

**Adaptación de una plantación de 18 especies
del género *Eucalyptus* en aldea La Jagua,
Municipio de Alauca, El Paraíso, Honduras**

Cristhiam Armando Aizprua Rios

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2017

ZAMORANO
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

Adaptación de una plantación de 18 especies del género *Eucalyptus* en aldea La Jagua, Municipio de Alauca, El Paraíso, Honduras

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Cristhiam Armando Aizprua Rios

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2017

Adaptación de una plantación de 18 especies del género *Eucalyptus* en aldea La Jagua, Municipio de Alauca, El Paraíso, Honduras

Cristhiam Armando Aizprua Rios

Resumen. Para establecer una plantación forestal con fines energéticos es importante considerar la adaptación de especies a las condiciones del lugar de establecimiento. En este estudio se evaluó el comportamiento en altura, diámetro y volumen, y el porcentaje de mortalidad de 18 especies de *Eucalyptus*. Además se estimó, a una edad de seis años, el volumen total promedio de las especies con mejor comportamiento. La plantación experimental fue establecida en La Jagua, municipio de Alauca, Honduras. Las especies se plantaron en tres bloques, 18 parcelas por bloque y 25 árboles por parcela. Se seleccionaron los árboles del centro de cada parcela. Se midió el diámetro a cada 0.2 m, partiendo desde la base hasta 1.8 m de altura, además se midió la altura total. Se contabilizó el total de árboles establecidos por especies. A través de un modelo de regresión lineal simple se proyectó el volumen total promedio de las mejores especies, relacionando las variables dependientes de diámetro y altura con la variable independiente de tiempo. Los datos fueron analizados en el programa “Real Statistics” usando Excel®. Las especies 2, 9 y 11 presentaron mejor comportamiento en diámetro y volumen. Las especies 2, 9 y 14 fueron las mejores en altura con un promedio de 2.56, 2.50 y 2.58 m, respectivamente. Las especies 6, 15 y 16 presentaron una mortalidad del 100%, las mejores especies adaptadas fueron la 5, 9 y 14 con una mortalidad menor al 6%. La especie 2 presentó el mejor volumen total promedio proyectado con 90.19 m³/ha.

Palabras clave: Coeficientes mórficos, mortalidad, volumen.

Abstract. In order to establish an energetic plantation, it is important to consider the adaptation of species to the conditions of the place it was established. In this study we evaluated the behavior in height, diameter and volume, and the mortality rate of 18 *Eucalyptus* species. In addition, the average of total volume of the best-performing species was estimated at a six-year age. The experimental plantation was established in La Jagua, Alauca municipality, Honduras. The species were planted in three blocks, 18 plots per block and 25 trees per plot. The trees in the center of each plot were selected. The diameter of the trees was measured every 0.2 m, starting from the base up to 1.8 m in height, in addition the total height was measured. The total number of trees established by species was counted. Through a simple linear regression model the average of total volume of the best species was projected, relating the dependent variables of diameter and height to the independent variable of time. The data were analyzed in the program "Real Statistics" using Excel®. Species 2, 9 and 11 presented better behavior in diameter and volume. Species 2, 9 and 14 were the best in height with an average of 2.56, 2.50 and 2.58 m, respectively. Species 6, 15 and 16 presented a mortality of 100%, the best adapted species were 5, 9 and 14 with a mortality lower than 6%. Species 2 presented the best average of total volume projected with 90.19 m³ / ha.

Key words: Morphic coefficients, mortality, volume.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas.....	ii
Resumen.....	iii
Contenido	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. METODOLOGÍA.....	3
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
4. CONCLUSIONES	22
5. RECOMENDACIONES	23
6. LITERATURA CITADA.....	24
7. ANEXOS	27

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Mortalidad de especies de la plantación experimental de <i>Eucalyptus</i>	11
2. Prueba de Shapiro-Wilk para comprobar normalidad de datos del diámetro de las especies de <i>Eucalyptus</i>	12
3. Prueba de Shapiro-Wilk para comprobar normalidad de datos de altura de las especies de <i>Eucalyptus</i>	12
4. ANOVA de diseño de bloques completamente al azar del diámetro de las especies de <i>Eucalyptus</i>	13
5. ANOVA de diseño de bloques completamente al azar de la altura de las especies de <i>Eucalyptus</i>	13
ANOVA de una vía para determinar diferencias significativas entre especies de <i>Eucalyptus</i> en relación a diámetro.....	14
6. ANOVA de una vía para determinar diferencias significativas entre especies de <i>Eucalyptus</i> en relación a la altura	14
ANOVA de una vía para determinar diferencias significativas entre especies de <i>Eucalyptus</i> en relación a volumen	14
7. Prueba de medias mediante contrastes para determinar las especies de <i>Eucalyptus</i> con mejor crecimiento en diámetro	15
8. Prueba de medias mediante contrastes para determinar las especies de <i>Eucalyptus</i> con mejor crecimiento en altura	16
9. Prueba de medias mediante contrastes para determinar las especies de <i>Eucalyptus</i> con mayor comportamiento en volumen a una altura de 1.8 m	17
10. Diámetro basal (m) promedio de especies de <i>Eucalyptus</i> a seis años de edad	18
11. Altura (m) promedio de especies de <i>Eucalyptus</i> a seis años de edad	19
12. Valores de coeficientes mórficos para las especies de <i>Eucalyptus</i> de la plantación experimental	20
13. Volumen promedio total de especies de la plantación experimental de <i>Eucalyptus</i> proyectado en seis años	20
Figuras	Página
1. Ubicación de plantación experimental de <i>Eucalyptus</i> en aldea La Jagua, Municipio de Alauca, El Paraíso, Honduras.	3

2. Plantación experimental de <i>Eucalyptus</i> establecida en bloques completamente al azar	4
3. Diseño de parcela y secuencia en que fueron medidos los árboles en plantación de <i>Eucalyptus</i>	5
4. Medición de diámetro a cada 0.2 m de altura	5
5. Primera medición de diámetro del árbol	6
6. Última medición de diámetro a 1.8 m de altura	6
7. Medición de altura total del árbol con ayuda de cinta métrica	7
8. Medición de altura total del árbol con ayuda de vara de maniobra telescópica	7
9. Curva de crecimiento de la plantación experimental de <i>Eucalyptus</i>	18

Anexos

Página

1. Plantación experimental de <i>Eucalyptus</i> ubicada en La Jagua, municipio de Alauca, El Paraíso, Honduras.	27
--	----

1. INTRODUCCIÓN

La descarbonización en la generación de electricidad es un factor importante para estabilizar los niveles atmosféricos de gases de efecto invernadero. La producción de biomasa para su uso en la generación de electricidad es una fuente de energía renovable (Regan et al., 2017). Esta alternativa ayuda a la mitigación del cambio climático a través del secuestro directo de dióxido de carbono (CO₂) y la sustitución de combustibles como el petróleo y carbón (Zhang, Guan, y Song, 2012).

