

EVALUACIÓN DE LA PLANTACIÓN FORESTAL

La presente publicación es parte del proyecto PD 849/17 Rev. 2 (F), “Incremento de la competitividad de la reforestación comercial en Costa Rica” financiado por la Organización Internacional de las Maderas Tropicales (OIMT), mediante las aportaciones voluntarias de los gobiernos de Estados Unidos de América y Japón. Para conocer más de la OIMT visitar www.itto.int



AGOSTO 2025

EVALUACIÓN DE LA PLANTACIÓN FORESTAL

OLMAN MURILLO | MELANY PADILLA | HILLARY JARA
Escuela de Ing. Forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica

RANDALL CASTRO

Sistema Nacional de Áreas de Conservación (ACAHN). Ministerio del Ambiente y Energía

634.92
M977e

Murillo-Gamboa, Olman, autor.

Evaluación de la plantación forestal / Olman Murillo-Gamboa, Melanie Padilla-Castro, Hillary Jara-Hernández, Randall Castro-Salazar.
-- 1 edición. -- Cartago, Costa Rica : Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, 2025.
42 páginas ; 13.97 x 21.59 cm : ilustraciones, fotografías, gráficos.

Incluye Bibliografía.
ISBN: 978-9930-817-95-3

1. Árboles -- Cultivo. 2. Árboles -- Calidad. 3. Manejo de bosques.
4. Silvicultura. 5. Manejo de plantaciones forestales. 6. Plantaciones forestales -- Evaluación. 7. Plantaciones forestales -- Calidad. 8. Manejo de bosques. 9. Bosques -- Riesgos ambientales. 10. Análisis del impacto ambiental. 11. Producción forestal. 12. Evaluación de proyectos.
13. Manuales. I. Padilla-Castro, Melanie, autora II. Jara-Hernández, Hillary, autora III. Castro-Salazar, Randall, autor IV. Título.

Comité Editorial, Escuela de Ing. Forestal
Luis Acosta
Ruperto Quesada
Dorian Carvajal

EVALUACIÓN DE LA PLANTACIÓN FORESTAL

Contenidos

Introducción.....	1
1. Cumplimiento de los objetivos de la plantación.....	2
2. El primer factor de éxito está en la calidad genética de las plantas.....	3
3. Área Efectiva y Área Neta Plantada	6
4. Calidad del mantenimiento de la plantación	9
Procedimiento de muestreo.....	9
Procedimiento de muestreo basado en árboles individuales....	10
Criterios e instrumentos de evaluación	12
Interpretación y análisis	13
5. Calidad del crecimiento.....	15
6. Calidad de los árboles de la plantación	18
7. Calidad del manejo de la plantación.....	21
8. Evaluación de la Plantación Forestal	23
8.1 Análisis del riesgo de la plantación para cumplir objetivos de inversión	23
a) Riesgos bióticos.	23
b) Riesgos abióticos.	24
c) Riesgos por fenómenos sociales y ambientales.	26
d) Riesgos en relación con el acceso a la plantación, facilidad de cosecha, tamaño de plantación y distancia al mercado futuro.	28

8.2 Calificación global de los riesgos del proyecto	29
8.3. Evaluación de la calidad de árboles, calidad del manejo y del crecimiento.....	30
a) Calidad del material genético utilizado.....	30
b) Calidad del mantenimiento.	30
c) Calidad de los árboles de la plantación (Índice de calidad de cosecha).....	31
d) Calidad del Manejo y del Crecimiento de la plantación forestal.....	32
Calificación Global de la calidad de la plantación y potencial de cumplimiento de objetivos	34
Literatura.....	35

Introducción

Este documento incluye los temas relacionados con la evaluación de proyectos de producción forestal o plantación y reúne la experiencia de los últimos 30 años en materia de auditoría técnica de proyectos de inversión forestal (Murillo 1991, Murillo y Badilla 2004, Gamboa 2023, Murillo y Badilla, Calidad de la Plantación Forestal en prensa). La auditoría es un campo esencial para el profesional que requiera evaluar proyectos, desde revisar el cumplimiento de los objetivos de producción, hasta la verificación de aplicación de buenas prácticas silviculturales que garanticen el éxito del proyecto de inversión. Así también, la verificación del cumplimiento de criterios mínimos de crecimiento, desarrollo y calidad de la plantación, que sustenten la continuidad del proyecto, que permitan decidir sobre la asignación de fondos de capital, o **para la toma de decisiones en general**. El documento podría también concebirse como una guía de auditoría técnica de plantaciones.

