parques se utiliza como planta ornamental. Las flores se toman en infusión para tratar afecciones hepáticas, cardíacas y en lavados para tratar heridas. Las flores son apreciadas por los insectos por la presencia de néctar y polen. Las hojas, flores y frutos sirven de alimento para el ganado caprino y vacuno, además, sirve como abono natural, su gran follaje produce sombra. La madera es utilizada para leña, carbón, postes y para fabricar parquet. Es una especie excelente para sistemas agroforestales (Guerrero y López, 1993).

2.5.2. *Cinchona officinalis* L.

Según Pollito (1989) y Missouri Botanical Garden, (2017), la filogenia de *Cinchona* es:

Nombre común: Cascarilla, quinina.

Nombre científico: *Cinchona officinalis* L.

Reino: Plantae.

División: Magnoliophyta.

Clase: Magnoliopsida.

Orden: Gentianales.



Figura 7. Fotografía de un árbol de *Cinchona officinalis*.

Familia: Rubiácea.

Género: Cinchona.

a. Descripción anatómica

Cinchona officinalis según la caracterización de Feijoo et al. (2019) presenta anillos de crecimiento poco visibles o ausentes y una porosidad difusa. Tiene vasos en patrones radiales o diagonales en grupos de 4 o más, el parénquima axial difuso. Los radios son desde uniseriados hasta multiseriados y las células radiales en su mayoría procumbentes con más de cuatro filas de células verticales. Las placas de perforación son simples y las punteaduras intervasculares alternas (Figura 8 y Anexo 1).

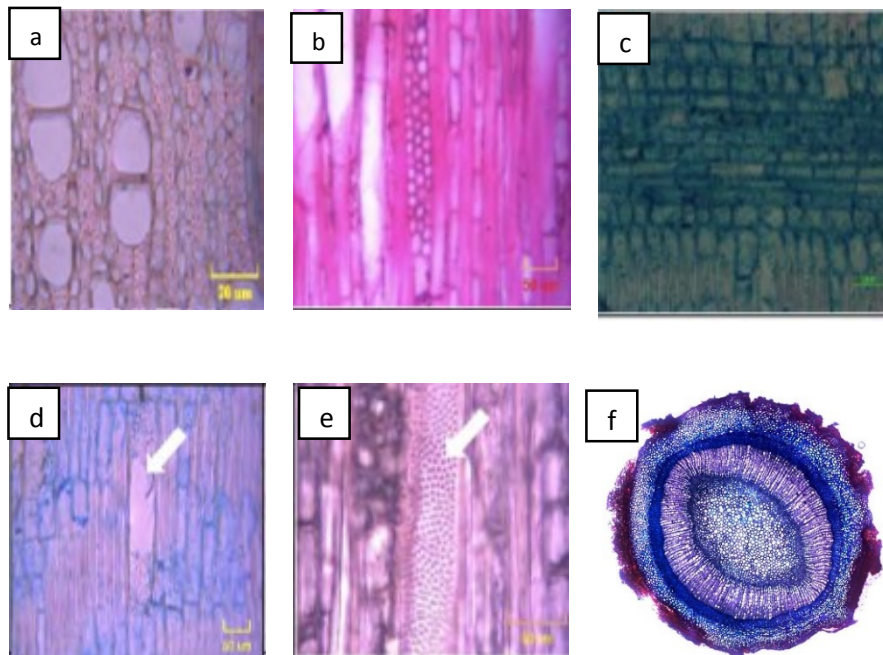


Figura 8. Estructura anatómica de la madera de *Cinchona officinalis*. a) Corte transversal 20x. b) Corte tangencial 20x. c) Corte radial 20x. d) Placas de perforación 100x. e) Punteaduras 100x. f) corte transversal completo.

Fuente: (Feijoo et al., 2019).

b. Requerimientos ecológicos

Cinchona es un género de plantas fanerógamas, pertenece a la familia Rubiaceae y es nativo de los valles andinos de Sudamérica (Buitrón, 1999; Jäger, Tye y Kowarik., 2007). Se distribuye a lo largo de la zona tropical y ecuatorial de la cordillera de los Andes desde los 12 ° latitud norte hasta los 20 ° latitud sur, encontrándose en alturas que van desde los 700 metros hasta los 2000 metros sobre el nivel del mar (Garmendia, 2005).

Estos árboles de quina o Cascarilla en estado natural constituyen pocas veces bosques por sí mismos, generalmente forman grupos esparcidos en medio del bosque, llamados manchas (Campos, Cerna y Chico, 2014).

En Ecuador se encuentran más de la mitad de todas las especies del género *Cinchona* sp., principalmente en provincias como Bolívar, Chimborazo, Cañar, Azuay, Morona, Zamora y Loja (Garmendia, 1999).

c. Importancia y usos

Cinchona officinalis L., es una planta que se utiliza para la producción de quinina, un agente antifebri febre especialmente útil en la prevención y tratamiento del paludismo. Su uso culinario tal vez insospechado es en la coctelería a través de mezclas con agua tónica. La quinina extraída de la corteza de estos árboles da el sabor amargo a este tónico que ha conquistado el mercado de bebidas gaseosas, especialmente en Europa y Estados Unidos (Russell, 2012).

También se usa para curar neumonías, acelerador del parto, tónico capilar para evitar la caída del cabello, desordenes del ritmo cardiaco, calambres e indigestión. Es depurativa pues favorece la eliminación de toxinas por piel y orina (Galeano y Galeano, 2009).

3. METODOLOGÍA

3.1. Área de investigación

Este estudio se llevó a cabo con las especies *Cinchona officinalis* (Cascarilla) y *Acacia macracantha* (Faique) en el Laboratorio de Anatomía de Maderas Tropicales de la Universidad Nacional de Loja (UNL) (Anexo 2) complementándose con mediciones de datos dasométricos y ecológicos obtenidos dentro del proyecto 21-DI-FARNR-2019: “*Impacto de las variaciones climáticas en la fijación de carbono en ecosistemas forestales al sur de Ecuador*”. Las mediciones se realizaron en individuos desarrollados bajo condiciones controladas, y con distintos tratamientos en el Invernadero de Investigación del Laboratorio de Micropropagación clonal de la UNL (Anexo 2). Las semillas de la Cascarilla provinieron de varios relictos boscosos de la provincia de Loja, y las semillas del Faique fueron de distintas procedencias en relictos boscosos de la parroquia Malacatos-Loja.

3.2. Recopilación de la información

Para el desarrollo del primer objetivo de esta investigación, se partió de información proporcionada por el proyecto 21-DI-FARNR-2019. Esta información fue levantada con docentes, técnicos investigadores y estudiantes en el marco de las prácticas Pre-Profesionales de la Carrera de Ingeniería Forestal. En estas prácticas hubo la participación activa del autor de esta tesis, y las actividades realizadas fueron como se detallan a continuación:

3.2.1. Obtención y procedencia de las plántulas.

Se obtuvieron 100 plántulas de cada especie que fueron donadas por distintas dependencias de la UNL. Las plántulas de *Cinchona officinalis* las proporcionó el Laboratorio de Micropropagación Vegetal, las cuales fueron propagadas por semilla y mantenidas bajo condiciones de invernadero durante 12 meses por el proyecto “*Identificación y descripción*”

del estado actual de Cinchona officinalis L., en la provincia de Loja y generación de protocolos para la propagación in vivo e in vitro". En el caso de *Acacia macracantha*, las plántulas provinieron del Vivero Forestal, las cuales, a diferencia de las de *Cinchona officinalis*, estaban al aire libre en un ambiente natural y sin ningún cuidado especial, se podría decir que estas plántulas ya estuvieron bajo condiciones de estrés antes de iniciar el experimento.

3.2.2. Sustrato y replante

La preparación del sustrato para el replante desde fundas pequeñas a grandes consistió en una mezcla de tierra, arena y humus (Marca Nutrisano) en una proporción de 3:1:1 acompañado de una desinfección con Terraclor y un tiempo de reposo de 7 días (Figura 9).



Figura 9. Preparación del sustrato para el repique de las plántulas.

Una vez preparado el sustrato, se hizo el replante de los 100 individuos de cada especie en fundas individuales de polietileno de 15 cm x 30 cm (Figura 10), para lograr un mejor

desarrollo durante los seis primeros meses del experimento, durante el periodo marzo-octubre del 2018.



Figura 10. Repique de las plántulas de las especies estudiadas.

Posterior al repique, las plántulas fueron trasladadas al invernadero de investigación del Laboratorio de Micropropagación clonal de la UNL con ayuda de una carretilla y así dejarlas en un ambiente donde se pueda controlar las condiciones ambientales (Figura 11).



Figura 11. Traslado de las plántulas de las especies estudiadas al Invernadero.

3.2.3. Establecimiento del diseño experimental

Se aplicó un diseño experimental con 100 plántulas por especie, repartidas en cuatro tratamientos (20 plántulas por tratamiento) y un control (20 plántulas) ubicadas sobre mesas metálicas de manera contigua dentro del invernadero (Figura 12). Los tratamientos aplicados fueron los siguientes:

Tratamiento de control (testigo = T0): Las plántulas se mantuvieron en un sustrato con humedad constante del 100 %, durante los seis meses de estudio, para lo cual se aplicó riego dos veces por semana, en una cantidad de 200 ml por aplicación.

Tratamiento sequía moderada (T1): En el primer mes las 20 plántulas de éste tratamiento se mantuvieron con un contenido de humedad del sustrato al 100 % al igual que el T0. En el segundo mes, se sometieron a condiciones de sequía durante las dos primeras semanas (semana 5 y 6), seguidamente se aplicaron dos riegos de 50 ml de agua en cada individuo en la semana 7, y se mantuvo nuevamente la sequía en la semana 8. Al tercer mes (semana 9), se inició un nuevo ciclo con contenido de humedad al 100 %, y así sucesivamente con semanas de riegos y sequías hasta el sexto mes.

Tratamiento sequía severa (T2): En el primer mes el sustrato se mantuvo a un contenido de humedad de 100 % en las 20 plántulas. Durante todo el segundo mes mantuvo condiciones de sequía teniendo en cuenta el momento en que la planta alcanzó la etapa de fuerte marchitez, pero aún reversible. Durante el tercer mes, nuevamente se inició un nuevo ciclo de humedad al 100 %, y así sucesivamente hasta el sexto mes, humedad, sequía, humedad.

Tratamiento sequía moderada + fertilizante (T3): Se aplicó el mismo tratamiento de sequía moderada en el T1, pero con 2 g. de fertilizante en el sustrato.

Tratamiento sequía severa + fertilizante (T4): Al igual que el tratamiento T2 pero con 2 g. de fertilizante en el sustrato.

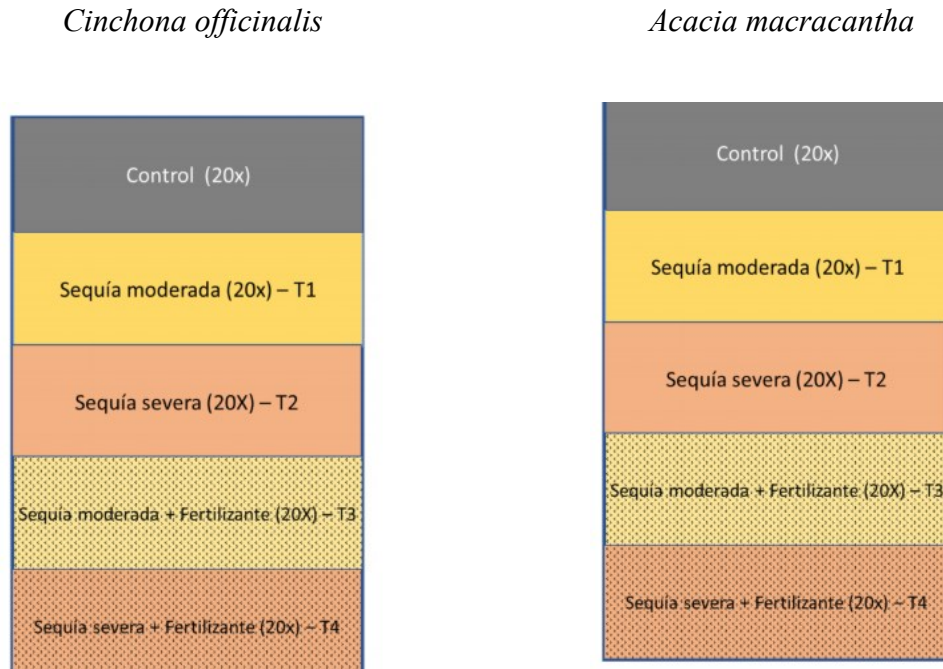


Figura 12. Diseño experimental para el establecimiento de los tratamientos y el control aplicado a las especies estudiadas. x = plántulas.

En los cuatro tratamientos incluido el control durante seis meses consecutivos se realizaron mediciones quincenales, de variables dasométricas de altura y diámetro en cada plántula, así como de variables ecológicas estado fitosanitario, cantidad de hojas y mortalidad.

Para los cuatro tratamientos se utilizó el mismo tipo de sustrato descrito anteriormente (Figura 9). El fertilizante aplicado YaraMila COMPLEX en los tratamientos T3 y T4 fue un compuesto con macro (Nitrógeno, Fósforo y Potasio) y micronutrientes (Azufre, Magnesio, Boro, Hierro, Manganeso y Zinc). Para aplicar el fertilizante se hizo un surco circular en el sustrato (aproximadamente 1 cm de profundidad) cercano al borde de la funda para evitar el contacto directo del fertilizante con la planta, se colocó el fertilizante y luego se lo cubrió con el mismo sustrato. Finalmente, en cada plántula de todos los tratamientos y control, con

la ayuda de un bisturí, se hicieron dos incisiones opuestas en sentido tangencial al tallo. Las incisiones fueron de aproximadamente 3 cm de longitud tomando en cuenta que la profundidad del corte llegue hasta las primeras células del xilema con el objetivo de dejar una cicatriz como marca inicial (Figura 13). Cabe aclarar que las incisiones se hicieron a partir de 3 cm desde la base del suelo.

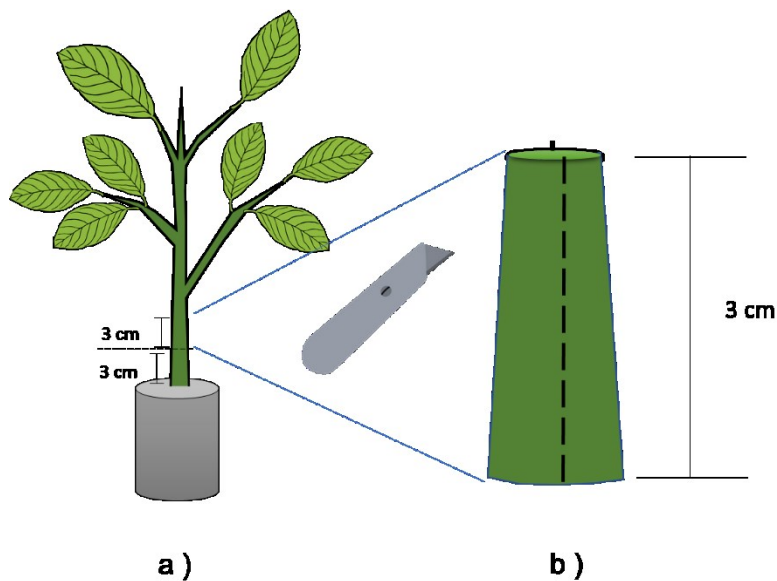


Figura 13. Esquema de las incisiones realizadas a las plántulas de los cuatro tratamientos y el control para generar una guía de seguimiento. (a) Marcas de control (incisiones) que se realizaron en cada individuo antes de aplicar cada uno de los tratamientos establecidos, (b) detalle del plano vertical del tallo indicando las dos incisiones a las plántulas.

Para la evaluación y análisis del impacto del estrés hídrico en el desarrollo del nuevo tejido secundario o xilogenénesis se indujeron sequías moderadas y severas en cada tratamiento de manera alternada, cuyo procedimiento varió según la especie, ya que al inicio del experimento se notó que las especies presentaron diferencias en su resistencia a la sequía.

Periodo de riego y sequía

Cinchona officinalis fue la que mostro menor resistencia a la sequía, por ello en esta especie, en el primer mes el sustrato se mantuvo a un contenido de humedad de 100 % (Figura 14); en el segundo mes se inició la fase de sequía hasta el momento en que la planta alcanzó la etapa de marchitez (Figura 15); al tercer mes, nuevamente se aplicó el tratamiento de humedad al 100 %, y así sucesivamente hasta el sexto mes.



Figura 14. Riego de las plántulas para mantenerlas a una humedad al 100 %.



Figura 15. Marchitez de las plántulas como reacción a la sequía.

En *Cinchona officinalis* los periodos de sequía fueron de un mes consecutivo, a excepción de la sequía moderada (T1 y T3) donde se interrumpió parcialmente con un riego de 50 ml por plántula a la tercera semana de este periodo (Tabla 2).

Tabla 2. Cronograma detallado de sequía para *Cinchona officinalis*.

Tratamiento:	SEMANA			
	1	2	3	4
T1 SEQUÍA MODERADA:	X	X	O	X
T2 SEQUÍA SEVERA:	X	X	X	X
T3 SEQUÍA MODERADA:	X	X	O	X
T4 SEQUÍA SEVERA:	X	X	X	X

O = Riego (50 ml); X = Sequía

En el caso de *Acacia macracantha* por su mayor resistencia a los periodos de sequía se extendieron hasta dos meses. Igualmente, los tratamientos de sequía moderada (T1 y T3)

fueron interrumpidos a la quinta semana de este periodo con un pequeño riego de 50 ml. (Tabla 3).

Tabla 3. Cronograma detallado del periodo de sequía para *Acacia macracantha* durante dos meses.

Tratamiento	Semana							
	1	2	3	4	5	6	7	8
T1 Sequía moderada	X	X	X	X	O	X	X	X
T2 Sequía severa	X	X	X	X	X	X	X	X
T3 Sequía Moderada + fertilizante	X	X	X	X	O	X	X	X
T4 Sequía Severa	X	X	X	X	X	X	X	X

O = Riego (50 ml); X = Sequía

Control de plagas

Frente a la presencia de patógenos (arácnidos) que afectaron el desarrollo normal de las plántulas (Figura 16), se fumigó con Topas EW (fungicida antioídio, sistémico, del grupo químico de los triazoles, con acción preventiva, cuya sustancia activa es el Penconazol), con el objetivo de regular y controlar el estado fitosanitario de las plántulas. Para la preparación del fungicida se utilizó una mezcla de 1 ml. de producto por cada litro de agua, y se suministró un contenido aproximado de 20 ml. de solución por planta, el cual se lo realizó con la ayuda de una bomba a presión un día por semana durante dos meses.



Figura 16. Presencia de patógenos en las plántulas.

Nota: El óvalo representa la presencia de arácnidos.

El estudio tuvo un seguimiento y monitoreo minucioso de todas las actividades realizadas dentro del invernadero con sus respectivas fechas de riego-sequía (Figura 17). Además, se incluyó un registro detallado de las mediciones, fumigación, actividades no planificadas, etc. durante el periodo abril-octubre 2019 (Ver cronograma detallado en Anexo 3).



Figura 17. Cronograma de riego y sequía de plántulas bajo invernadero.

3.3. Determinación de los cambios anatómicos en la madera de *Acacia macracantha* Willd. y *Cinchona officinalis* L. a causa de estrés hídrico y fertilización

3.2.1. Análisis anatómico de la madera

a. Selección de individuos

Se seleccionó tres individuos por cada tratamiento en cada especie (Figura 18), considerando las medidas de su diámetro.



Figura 18. Individuo seleccionado de *Cinchona officinalis*.

b. Cortes transversales del tallo

Posteriormente se llevaron las plantas al Laboratorio de Anatomía de Maderas Tropicales y a partir de aquí se siguieron todos los procedimientos para este análisis en la Guía para Cortes Anatómicos de Madera (Feijoo, Ramón y Pucha, 2018). En los individuos seleccionados por cada tratamiento se procedió primero a cortar el tallo transversalmente en láminas finas de 2 a 3 μm con ayuda del micrótomo para su posterior visualización en el microscopio y digitalización, sobre todo de la parte donde la planta tuvo la incisión tangencial al inicio del tratamiento (Figura 19).

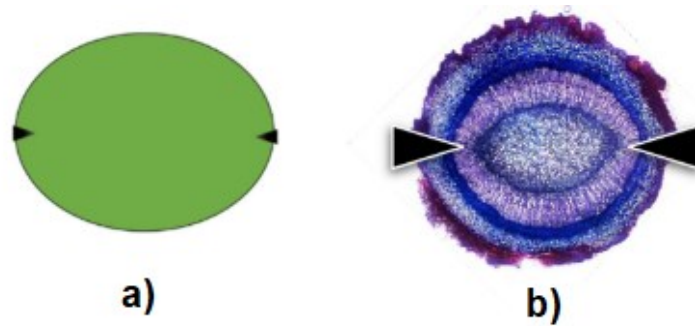


Figura 19. (a) Vista de las marcas en un plano transversal del tallo. (b) Ejemplo sistemáticos de cómo serían las marcas hasta llegar al xilema en un corte transversal de *Cinchona officinalis*.

Una vez cortadas las finas láminas con ayuda de un pincel se procedió a seleccionar y colocar las mejores muestras en un portaobjetos previamente etiquetado para su posterior identificación (Figura 20).



Figura 20. Selección, montaje y etiquetado de las muestras en portaobjetos.

c. Tinción, lavado y deshidratación de las muestras

Para la tinturación de las muestras se colocó una gota de tinte a base de Astrablau y Safranina, teniendo en cuenta que la gota cubra toda la superficie de las muestras. Seguidamente se dejó reposar durante 10 minutos para que el tinte pueda impregnarse en las muestras y así

diferenciar los tejidos por color rojo y azul, y poder reconocer el contenido de celulosa y lignina de cada muestra (Figura 21).



Figura 21. Tinción y reposo de las muestras.