La biomasa contribuye con el 7% de la matriz energética a nivel mundial (Gominho, Lourenzo, Miranda, y Pereira, 2012). Las plantaciones con fines energéticos pueden desempeñar un papel muy importante en el suministro de energía (Broek, Vleeshouwers, Hoogwijk, Wijk, y Turkenburg, 2001). Esto genera que exista una creciente demanda de materias primas a partir de fuentes renovables destinadas a la producción de electricidad (Eufrade, Oguri, de Melo, Ballarin, y Guerra, 2016). Debido a esta demanda y a la contribución energética surge durante los últimos años el interés de establecer plantaciones forestales de rápido crecimiento (Albaugh, Rubilar, Maier, Acuña, y Cook, 2017).

Las plantaciones forestales destinadas a la producción de biomasa presentan una rotación con un período de cinco a ocho años (Oliveira y Tomé, 2017). Se comprobó que esta producción para la generación de energía es potencialmente competitiva en el mercado. Esto se debe a que plantaciones de plantas perennes leñosas son a menudo menos susceptibles a las variables climáticas, además de presentar una corta rotación, requieren de menos insumos para su producción (Regan et al., 2017).

Dentro de los géneros más establecidos en las plantaciones forestales, se encuentra el *Eucalyptus* (Food and Agriculture Organization [FAO], 1997). El *Eucalyptus* es un árbol originario de Australia y Tasmania (Muñoz, Espinosa, Herrera y Cancino, 2005). Existe alrededor de 700 especies y se caracterizan por su alto rendimiento en producción de biomasa, capacidad de absorción de CO₂, nutrientes y recursos hídricos (Albaugh et al., 2017). Además es una especie de rápido crecimiento y resistente a factores climáticos (Grupo Empresarial ENCE, 2009).

Existen críticas negativas sobre las plantaciones forestales de *Eucalyptus*. Por ejemplo, se afirma que el *Eucalyptus* consume una gran cantidad de agua. Pero, en un estudio realizado por Roberts, Johnson, McLarin, y Read (2015), lograron predecir, bajo un modelo empírico, el uso anual de agua en una plantación forestal de *Eucalyptus nitens* de seis años de edad ubicada en Tasmania. El modelo predijo un uso anual de 791 mm de agua. Los resultados de este estudio contradicen la opinión de muchas personas sobre el consumo de agua en las

plantaciones de *Eucalyptus*. En ocasiones las críticas negativas recaen producto de la falta de conocimientos técnicos y de argumentos científicos.

La sostenibilidad es un tema muy importante en el manejo de plantaciones forestales (García et al., 2013). En Brasil por ejemplo, las plantaciones son establecidas en áreas de bajo potencial agrícola. Se utilizan suelos de los órdenes Oxisol y Entisol caracterizados por su baja fertilidad y bajas reservas de minerales (Rocha et al., 2016). Junto a esto, el manejo de plantaciones de rotación corta y de rápido crecimiento son alternativas para lograr mejores rendimientos (Eufrade et al., 2016).

El éxito de establecer una plantación forestal radica en conocer el sitio de siembra, selección de la especie, preparación del terreno, el manejo de las labores y el cuidado pre y post plantación (García, Sotomayor, Silva, y Valdebenito, 2006). La selección de la/las especies a utilizar en una plantación forestal deben ser adecuadas a las características del suelo y condiciones climáticas en el área de establecimiento (Martínez, Azpíroz, Rodríguez, Cetina, y Gutiérrez, 2006). Si no existe suficiente información de la especie a seleccionar, se debe realizar estudios que determine la especie que mejor se adapte a las condiciones del lugar de establecimiento.

En un estudio realizado por el Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal de Honduras (2015), muestra que las especies de *Eucalyptus* más establecidas en plantaciones forestales en regiones tropicales son: *Eucalyptus citriodora*, *Eucalyptus globulus*, y *Eucalyptus grandis*. Esta información se puede relacionar con este estudio, la cual está basado en una investigación sobre especies de mejor adaptación en una plantación experimental de *Eucalyptus*, ubicada en el Municipio de Alauca, El Paraíso, Honduras.

Esta investigación fue la continuación de una serie de estudios que buscan establecer una plantación forestal con fines de producción de biomasa para la generación de energía en la Universidad Zamorano. Actualmente, el 30% de la energía eléctrica que demanda esta Universidad está cubierta por energía renovable (Alvarenga, 2016). Con el compromiso de mitigar los efectos del cambio climático, la biomasa puede aumentar este porcentaje de energía basada en fuentes renovables. De esta manera, la Universidad Zamorano puede posicionarse como una de las mejores Universidades de Latinoamérica responsables con el medio ambiente.

Los objetivos de este estudio fueron los siguientes:

- Determinar las especies de *Eucalyptus* con mejor comportamiento en volumen, crecimiento de altura y diámetro de una plantación experimental ubicada en la Aldea La Jagua, Municipio de Alauca, El Paraíso, Honduras.
- Determinar el porcentaje de mortalidad de las 18 especies del género *Eucalyptus* establecidas en la plantación experimental ubicada en la Aldea La Jagua, Municipio de Alauca, El Paraíso, Honduras.
- Estimar a una edad de seis años el volumen promedio total de las especies que presentan mejor comportamiento en crecimiento y volumen de la plantación experimental.

2. METODOLOGÍA

Sitio de estudio.

La plantación se estableció en la aldea La Jagua ($13^{\circ}52'6.18''$ N y $86^{\circ}37'8.33''$ W) (Figura 1) ubicada en el Municipio de Alauca, Departamento de El Paraíso, Honduras (Instituto Hondureño de Turismo, 2016). Esta región tiene un clima tropical con una precipitación media anual que oscila entre 1,000 a 1,200 mm. En un año, la temperatura media es de 27°C y la altitud promedio es de 876 msnm (Climate-Data.Org, 2015).



Figura 1. Ubicación de plantación experimental de *Eucalyptus* en aldea La Jagua, Municipio de Alauca, El Paraíso, Honduras.

Diseño experimental.

La plantación experimental de *Eucalyptus* se estableció del 24 al 28 de septiembre del año 2015. El diseño que se utilizó en el estudio fue bloques completamente al azar. Las especies fueron plantadas en tres bloques (Figura 2) y por cada bloque se establecieron 18 parcelas con las especies estudiadas. Por motivo de confianza en la investigación, las especies fueron identificadas con números (especie 1, especie 2, especie 3 y así sucesivamente). En

cada parcela se plantaron 25 árboles de una misma especie distribuidos en cinco hileras y en cada hilera se plantaron cinco árboles. El distanciamiento fue de 3 m entre bloques, 2 m entre hileras y 3 m entre plantas.