Es importante señalar que el enfoque de este manual está en plantaciones forestales orientadas a la producción de madera para aserrío. Por tanto, se refiere a la evaluación de los árboles en función del mejor desarrollo del diamétrico, altura comercial y donde la calidad del fuste se convierte en un eje central de revisión. Esta es una silvicultura orientada a maximizar el volumen por árbol y de la mejor calidad de fuste posible. A diferencia de la silvicultura orientada a maximizar el volumen por área (Ej. plantaciones para fibra y energía), cuya silvicultura no es por tanto la orientación de esta publicación.

El manual parte del principio de que el éxito de una buena inversión forestal estará en función del uso del mejor material genético disponible, asociado con las mejores prácticas de mantenimiento y manejo en sus primeros años. Otro de los principios es que **el negocio forestal con especies tropicales construye su base en los primeros 2 a 3 años**. Lo que no se realice en esta etapa esencial repercutirá en el riesgo de no cumplimiento de objetivos, en la calidad, el desarrollo y en el valor final de la plantación.

El proceso de evaluación continua con la revisión de la calidad del mantenimiento de la plantación, que debe interpretarse como el conjunto de acciones esenciales para consolidar el éxito de la inversión.

Como resultado de la aplicación de buenas prácticas silviculturales se obtendrá una plantación de alta calidad y productividad, que se integran para crear un negocio de alto valor económico.

Una serie de índices de calidad y productividad fueron propuestos para determinar el potencial de cumplimiento de objetivos de una plantación forestal (Rojas & Murillo, 2000; Murillo 2000). La silvicultura ha seguido evolucionando, el mejoramiento genético y un mejor manejo de factores limitantes para el desarrollo de los árboles, han permitido que los indicadores de calidad y productividad de plantaciones forestales sigan mejorando (Garro *et al.* 2025; Murillo *et al.*, 2025). Por tanto, nuevos criterios han sido desarrollados en los últimos años que abordan temas complejos como la calidad del crecimiento de una plantación (Murillo *et al.* 2016, Gamboa 2023, Guevara *et al.* 2025), así como mejores procedimientos de muestreo (Vargas 2005, Montoya 2005, Alfaro 2005, Murillo *et al.* 2011, Rojas 2014, Murillo & Badilla 2015).

1. Cumplimiento de los objetivos de la plantación

Todo proyecto de inversión en plantaciones forestales debe partir de la máxima “cada árbol plantado debe producir un valor que supere los costos de inversión”. La evaluación de una plantación forestal requiere de un análisis crítico para determinar si se cumplirán los objetivos que motivaron su establecimiento. El cultivo de árboles, o mejor aún, el cultivo de madera como hoy día se entiende, es una opción de inversión o de uso de la tierra para el productor. Se incluye también, el cultivo de árboles en sistemas agroforestales como sombra maderable en café, franjas productivas en linderos de producción ganadera (sistema silvopastoril), entre otros. El proceso de revisión debe entonces estar orientado a determinar si la inversión se podrá recuperar y si generará un retorno económico.

Por tanto, no se aborda en este manual el análisis de plantaciones establecidas con otros fines como restauración, paisajismo, árboles de navidad, entre otros. El enfoque de este manual está orientado por tanto, a la evaluación de proyectos productivos o de cultivo de madera para aserrío.

2. El primer factor de éxito está en la calidad genética de las plantas

Hoy día no se cuestiona el impacto de la calidad genética de las plantas en el desarrollo de una plantación forestal, concepto esencial cuando se discute sobre temas como: calidad de árboles, tasa de crecimiento y productividad en general. Más importante aún, cuando se habla de tolerancia o resistencia genética a plagas y enfermedades. Como ejemplo en la historia forestal reciente de Costa Rica, se ha logrado descubrir genotipos élite (clones) de melina con alta productividad, que también han sido verificados como altamente tolerantes a la marchitez causada por *Ceratocystis fimbriata*, enfermedad que desbastó las plantaciones en el país en los últimos 20 años (Méndez *et al.* 2021, 2023). El uso de genotipos tolerantes a climas extremos, a períodos secos más extensos (efectos del cambio climático), o a suelos marginales, son sin duda otros ejemplos donde el material genético certificado es esencial para alcanzar el éxito en la inversión.