Pasado el tiempo de reposo, se lavó las muestras con ayuda de una pipeta, primero con agua destilada, luego alcohol al 50 %, alcohol al 75 % alcohol al 96 %, y al final una gota de diluyente (Figura 22).

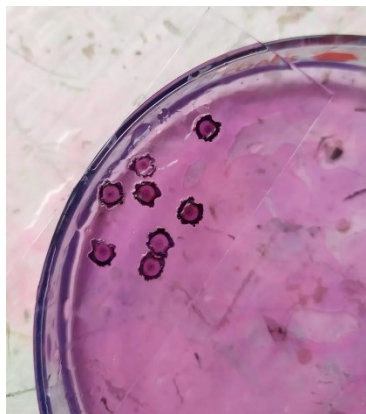


Figura 22. Lavado y deshidratado de las muestras

d. Sellado permanente y secado de las muestras

Con ayuda de una jeringa sin aguja se tomó una porción de Bálsamo de Canadá y se colocó una gota sobre las muestras, y posteriormente con la ayuda de una pinza se colocó el cubreobjetos sobre la muestra cubierta por el Bálsamo de Canadá.

Para el secado se colocó las muestras cubiertas por papel aluminio en una lámina de metal presionadas por un imán. Posteriormente se llevó las placas metálicas con las muestras a la estufa a una temperatura de 90 °C por 24 horas para que se sequen completamente. Una vez pasado este tiempo, se sacó las muestras de la estufa y se procedió a quitar el papel aluminio, seguidamente con ayuda de una cuchilla se retiraron los restos de Bálsamo de Canadá sobre el cubreobjetos.

e. Digitalización y captura de imágenes anatómicas

Una vez listas las muestras selladas con el Bálsamo de Canadá se llevaron al microscopio para su visualización (Figura 23). Las mejores muestras fueron digitalizadas y almacenadas dentro del ordenador a través del software *Infinity Analyze* e *Infinity Capture*. Dentro de estos softwares, primeramente, se configuró los colores naturales de la muestra. Para obtener una imagen completa se hizo un mosaico basado en las capturas de múltiples imágenes siguiendo una secuencia de izquierda a derecha hasta completar toda el área de la muestra, teniendo en consideración que cada imagen debe compartir un 20 % de área en común.

Posteriormente con ayuda del software *Image Composite Editor*, se unió las múltiples imágenes obtenidas de la muestra para tener la sección completa de nuestro interés, y así poder almacenarla para su posterior análisis.



Figura 23. Visualización en el microscopio de la muestra

f. Determinación de porcentajes de celulosa y lignina

Se utilizó las imágenes de la sección transversal completa con una escala de 2400 μm (Figura 24), seguidamente se hizo un pre procesamiento en el software *Photoshop* para reducir el tamaño de la imagen a menos de 1,2 Mb en el formato Tiff o JPG, lo que redujo también un 60 % su resolución (Ver Anexo 4).

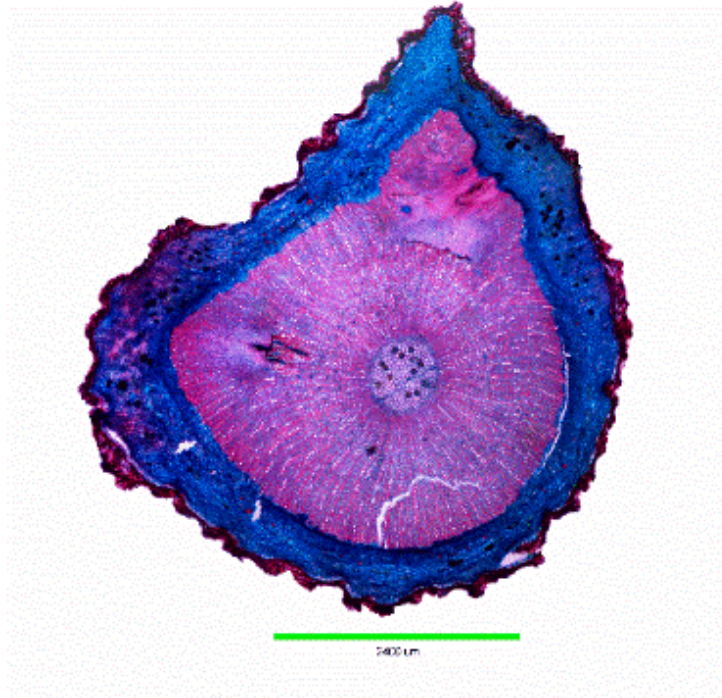


Figura 24. Imagen con escala de la sección transversal.

Finalmente, para determinar los porcentajes de carbono (celulosa) y lignina se aplicó un análisis de imagen digital utilizando filtros de color. Para ello se hizo uso del software *ICY* y con un análisis K-means de color se separó la imagen en ocho capas o canales de colores, lo cual facilitó separar el contenido de la celulosa y la lignina, sin tomar en cuenta los vasos. También se identificaron las áreas del antes y después del tratamiento (lignina y celulosa) basándose en la cicatriz que dejó la incisión en las plántulas al inicio de este estudio (Ver Anexo 5).

Seguidamente se exportaron los datos a Excel con las áreas de Lignina y Celulosa de cada plántula para determinar el comportamiento antes y después del tratamiento. Con la ayuda de gráficos de pastel en Excel se determinó el porcentaje de cada componente, sin tomar en cuenta el área de vasos, y así se pudo evaluar sus diferencias (Figura 25).

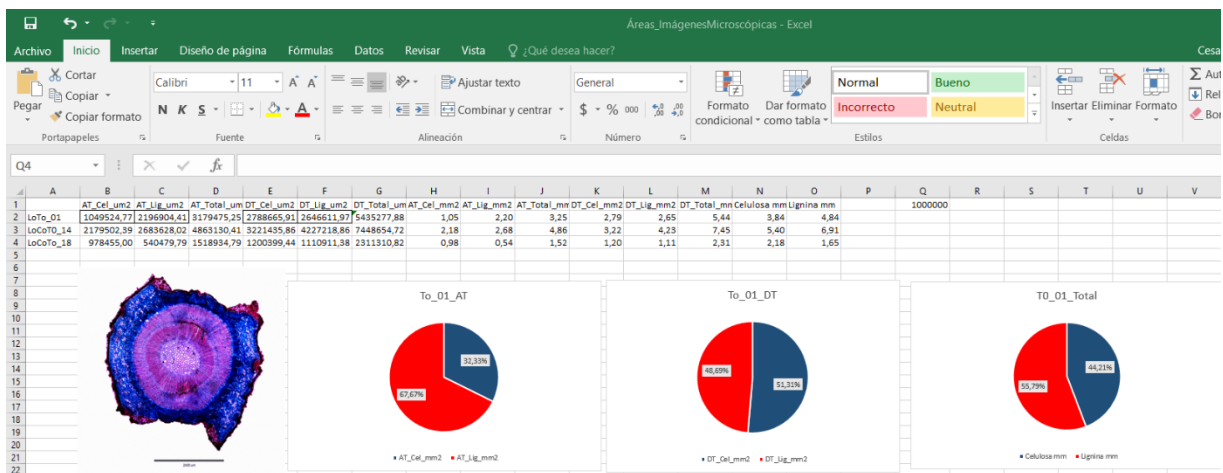


Figura 25. Base de datos para determinar porcentajes antes del tratamiento y después del tratamiento.

3.4. Evaluación de los cambios morfológicos en *Acacia macracantha* Willd. y *Cinchona officinalis* L. a causa de estrés hídrico y fertilización

Para el desarrollo de esta investigación se usaron los datos morfológicos del periodo abril-octubre del 2019, que forman parte del proyecto 21-DI-FARNR-2019. En el levantamiento de esta información el autor de esta tesis participó en todas las actividades referentes monitoreo de datos morfológicos en las plántulas bajo invernadero en el marco de las prácticas pre-profesionales de la Carrera de Ingeniería Forestal de la UNL. Las actividades realizadas para el monitoreo y análisis de datos fueron como se indican a continuación:

3.4.1. Monitoreo de datos morfológicos

Cada 15 días se midieron variables ecológicas y dasométricas (Altura, Diámetro, Número de hojas, Mortalidad, y Estado fitosanitario) en todos los tratamientos durante seis meses con el formato que se muestra en la Tabla 4 (ver matrices individuales y detalladas en el Anexo 6).

Luego de cada medición los datos se tabularon en el software Microsoft Office Excel para crear una nueva base de datos. Aquí se registró detalladamente cada medición durante los seis meses ordenados de acuerdo con el diseño experimental (Figura 12).

Tabla 4. Matriz para la medición individual por cada tratamiento.

T#: Descripción									
Individuo	Altura (cm)	Diámetro (cm)	N° de hojas			Mortalidad	Estado fitosanitario		
			C (caen)	N (nacen)	T (total)		Bueno (3)	Regular (2)	Malo (1)
T#_#individuo									

3.4.2. Análisis estadístico de datos morfológicos

Las variables morfológicas tomadas en la matriz fueron altura, diámetro, numero de hojas, mortalidad y estado fitosanitario.

La estructura de la base de datos se ajustó a un nuevo formato para tener una mejor apreciación y análisis de datos. Para ello, se creó una hoja de Excel por cada variable morfológica, de este modo se tuvo un seguimiento mensual para el comportamiento de cada variable e individuo tomando en cuenta las mediciones quincenales de cada tratamiento (Tabla 5).

Tabla 5. Mediciones tabuladas en Excel.

Vari.	Uni.	corte	Tr.	Cód	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9	m_10	m_11	m_12	m_13
Alt	cm	con cort	T0	T0_0 1													
Diám	cm	con cort	T0	T0_0 1													
Nro_h	num	con cort	T0	T0_0 1													
Est_fit	nivel	con cort	T0	T0_0 1													
Mort	num	con cort	T0	T0_0 1													

Posteriormente, se realizó una tabla resumen con el promedio de los 20 individuos en cada tratamiento (T0, T1, T2, T3 y T4) organizados por fecha, número de medición, y variable (altura, diámetro, número de hojas y estado fitosanitario) (Tabla 6).

Tabla 6. Resumen de los datos morfológicos de trece mediciones durante seis meses continuos de monitoreo en el presente estudio.

Medición	T0_alt	T0_diam	T0_hojas	T0_estado	T0_mort
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					

Para el análisis de los datos se inició con una correlación entre variables. Para ello, se importó esta base de datos al entorno estadístico de programación R (R Development CoreTeam, 2008) a través del software (Versión 3.5.1-© 2009-2018 RStudio, Inc.). En general se utilizó funciones de la base de R, así como librerías como “corrplot”, “psych” y “factoextra” para una mejor visualización de datos.

3.4.3. Visualización gráfica de variables morfológicas

a. Correlación de variables

Para determinar la relación entre las variables morfológicas, se ejecutó las matrices de correlaciones con un nivel de significancia de $p\text{-value} = 0,05$, lo que indica el nivel de asociación entre las variables morfológicas estudiadas.

Se utilizó la función denominada “corrplot.mixed(M)” del paquete “corrplot” con el método de visualización cuadrado “square”, función que permite tener estilos de agrupación y visualización mixtos. Para lo cual se partió desde el siguiente código R (script):

```
corrplot.mixed(order.T0.med2, tl.pos = "lt", upper="square", tl.cex=1,  
number.cex=1, mar=c(0,0,1,0),  
main="T0", p.mat=pval.T0.med, sig.level =  
0.05, insig = "blank")
```

Ver script detallado en Anexo 7

En el gráfico de correlaciones, las correlaciones positivas se mostraron en color azul y las correlaciones negativas en color rojo, donde la intensidad del color y el tamaño del recuadro son proporcionales a los coeficientes de correlación (ver código y matriz de correlación completa en Anexo 8). Los valores se encuentran en una escala entre -1 y 1 y entre más alta sea la proximidad a 1 se dirá que las especies tienen una correlación de tipo positiva, y si la proximidad es al valor -1, se dice entonces que existe una correlación de tipo negativa. Valores próximos a cero indica la posible inexistencia de asociación lineal entre las especies.

b. Diagrama de caja (BoxPlot)

Para la representación de los datos numéricos a través de sus cuartiles se utilizó la función *boxplot()* que viene incluida en el paquete estadístico de R, en donde se separan en tres cuartiles el primero que separa al 25 %; la mediana que es el segundo cuartil, que permite dividir al conjunto de datos en dos partes de modo tal que cada parte tendrá el 50 % de los datos; y el tercer cuartil que separa al 75 % de los datos una vez de ordenarlos a todos de menor a menor (Ver código en Anexo 8 y figuras con datos reales Anexo 9 y 10).

Para ello primero se realizó un procesamiento de los datos a través de la diferencia de la última medición con la primera, dentro de las 13 mediciones por cada tratamiento y por cada variable morfológica utilizando de igual manera el entorno R con el siguiente script:

```
data.alt <- data[,1:5]
colnames(data.alt) <- c("T0", "T1", "T2", "T3", "T4")
boxplot(data.alt, las=1, col = terrain.colors(5),
        main = "Altura", ylab = "[cm]")
```

c. PCA individuales

Para la representación de datos y su influencia o peso se utilizó el análisis de componentes principales PCA (individuales) con el siguiente script:

```
pca.ind.co <- prcomp(data, scale = TRUE, center = T)
```

Seguidamente,

```
fviz_pca_ind(pca.ind.co,
            col.ind = "contrib",
            pointsize = "contrib",
            gradient.cols = c("darkgreen", "darkblue",
```

```
"tan3", "orange", "red"),
      legend.title = "Contrib.",
      repel = TRUE)
```

Ver script detallado en Anexo 8

d. PCA Biplot

Adicionalmente, se utilizó también un análisis de componentes principales PCA tipo Biplot para una mejor interpretación del grado de relación entre cada variable con el siguiente scrip:

```
fviz_pca_var(pca.var.co.means,
             #col.var           =           "contrib",
             col.var   =   c("Altura", "Diámetro", "Hojas"),
             repel     =           F,
             legend.title = "Variables:")
```

Ver script detallado en Anexo 8

3.5. Difusión de los resultados a los actores involucrados en el sector forestal

La socialización de la información y conocimientos generados de la investigación se realizó dentro de las Jornadas académicas – Semana del Estudiante de la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables organizado por la Universidad Nacional de Loja (UNL) el día 14 de febrero de 2020. Aquí se presentó un Poster científico y muestras de cortes anatómicos de madera con proyección directa desde un microscopio *Olympus BX41TF* con cámara digital. Los resultados fueron socializados con docentes investigadores, técnicos, estudiantes y público en general (Anexo 11).

4. RESULTADOS

4.1. Porcentajes de lignina y celulosa en el xilema de *Acacia macracantha*

Luego de seis meses de monitoreo se encontró que en *Acacia macracantha* el tratamiento de sequía severa (T2) formó el mayor porcentaje de celulosa (16,31 %) mientras que el testigo (T0) formó el menor porcentaje de celulosa (2,23 %). Respecto al porcentaje de lignina, en todos los tratamientos se observó una pérdida; notándose la menor pérdida en el T0 (-2,23 %), mientras que el T2 (-16,31 %) presentó la mayor pérdida de lignina (Tabla 7).

En los porcentajes de lignina y celulosa en cortes anatómicos de madera de *Acacia macracantha* se observó para el tratamiento testigo (T0) antes del tratamiento 42,28 % de celulosa y 57,72 % de lignina, después del tratamiento de seis meses: 55,49 % (lignina) 44,51 % (celulosa). Por otro lado, dentro del tratamiento sequía moderada (T1), antes: 63,49 % (lignina) 36,51 % (celulosa), después: 48,00 % (lignina) 52,00 % celulosa. En el caso del tratamiento sequía severa (T2) antes: 74,25 % (lignina) 25,75 % (celulosa), después: 57,94 % (lignina) y 42,06 % (celulosa). Para el tratamiento sequía moderada + fertilizante (T3) antes: 68,60 % (lignina) 31,40 % (celulosa) y después: 56,04 % (lignina) 43,96 % (celulosa). Por último, el tratamiento sequía severa + fertilizante (T4) antes: 57,63 % (lignina) 42,37 % (celulosa), y después: 48,39 % (lignina) 51,61 % (celulosa) (Tabla 7).

Tabla 7. Áreas en mm² (lignina + celulosa) y en porcentaje de las diferencias de lignina y celulosa en el xilema de *Acacia macracantha* antes y después de cada tratamiento bajo condiciones de invernadero

Trat.	Descripción	Celulosa (mm ²)	Lignina (mm ²)	Área Total (mm ²)	-	Celulosa (%)	Lignina (%)	Área Total (%)
ANTES del tratamiento								
T0	Testigo	0,52	0,71	1,23		42,28	57,72	100
T1	Sequía moderada	0,46	0,80	1,26		36,51	63,49	100
T2	Sequía severa	0,43	1,24	1,67		25,75	74,25	100
T3	Sequía moderada + fertilizante	0,38	0,83	1,21		31,40	68,60	100
T4	Sequía severa + fertilizante	0,75	1,02	1,77		42,37	57,63	100
	<i>Subtotal (promedio)</i>	<i>0,51</i>	<i>0,92</i>	<i>1,43</i>		<i>35,66</i>	<i>64,34</i>	<i>100</i>
DESPUÉS del tratamiento								
T0	Testigo	0,81	1,01	1,82		44,51	55,49	100
T1	Sequía moderada	0,39	0,36	0,75		52,00	48,00	100
T2	Sequía severa	0,45	0,62	1,07		42,06	57,94	100
T3	Sequía moderada + fertilizante	0,40	0,51	0,91		43,96	56,04	100
T4	Sequía severa + fertilizante	0,32	0,30	0,62		51,61	48,39	100
	<i>Subtotal (promedio)</i>	<i>0,47</i>	<i>0,56</i>	<i>1,03</i>		<i>46,83</i>	<i>53,17</i>	<i>100</i>
DIFERENCIA (después - antes)								
T0	Testigo	0,29	0,30	0,59		2,23	-2,23	
T1	Sequía moderada	-0,07	-0,44	-0,51		15,49	-15,49	
T2	Sequía severa	0,02	-0,62	-0,6		16,31	-16,31	
T3	Sequía moderada + fertilizante	0,02	-0,32	-0,3		12,55	-12,55	
T4	Sequía severa + fertilizante	-0,43	-0,72	-1,15		9,24	-9,24	
	<i>Subtotal (promedio)</i>	<i>-0,03</i>	<i>-0,36</i>	<i>-0,39</i>		<i>11,16</i>	<i>-11,16</i>	
TOTAL (antes + después)								

Trat.	Descripción	Celulosa (mm ²)	Lignina (mm ²)	Área Total (mm ²)	Celulosa (%)	Lignina (%)	Área Total (%)
T0	Testigo	1,33	1,72	3,05	44	56	100
T1	Sequía moderada	0,85	1,16	2,01	42	58	100
T2	Sequía severa	0,88	1,86	2,74	32	68	100
T3	Sequía moderada + fertilizante	0,78	1,34	2,12	37	63	100
T4	Sequía severa + fertilizante	1,07	1,32	2,39	45	55	100
	<i>Subtotal (promedio)</i>	<i>0,98</i>	<i>1,48</i>	<i>2,46</i>	<i>39,91</i>	<i>60,09</i>	<i>100</i>

Respecto al incremento del área total (lignina + celulosa) después de cada tratamiento, se evidenció que T0 tuvo el mayor crecimiento (60 %), mientras que el menor crecimiento lo tuvo T4 (sequía severa + fertilizante) con un 26 % (Figura 26). Tomando como referencia al máximo crecimiento que obtuvo *Acacia macracantha* en el T0 (100 %), se pudo observar que a consecuencia del estrés hídrico las plántulas dejaron de crecer un ~39,50 % en promedio (Figura 27). El Tratamiento T4 alcanzó los menores porcentajes de crecimiento en 43 %, mientras que T3 hasta un 72 %.

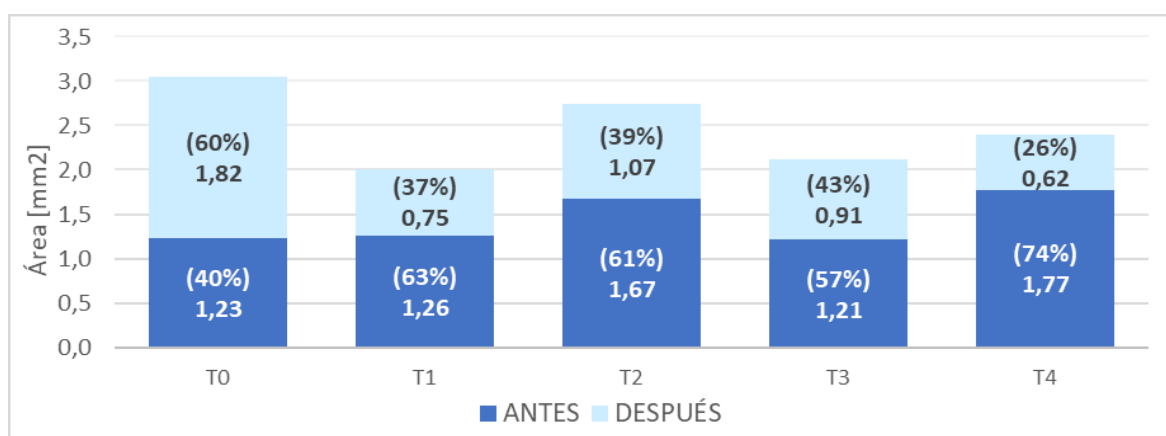


Figura 26. Incremento del área total (lignina + celulosa) antes y después de cada tratamiento en *Acacia macracantha*.