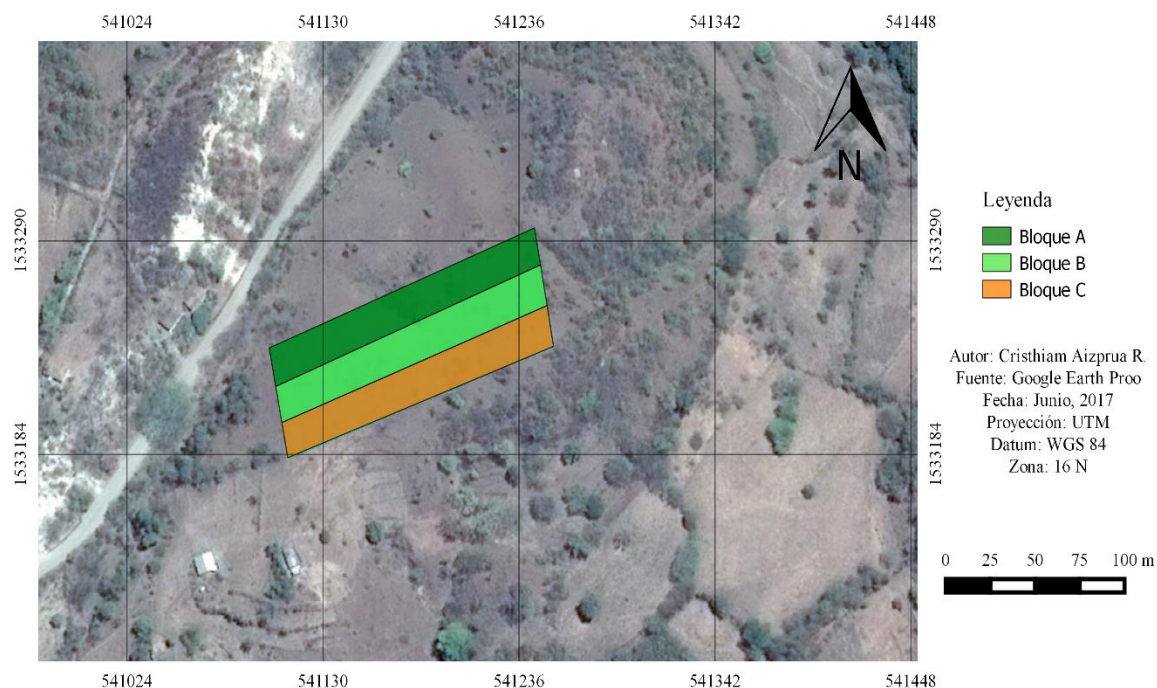


Figura 2. Plantación experimental de *Eucalyptus* establecida en bloques completamente al azar.

Selección de muestra.

Según Granados, Serrano, y García (2014), los árboles que se encuentran en los bordes de las parcelas presentan factores de competencia diferentes a los árboles que se encuentran dentro de las mismas. Por esta razón, se seleccionaron los árboles establecidos en el centro de cada parcela debido a que éstos presentan factores de competencia similares entre ellos. Por tanto se seleccionaron un total de nueve árboles por cada parcela.

Se estableció un orden de medición de los árboles por parcela. Para ello se identificaron enumerándolos desde uno hasta nueve y la secuencia en que se midieron los árboles fue a través de la forma de zigzag (Figura 3).

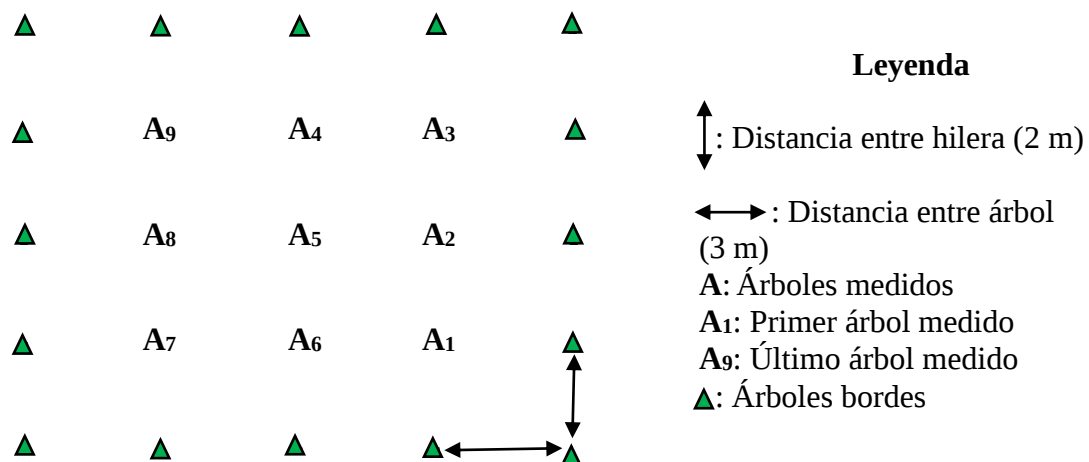


Figura 3. Diseño de parcela y secuencia en que fueron medidos los árboles en plantación de *Eucalyptus*.

Variables medidas.

Se midió el diámetro (mm) y altura total (m) de los árboles seleccionados por parcela. Con la ayuda del pie de rey se midió el diámetro del árbol a cada 0.20 m de altura (Figura 4), partiendo desde la base del árbol (Figura 5) hasta llegar a 1.8 m de altura (Figura 6).

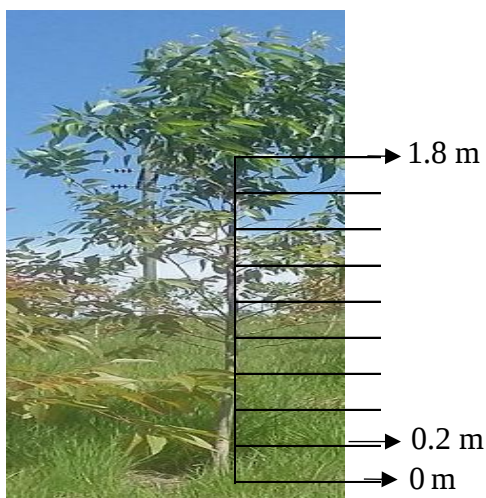


Figura 4. Medición de diámetro a cada 0.2 m de altura.



Figura 5. Primera medición de diámetro del árbol.



Figura 6. Última medición de diámetro a 1.8 m de altura.

Para los árboles que tenían una altura menor a 1.8 m, se midió el diámetro hasta la sección de altura (cada 0.2 m) más cercana a la altura total del árbol. Es decir, si un árbol midió 1.55 m de altura, la última medición del diámetro para ese árbol se tomó a 1.4 m de altura. Por otro lado, los árboles que presentaron una altura mayor a 1.8 m, se midió el diámetro solo hasta 1.8 m de altura.

Luego de haber medido las secciones de diámetros para un árbol, se midió la altura total de ese árbol. De esta manera se midieron todos los árboles seleccionados. Se utilizó una cinta métrica para los árboles que tenían una altura menor a 2 m (Figura 7). Si el árbol tenía una altura mayor a 2 m se utilizó una vara de maniobra telescópica (Figura 8).