De igual manera siempre debe tenerse presente, que **la calidad genética del material utilizado no es suficiente** por si sola para garantizar el éxito de una plantación. Es esencial aplicar las mejores prácticas silviculturales conocidas como el manejo y conservación del suelo, el control de malezas, u otras acciones que logren eliminar factores limitantes para el desarrollo de la plantación.

Con respecto a la calidad genética se podría resumir en investigar el origen o procedencia genética de las plantas, es decir la **fuente semillera** que dio origen al proyecto de inversión. Así como si las plantas se obtuvieron de algún programa estructurado de mejoramiento genético, donde se conozca el grado de mejoramiento genético alcanzado (primera o segunda generación de mejoramiento). En nuestro medio los programas más avanzados de teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) son de primera y segunda generación de mejoramiento genético. Es esencial identificar si se utilizó plantas provenientes de semilla de algún huerto semillero registrado en la Oficina Nacional de Semillas (ONS).

es el ente oficial que regula y ordena el comercio de semilla sexual o clonal), o también proveniente de la importación de material genético. O también, si las plantas se obtuvieron por producción clonal en invernadero procedente de los mejores genotipos de algún programa de mejoramiento registrado ante la ONS. La certificación de la calidad fisiológica y genética de las plantas debe llegar a ser una norma en un sector forestal organizado. De manera sistemática la calificación de la calidad genética podría resumirse como se muestra en el Cuadro 1. El riesgo de cumplimiento de los objetivos de producción, en alta proporción estará directamente en función de la calidad genética del germoplasma utilizado.

Cuadro 1. Calificación de la categoría genética de la Fuente Semillera para el establecimiento de plantaciones forestales (Basado y modificado de: Reglamento Técnico para la Certificación de Semillas y Plántulas de Especies Forestales. Oficina Nacional de Semillas. 2da Versión. 2012. San José, Costa Rica).

Fuente Semillera o calidad genética de las plantas	Inferior (20%)	Baja (40%)	Media (60%)	Alta (80%)	Superior (100%)
Certificada A. Clones élite de ensayos de progenie de <u>segunda generación</u> . Semilla de 3era generación ensayos de progenie de 2da generación, con raleos genéticos.				x	
Certificada B plus. Clones élite de <u>árboles plus</u> de primera generación, comprobados superiores genéticamente en el país.				x	

Fuente Semillera o calidad genética de las plantas	Inferior (20%)	Baja (40%)	Media (60%)	Alta (80%)	Superior (100%)
Certificada B. Semilla de 2da generación, de ensayo clonal, ensayo de progenie o huerto semillero clonal, <u>aislado y con raleos genéticos (roguing)</u> . Incluye, <u>clones</u> sin evaluación.			x		
Autorizada A. Semilla de 2da generación <u>sin comprobación</u> . Procedente de ensayo clonal, ensayo de progenie o huerto semillero clonal <u>sin aislamiento o sin raleo genético (roguing)</u> .		x			
Autorizada B. Semilla de lotes mixtos de procedencias de alta calidad, rodal semillero aislado con raleos.	x				

3. Área Efectiva y Área Neta Plantada

Área Efectiva. En todo programa de reforestación productivo, tanto para una empresa, una organización, así como para el Estado es vital poder estimar ¿cuál es la superficie real efectiva plantada en cada proyecto?. Así como determinar dentro de esta área efectiva, ¿cuál es el área neta cubierta con árboles plantados?, es decir, excluyendo pequeños claros, caminos, orillas de ríos, afluentes o canales, vegetación natural, y cualquier otro espacio no utilizado con árboles plantados. La mayoría de los proyectos presentan en realidad una menor área efectiva plantada de la que aparece en los registros oficiales. El desconocer este valor es perjudicial para el sistema de incentivos que promueve el Estado, al utilizar cifras sobreestimadas de lo reforestado, que pueden conducir a la formulación de planes de desarrollo forestal no realistas. Para el dueño de la plantación o la organización de productores puede ser aún peor. Ya que el registro de un área efectiva sobreestimada y el desconocimiento del área neta cubierta con árboles, puede provocar una sobreestimación de la producción esperada al momento de la cosecha.