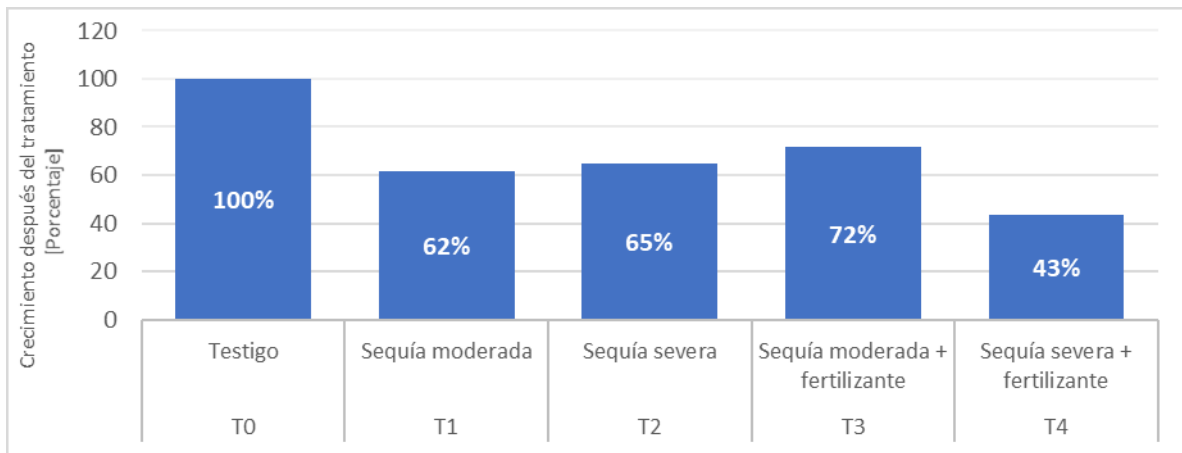


Figura 27. Crecimiento total (lignina + celulosa) en porcentaje de *Acacia macracantha* durante seis meses de crecimiento tomando como referencia del 100 % al T0.

**Testigo
(T0)**



MaAmT0_02

MaAmT0_10

MaAmT0_11

**Sequía moderada
(T1)**



MaAmT1_11

MaAmT1_13

MaAmT1_17

**Sequía severa
(T2)**

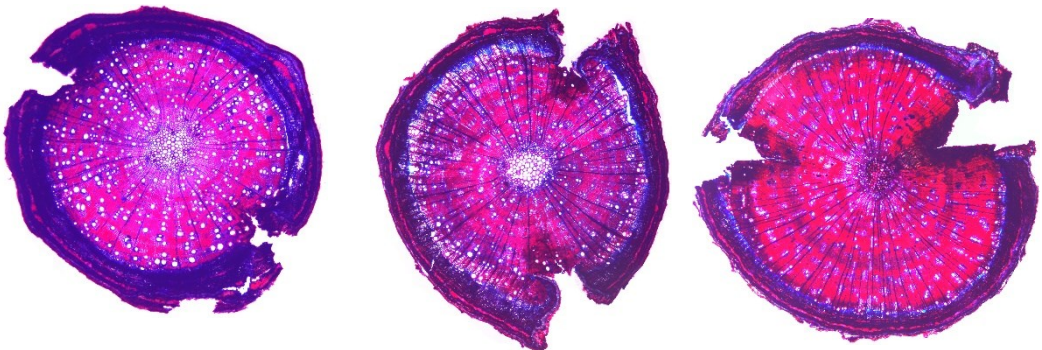


MaAmT2_02

MaAmT2_04

MaAmT2_20

**Sequía moderada +
Fertilizante (T3)**



MaAmT3_01

MaAmT3_17

MaAmT3_19

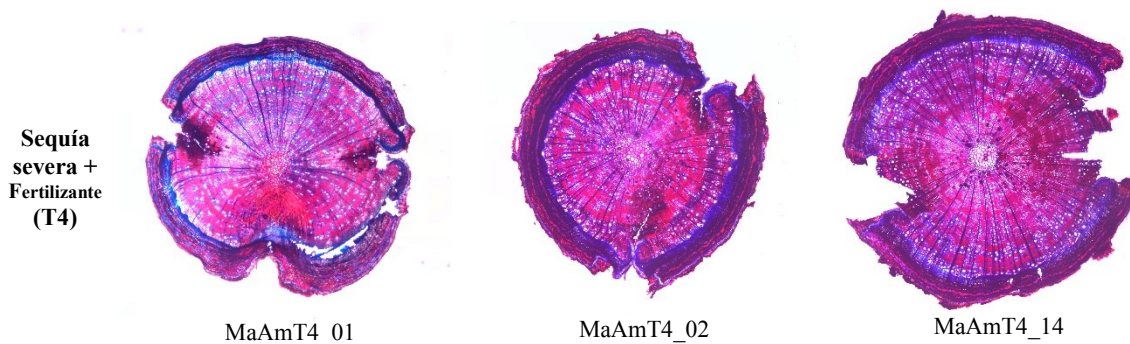


Figura 28. Cortes transversales con corteza de *Acacia macracantha* de tres repeticiones por cada tratamiento.

4.2. Porcentajes de lignina y celulosa en el xilema de *Cinchona officinalis*

Luego de seis meses de seguimiento se encontró que en *Cinchona officinalis* el tratamiento testigo (T0) fue el único que tuvo un leve incremento en el porcentaje de celulosa (0,08 %), mientras que en el tratamiento sequía severa (T4) fue el que más redujo su porcentaje de celulosa en un 27,42 %. Al contrario, la lignina tuvo su mayor incremento en el T4 (27,42 %), mientras que la menor fue T0 con una reducción de 0,08 % (Tabla 8).

En los porcentajes de lignina y celulosa de *Cinchona officinalis* se observó el tratamiento testigo (T0) antes del tratamiento de 50,85 % y 49,15 % respectivamente, después del tratamiento un 50,77 % (lignina) y 49,23 % (celulosa). Por otro lado, el tratamiento sequía moderada (T1), antes se encontró 51,94 % (lignina) y 48,06 % (celulosa), después 69,01 % (lignina) y 30,99 % (celulosa). El tratamiento sequía severa (T2) mostró 57,14 % (lignina) y 42,86 % (celulosa) antes, y después 58,38 % (lignina) y 41,62 % (celulosa). En el tratamiento sequía moderada + fertilizante (T3) antes 56,48 % (lignina) y 43,52 % (celulosa), después 70,71 % (lignina) y 29,19 % (celulosa). Por último, el tratamiento sequía severa + fertilizante antes 46,26 % (lignina) y 53,74 % (celulosa), y después 73,68 % (lignina) y 26,32 % (celulosa) (Tabla 8).

Tabla 8. Áreas en mm² (lignina + celulosa) y en porcentaje de las diferencias de lignina y celulosa en el xilema de *Cinchona officinalis* antes y después de cada tratamiento bajo condiciones de invernadero.

Trat.	Descripción	Celulosa (mm ²)	Lignina (mm ²)	Área Total (mm ²)	Celulosa (%)	Lignina (%)	Área Total (%)
ANTES del tratamiento							
T0	Testigo	0,58	0,60	1,18	49,15	50,85	100
T1	Sequía moderada	0,62	0,67	1,29	48,06	51,94	100
T2	Sequía severa	0,90	1,20	2,10	42,86	57,14	100
T3	Sequía moderada + fertilizante	0,84	1,09	1,93	43,52	56,48	100
T4	Sequía severa + fertilizante	1,15	0,99	2,14	53,74	46,26	100
	<i>Subtotal (promedio)</i>	<i>0,82</i>	<i>0,91</i>	<i>1,73</i>	<i>47,47</i>	<i>52,53</i>	<i>100</i>
DESPUÉS del tratamiento							
T0	Testigo	0,96	0,99	1,95	49,23	50,77	100
T1	Sequía moderada	0,22	0,49	0,71	30,99	69,01	100
T2	Sequía severa	0,60	0,84	1,44	41,67	58,33	100
T3	Sequía moderada + fertilizante	0,29	0,70	0,99	29,29	70,71	100
T4	Sequía severa + fertilizante	0,30	0,84	1,14	26,32	73,68	100
	<i>Subtotal (promedio)</i>	<i>0,47</i>	<i>0,77</i>	<i>1,25</i>	<i>35,50</i>	<i>64,50</i>	<i>100</i>
DIFERENCIA (después - antes)							
T0	Testigo	0,38	0,39	0,77	0,08	-0,08	
T1	Sequía moderada	- 0,40	- 0,18	- 0,58	- 17,08	17,08	
T2	Sequía severa	- 0,30	- 0,36	- 0,66	- 1,19	1,19	
T3	Sequía moderada + fertilizante	- 0,55	- 0,39	- 0,94	- 14,23	14,23	
T4	Sequía severa + fertilizante	- 0,85	- 0,15	- 1,00	- 27,42	27,42	

Trat.	Descripción	Celulosa (mm ²)	Lignina (mm ²)	Área Total (mm ²)	Celulosa (%)	Lignina (%)	Área Total (%)
	<i>Subtotal (promedio)</i>	- 0,34	- 0,14	- 0,48	- 11,97	11,97	
TOTAL (antes + después)							
T0	Testigo	1,54	1,59	3,13	49	51	100
T1	Sequía moderada	0,84	1,16	2,00	42	58	100
T2	Sequía severa	1,50	2,04	3,54	42	58	100
T3	Sequía moderada + fertilizante	1,13	1,79	2,92	39	61	100
T4	Sequía severa + fertilizante	1,45	1,83	3,28	44	56	100
	<i>Subtotal (promedio)</i>	1,29	1,68	2,97	43,30	56,70	100

Respecto al incremento del área total (lignina + celulosa) después de cada tratamiento, se evidenció que T0 tuvo el mayor crecimiento (62 %), mientras que el menor crecimiento lo tuvo T3 (sequía moderada + fertilizante) con un 34 % (Figura 29). Tomando como referencia al máximo crecimiento que obtuvo *Cinchona officinalis* en el T0 (100 %), se pudo observar que a consecuencia del estrés hídrico las plántulas dejaron de crecer un ~40 % en promedio (Figura 30). T3 y T4 alcanzaron los menores porcentajes de crecimiento, 55 y 56 % respectivamente, mientras que T2 sólo pudo crecer hasta un 66 %.

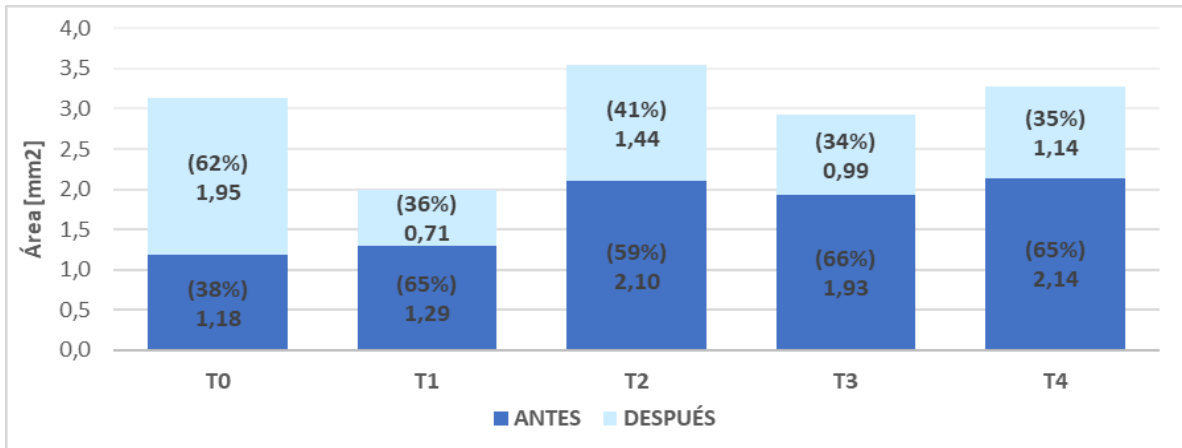


Figura 29. Incremento del área total (lignina + celulosa) antes y después de cada tratamiento de *Cinchona officinalis*.

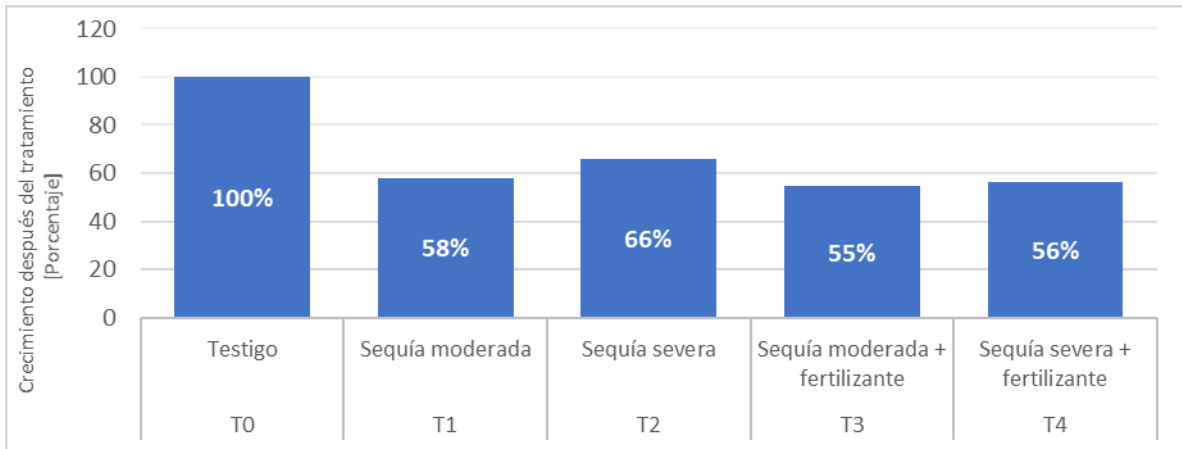


Figura 30. Crecimiento total (lignina + celulosa) en porcentaje de *Cinchona officinalis* durante seis meses de crecimiento tomando como referencia del 100 % al T0.

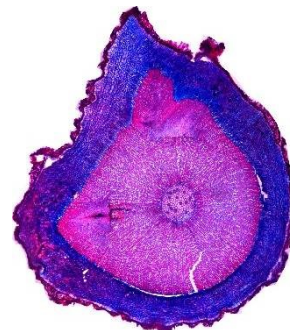
**Testigo
(T0)**



LoCoT0_01

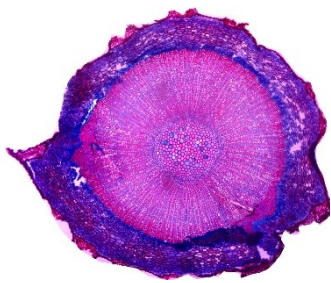


LoCoT0_14

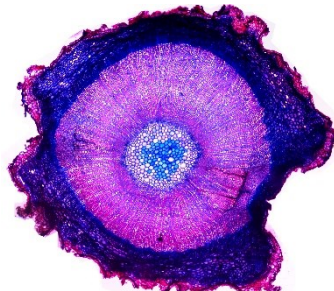


LoCoT0_18

**Sequía
moderada
(T1)**



LoCoT1_13

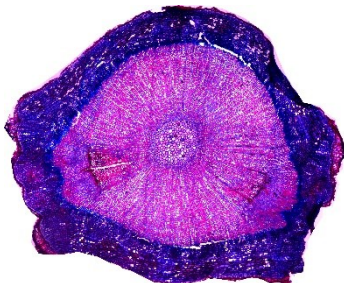


LoCoT1_15



LoCoT1_16

**Sequía
severa
(T2)**



LoCoT2_09



LoCoT2_13



LoCoT2_16

**Sequía
moderada
+
Fertilizante
(T3)**



LoCoT3_02



LoCoT3_14



LoCoT3_16



Figura 31. Cortes transversales con corteza de *Cinchona officinalis* de tres repeticiones por cada tratamiento.

4.3. Cambios anatómicos de la madera

La estructura anatómica en el xilema mostró diferencias principalmente en el tamaño y la agrupación de vasos. En el T0 ambas especies mostraron vasos de mayor tamaño en el área formada después del tratamiento, y vasos de menor tamaño en los tratamientos de sequía, siendo más evidente en *Acacia macracantha*. Entre los tratamientos con sequía (T1 a T4) no fue muy notable la diferencia de tamaño de vasos entre el área inicial y la nueva área formada luego de cada tratamiento. Sin embargo, cambios en la agrupación de vasos fueron más notables, sobre todo en el T4 de *Acacia macracantha*, observándose algunos grupos comunes de vasos mayores de tres (Figura 28 y 31).

Partiendo del hecho que las fibras tienen mayor cantidad de lignina, y el parénquima mayor cantidad de celulosa, se observó que *Acacia macracantha* en promedio su área de fibras (lignina) disminuyó de 64,34 % a un 53,17 %, y el área de parénquima (celulosa) aumentó de un 35,66 % a un 46,83 %. *Cinchona officinalis* reaccionó de manera contraria, el área de fibras aumentó del 52,53 % al 64,50 %, y el área de parénquima disminuyó de un 47,47 % a un 35,50 %.

Por otro lado, respecto al cambium vascular y floema, se observó que *Cinchona officinalis* tuvo una respuesta más rápida y exitosa que *Acacia macracantha* para regenerar el cambium vascular (Figura 28 y 31). En todos los tratamientos *Cinchona officinalis* logró formar un nuevo cambium vascular y floema dando lugar a una nueva corteza luego del corte realizado al inicio del experimento. Sin embargo, *Acacia macracantha* incluso en el tratamiento sin estrés hídrico T0 no pudo regenerar su cambium vascular, pero mostró una tendencia para cerrar su cicatriz. En la Repetición 2 del T0 (Figura 28) se evidenció un inicio de fusión del cambium vascular al unirse la nueva corteza después del corte.

4.4. Correlación entre las variables morfológicas de *Acacia macracantha*

El análisis de correlación al 0,95 de significancia ($p\text{-value} = 0,05$) entre las variables morfológicas de *Acacia macracantha* mostró los siguientes resultados en la Figura 32: El testigo (T0) obtuvo una correlación positiva con la altura y el diámetro ($r = 0,97$). El tratamiento de sequía moderada (T1) así mismo mostró una alta correlación entre la altura y el diámetro ($r = 0,9$), y una correlación negativa entre altura y el estado fitosanitario ($r = -0,77$). En el tratamiento sequía severa (T2) tuvo su mayor correlación entre las variables diámetro y altura ($r = 0,93$), y de manera negativa número de hojas con el diámetro ($r = -0,45$). En el tratamiento sequía moderada + fertilizante (T3) las variables que tuvieron mayor correlación fueron altura con diámetro ($r = 0,83$); y de manera negativa estado fitosanitario con altura ($r = -0,94$), y estado fitosanitario con diámetro ($r = -0,89$). Por último, en el tratamiento sequía severa + fertilizante (T4) las variables que tuvieron mayor correlación fueron diámetro con altura ($r = 0,95$), y de manera negativa diámetro con estado fitosanitario ($r = -0,79$).

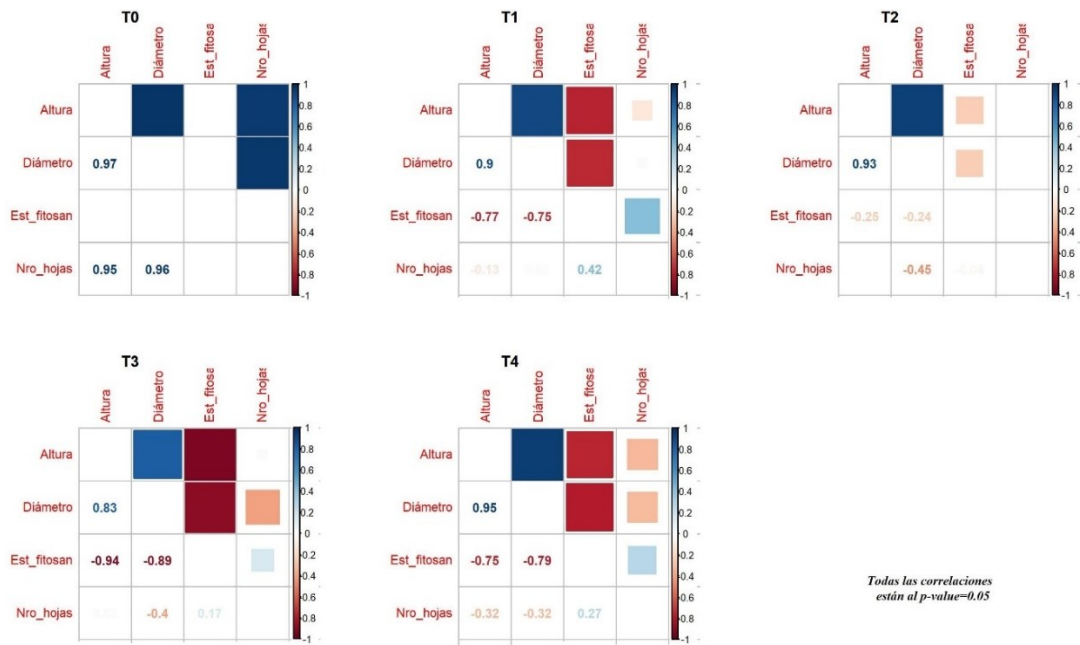


Figura 32. Matriz de correlación de variables morfológicas de *Acacia macracantha* bajo condiciones de invernadero durante el periodo de estudio. $p\text{-value}=0,05$.

Por otro lado, el análisis comparativo promedio de 20 individuos por cada tratamiento de la Figura 33 muestra lo siguiente: 1. Altura.- El tratamiento testigo (T0) tuvo el mayor crecimiento, mientras que el tratamiento de sequía severa + fertilizante (T4) resultó tener el menor crecimiento. 2. Diámetro.- De igual manera el T0 mostró el mayor crecimiento en diámetro mientras que el T4 presentó los menores valores. 3. Número de hojas.- El tratamiento T0 presentó el mayor número de hojas, y el T4 presentó el menor número de hojas. 4. Estado fitosanitario.- Todos los tratamientos de manera general tuvieron un excelente estado fitosanitario. 5. Mortalidad.- Únicamente los tratamientos con fertilizante T3 y T4 tuvieron un individuo que murió, el resto de los tratamientos no registró ninguna mortalidad durante estos seis meses de monitoreo.