Figura 7. Medición de altura total del árbol con ayuda de cinta métrica.



Figura 8. Medición de altura total del árbol con ayuda de vara de maniobra telescópica.

Fecha de toma de datos.

Los datos fueron tomados cuatro veces en un período de un año. En los meses de junio y octubre del año 2016 se tomaron dos mediciones. Las otras dos mediciones se recolectaron en marzo y junio del presente año. La edad de la plantación experimental de *Eucalyptus* en la última toma de datos era de un año y nueve meses.

Cálculos.

Se trabajaron los cálculos, para los datos tomados en campo, con el programa de Excel 2013.

El volumen de cada sección del fuste de un árbol se estimó con la fórmula utilizada en el estudio de (Albaugh et al., 2017), en la que se empleó el criterio de la fórmula de Smalian definido por la ecuación 1. El volumen a 1.8 m de altura fue calculado para cada árbol sumando el volumen calculado de cada sección.

$$V = \frac{(A + a) * h}{2} \quad [1]$$

Donde:

V = Volumen de la sección del fuste (m³).

A = Área transversal de la sección de diámetro mayor (m²).

a = Área transversal de la sección de diámetro menor (m²).

h = Altura de la sección (0.2 m).

El área transversal de cada sección se calculó con la ecuación 2.

$$A = \pi * \frac{d^2}{4} \quad [2]$$

Donde:

A = Área transversal de sección (m²).

$\pi = 3.1416$

d = Diámetro de la sección (m).

El volumen a 1.8 m de altura para una especie fue el promedio de los volúmenes obtenidos en los árboles que representan a dicha especie. Este cálculo se realizó para todas las especies.

Se estimó el volumen total promedio para una especie utilizando la ecuación empleada en el estudio de (García et al., 2013) definido por la ecuación 3.

$$V = \pi * \frac{d^2}{4} * H * Cm \quad [3]$$

Donde:

V = Volumen total promedio (m³) para especie n.

$\pi = 3.1416$

d = Diámetro promedio basal de la especie n (m).

H = Altura promedio total de la especie n.

Cm = Coeficiente mórfico para especie n.

El coeficiente mórfico es un indicador numérico de la forma de los fustes de los árboles. Es la relación que existe entre el volumen real de un fuste y el volumen de un cuerpo geométrico convencional como el cilindro cuya base será el área basal del árbol y su misma altura (Romahn y Maldonado, 2010). Su cálculo fue definido por la ecuación 4.

$$C_m = \frac{V_f}{V_c} \quad [4]$$

Donde:

C_m = Coeficiente mórfico de la especie n.

V_f = Volumen promedio de fuste de la especie n.

V_c = Volumen de cilindro con área de la base igual que el área basal promedio de la especie n e igual altura promedio.

Mortalidad de árboles.

Para determinar el porcentaje de mortalidad de las especies estudiadas se contabilizaron los árboles vivos seleccionados por parcela. Se calculó el porcentaje de mortalidad de las especies de la plantación con la ecuación 5.

$$Z = \frac{x - y}{x} * 100 \quad [5]$$

Donde:

Z = Porcentaje de árboles muertos de la especie n.

x = Árboles plantados de la especie n.

y = Árboles contabilizados de la especie n.

Fase estadística.

Se utilizó la herramienta “Real Statistics” del programa Excel para las pruebas y análisis del estudio.

Para comprobar que los datos de las variables de diámetro y altura seguían una distribución normal, se ejecutó la prueba estadística de normalidad Shapiro-Wilk, con un alfa = 0.05. Se planteó como hipótesis nula que los datos estudiados provienen de una población normalmente distribuida.

Se determinó la efectividad del diseño de los bloques a través de un ANOVA de bloques completamente al azar. Con un alfa = 0.05, se evaluó si el diseño entre bloques presentaba o no diferencias estadísticamente significativas. Como el análisis del diseño fue balanceado, las especies evaluadas fueron las establecidas en los tres bloques. Las especies que no se establecieron en al menos uno de los tres bloques, no fueron evaluadas en este análisis.

Se aplicó un ANOVA de una vía con el diseño completamente al azar. Esta prueba se aplicó con un diseño no balanceado, es decir, que se incluyeron las especies que no estaban presentes en uno de los tres bloques del estudio. Con un alfa = 0.05, se planteó la siguiente hipótesis:

H_0 = No hay diferencias significativas entre las especies en las variables de diámetro, altura y volumen.

H_1 = Existe un comportamiento superior en diámetro, altura y volumen de una especie con el resto de las demás especies.

Se aplicó una prueba de contrastes de comparaciones planeadas buscando conocer cuáles especies presentaban mejor comportamiento en diámetro, altura y volumen.

Se estimó el volumen total a la edad de cosecha (seis años) de las especies que presentaron mejor comportamiento en la plantación experimental. Para ello, se relacionaron las variables dependientes de diámetro y altura con la variable independiente de tiempo a través de un modelo de regresión lineal simple. Este modelo para estimar volumen es sugerido por (Zhang et al., 2012), donde Y es la variable dependiente y x es la variable independiente, entonces el modelo de regresión lineal simple es definido por la ecuación 6 (Zaiontz, 2013):

$$Y = \beta_1 * x + \beta_0 \quad [6]$$

Donde:

Y= Variable de respuesta

β_1 = Pendiente (Positiva o negativa)

x = Período de tiempo

β_0 = Intersección de la línea con el eje

Una vez conocidos los valores de β_1 , β_0 y x, que es representada por el valor tiempo, se sustituyó en la ecuación de regresión. De esta manera se utilizó el modelo de predicción de las variables de diámetro y altura.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mortalidad de especies.

Las especies que no se adaptaron a las condiciones de la región donde se estableció la plantación experimental fueron la 6, 15 y 16 con un porcentaje de mortalidad del 100%. Por otro lado, las especies que presentaron una mortalidad baja fueron la 5, 9, y 14 con un porcentaje menor o igual al 6% (Cuadro 1).

Cuadro 1. Mortalidad de especies de la plantación experimental de *Eucalyptus*.

Especie	Mortalidad (%)
1	33
2	13
3	29
4	44
5	4
6	100
7	25
8	14
9	6
10	33
11	30
12	44
13	78
14	6
15	100
16	100
17	33
18	30

La mortalidad promedio en la plantación experimental de *Eucalyptus* fue del 40%, el doble del promedio de mortalidad que presentaron en vivero, según el estudio realizado por Gutiérrez (2015). La mortalidad en vivero de la especie 9 fue del 20%, sin embargo el comportamiento de adaptación en campo fue mejor, con una mortalidad de 6%. Por otro lado, la especie 14 presentó una mortalidad similar en campo y en vivero, con un porcentaje del 6%.

Las especies de *Eucalyptus* que presentaron un alto porcentaje de mortalidad no fueron analizadas en el estudio. Estas especies fueron la 4, 6, 13, 15 y 16.