La estimación del área efectiva plantada se realiza hoy día de manera práctica y precisa con ayuda de un GPS o de un dron (VANT). Se recorre la periferia del lote o proyecto reforestado con ayuda de un GPS, con el que se puede luego estimar la superficie del polígono o terreno. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de un lote plantado con teca, donde la empresa tenía registrado una superficie menor en un 4% de área efectiva.

Por lo general es difícil que un proyecto logre plantar más de un 85% del terreno designado para reforestación, aún en propiedades de topografía plana o semi ondulada que han estado previamente bajo uso agrícola o ganadero. Múltiples factores intervienen en el logro de una mayor área plantable en un proyecto.

Área Neta. Esta se define como la superficie de plantación **dentro** del Área Efectiva que está **cubierta con árboles**. Se excluye entonces la superficie destinada a caminos, drenajes naturales o artificiales, pequeños claros, mortalidad o cualquier otra vegetación, que utilice espacios dentro del área efectiva plantada. (Figura 2). Podría decirse que el área neta cubierta

con árboles es el estimado más cercano de la producción real a obtener de una plantación forestal. Este criterio es relevante y puede ser una de las razones principales para explicar por qué en la cosecha se obtiene menos volumen comercial que el esperado. Con un sistema de inventario basado solamente en parcelas permanentes de medición, difícilmente se logrará determinar el área neta plantada. El uso de las tecnologías basadas en drones podrá ser de gran utilidad para estimar el área neta plantada. La estimación del Área Neta cubierta con árboles se puede entonces determinar de varias maneras.

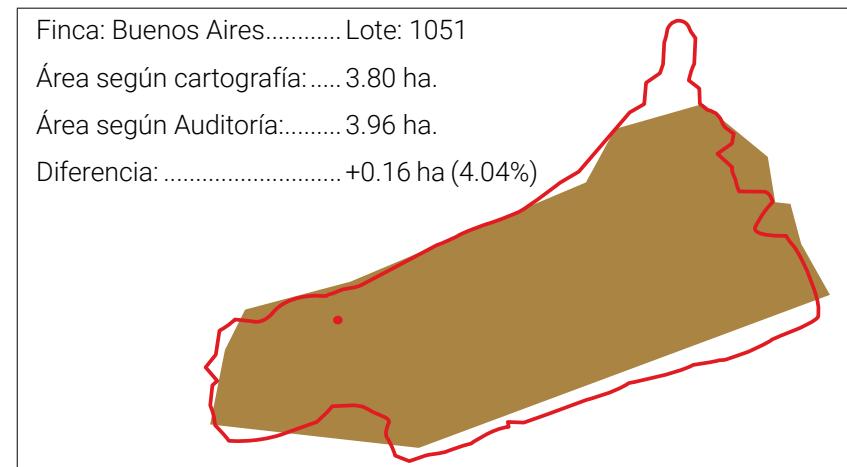


Figura 1. Verificación de área efectiva plantada en un lote de teca en una empresa forestal (Gamboa 2023). La línea roja corresponde al área efectiva real plantada en el terreno.

a) En campo, mediante un levantamiento de áreas con apoyo de un GPS, tal y como se muestra en la Figura 1.

b) Mediante el uso de imágenes de satélite o de drones (Figura 2), se puede determinar la superficie efectivamente plantada y excluir todos los espacios no plantados.