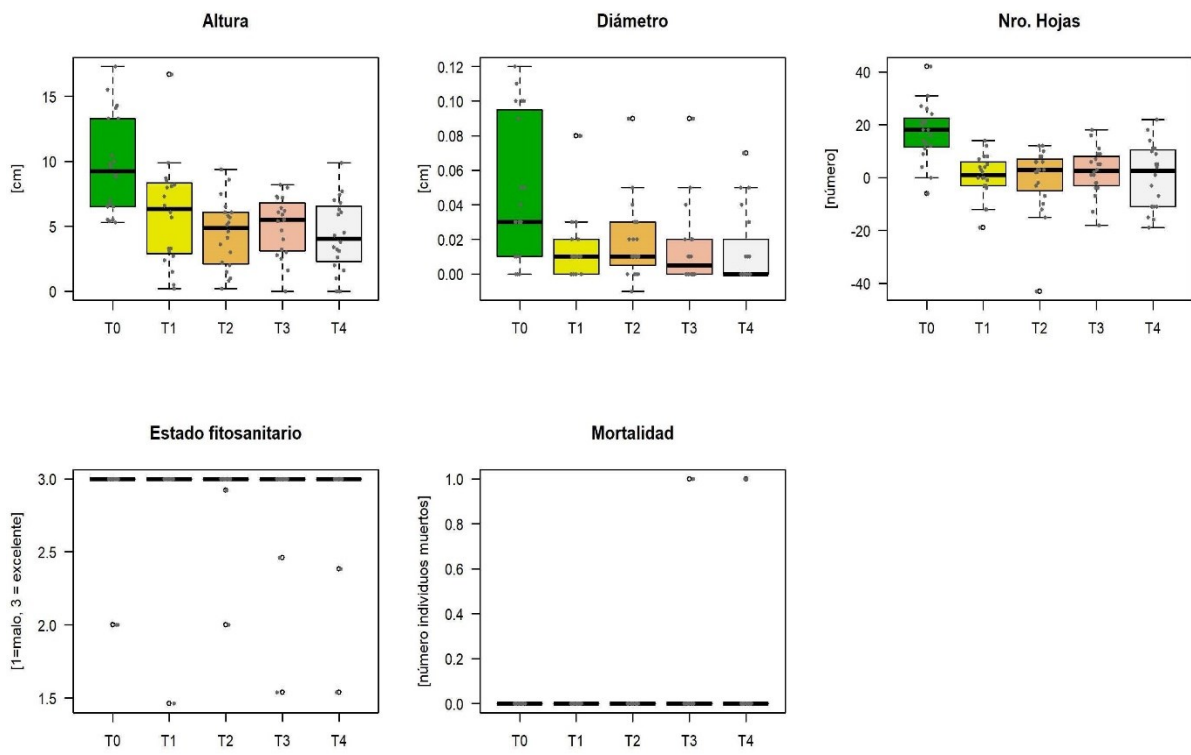


Figura 33. Diagramas de caja (*Box plot*) del incremento promedio de las cinco variables morfológicas en plántulas de *Acacia macracantha* obtenido en los diferentes tratamientos bajo condiciones de invernadero en el periodo del estudio.

Visto desde otra perspectiva con un Análisis de Componentes Principales entre los 100 individuos de *Acacia macracantha* sin hacer distinción entre tratamientos, se observó que el *número de hojas* fue la variable morfológica con mayor contribución o variabilidad seguida de la *altura*. Al contrario, el *diámetro* y *estado fitosanitario* presentaron la menor variabilidad entre individuos (Figura 34).

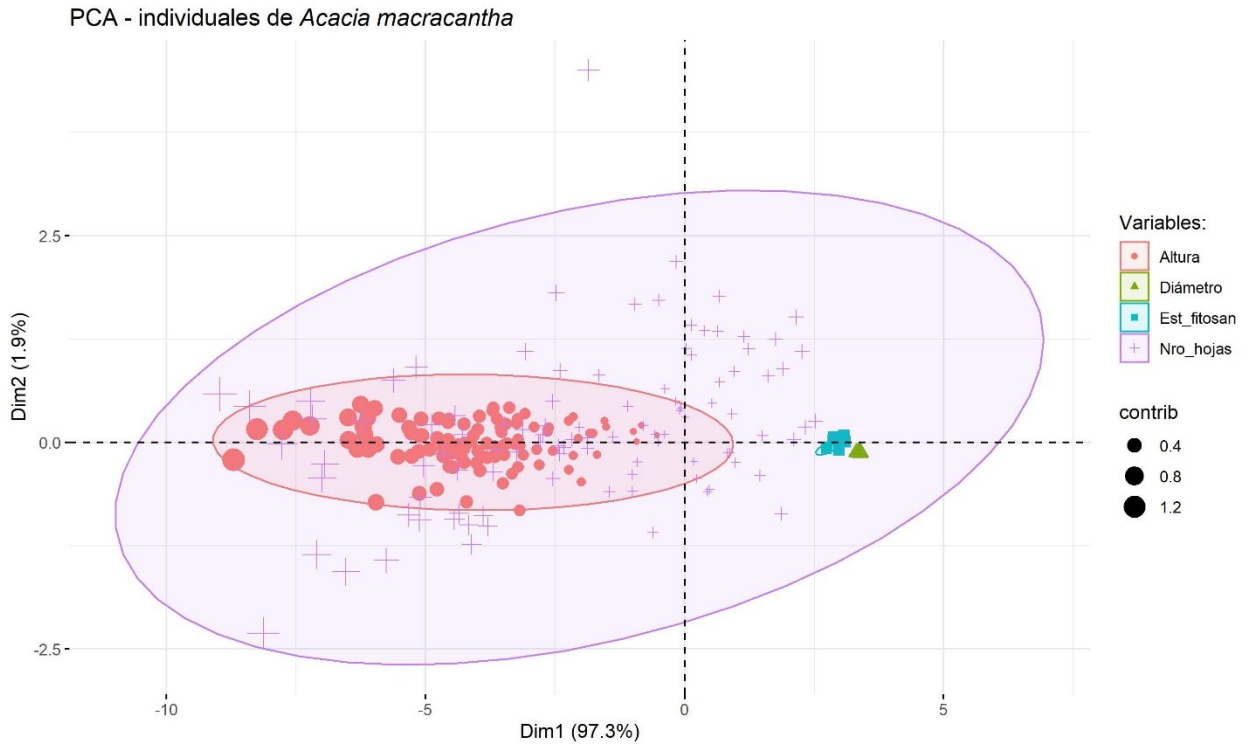


Figura 34. Análisis de componentes principales individuales de *Acacia macracantha*.

Finalmente, con el Análisis de Componentes Principales (*Biplot*) con datos promedio de *número de hojas*, *altura* y *diámetro*, se observó una fuerte relación entre la altura y el diámetro, mostrando a la variable número de hojas tener una relación independiente con las otras variables morfológicas. Así también, se pudo visualizar que el análisis de las 13 mediciones mostró una decaída en la medición 8 y 9, y un aumento en las mediciones 2, 5 y 6 (Figura 35).

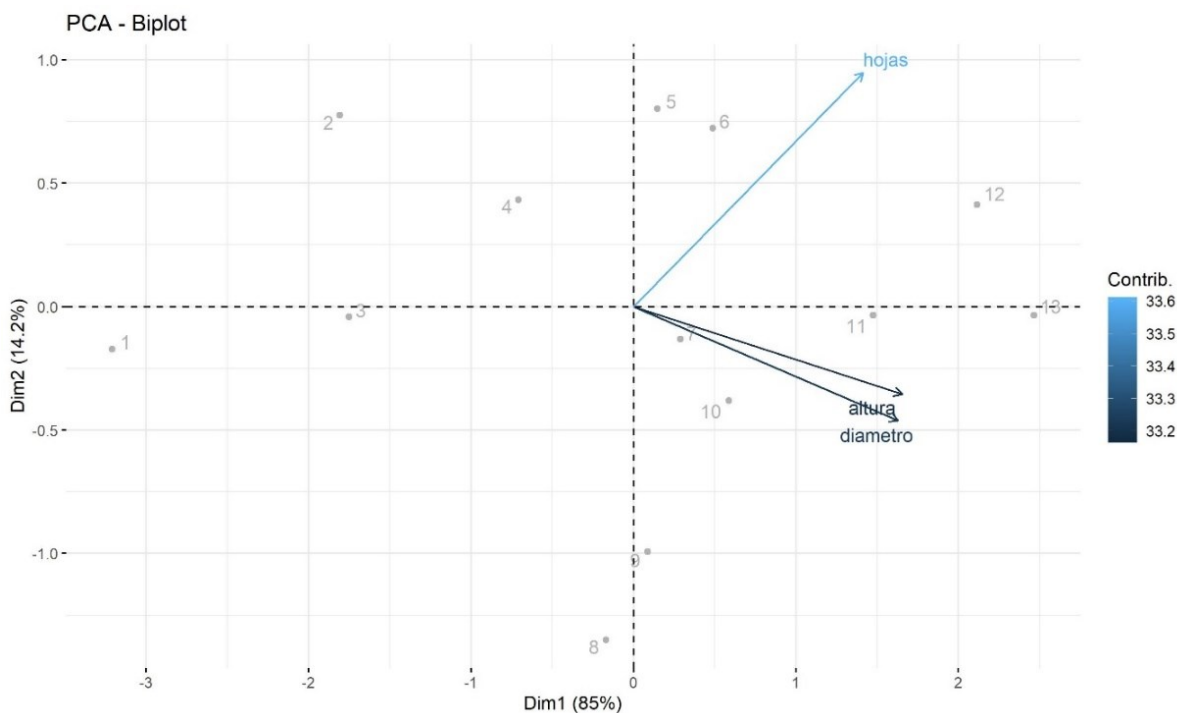


Figura 35. Análisis de componentes principales promedio de *Acacia macracantha*.

4.5. Correlación entre las variables morfológicas de *Cinchona officinalis*

El análisis de correlación (p -value = 0,05) (Figura 36): 1. El testigo (T0) mostró una correlación positiva entre la altura y el diámetro ($r = 0,99$). 2. El tratamiento sequía moderada (T1) así mismo mostró mayor correlación entre la altura y el diámetro ($r = 0,95$) y de manera negativa entre el número de hojas y el estado fitosanitario ($r = -0,34$). 3. En el tratamiento sequía severa (T2) mostró correlación de manera positiva entre la altura y el número de hojas ($r = 0,91$), y de manera negativa el diámetro con el estado fitosanitario ($r = -0,63$). 4. Para el tratamiento sequía moderada + fertilizante (T3) existió mayor correlación de manera positiva entre la altura con el número de hojas ($r = 0,91$) y de manera negativa el estado fitosanitario con el diámetro ($r = -0,27$). 5 Por último, en el tratamiento sequía severa + fertilizante (T4) mostró la mayor correlación de manera positiva el número de hojas con altura ($r = 0,91$) y de manera negativa el número de hojas con el diámetro y el estado fitosanitario ($r = -0,81$).

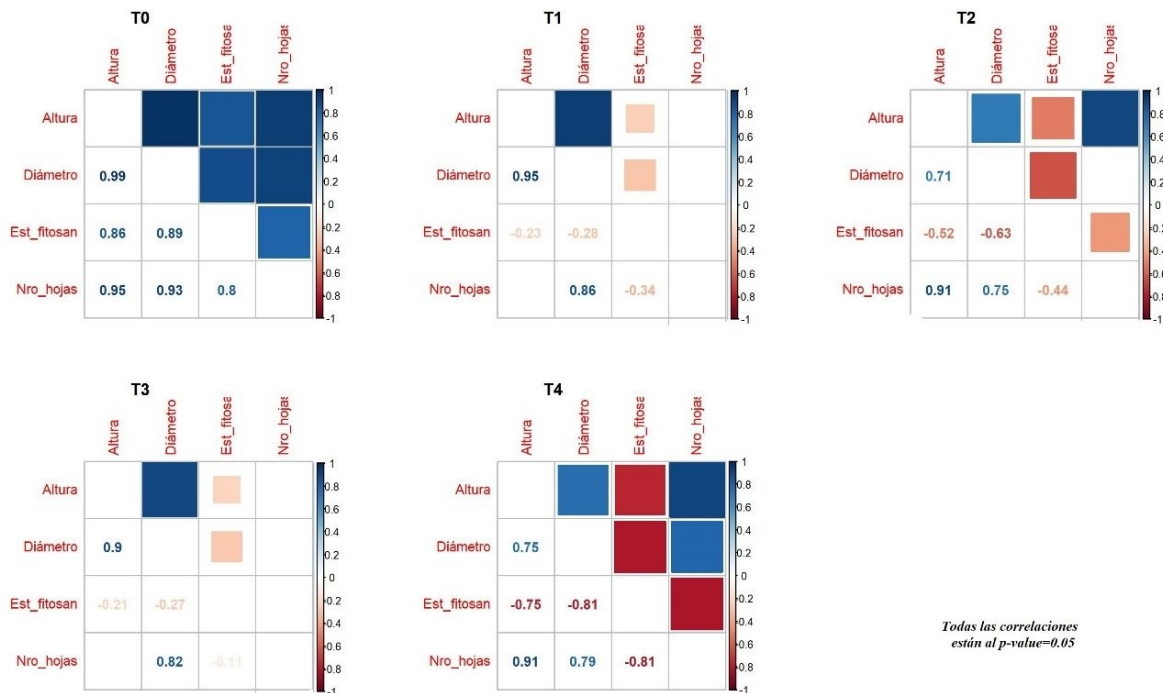


Figura 36. Matriz de correlación de variables morfológicas de *Cinchona officinalis* bajo condiciones de invernadero durante el periodo de estudio. $p\text{-value} = 0,05$.

Por otro lado, el análisis comparativo y promedio de 20 individuos por cada tratamiento que se representa en la Figura 37 muestra lo siguiente: 1. Altura.- El tratamiento testigo (T0) tuvo mayor crecimiento, mientras que el T4 presentó los menores valores. 2. Diámetro.- De igual manera el T0 mostró mayor crecimiento, mientras que el T4 presentó los menores valores. 3. Número de hojas.- El tratamiento T0 presentó el mayor número de hojas y el T3 menores valores. 4. Estado fitosanitario.- El tratamiento T0 presentó el mayor nivel (excelente), y el T4 el nivel menor (malo). 5. Mortalidad.- Todos los tratamientos registraron mortalidad con excepción del T0, y un mayor impacto en el T4 durante estos seis meses de monitoreo.

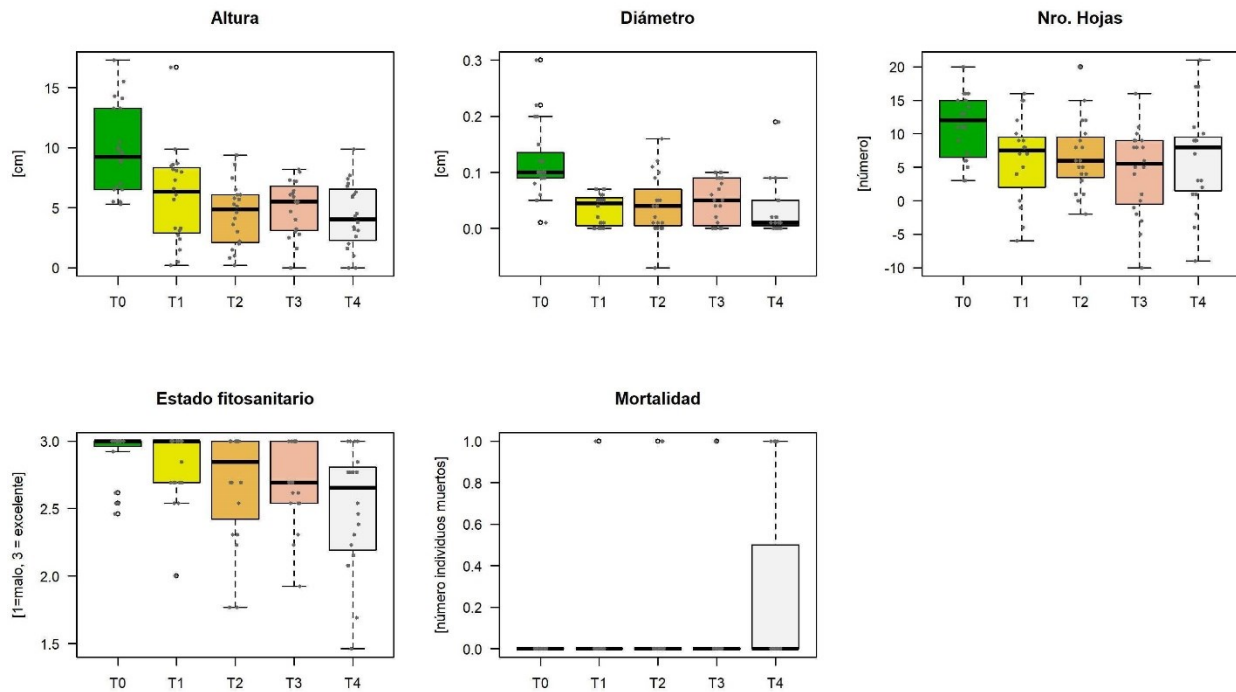


Figura 37. Diagramas de caja (*Box plot*) del incremento promedio de las cinco variables morfológicas en plántulas de *Cinchona officinalis* obtenido en los diferentes tratamientos bajo condiciones de invernadero en el periodo del estudio.

Desde otro punto de vista con un Análisis de Componentes Principales entre los 100 individuos de *Cinchona officinalis* sin realizar diferenciación entre tratamientos, se observó que el *número de hojas* con la *altura* fueron las variables morfológicas con más variabilidad entre individuos. Al contrario, el *diámetro* fue la variable con menor variabilidad seguido del *estado fitosanitario* (Figura 38).

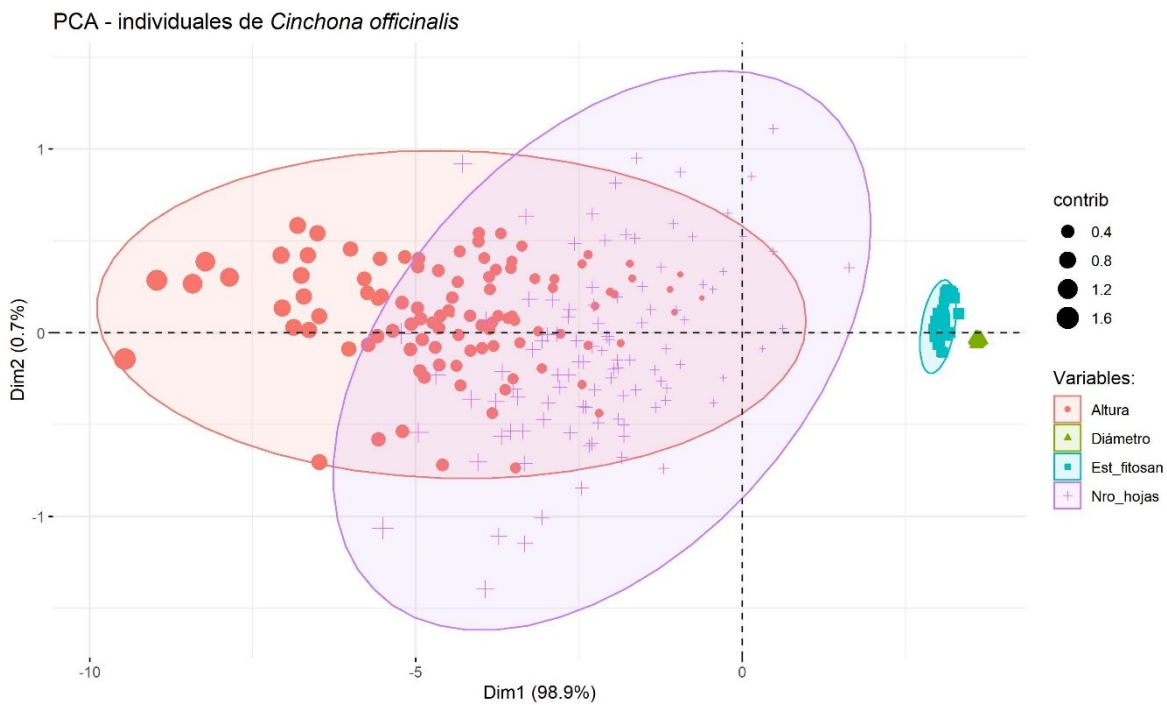


Figura 38. Análisis de componentes principales individuales de *Cinchona officinalis*.

Finalmente, con el Análisis de Componentes Principales (*Biplot*) con datos promedio de *número de hojas*, *altura* y *diámetro*, se observó una fuerte relación entre la altura y el diámetro, mostrando que la variable número de hojas tiene menor relación. Así también, se pudo visualizar que el análisis de las 13 mediciones mostró una decaída en la medición 6 y 7, y un aumento en la 3 y 4 (Figura 39).

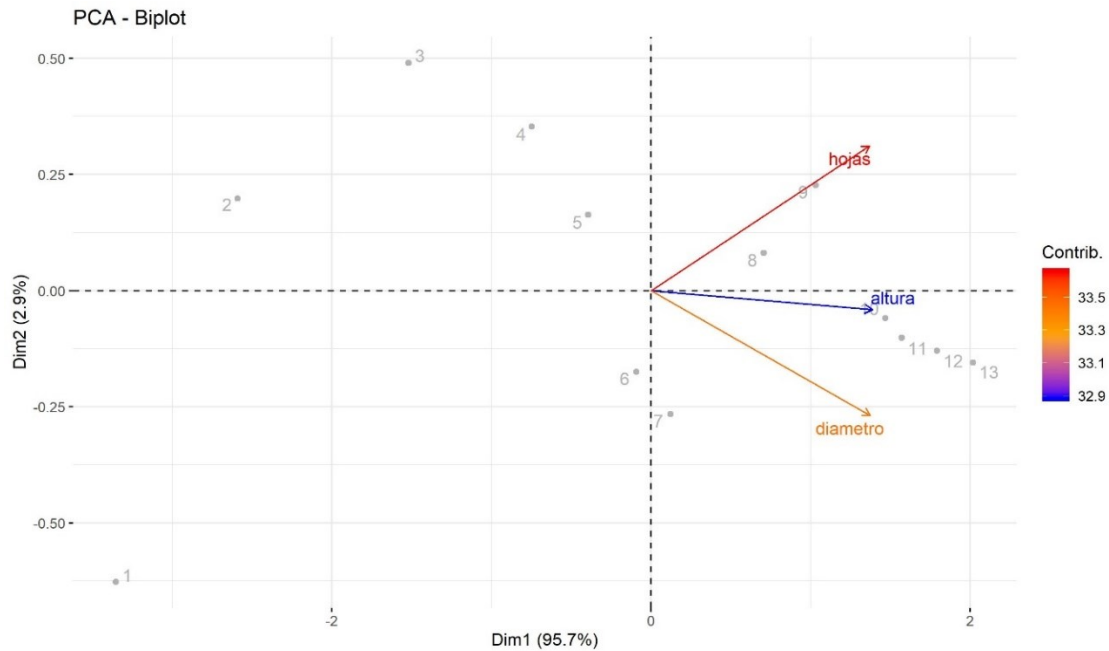


Figura 39. Análisis de componentes principales promedio de *Cinchona officinalis*.