Prueba estadística de normalidad Shapiro-Wilk.

Se comprobó que los datos de diámetro (Cuadro 2) y altura (Cuadro 3) seguían una distribución normal.

Cuadro 2. Prueba de Shapiro-Wilk para comprobar normalidad de datos del diámetro de las especies de *Eucalyptus*.

Variable	Estadístico W	Significancia
Bloque A	0.96	0.77
Bloque B	0.95	0.55
Bloque C	0.93	0.39

Nota. $\alpha = 0.05$.

El valor estadístico W oscila entre 0 y 1. Este valor entre más cercano se encuentra de 0, la hipótesis nula se rechaza, si por el contrario el valor W se encuentra cercano a 1, la hipótesis nula no se rechaza (Zaiontz, 2013). Dado que el nivel de significancia fue mayor que el alfa establecido ($p > 0.05$) en los tres bloques, se concluyó que no existen motivos para rechazar la hipótesis nula. Por tanto, los valores de diámetro en los tres bloques cumplieron los requisitos de una distribución normal.

Cuadro 3. Prueba de Shapiro-Wilk para comprobar normalidad de datos de altura de las especies de *Eucalyptus*.

Variable	Estadístico W	Significancia
Bloque A	0.94	0.60
Bloque B	0.95	0.56
Bloque C	0.93	0.39

Nota. $\alpha = 0.05$.

Dado que la significancia fue mayor que el alfa establecido ($p > 0.05$) en los tres bloques, no se rechazó la hipótesis nula. Por tanto, se concluyó que los valores de altura en los bloques A, B y C provienen de una distribución normal.

Efectividad del diseño de los bloques.

El diseño entre bloques completamente al azar en que se estableció la plantación experimental de *Eucalyptus* no presentó diferencias significativas en diámetro (Cuadro 4) y altura (Cuadro 5). Esto indica que el diseño de bloques no separó el error del experimento, lo que significa que se pudo haber usado un diseño completamente al azar.

Cuadro 4. ANOVA de diseño de bloques completamente al azar del diámetro de las especies de *Eucalyptus*.

Fuentes	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Valor p
Bloques	0.000024	2	0.000012	0.54	0.59
Tratamientos	0.000459	8	0.000057	2.58	0.05&
Error	0.000356	16	0.000022		
Total	0.000838	26			

Nota. $p < 0.05$. & Es significativo para el alfa establecido.

La fila de bloques corresponden al diseño de bloqueo y la de tratamientos corresponden a las especies establecidas. La significancia para los tratamientos indica la diferencia entre diámetro de las especies y fue de 0.05, la cual es igual al valor de alfa. Esto significa que existen diferencias entre diámetro. Dado que la significancia para bloques fue mayor al valor alfa, se concluyó que no existen diferencias significativas entre el diseño de bloques.

Cuadro 5. ANOVA de diseño de bloques completamente al azar de la altura de las especies de *Eucalyptus*.

Fuentes	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Valor p
Bloques	0.1	2	0.04	0.28	0.76
Tratamientos	3.0	8	0.38	2.53	0.05&
Error	2.4	16	0.15		
Total	5.5	26			

Nota. $p < 0.05$. & Es significativo para el alfa establecido.

El factor evaluado fue el de bloques y dado que el valor de significancia = $0.76 > 0.05$, no existió suficientes evidencias para rechazar la hipótesis nula y se concluyó que no existieron diferencias significativas en altura entre el diseño de bloques.

Los resultados del ANOVA de diseño de bloques completamente al azar mostraron que el diseño entre bloques no ayudó a reducir la variación del experimento. Por tanto, se analizó un diseño completamente al azar, la cual permitió incluir tratamientos que no se presentaron en todos los bloques. Esto se debe a que el análisis de bloques no balanceados presenta una metodología más sencilla para diseños completamente al azar que para el diseño de bloques completamente al azar.

Análisis de un diseño no balanceado.

Se aplicó un ANOVA de una vía, la cual nos permitió incluir en el análisis a las especies 1, 9, 10 y 17 que no se establecieron el menos uno de los tres bloques.

Cuadro 6. ANOVA de una vía para determinar diferencias significativas entre especies de *Eucalyptus* en relación a diámetro.

Fuentes	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Valor p
Tratamientos	0.00076	12	0.000063	3.637	0.004&
Error	0.00038	22	0.000017		
Total	0.00115	34	0.000034		

Nota. $p < 0.05$. & Es significativo para el alfa establecido.

Según los resultados de la prueba de ANOVA de una vía, como el valor $p < 0.05 = \alpha$, se rechazó la hipótesis nula y se concluyó que existen diferencias significativas en diámetro entre las especies de *Eucalyptus* de la plantación experimental.

Cuadro 7. ANOVA de una vía para determinar diferencias significativas entre especies de *Eucalyptus* en relación a la altura.

Fuentes	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Valor p
Tratamientos	4.35	12	0.36	3.06	0.01&
Error	2.61	22	0.12		
Total	6.95	34	0.20		

Nota. $p < 0.05$. & Es significativo para el alfa establecido.

Dado que el valor $p = 0.01 < 0.05 = \alpha$, se rechazó la hipótesis nula y se concluyó que existen diferencias significativas en altura entre las especies de *Eucalyptus* de la plantación experimental.

Cuadro 8. ANOVA de una vía para determinar diferencias significativas entre especies de *Eucalyptus* en relación a volumen.

Fuentes	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Valor p
Tratamientos	0.0000339	12	0.0000028	3.337	0.007&
Error	0.0000186	22	0.00000845		
Total	0.0000525	34	0.0000154		

Nota. $p < 0.05$. & Es significativo para el alfa establecido.

En relación al volumen, debido a que el valor $p = 0.007 < 0.05$, se rechazó la hipótesis nula y se concluyó que existen diferencias significativas entre las especies de *Eucalyptus*.

Prueba de medias mediante contrastes de comparaciones planeadas.

Diámetro. Las especies de *Eucalyptus* que presentaron un comportamiento superior en el crecimiento de diámetro fueron las especies 2, 9 y 11 (Cuadro 9). Estas tres especies presentaron un comportamiento similar en el crecimiento de diámetro. Por esta razón, no fue posible separarlas y encontrar diferencias significativas entre ellas.

Cuadro 9. Prueba de medias mediante contrastes para determinar las especies de *Eucalyptus* con mejor crecimiento en diámetro.

Especies	Promedio diámetro (m)
1	0.019 b
2	0.025 ab
3	0.020 b
5	0.020 b
7	0.012 c
8	0.018 bc
9	0.029 a
10	0.020 b
11	0.023 ab
12	0.017 bc
14	0.019 b
17	0.012 c
18	0.013 c

Nota: Letras iguales entre columna indican que no existen diferencias significativas de diámetro entre especies de acuerdo a la prueba de medias mediante contrastes al 5%.