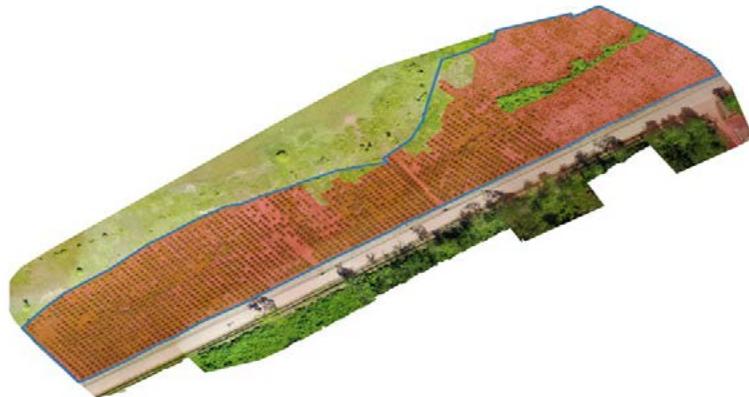


Figura 2. Área Efectiva (dentro del polígono en línea azul) y Área Neta de una plantación de melina (*Gmelina arborea*) de la Zona Norte de Costa Rica. Obsérvese la pérdida de Área Neta causada por mortalidad dentro del Área Efectiva. Foto obtenida con dron (VANT), Mario Guevara, Instituto Tecnológico de Costa Rica.

En el Cuadro 2 se muestra cómo interpretar la calificación de un lote plantado en relación con la proporción de Área Neta plantada.

Cuadro 2. Criterios de calificación de la calidad de una plantación con base en la proporción de Área Neta cubierta con árboles.

Mayor al 90%	De 80 a 90%	De 70 a 80%	Menor al 70%
Excelente	Muy bueno	Aceptable	Deficiente

4. Calidad del mantenimiento de la plantación

Después de la decisión de utilizar el mejor material genético disponible, el mantenimiento de la plantación es sin duda uno de los factores de éxito más importantes en una plantación forestal o SAF. Sin un adecuado programa de mantenimiento el cumplimiento de los objetivos de plantación será del todo incierto. En todo programa de fomento de plantaciones, en una empresa reforestadora, en una ONG, para un pequeño o mediano productor forestal, es esencial determinar la calidad del mantenimiento de su cultivo.

Se entiende por mantenimiento todas aquellas actividades silviculturales que deben ocurrir en los primeros 3 a 5 años. Esto implica casi todas las actividades de las primeras podas, con excepción de la poda alta y en muchos casos, hasta un primer raleo. Pero no incursiona en los temas del raleo para el control de la densidad y crecimiento de plantación.

Procedimiento de muestreo

Para evaluar la calidad del mantenimiento de una plantación será necesaria la toma de una muestra representativa y suficiente de la plantación o proyecto. En el caso de lotes o proyectos mayores a las 5-6 ha, así como en plantaciones de edad avanzada y en estado de abandono, o donde se ha perdido la direccionalidad de hileras o filas, se utiliza el procedimiento convencional basado en al menos una parcela cada dos hectáreas, preferiblemente de forma rectangular de 500 m² (25 x 20m). En plantaciones menores a 5-6 ha, en sistemas agroforestales, o donde se plante árboles en arreglos espaciales diferentes al de un bloque compacto, es apropiado utilizar el procedimiento de muestreo basado en árboles individuales. Con este método cada árbol es una parcela de muestreo, como se muestra más adelante. En caso de que el lote o la población sea aún más pequeña, tal y como ocurre con frecuencia en sistemas agroforestales, es apropiado intentar tomar una muestra de al menos 30 árboles. Para esto, se estima el tamaño de población (cantidad de árboles) y se divide entre 25 para determinar la frecuencia de muestreo. Si por ejemplo, en un SAF de café con 80 árboles, entonces la frecuencia de muestreo será de 80/30 = 2,67 árboles que se redondea a cada 2 árboles.