4.6. Difusión de los resultados

Los resultados obtenidos en este estudio fueron socializados dentro de las jornadas académicas - Semana del Estudiante, organizado por la Universidad Nacional de Loja (UNL), del 10 al 14 de febrero del 2020 a través del Laboratorio de Anatomía de Maderas Tropicales con el Poster “**Impacto del estrés hídrico en la anatomía de la madera y morfología de *Acacia macracantha* Willd. Y *Cinchona officinalis* L. bajo condiciones de invernadero**”, (Figura 40), ver poster y certificado en el Anexo 10.



Figura 40. Socialización de los resultados de la investigación en la UNL, mediante un póster científico.

5. DISCUSIÓN

5.1. Porcentajes de lignina y celulosa en el xilema

Los resultados de este estudio demuestran que en *Acacia macracantha* en el tratamiento testigo (T0) los niveles de celulosa y lignina se mantuvieron relativamente similares durante el periodo de estudio. Mientras tanto, en los otros tratamientos de sequía (T1-T4) se observó un incremento en el porcentaje de celulosa y una disminución en el porcentaje de lignina, contrario a lo que se esperaba de acuerdo a la hipótesis planteada (hipótesis 1: El estrés hídrico bajo condiciones controladas incide negativamente en la producción de celulosa y es favorable en la producción de lignina de *Acacia macracantha* Willd. y *Cinchona officinalis* L.). El aumento en el porcentaje de celulosa en todos los tratamientos de sequía podría explicarse por el hecho que los individuos ya estaban sometidos a estrés antes de iniciar el experimento debido a que se encontraban en condiciones desfavorables en su lugar de procedencia (falta de riego, tamaño inadecuado de fundas, falta de sustrato, falta de tratamientos de plaguicidas, ningún tipo de cuidado silvicultura).

Al preparar estas plántulas de *A. macracantha* para exponerlas a las diferentes condiciones de los tratamientos, de alguna manera se les proporcionó condiciones más favorables para su desarrollo que en las tenían donde se encontraban antes del experimento, como, por ejemplo, el repique a fundas de mayor tamaño, sustrato mejorado y cuidados para el control de malezas y plagas dentro del invernadero. En el caso del T0, la poca variación en el contenido de celulosa y lignina también se entiende por el hecho de que es una especie que está adaptada para vivir en ambientes de poca disponibilidad de agua, y por lo que es posible que el tratamiento de riego constante no haya causado mayor impacto en el desarrollo de esta especie.

Según lo reportado por Mostacero, Mejía y Gamarra (2009) *Acacia macracantha* crece bajo una gran variedad de condiciones ambientales como zonas desérticas, quebradas, montes ribereños, valles, pie de montes y laderas. Además, es una especie que resiste periodos largos de sequías, por lo que se supone que está adaptada para vivir en condiciones de estrés hídrico. Similar a lo mencionado por Nilsen y Orcutt (1996) quienes mencionan que se ha demostrado que las plantas evolutivamente han respondido al estrés hídrico desarrollando adaptaciones a nivel morfológico, anatómico y celular, las cuales le han permitido vivir en constante condición de estrés hídrico; asimismo, que las plantas que son capaces de adquirir más agua o que hacen un uso más eficiente de ésta podrán tener resistencia al estrés por sequía.

Para el caso de *Cinchona officinalis* el tratamiento T0 mostró la misma tendencia que el observado para *Acacia macracantha* de mantener constante los niveles de celulosa y lignina en el periodo de estudio; pero a diferencia de esa especie *C. officinalis* de manera general presentó una tendencia a disminuir el contenido de celulosa y aumentar la lignina durante el experimento tal como se esperaba de acuerdo con la hipótesis formulada para este análisis (hipótesis 1). Lo reportado para *C. officinalis* es similar a lo mencionado por Valladares et al. (2004) quienes mencionan que las especies perennifolias disminuirán el intercambio gaseoso, al igual que no se pierde vapor de agua a través de las hojas, tampoco se captará CO₂, lo cual pone en duda que en estas especies el balance de carbono a lo largo del año sea favorable ante un agravamiento de la sequía (es decir, que actúen como sumideros de carbono). De igual manera a lo reportado para *A. macracantha* Valladares et al. (2004) menciona que las especies caducifolias seguirían una estrategia derrochadora, en la que la transpiración y la tasa fotosintética es alta; así son capaces de aprovechar las impredecibles lluvias, con una respuesta estomática menor, responsable de una abscisión foliar temprana,

por las obstrucciones generadas en el xilema. Este hecho pone de manifiesto el riesgo de embolias y abscisión foliar temprana en especies que mantienen una tasa fotosintética elevada (CO₂).

Este resultado se mostró debido a que las plántulas de esta especie ya estaban aclimatadas antes del experimento a las condiciones del invernadero donde se desarrollaron desde su propagación, y por lo tanto no estaban sometidas a ningún tipo de estrés previo por ello los tratamientos de estrés fueron más efectivos en esta especie, lo que representa que dicha especie es más sensible a un estrés hídrico prolongado por sus condiciones ecológicas en donde se desarrolla lo que se evidencia con lo reportado por Loján (1992) quien menciona que la *Cinchona* es de origen Sudamericano, su hábitat son bosques andinos del Ecuador, Perú, Venezuela, Colombia y Bolivia. En el Ecuador prosperan silvestremente y exclusivamente en los bosques densos exteriores de ambas cordilleras: occidental y oriental formando una faja altitudinal desde los 640 hasta 3200 msnm y entre los 10 °C y 23 °C, en un ambiente generalmente húmedo y lluvioso durante todo el año. Se demuestra por lo tanto que las dos especies estudiadas mostraron diferentes respuestas al estrés hídrico evaluadas a través de la producción de celulosa y lignina. *Acacia macracantha* parece ser más tolerante al estrés hídrico que *C. officinalis*, que fue la especie que respondió claramente a los tratamientos de estrés hídrico de acuerdo a lo esperado, según se planteó de manera hipotética disminuyendo la celulosa (CO₂) y aumentando la lignina lo mismo que reporta Martínez-Ballesta et al. (2009) mencionan que los estreses ambientales como la sequía, las altas o bajas temperaturas o la disminución de la radiación solar alteran la estructura y metabolismo de las plantas, por lo tanto, afectan su papel como secuestradores de CO₂. De igual forma McDowell et al. (2008) menciona que el estrés por sequía en los árboles se presenta a través de dos

mecanismos. El primero es a través del cierre de los poros del estoma en las hojas lo que limita la entrada de CO₂. El segundo los árboles modifican la formación de madera en respuesta a la sequía para producir madera con propiedades hidráulicas eso mitiga la probabilidad de falla hidráulica. De igual manera Pan et al. al. (2011) mencionan que en la sequía se espera que se disminuya el secuestro de carbono forestal.

La estructura anatómica en el xilema mostró diferencias principalmente en el tamaño y la agrupación de vasos. En el T0 ambas especies mostraron vasos de mayor tamaño en el área formada después del tratamiento, y vasos de menor tamaño en los tratamientos de sequía, siendo más evidente en *Acacia macracantha*. Entre los tratamientos con sequía (T1 a T4) no fue muy notable la diferencia de tamaño de vasos entre el área inicial y la nueva área formada luego de cada tratamiento. Sin embargo, cambios en la agrupación de vasos fueron más notables, sobre todo en el T4 de *Acacia macracantha*, observándose algunos grupos comunes de vasos mayores de tres. Similar a lo mencionado por Awad et al. (2010) que dicen que la planta puede incrementar la resistencia al paso del agua acortando la longitud de vasos, impermeabilizando las punteaduras, o disminuyendo el diámetro de vasos, de modo que se incremente la pérdida de carga en los mismos durante el transporte. De igual forma basado en estudios florísticos del botánico Carlquist (1984), en los que se observa plantas de zonas tropicales son muy eficiente desde el punto de vista conductivo y muy vulnerables a la cavitación, y que las plantas de zonas desérticas presentan xilemas de numerosos vasos de pequeño diámetro y muy resistentes a la cavitación.

5.2. Correlación entre las variables morfológicas

En el caso de las variables morfológicas la diferencia de la correlación entre las variables morfológicas en estudio (altura, diámetro, estado fitosanitario, número de hojas), se cree que

difiere entre las dos especies por la respuesta que presenta cada una a las sequías inducidas (moderadas y severas), asimismo, la mortalidad se ve asociada a la resistencia al estrés del ambiente de cada especie.

La *Acacia macracantha* tiene una respuesta inmediata al estrés hídrico a través de la pérdida continua de sus hojas y así solventar los requerimientos de agua dentro de la plántula, y de esta manera no se vea afectada las variables dasométricas (altura, diámetro) pero el estado fitosanitario disminuye dentro de la planta debido a la pérdida de follaje. De manera general se evidenció mayor correlación de manera positiva entre la altura y el diámetro dentro de todos los tratamientos usados en esta investigación y de manera negativa el estado fitosanitario con la altura y el diámetro dentro de los tratamientos de sequía (T1-T4). Tal como se consideró Smith y Smith (2007) mencionan que el estrés hídrico prolongado hace que las hojas se vuelvan amarillas y a medida que empeoran las condiciones, los árboles caducifolios pueden mudar sus hojas prematuramente y los más viejos mueren antes. En regiones tropicales se encuentran especies que se conocen como caducifolios de la sequía. En estas especies, la pérdida de las hojas se produce al inicio de la temporada seca. Así mismo, Taiz y Zeiger (2002) mencionan que una reducción en el contenido hídrico en las plantas provoca las siguientes consecuencias: reducción del área foliar, extensión radicular, cierre de los estomas, aumento de la resistencia al flujo de agua en fase líquida, aumento de la deposición de cera en la superficie de las hojas y alteración en la disipación de la energía de las hojas.

Además, en *A. macracantha* la mortalidad se dio dentro de los tratamientos de sequía con fertilizante (T3 y T4), al respecto se cree por cuestión de que el fertilizante requiere mayor cantidad de riego para poder ser asimilable por las raíces y crear el efecto esperado. Por el

contrario, la sequía lo mantuvo en estado sólido y hubo contacto con la raíz de las plántulas y causó su muerte posiblemente por falta de cuidados silviculturales. Lo que se asemeja con lo mencionado por Thiers, Reyes, Gerding y Schlatter (2014) quienes mencionan que la necesidad de fertilizar una plantación forestal con la deficiencia de elementos nutritivos en el suelo es válido, pero sólo en forma parcial, ya que la aplicación de fertilizantes debe considerar todos los factores de la fertilidad del suelo: espacio, régimen de agua, régimen de aire, régimen calórico y, por supuesto, el régimen nutritivo. Del mismo modo Donoso y Soto 2010 manifiestan que se deben considerar los factores relevantes de la silvicultura que influyen en el crecimiento de una plantación y que pueden determinar la necesidad de una fertilización, como también su posible éxito o fracaso calidad de las plantas (incluyendo su genética), preparación del sitio, técnica de plantación, cuidados culturales (control sanitario, competencia de malezas, intervenciones en el rodal como raleos y podas, etc.) y el sitio.

Para el caso de *Cinchona officinalis* se evidenció la respuesta al estrés hídrico al contrario de *Acacia*, ya que no pierde sus hojas, sino que las mantienen marchitas, por dicha reacción se ve que no crea un efecto de bajar los requerimientos de agua, sino que se mantiene en un mismo nivel, debido a esto se cree que la especie difiere en cuanto a la correlación entre sus variables morfológicas (altura, diámetro, estado fitosanitario y número de hojas) de acuerdo a los tratamientos inducidos ya que al mantener alto requerimientos en el nivel de agua y estar inducido a sequías, presenta mayor afección de sus variables morfológicas y mayor tasa de mortalidad la cual se presentó en todos los tratamientos de sequía (T1-T4) por el mismo hecho antes mencionado. Dentro del tratamiento testigo y los tratamientos de sequía moderada (T1 y T3) tienen mayor correlación positiva el diámetro con la altura, por otro lado, los tratamientos de sequía severa (T2 y T4) la correlación de manera positiva más alta

es entre la altura con el número de hojas; y de manera negativa la correlación mayor fue el estado fitosanitario con el diámetro y el número de hojas para todos los tratamientos. De manera similar Valladares et al. (2004) reporta en una especie perennifolia *Q. ilex* es más sensible y será capaz de recuperarse del estrés por déficit hídrico, teniendo en cuenta que dicha capacidad de recuperación va disminuyendo tras sufrir varios episodios de sequía; del mismo modo acerca de la mortalidad mencionan que especies que originariamente se encontraban en el límite superior se extinguirán, al no poder ascender más y no resistir el aumento de temperatura (sequías) al que están sometidas. Además, el aumento de la temperatura en el límite inferior, atraería a especies termófilas

6. CONCLUSIONES

- *Cinchona officinalis* es más sensible al estrés hídrico que *Acacia macracantha*. En *C. officinalis* se evidencia considerablemente una disminución en la fijación de carbono (celulosa) pero un cambio morfológico más homogéneo a causa del estrés hídrico. *A. macracantha* presenta mayor producción de celulosa y un cambio morfológico más variable entre tratamientos e individuos a causa del estrés hídrico.
- El fertilizante no influyó a la resistencia al estrés hídrico, tanto a nivel anatómico como morfológico. Al contrario, se pudo evidenciar que los individuos que contenían fertilizante tuvieron mayor mortalidad dentro de las dos especies.
- Durante una sequía de cuatro semanas (T3) *Cinchona officinalis* deja de crecer en diámetro en 33,90 % en promedio. Mientras que *Acacia macracantha* durante una sequía (T4) de ocho semanas deja de crecer en diámetro un 26,24 % en promedio.
- Con las mejores condiciones de humedad (T0) *Cinchona officinalis* fue el único que tuvo un leve incremento en el porcentaje de **celulosa** con un 0,08 % (0,96 mm²) respecto al tratamiento de sequía T4 que disminuye su producción en un -27,42 % (0,30 mm²). Por su parte, *Acacia macracantha* (T2) tuvo la mayor producción de celulosa en un 16,31 % (0,45 mm²) respecto al tratamiento (T0) que tuvo 2,23 % (0,81 mm²).
- Con las mejores condiciones de humedad (T0) *Cinchona officinalis* disminuye su producción de **lignina** en un -0,08 % (0,99 mm²) respecto al tratamiento de sequía T4 que aumenta su producción en un 27,42 % (0,84 mm²). Por su parte, *Acacia*

macracantha (T2) tuvo la mayor pérdida de lignina con un -16,31 % (0,62 mm²) respecto al tratamiento (T0) que tuvo -2,23 % (1,01 mm²).

- Respecto a los cambios morfológicos, la altura y número de hojas fue lo que más variabilidad tuvo en ambas especies. Además, ambas especies mantienen una fuerte relación entre el crecimiento en altura y diámetro en todos sus tratamientos.
- *Cinchona officinalis* presenta problemas sanitarios acorde al estrés hídrico, con riego constante mantiene un mejor estado fitosanitario (T0 = 2,90), pero con sequía severa presenta los problemas sanitarios más graves (T4 = 2,50). Mientras que *Acacia macracantha* mantiene un nivel fitosanitario alto (2,90) en todos sus tratamientos.
- *Cinchona officinalis* requiere riego permanente (T0) ya que en todos los tratamientos de sequía moderada a sequía severa presentó mortalidad (T1-T4). Por otro lado, *Acacia macracantha* es más resistente a la sequía y presentó mortalidad sólo en los tratamientos con fertilizante (T3 y T4).
- *Cinchona officinalis* regenera rápidamente su cambium vascular después de una herida a pesar de su alta sensibilidad al estrés hídrico, mientras lo contrario ocurre en *Acacia macracantha*.

7. RECOMENDACIONES

- Complementar investigaciones relacionadas al impacto del estrés hídrico en la fijación de carbono (celulosa) y producción de madera (lignina), así como la determinación del grado de decrecimiento de las variables morfológicas, con la finalidad de poder contrarrestar la pérdida de los bosques nativos en la región sur de Ecuador a causa del calentamiento global y las sequías prolongadas, generando información para la toma de decisiones.
- Profundizar los estudios anatómicos y morfológicos a nivel de diferentes especies forestales de importancia ecológica y comerciales con el fin de conocer de manera individual la reacción a eventos adversos de sequías severas.
- Realizar estudios de las mismas especies de diferentes localidades en condiciones climáticas diferentes, para determinar si estas especies reaccionan de manera igualitaria o diferente en cuanto al porcentaje de lignina, celulosa y la reacción de sus variables morfológicas.
- En lo posible trabajar con clones para poder tener el estudio de manera uniforme y no influya el lugar de procedencia.
- Controlar plagas, enfermedades y las malezas para que las mismas no sean un factor que afecte a las investigaciones.

- Antes de un experimento de sequía tener claro el tiempo de resistencia de cada especie de plántula forestal, para evitar mortalidad inicial de los individuos.
- Realizar podas de las plántulas forestales para evitar nudos causado por pequeñas ramillas dentro de la zona a cortar para los estudios anatómicos de la madera.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre, N., Eguiguren, P., Maita, J., Ojeda, T., Samaniego, N., Furniss, M., y Aguirre, Z. (2017). Potential impacts to dry forest species distribution under two climate change scenarios in southern Ecuador. *Neotropical Biodiversity*, 3(1), 18-29.
- Allen, C.D. (2007). Cross-scale interactions among forest dieback, fire, and erosion in northern New Mexico landscapes. *Ecosystems*, 10: 797–808.
- Andersson, L. (1998). A revision of the genus *Cinchona* (Rubiaceae-Cinchoneae). *Mem New York Bot Gard* 80:1-75.
- Armijos, C., Cueva, M., Quiñonez, D., Rojas, A., y Sisalima, N. (2018). Propiedades físicas y características anatómicas de la madera de *Acacia macracantha*, *Podocarpus oleifolius*, *Chionanthus pubesens* al sur del Ecuador. Universidad Nacional de Loja. Loja-Ecuador.
- Arroyo, P. (1983). Propiedades fisicomecánicas de la madera; texto para estudiantes de Ingeniería Forestal. Universidad de los Andes. Facultad de Ciencias Forestales. Mérida, Venezuela.
- Audesirk, T. Audesirk, G. y Byers, B. (2012). *Biología: la vida en la tierra*. Pearson educación de Mexico, S.A.
- Awal MA, Ikeda T. 2002. Recovery strategy following the imposition of episodic soil moisture deficit in stands of peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science* 188: 185-192.

- Awad H., Barigah, T., Badela, E., Cochard, H. y Herbette, S. (2010). Poplar vulnerability to xylem cavitation acclimates to drier soil conditions. *Physiologia Plantarum*. 139,280-288.
- Barros, J., Serk, H, Granlundz, I. y Pesquet, E. (2015). The cell biology of lignification in higher plants. *Annals of botany*. 115: 1053–1074.
- Bonan, G. (2008). Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, 320(5882), 1444-1449.
- Boyer, J. S. (1982). Productividad vegetal y medio ambiente. *Science*, 218 (4571), 443-448.
- Brienen y Zuidema. (2005). *Oecologia*, Springer. Programa Manejo de Bosques de la Amazonia Boliviana. (PROMAB), Casilla 107, Riberalta, Bolivia.
- Buitrón, X. (1999). Ecuador: Uso y Comercio de Plantas Medicinales. Situación Actual y Aspectos Importantes. Para su Conservación. Recuperado de www.traffic.org/medicinalreports/traffic_pub_medicinal27.pdf.
- Burdett, A. N. (1990). Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. *Canadian Journal of Forest Research* 20: 415-427.
- Butz, P., Raffelsbauer, V., Graefe, S., Peters, T., Cueva, E., Hölscher, D., & Bräuning, A. (2017). Tree responses to moisture fluctuations in a neotropical dry forest as potential climate change indicators. *Ecological Indicators*, 83, 559-571.
- Camefort, M. (1972). *Morphologie des Végétaux Vasculaires*. 2da ed. Doin, Éditeurs.

- Campos, J; Cerna, L y Chico, J. (2014). Efecto del ácido giberélico, nitrato de potasio y agua de coco en la germinación de semillas de quina, *Cinchona pubescens*. Revista Científica de Estudiantes. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo. Perú.
- Carlquist, S. (1984). Vessel grouping in dicotyledon wood: significance and relationship to imperforate tracheary elements. *Aliso* 10,505-525.
- Carlson, W. C. (1986). Root system considerations in the quality of loblolly pine seedlings. *Southern Journal of Applied Forestry* 10: 87-92.
- Castillo, M. y Suzuarte, M. (2010). Análisis y Diagnóstico Proyecto de Arquitectura y Paisajismo. Informe Final. San Bernardo. Chile
- Čermák J, Kučera J, Bauerle WL, Phillips N, Hinckley TM. (2007). Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees. *Tree Physiology* 27: 181-198.
- Cervantes, M. y Hernandez, M. (2004). *Biología General*. Grupo Editorial Patria
- Domínguez A.V. (1984). *Tratado de Fertilización*. Capítulo 17. Ed. Mundiprensa. Madrid-1,511.
- Donoso P. y Soto D. (2010). Plantaciones con especies nativas en el centro-sur de Chile: experiencias, desafíos y oportunidades. *Bosque Nativo* 47: 10-17.