En la prueba de medias mediante contrastes, se tomó la media mayor de las especies analizadas y se comparó con cada media de las demás especies. El resultado del ensayo mostró que la especie 9 presentó diferencias significativas con la media de las demás especies, excepto con la media de las especies 2 y 11, la cual no presentó diferencias significativas. Por tanto, no fue posible separar las especies 2, 9 y 11 debido a que presentaron un comportamiento similar en diámetro.

Altura. Las especies de *Eucalyptus* que presentaron un comportamiento superior en cuanto a crecimiento en altura fueron las especies 2, 3, 8, 9, 10, 11, y 14 (Cuadro 10). Estas especies no fueron posibles separarlas debido a que presentaron un comportamiento similar en el crecimiento de longitud.

Cuadro 10. Prueba de medias mediante contrastes para determinar las especies de *Eucalyptus* con mejor crecimiento en altura.

Especies	Promedio altura (m)
1	1.85 b
2	2.56 a
3	2.24 ab
5	1.97 b
7	1.87 b
8	2.20 ab
9	2.50 ab
10	2.30 ab
11	2.08 ab
12	1.62 b
14	2.58 a
17	1.45 b
18	1.62 b

Nota: Letras iguales entre columna indican que no existen diferencias significativas de altura entre especies de acuerdo a la prueba de medias mediante contrastes al 5%.

Se tomó la media de la especie 14, especie con la media más alta, y se comparó con cada media de las demás especies. Los resultados mostraron que la especie 14 no fue posible separarla de las especies 2, 3, 8, 9, 10 y 11, sin embargo con las demás especies si mostró diferencias significativas. En el estudio realizado por Gutiérrez (2015), evaluó en vivero el desarrollo físico de estas 18 especies, y las especies que registraron mayor altura en los primeros 17 días de germinadas fueron las especies 12 y 18. Sin embargo, éstas especies no sobresalieron en cuanto a crecimiento de altura en campo.

Volumen. En cuanto a volumen, las especies de *Eucalyptus* que presentaron un comportamiento superior fueron la 2, 9 y 11 (Cuadro 11). Estas tres especies no fue posible separarlas debido a que presentaron un comportamiento similar entre ellas.

Cuadro 11. Prueba de medias mediante contrastes para determinar las especies de *Eucalyptus* con mayor comportamiento en volumen a una altura de 1.8 m.

Especies	Promedio volumen (m ³)
1	0.0006 b
2	0.0010 ab
3	0.0007 b
5	0.0008 b
7	0.0002 bc
8	0.0006 b
9	0.0014 a
10	0.0007 b
11	0.0009 ab
12	0.0004 b
14	0.0006 b
17	0.0002 bc
18	0.0002 bc

Nota: Letras iguales entre columna indican que no existen diferencias significativas de volumen entre especies de acuerdo a la prueba de medias mediante contrastes al 5%.

Las especies que presentó un comportamiento superior en volumen fue la especie 9. Esta especie presentó diferencia significativa con las demás especies excepto con las especies 2 y 11, la cual no presentó diferencias significativas con estas dos especies. Debido a que presentaron un comportamiento similar, no fue posible separar las especies 2, 9 y 11.

Hasta la última toma de medición, las especies con mejor comportamiento en volumen fueron la 2, 9 y 11. Sin embargo, este comportamiento puede cambiar a medida que va creciendo la plantación. Según un estudio, en los primeros años de establecimiento de una plantación de *Eucalyptus*, algunas especies mantienen una tasa de crecimiento similar en altura y diámetro, como fue el caso de las especies 2, 9 y 11 (Figura 9). Mientras que otras especies presentan un nivel de crecimiento en altura mayor a su diámetro, al llegar a su altura máxima promedio, éstas se enfocan luego en el crecimiento de su diámetro. Por tanto, es importante considerar a las especies que sobresalieron en la prueba de crecimiento de altura que no sobresalieron en la prueba de crecimiento de diámetro (Eufrade et al., 2016).

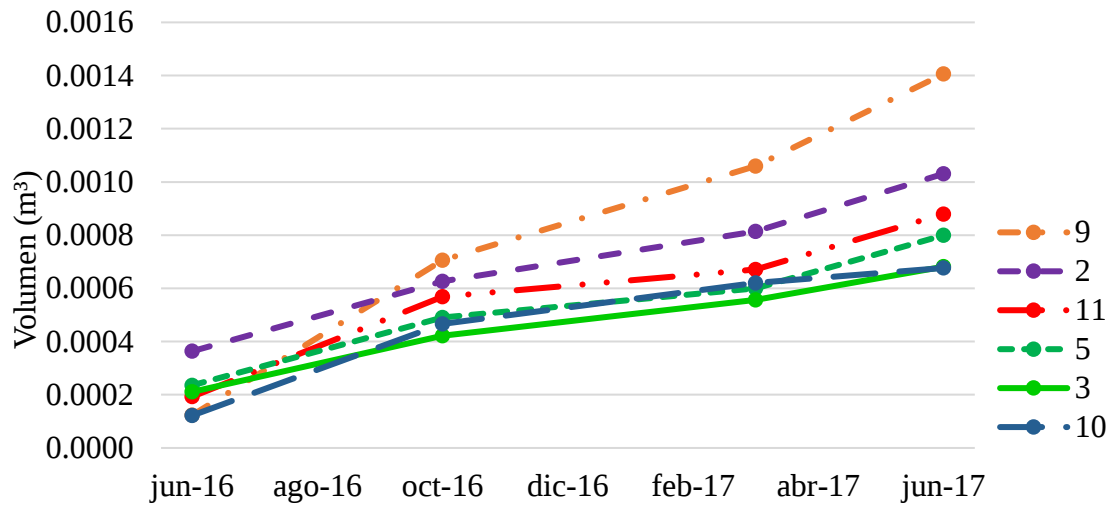


Figura 9. Curva de crecimiento de la plantación experimental de *Eucalyptus*.

Volumen total promedio estimado de las mejores especies.

Se estimó a una edad de seis años, el volumen total promedio de las especies que sobresalieron en el crecimiento de diámetro y altura. Para ello, se estimó el diámetro promedio basal (Cuadro 12) y altura total promedio (Cuadro 13) de las estas especies de *Eucalyptus*. Con el análisis de regresión se calcularon los valores de la pendiente (β_1) e intersección de la línea con el eje (β_0).

Cuadro 12. Diámetro basal (m) promedio de especies de *Eucalyptus* a seis años de edad.

Especie	β_1	β_0	R^2	Diámetro basal (m) $Y = \beta_1 * x + \beta_0$
2	0.000054	0.0074	0.88	0.127
3	0.000039	0.0072	0.88	0.094
8	0.000023	0.0037	0.93	0.054
9	0.000084	0.0004	0.93	0.184
10	0.000057	0.0029	0.81	0.128
11	0.000060	0.0097	0.87	0.141
14	0.000022	0.0067	0.80	0.054

Nota. β_1 : Pendiente. β_0 : Intersección de la línea con el eje. R^2 : Coeficiente de determinación.