Procedimiento de muestreo basado en árboles individuales

Este método es funcional en lotes menores a 5-6 ha, aunque hay experiencias con mayor superficie plantada (Rojas 2014). Este es un método sistemático que permite, no solo obtener una muestra con una alta representatividad, sino que también determinar directamente el área neta plantada de manera precisa. Este método sistemático permite determinar directamente el área neta plantada de manera precisa. El muestreo inicia aleatoriamente con un número del 1 al 9, que corresponde con una planta en cualquier parte de la plantación. Para este ejemplo se utilizó el # 5, que es el árbol de inicio del muestreo, localizado en la esquina superior izquierda de la Figura 3 ("X"). En estudios previos para el desarrollo de esta metodología, se demostró que con una muestra de un 4% de la población presente se obtiene un error de muestreo inferior al 5% (Murillo *et al.* 2013). Por tanto, desde este punto de arranque **X** se continúa evaluando cada 25 individuos (4% de la población) que se define como la Frecuencia de Muestreo (FM). Los cuatro árboles iniciales anteriores a la **planta de inicio "X"** se contabilizan como saldo inicial. Se continúa avanzando por la columna hacia abajo, contabilizando únicamente los árboles en pie (las celdas con "x" son árboles faltantes) hasta llegar al 25avo árbol que será nuestra primera muestra **#1**. En cada árbol incluido en la muestra se contabiliza cuántos de los ocho vecinos originales siguen en pie. Obsérvese que en la muestra #1 hay seis árboles vecinos. Se continúa avanzando hasta el final de la columna y se regresa por la siguiente columna hasta recorrer toda la plantación. Para este ejemplo se localizaron 28 individuos (n). El número total de árboles vivos del lote (censo) será entonces 28 muestreados por 25 (FM) + 4 iniciales + 3 de saldo final = $700 + 7 = 707$ árboles en pie.

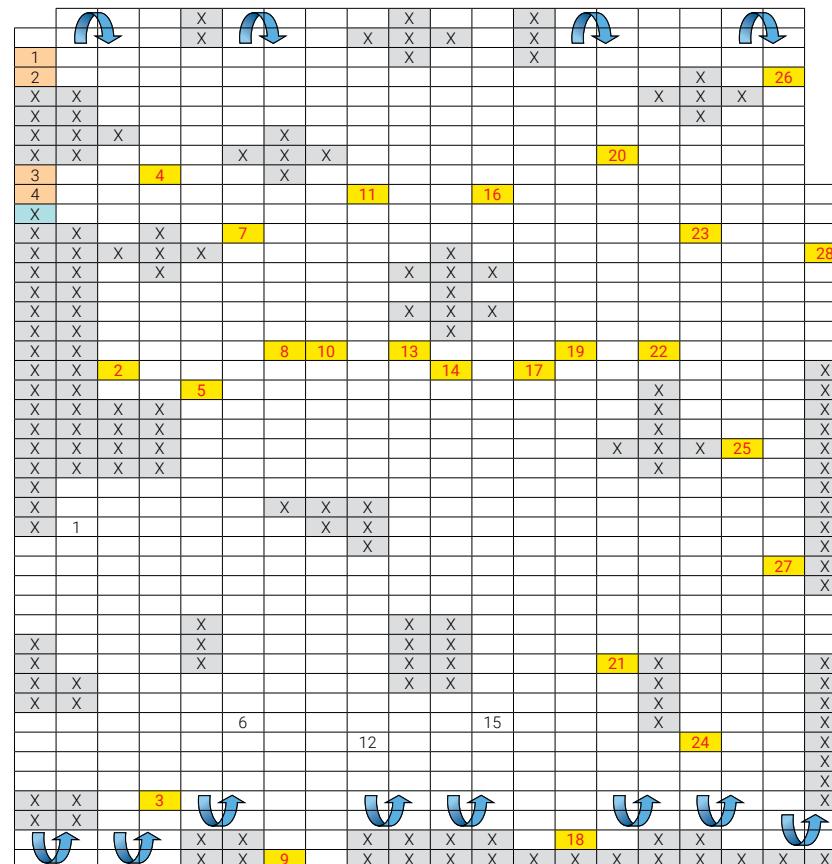


Figura 3. Procedimiento de muestreo con árboles individuales recomendado para plantaciones o lotes con una superficie menor a 5-6 ha (Rojas 2014, Murillo & Badilla 2015). Los espacios con "x" corresponden a árboles faltantes.

Puede observarse que el método de forma precisa excluirá sectores con mortalidad, con lo que permitirá también obtener al final un muy buen estimado de Área Neta cubierta con árboles.