- Evert, RF. (2006). *Esau's plant anatomy: meristems, cells, and tissues of the plant body: their structure, function, and development*, 3rd edition. John Wiley and Sons, Inc. ISBN: 9780471738435.
- Feijoo, C., Ramón, D., y Pucha, D. (2018). *Guía para cortes anatómicos de la madera*. Loja, Ecuador: EdiLoja.
- Feijoo, C., Espinoza, F., Cueva, M., Hidalgo, F., Ramón, D., Jumbo, J., Moreno, J., Yaguana, M., Eras-Guamán, V. y Pucha-Cofrep, D. (2019). Propiedades físicas y características anatómicas de la madera de *Cinchona officinalis* (L.) Ruiz y *Cinchona macrocalyx* Pav. ex DC en relictos boscosos al sur de Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 9(1): 94-109.
- Fertiza. (2012). Abono Compuesto 10-30-10. Recuperado de http://www.fertisa.com/productos_info.php?id=82
- Fukuda, H. (1994). Redifferentiation of single mesophyll cells into tracheary elements. *Int. J. Plant Sci.* 155: 262-271.
- Galmés J, Cifre J, Medrano H, Flexas J. 2005. Modulation of relative growth rate and its components by water stress in Mediterranean species with different growth forms. *Oecologia* 145: 21-31.
- Galeano, V. D., y Galeano, H. D. (2009). *Uso de plantas medicinales: para prevenir y curar algunas enfermedades*. AHYAT.

- Garmendia, A. (1999). El árbol de la quina (*Cinchona* spp.): Distribución, caracterización de su hábitat y arquitectura. Madrid. Universidad Complutense de Madrid.
- Garmendia, A. (2005). El Árbol de la Quina (*Cinchona* sp), (1ra. ed.). Ecuador: Universidad Técnica Particular de Loja. Pág. 33-155.
- Giantomasi, M., Roig, F., Villagra, P. and Srur, A. (2009). Annual variation and influence of climate on the ring width and wood hydrosystem of *Prosopis flexuosa* DC trees using image analysis. Springer.
- Guerrero, C. y López, F. 1993. Árboles Nativos de la provincia de Loja. Loja, Ecuador.
- Hacke, U. y Sperry, J. (2001), Functional and ecological xylem anatomy. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics. Vol.4/2:97-115.
- Hicke, J.A., Logan, J.A., Powell, J. y Ojima, D.S. (2006). Changing temperatures influence suitability for modeled mountain pine beetle (*Dendroctonus ponderosae*) outbreaks in the western United States. Journal of Geophysical Research, 111: G02019.
- Imaña Encinas, J., Jiménez Péres, J., Rezende, A. V., Imaña, C. R., Santana, O. A., & Meira Junior, M. S. D. (2014). Conceptos Dasométricos en los inventarios fitosociológicos.
- Imaña Encinas, J., Silva, G.F. y Kishi, I.T. 2002. Variáveis dendrométricas. Brasília: Universidade de Brasília, Depto. De Engenharia Florestal. 102p. (Comunicações Técnicas Florestais, v.4, n.1).

- Jacobs, D., Salifu, K. y Davis, A. (2009). Drought susceptibility and recovery of transplanted *Quercus rubra* seedlings in relation to root system morphology. *Annals of Forest Science* 66: 1-12.
- Jäger, H., Tye, A. y Kowarik, I. (2007). Tree invasion in naturally treeless environments: Impacts of quinine (*Cinchona pubescens*) trees on native vegetation in Galápagos. *Biological Conservation*, 140(3-4): 297-307.
- JUNAC. (1989). *Descripción general anatómica de las maderas del grupo Andino*. Lima, PE. Recuperado de <http://cort.as/-HR6Q>
- Kimball B.A., Kobayashi K., Bindi M. (2002) Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment, *Adv. Agron.* 77, 293–368.
- Kollman, F. (1959). *Tecnología de la madera y sus aplicaciones*. Madrid, España: IFIE.
- Larson, P. R. (1994). *The Vascular Cambium: Development and Structure*. Berlin, Heidelberg: Springer- Verlag.
- León, W. (2010). Anatomía y densidad o peso específico de la madera. *Pittieria* 39, 107-169.
- Levitt, J. (1980). *Responses of plants to environmental stresses*. 2da Edition. Academic Press, New York.
- Locosselli, GM y Buckeridge, MS (2017). Dendrobioquímica, un eslabón perdido para comprender mejor la asignación de carbono durante el crecimiento y la disminución de los árboles. *Árboles*, 31 (6), 1745-1758.

- Loján, L. (1992). Microcuencas y flora del Ecuador. El verdor de los Andes. Proyecto de Desarrollo Forestal Participativo en los Andes. Quito - Ecuador.
- Lozada, J. R. y Arends, E. (2000). Clasificación ecológica de especies arbóreas, con fines de aprovechamiento forestal, en la Estación. Experimental Caparo, Barinas Venezuela. *Rev. Forest. Venez.* 44(1) 81-91
- Martínez-Ballesta, M.C., Lopez-Perez, L. Muries, B, Muñoz-Azcarate, O., Carvajal, M. (2009) Climate change and plant water balance. The role of aquaporins. *Sustainable Agricultural Reviews* (E. Lichtfouse, Ed.) Vol 2, 71-89.
- Martínez E., Balaguer L., Valladares F., Chico JM., Manrique E. (2000). Energy dissipation in drought-avoiding and drought-tolerant tree species at midday during the Mediterranean summer. *Tree Physiology* 20: 131-138.
- McDowell, N., Pockman, W.T., Allen, C.D., Breshears, D.D., Cobb, N., Kolb, T., Sperry, J., West, A., Williams, D. y Yepez, E.A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *Tansley Review. New Phytologist*, 178: 719–739.
- Miles, L., Grainger, A., y Phillips, O. (2004). The impact of global climate change on tropical forest biodiversity in Amazonia. *Global Ecology and Biogeography*, 13(6), 553-565.
- Miller, G. (2007). *Ciencia ambiental: Desarrollo sostenible, un enfoque integral*, 8va edición, Editores Internacional Thomson, México

- Missouri Botanical Garden. (2017). *Cinchona officinalis*. Quinina. Recuperado de:
<http://www.mobot.org/mobot/archives/image.asp?filename=GPN1982-0505.tif&returnto=/mobot/archives/results.asp>.
- Mostacero, J., Mejía, F. y Gamarra, O. (2009). *Fanerógamas del Perú: Taxonomía, Utilidad y Ecogeografía*. (1° ed.). Perú: Concytec.
- Navarro, R., del Campo A. y Cortina, J., (2006). Factores que afectan al éxito de una repoblación y su relación con la calidad de planta. *In*: Cortina, J., J. L. Peñuelas, J. Puertolas, R. Savé y A. Villagrosa (coords.). *Calidad de planta forestal para la restauración en ambientes mediterráneos. Estado actual de conocimientos*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, España.
- Navarro, R., Gálvez, C., Contreras, V. y Del Campo, A. (1998). *Protocolo para la caracterización del cultivo de plantas forestales en contenedor*. Ministerio de Agricultura, Consejería de Agricultura y Pesca, E.T.S.I. Agrónomos y de Montes, Córdoba.
- Nepstad, D.C., Stickler, C.M., Soares-Filho, B. y Merry, F. (2008). Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B*, 363(1498): 1737–1746.
- Nilsen, E. T. y Orcutt, D. M. (1996). *Physiology of plants under stress. Abiotic factors*. John Wiley and Sons, New York, NY.

- Orozco, G., Muñoz, F., Villaseñor R., Rueda, S., Sigala, R. y Prieto, R., (2010). Diagnóstico de calidad de planta en viveros forestales del estado de Colima. Campo Experimental Uruapan. INIFAP. Uruapan, Much., México. Folleto técnico Núm. 1. 60p.
- Ortega, D., Santini, L., Carvalho, H. y Tomazello, M. (2019). A novel approach to understanding the formation of tree rings in tropical species by analyzing traces of elements. Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” IUFRO. Curitiba, Brazil.
- Pan, Y., Birdsey, R., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P., Kurz, W., & Phillips, O. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993.
- Patiño, S. Guamán, L. Chalán, M. y Pucha, D. (2017). Anatomía de la madera de *Acacia macracantha*. Poster presentado en la carrera de Ingeniería Forestal de la Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador.
- Pollito, P. (1989). Taxonomía, distribución geográfica y status del género *Cinchona* en el Perú.
- Prieto, J., Domínguez, P., Cornejo, E. y Návar, J. (2007). Efecto del envase y del riego en vivero en el establecimiento de *Pinus cooperi* Blanco en dos condiciones de sitio. *Madera y Bosques* 13(1): 79-97.
- Pritchett, W.L. (1986). Suelos forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. Traducción al español por José Hurtado Vega. Ed. Limusa. México.

- Pucha-Cofrep, D., Peters, T. and Bräuning, A. (2015). Wet season precipitation during the past century reconstructed from tree-rings of a tropical dry forest in Southern Ecuador. *Global and Planetary Change*, 133, 65-78.
- Puertas, P., Guevara, C. y Espinoza, M. (2012). Utilización industrial y mercado de diez especies maderables potenciales de bosques secundarios y primarios residuales. Informe técnico final. Estudio de la estructura anatómica de diez especies de bosques secundarios y primarios remanentes. Organización Internacional de las Maderas Tropicales. Dirección General Forestal y de Fauna Silvestre. Asociación para la Investigación y Desarrollo Integral.
- Raffa, K.F., Aukema, B.H., Bentz, B.J., Carroll, A.L., Hicke, J.A., Turner, M.G. y Romme, W.H. (2008). Cross-scale drivers of natural disturbances prone to anthropogenic amplification: the dynamics of bark beetle eruptions. *Bioscience*, 58(6): 501–517.
- Ramírez, A. y Rodríguez D. (2004). Efecto de la calidad de planta, exposición y micrositio en una plantación de *Quercus rugosa*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 10 (1): 5-11.
- Ray JD, Sinclair TR. (1998). The effect of pot size on growth and transpiration of maize and soybean during water deficit stress. *Journal of Experimental Botany* 49: 1381-1386.
- Rodriguez, F.D. y Groover, A. (2019). Madera y agua: cómo los árboles modifican el desarrollo de la madera para hacer frente a la sequía. *Plantas, personas, planeta*.

- Reed, D., Ewers, B., & Pendall, E. (2014). Impact of mountain pine beetle induced mortality on forest carbon and water fluxes. *Environmental Research Letters*, 9. doi: 10.1088/1748-9326/9/10/105004.
- Richter, C. (2010). Wood Characteristics. Description, Causes, Prevention, Impact on Use and Technological Adaptation. Doi 10.1007/978-3-319-07422-1.
- Robles V., Rodríguez, D. y Villanueva, A. (2017). Calidad de planta y supervivencia en reforestación de *Pinus montezumae* Lamb. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 8(42): 55-72.
- Russell. (2012). *Cinchona Officinalis*. (B. o. Demand, Ed.) Recuperado de: <http://www.loot.co.za/product/jesse-russell-cinchona-officinalis/wzvd-2307-g330> 1.
- Scagel, R., Bowden, R., Madill, M. y Kooistra, C. (1993). Provincial seedling stock type selection and ordering guidelines. British Columbia. Min. of Forests. SD404.P76. 76.
- Schreiber, S., Hacke, U., Hamann, A. y Thomas, B. (2011). Genetic variation of hydraulic and wood anatomical traits in hybrid poplar and trembling aspen. *New Phytol.* 190(1), 150-60.
- Schweingruber, F. H., Steiger, P., y Börner, A. (2019). Bark Anatomy of Trees and Shrubs in the Temperate Northern Hemisphere. Springer.
- Silva, A., Blanco, C. y Lindorf, H. (1988). Anatomía de la madera de nueve leguminosas de Venezuela. *Acta Botanica Brasilica*, 2(1), 115-133.

- Smith, T. M., & Smith, R. L. (2007). *Ecología*. Sexta Edición. Ed. *Pearson Educación SA España*.
- Sperry, J. S., Hacke, U. G. y Pittermann, J. (2006). Size and function in conifer tracheids and angiosperm vessels. *American Journal of Botany*, 93(10), 1490–1500. doi: 10.3732/93.10.1490.
- Spicer, R. (2014). Symplasmic network in secondary vascular tissues: parenchyma distribution and activity supporting long-distant transport. *Journal of experimental botany*. 65: 1829-1848.
- Steudle E., Peterson C. (1998) How does water get through roots? *J. Exp. Bot* 49, 775-788.
- Taiz, L. y Zeiger, E. (2002). Fisiología del estrés. En: *Fisiología Vegetal (Vol.II)*. Universitat Jaume I, Castelló de la Plana.
- Thiers O, J Reyes, V Gerding, J Schlatter. (2014). Suelos en ecosistemas forestales. En: Donoso C, MGonzález, A Lara eds. *Ecología forestal. Bases para el manejo sustentable y conservación de los bosques nativos de Chile*. Valdivia, Chile. Ediciones Universidad Austral de Chile. p.133– 178. Toledo, M., Poorter, L., Peña-Claros, M., Alarcón, A., Balcázar, J., Leño, C., Licona, J.C., Llanque, O., Vroomans, V., Zuidema, P.A., Bongers, F. 2011. Climate is a stronger driver of tree and forest growth rates than soil and disturbance. *Journal of Ecology* 99: 254–264. doi:10.1111/j.1365-2745. 2010.01741.x

- Tsakaldimi, M., Ganastsas P. y Jacobs, D. (2013). Prediction of planted seedling survival of live Mediterranean species base on initial seedling morphology. *New Forest* 43: 561-579.
- Tyree, M., Davis, S., Cochard, H. (1994). Biophysical perspectives of xylem evolution – is there a tradeoff of hydraulic efficiency for vulnerability to dysfunction? *International Association of Wood Anatomists Journal* 15,3335-360.
- Tyree M. y Sperry J. (1989). Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. *Ann. Rev. Plant. Phys. MOI. Bio* 40,19-38.
- Valladares F, Vilagrosa A, Peñuelas J, Ogaya R, Camarero JJ, Corcuera L, Sisó S, Gil-Pelegrín E. (2004). Estrés hídrico: ecofisiología y escalas de la sequía. In: Valladares F, ed. *Ecología del bosque Mediterráneo en un mundo cambiante*. España: Organismo Autonomo de Parques Nacionales, 165-192.
- Villa, L. (2018). Así se adaptan los árboles españoles a las sequías extremas. Obtenido de <https://www.publico.es/ciencias/cambio-climatico-adaptan-arboles-espanoles-sequias-extremas.html>.05-07-2019.
- Wilson, B. C. y Jacobs, D. (2006). Quality assessment of temperate zone deciduos hardwood seedling. *New Forest* 31: 417-433.
- Wodzicki, T. J. y Humphreys, W. J. (1973). Maturing pine tracheids. *J. Cell Biol.* 56: 263-265.

Worbes, M. 1999. Annual growth rings, rainfall-dependent growth and longterm growth patterns of tropical trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela. *Journal of Ecology* 87: 391–403. doi:10.1046/j.1365- 2745.1999.00361.x.

Zobel, B. y Van Buijtenen, J. 1989. Wood variation. Its causes and control. Springer Series in wood Science. Springer, Verlag.

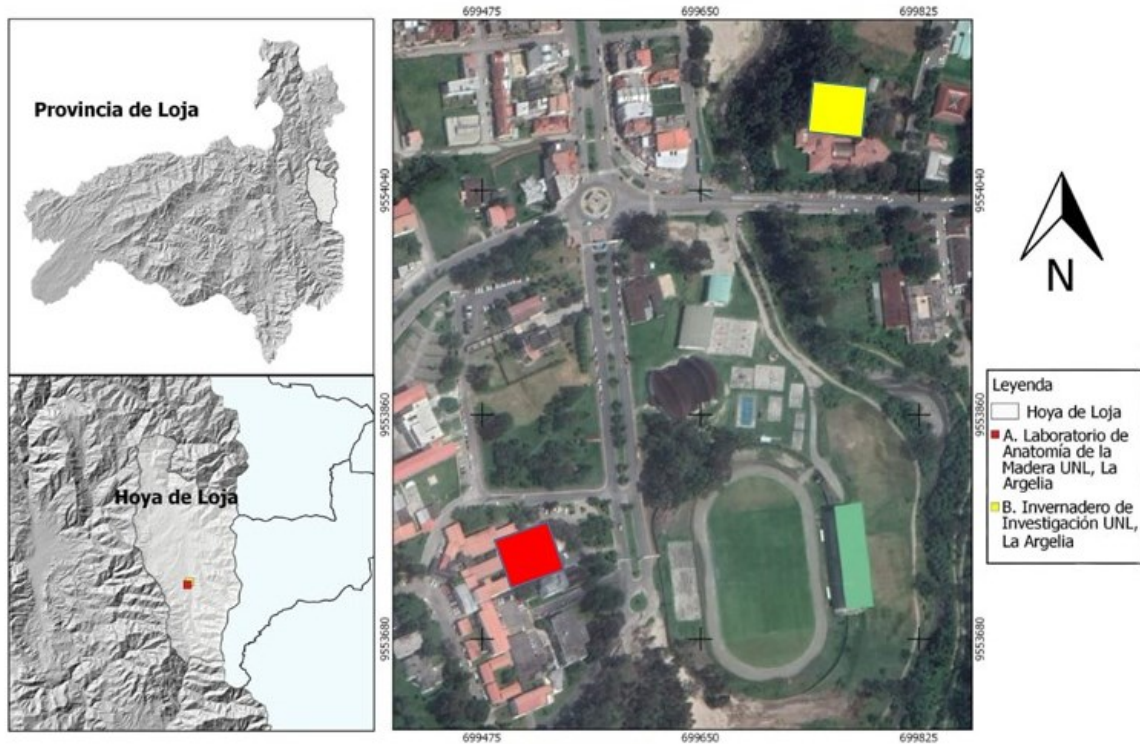
9. ANEXOS

Anexo 1. Características Anatómicas de la madera de *Acacia macracantha* y *Cinchona officinalis* (Laboratorio de Anatomía de Maderas Tropicales de la Universidad Nacional de Loja).

Familia	Nombre Común	Nombre Científico	Sector	Anillos de crecimiento visibles	Anillos poco visibles o ausentes	Anillos con poros difusos	Vasos en patrones radiales	Vasos solitarios (90% o más)	Vasos en grupos radiales de 4 o más	Placas perforadas simples	Punteaduras intervasculares alternas	Fibras de pared de delgada a gruesa	Parénquima axial difuso	Parénquima axial vasocéntrico	Parénquima axial en bandas con más tres células de ancho	Parénquima axial escaliforme	Parénquima axial marginal o en bandas aparentemente marginales	Cuatro (3-4) células por hebra de parénquima	Más de ocho células por hebra de parénquima	Radios comunmente de 4 a 10 series	Radios con porciones multiseriadas y porciones uniseriadas.	Radios de altura mayor a 1mm	Todas las células procumbentes	células procumbentes con más de 4 filas de células verticales y/o cuadradas marginales	
Rubiaceae	Cascarilla	<i>Cinchona officinalis</i>	Zamora Huayco-Loja		X	X	X		X	X	X	X	X			X			X	X		X		X	
Fabaceae	Faique	<i>Acacia macracantha</i>	Malacatos-Loja	X		X	X	X						X	X		X	X		X	X		X		

Anexo 2. Mapa de ubicación del sitio de estudio. A. Laboratorio de anatomía de Maderas Tropicales UNL, La Argelia, B. Invernadero de Investigación UNL, La Argelia

MAPA DE UBICACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO



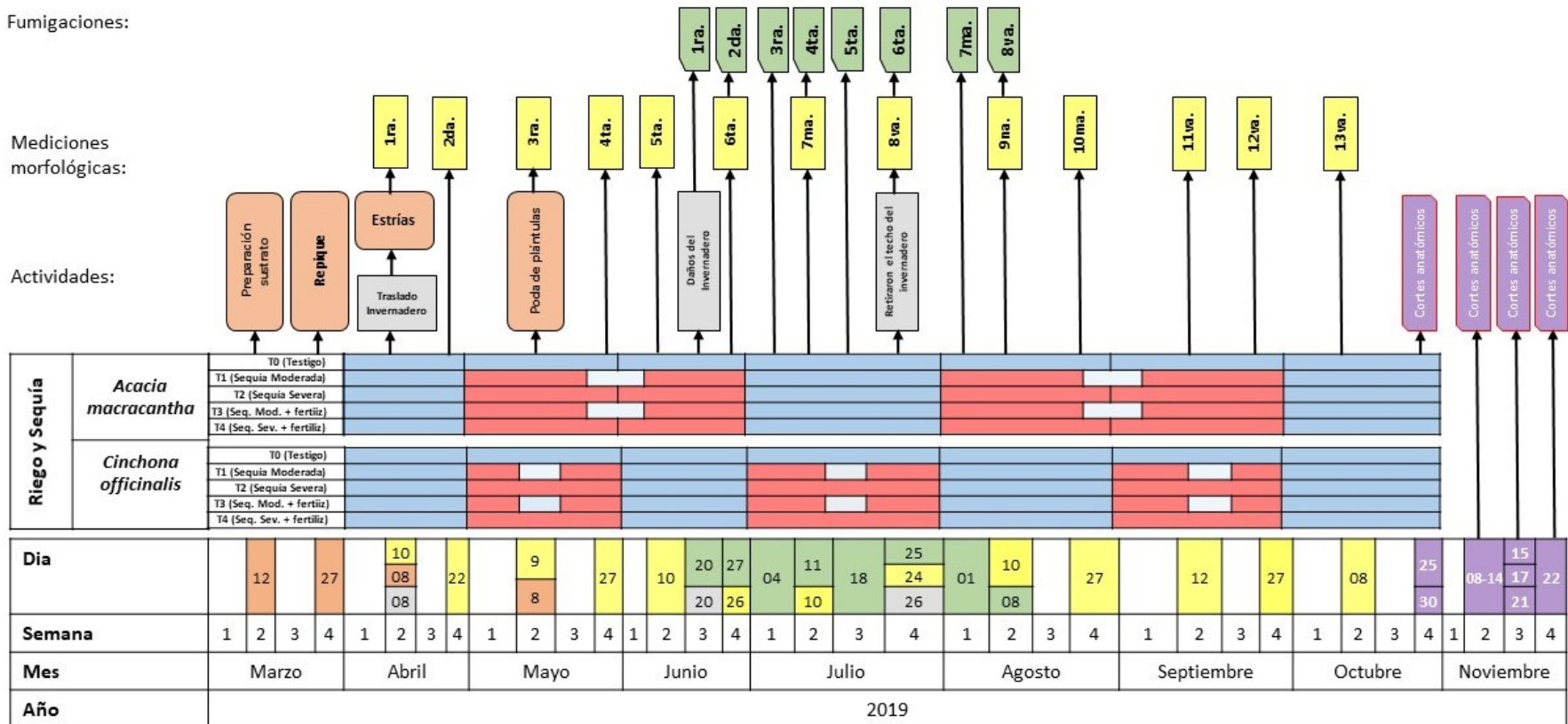
Anexo 3. Cronograma detallado de riego/sequía, fumigaciones, mediciones morfológicas, y actividades en plántulas bajo invernadero