El coeficiente de determinación (R^2) varió según la especie. El valor de R^2 más bajo de las especies evaluadas fue 0.80 de la especie 14. Sin embargo, ese valor es cercano a 1. Esto significa que el modelo lineal es adecuado para describir la relación de la variable diámetro y tiempo.

Las especies con las medias más altas en el diámetro basal, estimado a una edad de seis años fueron la 9 y 11. Las especies que presentaron la media de diámetro inferior fueron la 8 y 14. Si comparamos el diámetro promedio de estas especies a 1 año y 9 meses con la estimación de diámetro de este estudio, la especie 9 presentó comportamiento similar, es decir, mayor a las demás especies.

Cuadro 13. Altura (m) promedio de especies de *Eucalyptus* a seis años de edad.

Espece	β_1	β_0	R ²	Altura (m) $Y = \beta_1 * x + \beta_0$
2	0.0027	0.9000	0.90	6.77
3	0.0024	0.8025	0.91	5.98
8	0.0023	0.7573	0.85	5.85
9	0.0031	0.6857	0.80	7.54
10	0.0022	0.9519	0.91	5.77
11	0.0014	1.2414	0.73	4.39
14	0.0024	1.0805	0.85	6.44

Nota. β_1 : Pendiente. β_0 : Intersección de la línea con el eje. R²: Coeficiente de determinación.

A la edad de seis años, las especies que presentaron mayor crecimiento en altura fueron la 9, 2 y 14 con una altura de 7.54, 6.77 y 6.44 m, respectivamente. Aquellas que presentaron un crecimiento menor fueron las especies 11 y 5.

Estos resultados relacionados con el estudio de (Muñoz et al., 2005), muestran una diferencia en el crecimiento de altura y diámetro. Dicho estudio fue en una plantación de *Eucalyptus nitens* de seis años de edad ubicada en Chile. Los resultados mostraron un diámetro a la altura del pecho (Dap) promedio de 15.5 cm con una altura promedio de 18.1 m. Por otro lado, los resultados del estudio de (Albaugh et al., 2017), de una plantación de *Eucalyptus globulus* de la misma edad que el estudio anterior, mostraron un Dap promedio de 6.5 cm y una altura promedio de 8.4 m.

Es importante mencionar que los resultados de este estudio no pueden ser comparados directamente con otros, debido a que no se tiene el nombre científico de las especies evaluadas por motivos de confidencialidad. Sin embargo, los resultados de los estudios presentados dieron una idea de que tan reales fueron los resultados del estudio.

Coeficientes de forma.

El valor del coeficiente mórfo del fuste varía entre 0 y 1 para los tipos de dendrometría. Este intervalo se debe a que el volumen de cualquier árbol es menor o igual al volumen del cilindro. El intervalo de los coeficientes mórfo obtenidos en este estudio para las especies de *Eucalyptus* evaluadas fue de 0.22 - 0.78 (Cuadro 14). Estos valores presentan un intervalo mayor en comparación a los valores obtenidos en el estudio de (García et al., 2013), la cual muestran un rango de coeficientes de forma de 0.46 - 0.63.

Cuadro 14. Valores de coeficientes m3rficos para las especies de *Eucalyptus* de la plantaci3n experimental.

Especie	Coeficientes de forma
2	0.46
3	0.51
5	0.44
8	0.40
9	0.39
10	0.39
11	0.29
14	0.34

Se multiplic3 el 3rea basal promedio para una especie, por su altura total promedio y por el coeficiente m3rfico, para obtener el volumen promedio total de cada especie evaluada.

Volumen total promedio de las especies evaluadas.

Las especies con mayor volumen total promedio estimado fueron la 2 y 9. Mientras que las especies 8 y 14 fueron las de menor volumen (Cuadro 15).

Cuadro 15. Volumen promedio total de especies de la plantaci3n experimental de *Eucalyptus* proyectado en 6 a3os.

Especie	3rea basal (m ²)	Altura total (m)	Factor de forma	Volumen (m ³)	m ³ /ha	Rendimiento (kg/ha)	Ton/ha
2	0.0126	6.77	0.46	0.040	66.11	46277.50	46.28
3	0.0069	5.98	0.51	0.021	35.26	24684.03	24.68
5	0.0106	4.54	0.44	0.021	34.99	24493.85	24.49
8	0.0023	5.85	0.40	0.005	8.90	6228.58	6.23
9	0.0265	7.54	0.39	0.078	130.00	90998.20	91.00
10	0.0129	5.77	0.39	0.029	47.80	33457.81	33.46
11	0.0157	4.39	0.29	0.020	33.63	23539.12	23.54
14	0.0023	6.44	0.34	0.005	8.23	5763.90	5.76

Se estim3 el volumen (m³/ha) con una densidad de siembra de 1,667 3rboles/ha. Seg3n un estudio realizado, el volumen de madera en una plantaci3n de *Eucalyptus* de seis a3os de edad oscila entre 150 - 200 m³/ha (Rocha et al., 2016). Otro estudio realizado por (Albaugh et al., 2017), cuyos resultados mostraron que el volumen de madera de *Eucalyptus* de una plantaci3n a una edad de seis a3os oscil3 entre 180 - 200 m³/ha. La especie 9 seg3n la

proyección de volumen estimada es la que más se acerca a estos rangos, siendo así la especie que presentó el mayor volumen total estimado.

El rendimiento de la madera de *Eucalyptus* varía según la especie. Para este estudio se consideró un rendimiento promedio de 700 kg/m³ (FAO, 1997). Los resultados del estudio mostraron que la especie 2 presentó el rendimiento más alto con 63.13 ton/ha, datos que son relacionados con los resultados del estudio de (Albaugh et al., 2017), en la muestran que la productividad de madera promedio de una plantación de *Eucalyptus* para producción de energía fue de 100 ton/ha.

4. CONCLUSIONES

- En la plantación experimental de *Eucalyptus*, las especies que presentaron mayor comportamiento en crecimiento de diámetro fueron la 2, 9 y 11. Las especies con mayor comportamiento de crecimiento en altura fueron la 2, 3, 8, 9, 10, 11, y 14. En cuanto al volumen promedio a una altura de 1.8m, las especies que presentaron las medias más altas fueron la 2, 9 y 11.
- La mortalidad promedio de la plantación experimental de *Eucalyptus* fue del 40%. Este valor es alto debido a que las especies 6, 15 y 16 no se adaptaron a las condiciones de la región donde se estableció la plantación. Las especies 5, 9 y 14 se adaptaron mejor con un porcentaje de mortalidad menor al 6%.
- El volumen promedio total de las especies se estimó a una edad de seis años, edad aproximada de cosecha. La especie 9 presentó un volumen total promedio mayor en comparación con las especies evaluadas. Esta especie se puede considerar para establecer una plantación forestal con fines de producción de biomasa.

5. RECOMENDACIONES

- Dar seguimiento al comportamiento de las especies establecidas en la plantación experimental de *Eucalyptus* hasta la edad de cosecha. Realizar un estudio futuro en el cual se repita las mediciones de diámetro y altura de las especies que potencialmente presentaron un mejor volumen en este estudio.
- Realizar estudios de las características que presenta el área donde está establecida la plantación y del lugar donde se pretenda establecer la plantación forestal. Con el estudio se debe plantear investigar el tipo de suelo y la precipitación anual promedio de ambos lugares.
- Determinar el volumen real de la plantación en el período de cosecha. Comparar los resultados con los de este estudio y demostrar si la metodología aplicada para estimar el volumen fue correcta.
- Realizar un estudio de impacto ambiental y rentabilidad económica previo a la toma decisiva sobre el establecimiento de una plantación forestal de *Eucalyptus* de aprovechamiento de biomasa para producción de energía.

6. LITERATURA CITADA

- Albaugh, T., Rubilar, R., Maier, C., Acuña, E., y Cook, R. (2017). Biomass and nutrient mass of *Acacia dealbata* and *Eucalyptus globulus* bioenergy plantations. *Biomass and Bioenergy*, 97 (1), pp. 162-172.
- Alvarenga, F. (2016). Zamorano es la primera universidad con parque solar. Francisco Morazán, Honduras: *Revista Productor Agropecuario*. Recuperado de: <https://revistaaproagro.com/zamorano-es-la-primer-universidad-con-parque-solar/>
- Broek, R., Vleeshouwers, L., Hoogwijk, M., Wijk, A., y Turkenburg, W. (2001). The energy crop growth model SILVA: description and application to *Eucalyptus* plantations in Nicaragua. *Biomass and Bioenergy*, 21 (5), pp. 335-349.
- Climate-Data.Org. (2015). Clima: El Paraíso. El Paraíso, Honduras: *Climate-data.org*. Recuperado de: <https://es.climate-data.org/location/30484/>
- Eufrade, H., Oguri, G., de Melo, R., Ballarin, A., y Guerra, S. (2016). Storage of whole-tree chips from high-density energy plantations of *Eucalyptus* in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 93 (1), pp. 279-283.
- Food and Agriculture Organization. (1997). Evaluación de los recursos forestales mundiales. Roma, Italia: *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/005/Y1997S/y1997s09.htm>
- García, E., Sotomayor, A., Silva, S., y Valdebenito, G. (2006). Establecimiento de plantaciones forestales. Santiago, Chile: *Instituto Forestal*. Recuperado de: <http://icf.gob.hn/wp-content/uploads/2015/12/PREFO-Manual-del-Eucalipto.pdf>
- García, G., Paleo, C., Hernández, J., García, J., Muñoz, H., y García, X. (2013). Estimación de coeficientes y cocientes de forma para *Pinus montezumae* Lamb. en San Juan Nuevo, Michoacán. Tabasco, México: *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias*. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/272181422>.
- Gominho, J., Lourenzo, A., Miranda, I., y Pereira, H. (2012). Chemical and fuel properties of stumps biomass from *Eucalyptus globulus* plantations. *Industrial Crops and Products*, 39 (1), pp. 12-16.

- Granados, C., Serrano, D., y García, A. (2014). Efecto de borde en la composición y en la estructura de los bosques templados, Sierra de Monte Alto, Centro de México. *Caldasia*, 36 (2), pp. 269-287.
- Grupo Empresarial ENCE. (2009). La gestión forestal sostenible y el *Eucalyptus*. Madrid, España. ENCE. Recuperado de: https://www.ence.es/pdf/El_Eucalipto.pdf.
- Gutiérrez, J. (2015). *Evaluación del desarrollo físico en vivero de dieciocho especies de Eucalyptus con dos sustratos para la generación de biomasa* (tesis de pregrado). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.
- Instituto Hondureño de Turismo. (2016). Departamento El Paraíso. Tegucigalpa, Honduras: Instituto Hondureño de Turismo. Recuperado de: <http://portalunico.iaip.gob.hn/portal/index.php?portal=360>.
- Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre. (2015). Anuario Estadístico Forestal de Honduras. Recuperado de: <http://icf.gob.hn/wp-content/uploads/2017/04/CIPF-Anuario-Forestal-de-Honduras-2015.pdf>.
- Martínez, R., Azpíroz, H., Rodríguez, J., Cetina, V., y Gutiérrez, M. A. (2006). Importancia de las plantaciones forestales de *Eucalyptus*. *Ra Ximhai*, 2 (3), pp. 815-846.
- Muñoz, F., Espinosa, M., Herrera, M., y Cancino, J. (2005). Growth characteristics in diameter, height, and volume of a *Eucalyptus nitens* plantation with different silvicultural treatment for pruning and thinning. *Bosque*, 26 (1), pp. 93-99.
- Oliveira, T., y Tomé, M. (2017). Improving biomass estimation for *Eucalyptus globulus* Labill at stand level in Portugal. *Biomass and Bioenergy*, 96 (1), pp. 103-111.
- Regan, C., Connor, J., Segaran, R., Meyer, W., Bryan, B., y Ostendorf, B. (2017). Climate change and the economics of biomass energy feedstocks in semi-arid agricultural landscapes: A spatially explicit real options analysis. *Journal of Environmental Management*, 192 (1), pp. 171-183.
- Roberts, S., Johnson, R., McLarin, M., y Read, S. (2015). Predicting the water use of *Eucalyptus nitens* plantation sites in Tasmania from inventory data, and incorporation of water use into a forest estate model. *Forest Ecology and Management*, 343 (1), pp. 110-122.
- Rocha, J., de Moraes, J., Gava, J., de Oliveira, T., Melo, E., Bazani, y Wichert, M. (2016). Forest residue maintenance increased the wood productivity of a *Eucalyptus* plantation over two short rotations. *Forest Ecology and Management*, 379 (1), pp. 1-10.
- Romahn, C., y Maldonado, H. (2010). *Dendrometría* (tesis de pregrado). Universidad Autónoma Chapingo, México.

- Zaiontz, C. (2013). Regression Analysis. Indiana, Estados Unidos: *Real Statistics using Excel*. Recuperado de: <http://www.real-statistics.com/regression-analysis/>
- Zaiontz, C. (2013). Shapiro-Wilk Original Test. Indiana, Estados Unidos: *Real Statistics using Excel*. Recuperado de: <http://www.real-statistics.com/tests-normality-and-symmetry/statistical-tests-normality-symmetry/shapiro-wilk-expanded-test/>
- Zhang, H., Guan, D., y Song, M. (2012). Biomass and carbon storage of *Eucalyptus* and *Acacia* plantations in the Pearl River Delta, South China. *Forest Ecology and Management*, 277 (1), pp. 90-97.

7. ANEXOS

Anexo 1. Plantación experimental de *Eucalyptus* ubicada en La Jagua, municipio de Alauca, El Paraíso, Honduras.