Cronograma detallado de riego/sequía, fumigaciones, mediciones morfológicas, y actividades en plántulas bajo invernadero

Fumigaciones:

Mediciones morfológicas:

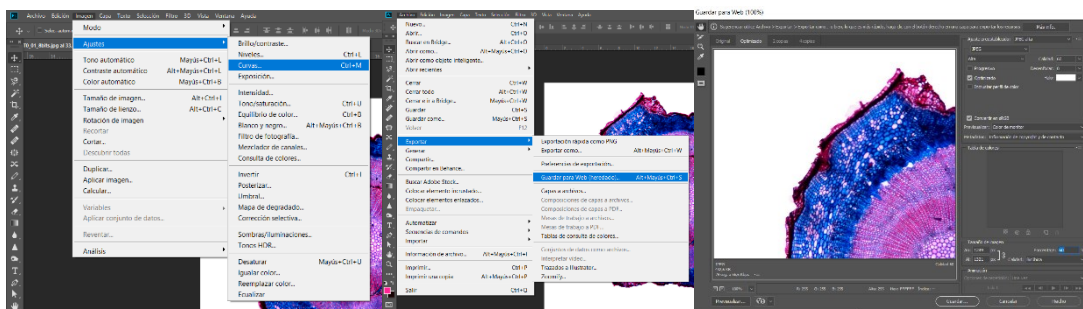
Actividades:



LEYENDA: Riego 200 ml de agua (dark blue), Riego 50 ml de agua (light blue), Sequía 0 ml de agua (red)

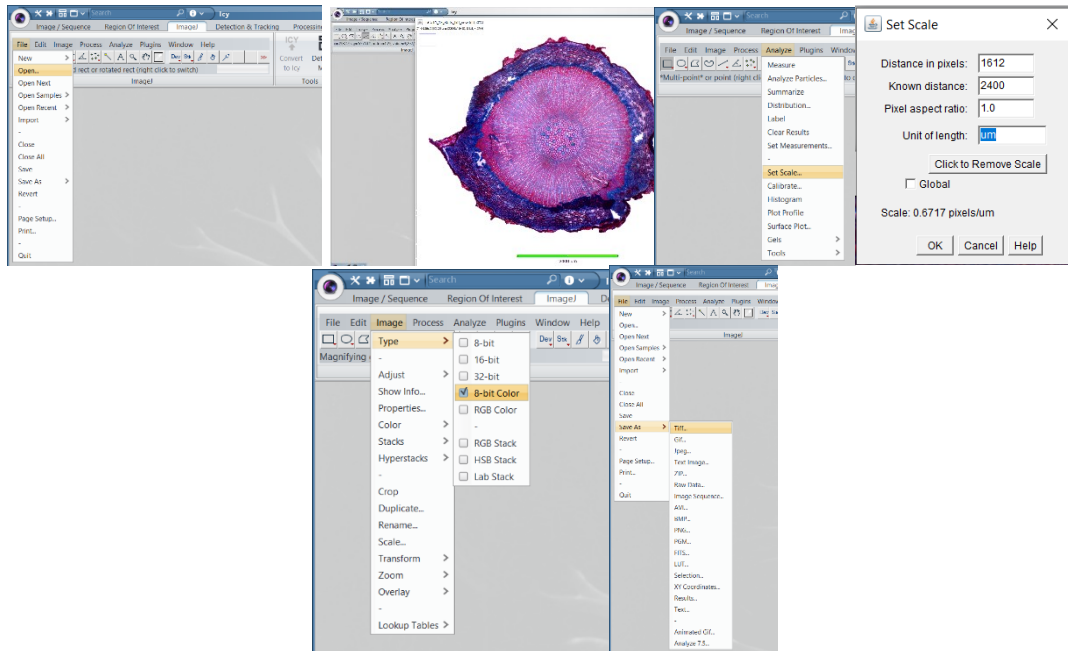
Anexo 4. Pre procesamiento de la imagen


- Abrir el programa *Photoshop*
- Archivo → Abrir → Imagen sin procesar
- Imagen → Ajustes → Curvas → Ajuste preestablecido → Aumentar contraste → Ok
- Archivo → Exportar → Guardar para Web (heredado) → Ajuste preestablecido JPEG alta, Porcentaje 60% → Guardar

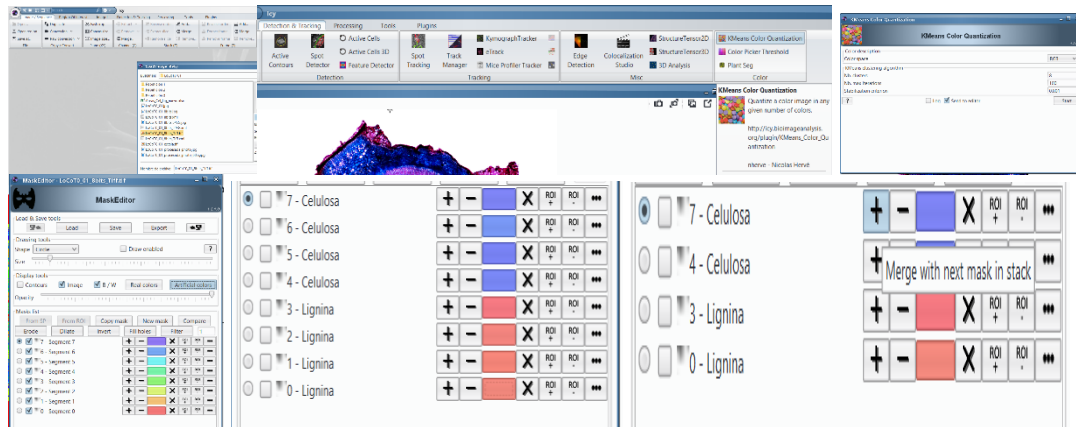


Anexo 5. Proceso de separación de colores

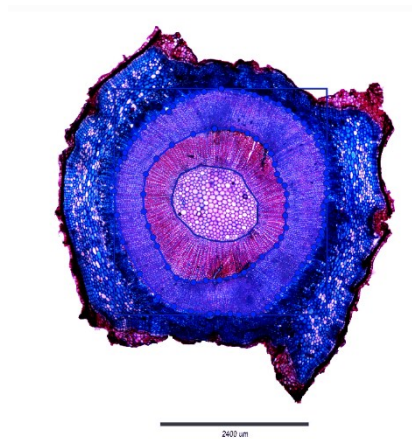
- Abrir el programa *ICY*
- ImageJ → File → Open → Imagen pre procesada en *Photoshop* → *Straight*, segmented or freehand lines, or arrows (Se selecciona con la línea la escala de la imagen) → Analyze → Set Scale → Distance in pixels (1612), Known distance (2400), Pixel aspect ratio (1.0), Unit of length (μm) → Ok → Image → Type → 8-bit Color → File → Save As → Tiff → Guardar



- Image/ Sequen → Open → Imagen Tiff transformada a 8 bits → Detection & Tracking → KMeans Color Quantization → Color space (RGB), Nb. Clusters (8), Nb. Max iterations (100), Stabilization criterion (0.001), Send to editor (✓) → Start → MaskEditor → Artificial colors, Identificar las zonas de Lignina y Celulosa diferenciandolos por el color rojo y azul respectivamente, además, identificar cada color con el nombre de Celulosa o Lignina para poder diferenciarlos, con el signo más unimos todos los colores azul y todos los colores rojos para obtener solo dos capas, Other actions (■■■), Export mask as Roi () las dos capas la de Celulosa y Lignina.

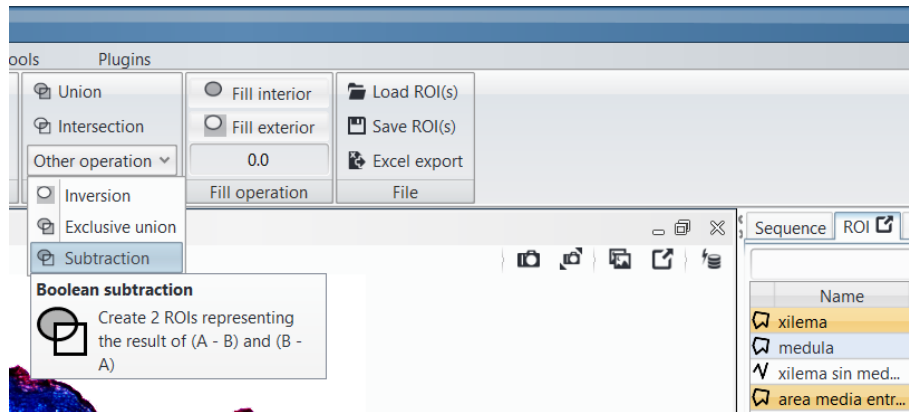


- Region Of Interest → Polygon (Dibujamos toda el área del xilema excluyendo la corteza) → Polygon (Dibujamos el área de la médula) → Polygon (Dibujamos en área media entre tratamientos), Automáticamente se ingresaran al ROI en donde le etiquetaremos con el nombre respectivo Xilema, Médula y Sección entre tratamientos a cada polígono.

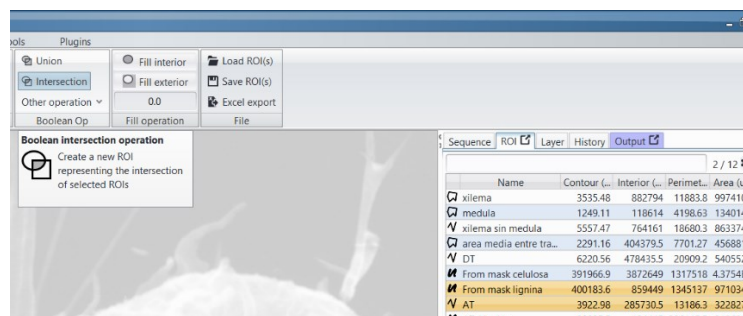


- ROI → Seleccionamos el polígono del xilema con el de área media entre tratamientos → Region of Interest → Other operation → Subtraction → De las cuáles resultan dos capas y nos quedamos con la que nos sirve → ROI → Etiquetamos la nueva capa como área después del tratamiento → Nuevamente Ingresamos en el ROI → Seleccionamos el polígono de la médula con el de área media entre tratamientos →

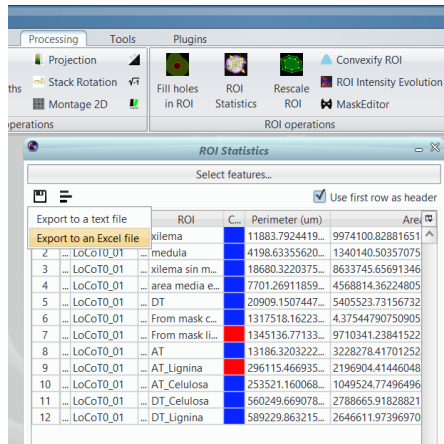
Region of Interest → Other operation → Subtraction → De las cuáles resultan dos capas y nos quedamos con la que nos sirve → ROI → Etiquetamos la nueva capa como área antes del tratamiento.



- ROI → Seleccionamos la capa de Lignina y el polígono de área antes del tratamiento → Region Of Interest → Intersection → ROI → Etiquetamos con el nombre AT_Lignina → ROI → Seleccionamos la capa de Lignina y el polígono de área después del tratamiento → Region Of Interest → Intersection → ROI → Etiquetamos con el nombre DT_Lignina → ROI → Seleccionamos la capa de Celulosa y el polígono de área antes del tratamiento → Region Of Interest → Intersection → ROI → Etiquetamos con el nombre AT_Celulosa → ROI → Seleccionamos la capa de Celulosa y el polígono de área después del tratamiento → Region Of Interest → Intersection → ROI → Etiquetamos con el nombre DT_Celulosa.



- Processing → ROI Statistics → Aparece un cuadro con todos los resultados de lo que tenemos en el ROI en cuanto al Área → Export as Excel file → Nombramos el archivo como Área_Código_de_la_imagen.



Anexo 6. Formulario de variables morfológicas

Carrera de Ingeniería Forestal									
Proyecto de investigación: "Impacto de las variaciones climáticas en la fijación de carbono en ecosistemas forestales al sur de Ecuador"									
FICHA DE MEDICIONES									
Para proyecto de tesis sobre la estimación de la producción de celulosa y lignina bajo estrés hídrico a través de un estudio anatómico de la madera.									
Especie:	Código:								
Responsable:									
Medición Nro:									
Fecha:									
Observaciones:									
T0: TESTIGO									
Indiv.	Altura (cm)	Díámetro (cm)	N° de hojas			Mortalidad	Estado fitosanitario		
			C	N	T		Bueno	Regular	Malo
T0_01									
T0_02									
T0_03									
T0_04									
T0_05									
T0_06									
T0_07									
T0_08									
T0_09									
T0_10									
T0_11									
T0_12									
T0_13									
T0_14									
T0_15									
T0_16									
T0_17									
T0_18									
T0_19									
T0_20									
T1: SUSTRATO Y SEQUÍA MODERADA									
Indiv.	Altura (cm)	Díámetro (cm)	N° de hojas			Mortalidad	Estado fitosanitario		
			C	N	T		Bueno	Regular	Malo
T1_01									
T1_02									
T1_03									
T1_04									
T1_05									
T1_06									
T1_07									
T1_08									
T1_09									
T1_10									
T1_11									
T1_12									
T1_13									
T1_14									
T1_15									
T1_16									
T1_17									
T1_18									
T1_19									
T1_20									
T2: SUSTRATO Y SEQUÍA SEVERA									
Indiv.	Altura (cm)	Díámetro (cm)	N° de hojas			Mortalidad	Estado fitosanitario		
			C	N	T		Bueno	Regular	Malo
T2_01									
T2_02									
T2_03									
T2_04									
T2_05									
T2_06									
T2_07									
T2_08									
T2_09									
T2_10									
T2_11									
T2_12									
T2_13									
T2_14									
T2_15									
T2_16									
T2_17									
T2_18									
T2_19									
T2_20									
T3: SUSTRATO + FERTILIZANTE Y SEQUÍA MODERADA									
Indiv.	Altura (cm)	Díámetro (cm)	N° de hojas			Mortalidad	Estado fitosanitario		
			C	N	T		Bueno	Regular	Malo
T3_01									
T3_02									
T3_03									
T3_04									
T3_05									
T3_06									
T3_07									
T3_08									
T3_09									
T3_10									
T3_11									
T3_12									
T3_13									
T3_14									
T3_15									
T3_16									
T3_17									
T3_18									
T3_19									
T3_20									
T4: SUSTRATO + FERTILIZANTE Y SEQUÍA MODERADA									
Indiv.	Altura (cm)	Díámetro (cm)	N° de hojas			Mortalidad	Estado fitosanitario		
			C	N	T		Bueno	Regular	Malo
T4_01									
T4_02									
T4_03									
T4_04									
T4_05									
T4_06									
T4_07									
T4_08									
T4_09									
T4_10									
T4_11									
T4_12									
T4_13									
T4_14									
T4_15									
T4_16									
T4_17									
T4_18									
T4_19									
T4_20									

Anexo 7. Código R utilizado para la obtención de las herramientas gráficas: Matriz de correlación

```
# Tesis: Impacto del estrés hídrico en La Anatomía de La madera y La
# morfología de
# Acacia macracantha y Cinchona officinalis bajo
# condiciones de invernadero
# Responsable: Cesar Emiliano Feijoo Feijoo
# Análisis: Correlación variables morfológicas
# Director: Darwin Pucha
# Fecha: 09-01-2020
## corrplot 0.84 loaded
#####

#####
## Correlaciones
#####

rm(list=ls()) # Limpiar area de trabajo
graphics.off() # Limpiar área de gráficos

setwd("C:/.../Tesis/R")

# importar datos
data <- read.csv("Cinchona officinalis_Todo.csv", sep = ";", dec = ",")

#remover columnas vacias Automaticamente
data[data==""] <- NA
data <- data[rowSums(is.na(data)) !=ncol(data), colSums(is.na(data))
!=nrow(data)]

# borrar datos de mortalidad
data <- data[1:400, ]

# crear columna de promedios
data$prom <- rowMeans(data[, 6:18])

# Limpiar tabla, borrar levels
data$Variable <- factor(data$Variable)

jpeg(filename="cor.cascarilla.jpg", width = 250, height = 150, units =
"mm", res=300)

layout(matrix(c(1:9), 2, 3, byrow = T)) # dividir area grafica en
secciones
```

```

## Warning in matrix(c(1:9), 2, 3, byrow = T): la longitud de los datos [
9] no es
## un submúltiplo o múltiplo del número de filas [2] en la matriz

#####
### Subtablas por MEDICIONES (13med)

### T0
# Extraer datos
data.T0 <- data[data$tratamiento=="T0",] # Con todas las variables

# crear tabla automatica de PROMEDIOS por cada medicion
data.T0.med <- data.frame(medicion = 1:13)
for(i in 1:4) {
  data.T0.med[, levels(data.T0$Variable)[i]] <- colMeans(data.T0[data.T
0$Variable==levels(data.T0$Variable)[i], 6:18])}

# Crear tabla de correlaciones
data.T0.med.cor <- cor(data.T0.med[,2:5])

# Crear tabla p.values
library(psych)
pval.T0.med <- psych::corr.test(data.T0.med, adjust="none")$p

## Warning in abbreviate(rownames(r), minlength = minlength): abreviatura
utilizada
## con caracteres no ASCII

## Warning in abbreviate(colnames(r), minlength = minlength): abreviatura
utilizada
## con caracteres no ASCII

# abrir paquete o libreria
library (corrplot)

## Warning: package 'corrplot' was built under R version 3.5.3

## corrplot 0.84 loaded

order.T0.med <- corrMatOrder(data.T0.med.cor, order="alphabet") #orden alf
abetico
order.T0.med2 <- data.T0.med.cor[order.T0.med, order.T0.med]

#Plot
#export plot as jpeg

#jpeg(filename="cor_cascarilla_med_T0.jpg", width = 150, height = 150, un
its = "mm", res=1000)

corrplot.mixed(order.T0.med2, tl.pos = "lt", upper="square", tl.cex=1, num
ber.cex=1, mar=c(0,0,1,0),

```



```

                                main="T0", p.mat=pval.T0.med, sig.level = 0.0
5, insig = "blank")

# T1

# Extraer datos
data.T1 <- data[data$tratamiento=="T1",]      # Con todas las variables

# crear tabla automatica de PROMEDIOS por cada medicion
data.T1.med <- data.frame(medicion = 1:13)
for(i in 1:4) {
  data.T1.med[, levels(data.T1$Variable)[i]] <- colMeans(data.T1[data.T
1$Variable==levels(data.T1$Variable)[i], 6:18])}

# Crear tabla de correlaciones
data.T1.med.cor <- cor(data.T1.med[,2:5])

# Crear tabla p.values
library(psych)
pval.T1.med <- psych::corr.test(data.T1.med, adjust="none")$p

## Warning in abbreviate(rownames(r), minlength = minlength): abreviatura
utilizada
## con caracteres no ASCII

## Warning in abbreviate(rownames(r), minlength = minlength): abreviatura
utilizada
## con caracteres no ASCII

# abrir paquete o Libreria
library (corrplot)
order.T1.med <-corrMatOrder(data.T1.med.cor, order="alphabet") #orden alf
abetico
order.T1.med2 <- data.T1.med.cor[order.T1.med, order.T1.med]

#Plot
#export plot as jpeg

#jpeg(filename="cor_cascarilla_med_T1.jpg", width = 150, height = 150, un
its = "mm", res=1000)

corrplot.mixed(order.T1.med2, tl.pos = "lt", upper="square", tl.cex=1, num
ber.cex=1, mar=c(0,0,1,0),
                                main="T1", p.mat=pval.T1.med, sig.level = 0.0
5, insig = "blank")

# T2

# Extraer datos
data.T2 <- data[data$tratamiento=="T2",]      # Con todas las variables

```

```

# crear tabla automatica de PROMEDIOS por cada medicion
data.T2.med <- data.frame(medicion = 1:13)
for(i in 1:4) {
  data.T2.med[, levels(data.T2$Variable)[i]] <- colMeans(data.T2[data.T
2$Variable==levels(data.T2$Variable)[i], 6:18])}

# Crear tabla de correlaciones
data.T2.med.cor <- cor(data.T2.med[,2:5])

# Crear tabla p.values
library(psych)
pval.T2.med <- psych::corr.test(data.T2.med, adjust="none")$p

## Warning in abbreviate(rownames(r), minlength = minlength): abreviatura
utilizada
## con caracteres no ASCII

## Warning in abbreviate(rownames(r), minlength = minlength): abreviatura
utilizada
## con caracteres no ASCII

# abrir paquete o Libreria
library (corrplot)
order.T2.med <- corrMatOrder(data.T2.med.cor, order="alphabet") #orden alf
abetico
order.T2.med2 <- data.T2.med.cor[order.T2.med, order.T2.med]

#Plot
#export plot as jpeg

#jpeg(filename="cor_cascarilla_med_T2.jpg", width = 150, height = 150, un
its = "mm", res=1000)

corrplot.mixed(order.T2.med2, tl.pos = "lt", upper="square", tl.cex=1, num
ber.cex=1, mar=c(0,0,1,0),
               main="T2", p.mat=pval.T2.med, sig.level = 0.0
5, insig = "blank")

# T3

# Extraer datos
data.T3 <- data[data$tratamiento=="T3",] # Con todas las variables

# crear tabla automatica de PROMEDIOS por cada medicion
data.T3.med <- data.frame(medicion = 1:13)
for(i in 1:4) {
  data.T3.med[, levels(data.T3$Variable)[i]] <- colMeans(data.T3[data.T
3$Variable==levels(data.T3$Variable)[i], 6:18])}

```

```

# Crear tabla de correlaciones
data.T3.med.cor <- cor(data.T3.med[,2:5])

# Crear tabla p.values
library(psych)
pval.T3.med <- psych::corr.test(data.T3.med, adjust="none")$p

## Warning in abbreviate(rownames(r), minlength = minlength): abreviatura
utilizada
## con caracteres no ASCII

## Warning in abbreviate(rownames(r), minlength = minlength): abreviatura
utilizada
## con caracteres no ASCII

# abrir paquete o Libreria
library (corrplot)
order.T3.med <- corrMatOrder(data.T3.med.cor, order="alphabet") #orden alf
abetico
order.T3.med2 <- data.T3.med.cor[order.T3.med, order.T3.med]

#Plot
#export plot as jpeg

#jpeg(filename="cor_cascarilla_med_T3.jpg", width = 150, height = 150, un
its = "mm", res=1000)

corrplot.mixed(order.T3.med2, tl.pos = "lt", upper="square", tl.cex=1, num
ber.cex=1, mar=c(0,0,1,0),
               main="T3", p.mat=pval.T3.med, sig.level = 0.0
5, insig = "blank")

# T4

# Extraer datos
data.T4 <- data[data$tratamiento=="T4",] # Con todas las variables

# crear tabla automatica de PROMEDIOS por cada medicion
data.T4.med <- data.frame(medicion = 1:13)
for(i in 1:4) {
  data.T4.med[, levels(data.T4$Variable)[i]] <- colMeans(data.T4[data.T
4$Variable==levels(data.T4$Variable)[i], 6:18])
}

# Crear tabla de correlaciones
data.T4.med.cor <- cor(data.T4.med[,2:5])

# Crear tabla p.values
library(psych)
pval.T4.med <- psych::corr.test(data.T4.med, adjust="none")$p

```

```

## Warning in abbreviate(rownames(r), minlength = minlength): abreviatura
utilizada
## con caracteres no ASCII

## Warning in abbreviate(rownames(r), minlength = minlength): abreviatura
utilizada
## con caracteres no ASCII

# abrir paquete o libreria
library (corrplot)
order.T4.med <-corrMatOrder(data.T4.med.cor, order="alphabet") #orden alf
abetico
order.T4.med2 <- data.T4.med.cor[order.T4.med, order.T4.med]

#Plot
#export plot as jpeg

#jpeg(filename="cor_cascarilla_med_T4.jpg", width = 150, height = 150, un
its = "mm", res=1000)

corrplot.mixed(order.T4.med2, tl.pos = "lt", upper="square", tl.cex=1, num
ber.cex=1, mar=c(0,0,1,0),
               main="T4", p.mat=pval.T4.med, sig.level = 0.0
5, insig = "blank")

# Plot TEXTO
plot(0,0,ann=F,bty="n",type="n",xaxt="n",yaxt="n")
text(x= 0.2, y=-0.75, paste("Todas las correlaciones \n estan al p-value=
0.05"), font = 9)

dev.off()

## null device
##          1

```

Anexo 8. Código R utilizado para la obtención de las herramientas gráficas: *Box Plot*, PCA Individual, PCA *Biplot*

```
#####
```

```

# Tesis: Impacto del estres hidrico en La Anatomia de La madera y La morf
ologia de
#           Acacia macracantha y Cinchona officinalis bajo condicion
es de invernadero
# Responsable: Cesar Emiliano Feijoo Feijoo
# Análisis: Boxplot y PCA - Análisis de componentes principales
# Director: Darwin Pucha
# Fecha: 17-01-2020
# Basado en: http://www.sthda.com/english/articles/31-principal-component

```

```

-methods-in-r-practical-guide/118-principal-component-analysis-in-r-prcom
p-vs-princomp/
# codificado por Darwin PC
#####

rm(list=ls()) # Limpiar area de trabajo
graphics.off() # Limpiar área de gráficos

# Analisis cascarilla

setwd("C:/.../Tesis/R")

#####
# Boxplot
#####
data <- read.csv("Cinchona officinalis_Resultados_Variables_nueva.csv", s
ep = ";", dec = ",")
data <- data[, -1] # borrar primera columna

#exportar como jpeg

jpeg(filename="boxplots.cascarilla.jpg", width = 250, height = 150, units
= "mm", res=300)

layout(matrix(c(1:9), 2, 3, byrow = T)) # dividir area grafica

## Warning in matrix(c(1:9), 2, 3, byrow = T): la longitud de los datos [
9] no es
## un submúltiplo o múltiplo del número de filas [2] en la matriz

# Altura
data.alt <- data[, 1:5]
colnames(data.alt) <- c("T0", "T1", "T2", "T3", "T4")
boxplot(data.alt, las=1, col = terrain.colors(5),
main = "Altura", ylab = "[cm]")

# Diametro
data.diam <- data[, 6:10]
colnames(data.diam) <- c("T0", "T1", "T2", "T3", "T4")
boxplot(data.diam, las=1, col = terrain.colors(5),
main = "Diametro", ylab = "[cm]")

# Nro. Hojas
data.hojas <- data[, 11:15]
colnames(data.hojas) <- c("T0", "T1", "T2", "T3", "T4")
boxplot(data.hojas, las=1, col = terrain.colors(5),
main = "Nro. Hojas", ylab = "[Numero]")

```

```

# Estado Fitosanitario
data.estado <- data[,16:20]
colnames(data.estado) <- c("T0", "T1", "T2", "T3", "T4")
boxplot(data.estado, las=1, col = terrain.colors(5),
        main = "Estado fitosanitario", ylab = "[1=regular, 2=bueno
, 3=excelente]")

# Mortalidad
data.mort <- data[,21:25]
colnames(data.mort) <- c("T0", "T1", "T2", "T3", "T4")
boxplot(data.mort, las=1, col = terrain.colors(5),
        main = "Mortalidad", ylab = "Nro. indiv. muertos")

dev.off()

## null device
##
##          1

graphics.off()    # Limpiar area de graficos

#####
# Analisis de componentes principales
#      PCA
#####

# abrir archivo csv
data <- read.csv("Cinchona officinalis_Resultados_Variables_nueva.csv", s
ep = ";", dec = ",")
#data <- data[,-c(1, 22:26)]    # borrar primera columna y Var. de mortal
idad
data <- data[,-c(1, 17:26)]    # borrar primera columna + mortalidad + es
tado
data <- as.data.frame(t(data))    # transponder o girar tabla de datos

library(factoextra)

## Warning: package 'factoextra' was built under R version 3.5.3
## Loading required package: ggplot2
## Warning: package 'ggplot2' was built under R version 3.5.3
## Welcome! Want to learn more? See two factoextra-related books at https
://goo.gl/ve3WBa

## Vizualizacion de individuales

# Crear objeto Lista de PCA

```

```

pca.ind.co <- prcomp(data, scale = TRUE, center = T)

# exportar como jpeg
jpeg(filename="pca.indiv.cascarilla.jpg", width = 250, height = 150, unit
s = "mm", res=300)

    fviz_pca_ind(pca.ind.co,
                 col.ind = "contrib",
                 pointsize = "contrib",
                 gradient.cols = c("darkgreen", "darkblue", "tan3"
, "orange", "red"),
                 legend.title = "Contrib.",
                 repel = TRUE)

dev.off()

## null device
##              1

## Visualizacion de variables
# cargar datos nuevamente
data.co <- as.data.frame(read.csv("Cinchona officinalis_Resultados_Variab
les_nueva.csv", sep = ";", dec = ","))
#data.co <- data.co[ , -1]      # borrar primera columna
data.co <- data.co[ , -c(1, 17:26)]      # borrar primera y ultimas column
as

# PCA
pca.var.co <- prcomp(data.co, scale = T, center = T)

# Color por variable
fviz_pca_var(pca.var.co,
             #col.var = "contrib",
             col.var = c("Altura", "Altura", "Altura", "Altura",
"Altura",
                               "Diametro", "Diametro", "Diame
tro", "Diametro", "Diametro",
                               "Hojas", "Hojas", "Hojas", "
Hojas", "Hojas"),
             repel = F,
             legend.title = "Variables:")

# Color por tratamiento
fviz_pca_var(pca.var.co,
             #col.var = "contrib",
             col.var = c("T0", "T1", "T2", "T3", "T4",
# "T0", "T1", "T2", "T3", "T
4",
                               "T0", "T1", "T2", "T3", "T4

```

```

",
                                                                    "T0", "T1", "T2", "T3", "T4
"),
                                                                    repel = F,
                                                                    legend.title = "Tratamientos:")

### PCA con Promedio de variables

#Tabla resumen
data.co.means <- data.frame(altura = rowMeans(data.co[,1:5]),
                                                                    diametro = rowMeans(
data.co[,6:10]),
                                                                    hojas = rowMeans(dat
a.co[,11:15])    )

pca.var.co.means <- prcomp(data.co.means, scale = T, center = T) #PCA

# Solo variables promedio
fviz_pca_var(pca.var.co.means,
              #col.var = "contrib",
              col.var = c("Altura", "Diametro", "Hojas"),
              repel = F,
              legend.title = "Variables:")

# Visualización de individuales y variables (Biplot)

# exportar como jpeg

jpeg(filename="pca.var.mean.cascarilla.jpg", width = 250, height = 150, u
nits = "mm", res=300)

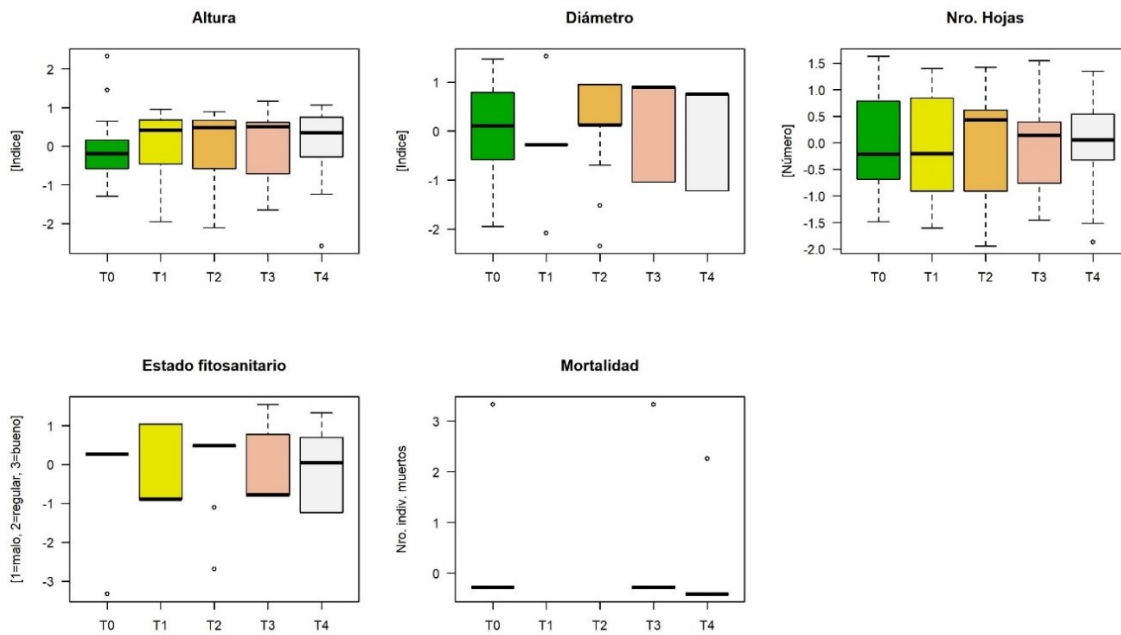
fviz_pca_biplot(pca.var.co.means,
                 gradient.cols = c("blue", "orange", "red"),
                 col.var = "contrib",
                 col.ind = "grey70",    # Individuals color
                 legend.title = "Contrib.",
                 repel = T)

dev.off()

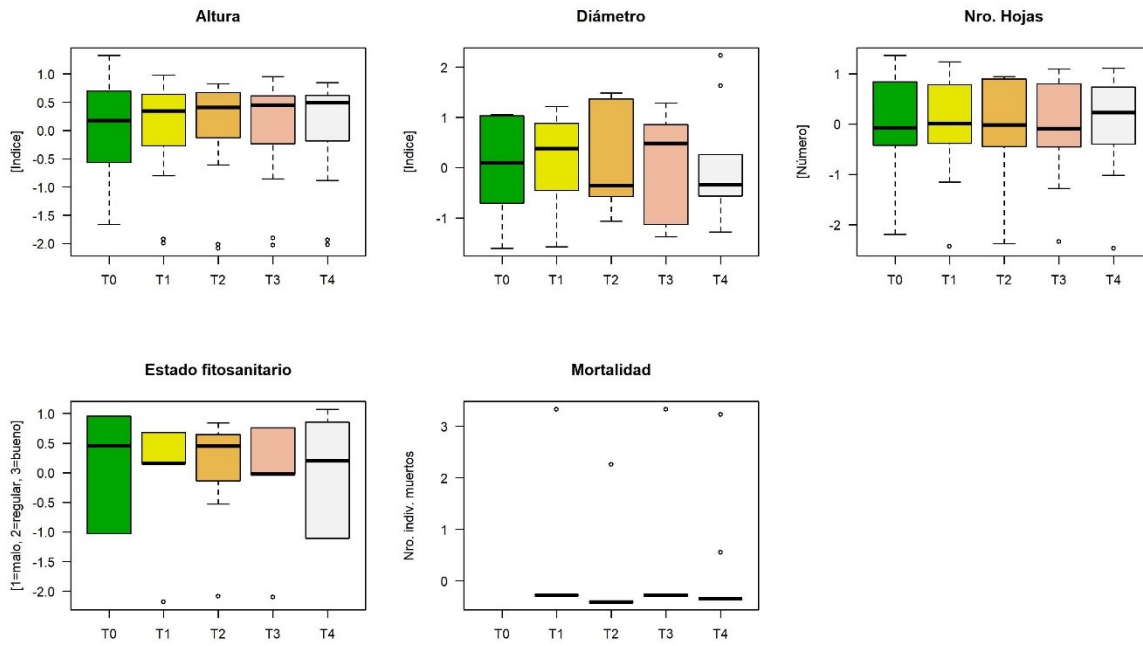
## pdf
##      2

```


Anexo 9. *Box plot* del incremento real de las cinco variables morfológicas en plántulas de *Acacia macracantha* obtenido en los diferentes tratamientos bajo condiciones de invernadero en el periodo del estudio



Anexo 10. *Box plot* del incremento real de las cinco variables morfológicas en plántulas de *Cinchona officinalis* obtenido en los diferentes tratamientos bajo condiciones de invernadero en el periodo del estudio



Anexo 11. Poster científico y certificado de participación en el evento organizado por la Universidad Nacional de Loja

IMPACTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN LA ANATOMÍA DE LA MADERA Y LA MORFOLOGÍA DE *Acacia macracantha* WILLD. Y *Cinchona officinalis* L. BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO.

Feijoo Feijoo Cesar¹, Pucha-Cofrep Darwin¹

¹ Laboratorio de Anatomía de Maderas Tropicales. Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables. Universidad Nacional de Loja, Loja - Ecuador.

1 INTRODUCCIÓN

La productividad de los ecosistemas forestales desde el punto de vista ecológico está relacionada directamente con la producción de biomasa, y desde el punto de vista comercial con la producción de madera. Este estudio busca entender cómo las variaciones climáticas, y en especial el estrés hídrico influye en la fijación de carbono o formación de celulosa, así como en los cambios morfológicos en especies forestales.

2 METODOLOGÍA

Este estudio se realizó con las especies forestales Cascarilla (*Cinchona officinalis*) y Faique (*Acacia macracantha*) bajo condiciones controladas de invernadero con cinco tratamientos y 20 repeticiones (T0=testigo, T1=sequía moderada, T2= s. severa., T3= s. mod. + fertilizante, y T4 = s. sev.+fertilizante). Mediciones semanales de parámetros dasométricos y ecológicos fueron realizadas durante seis meses. Luego de los seis meses cortes anatómicos de la madera fueron realizados en el Laboratorio de Anatomía de Maderas Tropicales de la UNL. Posteriormente, con el software ImageJ se realizó el análisis digital de imágenes para identificar los porcentajes y áreas de celulosa y lignina antes y después de cada tratamiento. El análisis estadístico de correlación y Componentes Principales (PCA) se realizó bajo el entorno de programación R.

3 RESULTADOS

Cinchona officinalis resultó ser mucho más sensible al estrés hídrico en su estructura morfológica y anatómica de la madera que *Acacia macracantha*. Los tratamientos de sequía severa mostraron las mayores diferencias en la producción de celulosa (T2 > celulosa en *A. macracantha*, y T4 < celulosa en *C. officinalis*) (Tabla 1 a 4). Las variables morfológicas (Diámetro, Altura, Nro. Hojas, etc.) de *C. officinalis* tuvieron más relación entre sí que en *A. macracantha* (Figura 1 y 2).

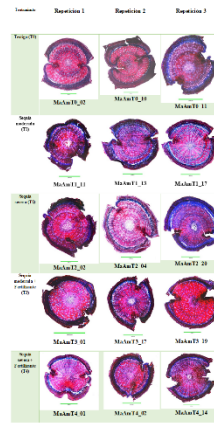
Tabla 1. Porcentajes Lignina y Celulosa en el xilema de *Acacia macracantha*

Tratamiento	Celulosa Antes	Lignina Antes	Celulosa Después	Lignina Después	Dif. Celulosa	Dif. Lignina
T0	42,45	57,55	44,6	55,4	2,15	-2,15
T1	36,61	63,39	51,54	48,46	14,93	-14,93
T2	25,61	74,39	42,04	57,96	16,43	-16,43
T3	31,46	68,54	43,58	56,42	12,12	-12,12
T4	42,57	57,43	51,8	48,2	9,23	-9,23

Tabla 2. Porcentajes Lignina y Celulosa en el xilema de *Cinchona officinalis*

Tratamiento	Celulosa Antes	Lignina Antes	Celulosa Después	Lignina Después	Dif. Celulosa	Dif. Lignina
T0	49,08	50,92	49,38	50,62	0,3	-0,3
T1	34,02	65,98	21,36	78,64	-12,66	12,66
T2	42,99	57,01	41,62	58,38	-1,37	1,37
T3	43,59	56,41	29,19	70,81	-14,4	14,4
T4	53,92	46,08	26,11	73,89	-27,81	27,81

Tabla 3. Imágenes microscópicas *Acacia macracantha*



Faique: Correlación entre variables (p-value=0.01)

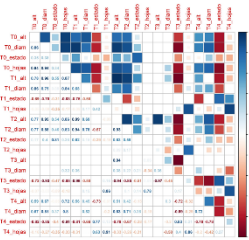
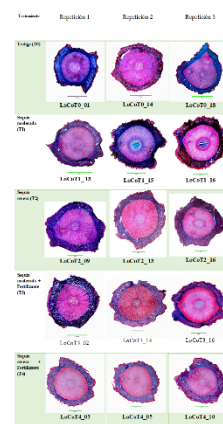


Tabla 4. Imágenes microscópicas *Cinchona officinalis*



Cascarilla: Correlación entre variables (p-value=0.01)

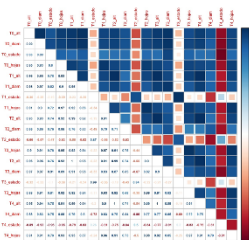


Figura 1. a. Matriz de correlación de *Acacia macracantha* b. Matriz de correlación de *Cinchona officinalis*

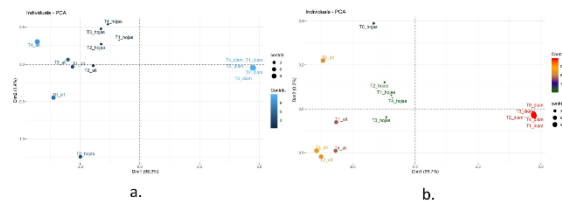


Figura 2. a. Análisis de Componentes Principales de *Acacia macracantha* b. Análisis de Componentes Principales de *Cinchona officinalis*

4 CONCLUSIONES

- Cinchona officinalis* es mucho más sensible al estrés hídrico que *Acacia macracantha*.
- El estrés hídrico tiene un alto impacto a nivel anatómico en la producción de celulosa y lignina, sobre todo en los tratamientos de sequía severa T2 y T4.
- Las variables morfológicas cambian más uniformemente en *C. officinalis* que en *A. macracantha* frente a un estrés hídrico.

5 AGRADECIMIENTOS

Al proyecto "Impacto de las variaciones climáticas en la fijación de carbono en ecosistemas forestales al sur de Ecuador", que se desarrolla con el financiamiento de la Universidad Nacional de Loja



Facultad
Agropecuaria y de
Recursos Naturales
Renovables

JORNADAS ACADÉMICAS
SEMANA DEL ESTUDIANTE
10 AL 14 DE FEBRERO DEL 2020



1859

Confieren el presente CERTIFICADO

A:

CESAR EMILIANO FEJOO FEJOO

Por su participación y presentación con el *Poster*:

**"IMPACTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN LA ANATOMÍA DE LA MADERA
Y LA MORFOLOGÍA DE *Acacia macracantha* WILLD. Y *Cinchona
officialis* L. BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO",**

Realizado en la Carrera de Ingeniería Forestal de la Facultad
Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables de la Universidad
Nacional de Loja.

Loja, Marzo de 2020



Dr. Jorky Roosevelt Armijos Tituana, MSc.
DECANO DE LA FACULTAD AGROPECUARIA
Y DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES



Mg. Johana C. Muñoz, MSc.
GESTORA ACADEMICA CARRERA
INGENIERÍA FORESTAL