El conteo de los árboles vecinos alrededor de cada individuo muestreado estimará la mortalidad, mediante la relación $n/9$ en plantaciones regulares y $n/6$ en distribución en tresbolillo. Por ejemplo, si se obtuvo en promedio que había 6,35 vecinos alrededor de cada uno de los 28 árboles incluidos en la

muestra, entonces de $6,35 + 1$ (árbol muestra) = 7,35 vivos de 9 individuos originales. Por tanto, esta plantación registra una sobrevivencia del 81,7%.

Si el espaciamiento inicial fue de $4 \times 3\text{m} = 12 \text{ m}^2$ se puede entonces obtener un estimado del área ocupada por árboles en el lote o **Área Neta (AN)**, que para este caso fue de $707 \text{ plantas} \times 12 \text{ m}^2 = 8\,484 \text{ m}^2$. Para estimar el **Área Efectiva** se debe ajustar el Área Neta por la sobrevivencia que fue de un 81,7%. Por tanto, el Área Efectiva (AE) originalmente plantada fue de $(100 * 8\,484\text{m}^2) / 81,7 = 10\,384 \text{ m}^2$.

En sitios donde no se establece con claridad las líneas de plantación, o se planta de manera irregular con distanciamientos variables, el uso de este procedimiento basado en árboles individuales podría tener limitaciones. Lo mismo sucederá cuando la maleza existente limite el paso fluido dentro de la plantación.

Criterios e instrumentos de evaluación

En el cuadro 3 se muestra los criterios de evaluación del mantenimiento de la plantación forestal. El técnico podrá elegir si requiere evaluar todos los criterios, o también proponer alguno adicional, como por ejemplo, presencia de síntomas de una enfermedad específica.

Cuadro 3. Evaluación de la calidad del mantenimiento de la plantación forestal

Finca: La Unión	Lugar: Río Jiménez, Guácimo, Caribe de Costa Rica
Propietario: Sergio Arias	Técnico: Olman Murillo
	Parcela: #1 500 m²
Lote: Monoclonal	Especie: melina (Gmelina arborea)
Área (ha) del lote 1,5	
Fecha de Plantación: 13 Febrero 2024	Fecha de medición: 13 Marzo 2025
Acceso: excelente 100%	enajes y alcantarillas: aceptable (75%)
Corta fuegos: NA	Cercas: Excelente (100%)
Malezas en línea de siembra: Excelente (100%)	Malezas en entrecalle: Baja (75%)
Distancia entre 6 árboles (Hilera): 20,5 m	Distancia entre 6 árboles (Fila): 17,75m
Origen genético de las plantas: clones de melina (categoría Certificada B plus)	

Árbol	# de vecinos	Sanidad. 1 a 3	Deficiencia nutricional 1 a 2	Maleza Rodaja 1 a 2	Poda. 1 a 2	Deshja. 1 a 2	Bifurcación 1 a 2	Rama gruesa 1 a 2	Daño Mecánico 1 a 2	Daño Químico 1 a 2	Corrección Daño por Viento 1 a 2	Calidad Mantenimiento 1 a 3
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2
5	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3
10	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
14	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2
16	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2
18	3	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	3
22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

n1 = 12
n2 = 8
n3 = 2

Interpretación y análisis

Con base en la calificación de todos los criterios utilizados, se obtiene al final la calificación general en la variable **Calidad del Mantenimiento**. Con un grado alto de experiencia se podrá simplemente calificar únicamente la variable Calidad del Mantenimiento para cada árbol evaluado. Los árboles que en todos los criterios evaluados obtuvieron valores de "1", son calificados como **calidad 1**. Los individuos que recibieron calificaciones de "2" en cualquiera de los criterios: sanidad, deficiencia nutricional, maleza en la rodaja, bifurcación, poda hasta 2,5 metros y deshja son calificados como **calidad 2**. La calificación de un "3" implica inaceptable y ocurre cuando hay individuos con sanidad "3", así también aquellos árboles calificados con un "2" pero que presentan algún tipo de daño o defecto irreversible, como **corrección por viento** o un daño **mecánico severo**.

Finalmente se obtiene la calidad general del mantenimiento mediante el siguiente cálculo:

$$\text{Calidad del Mantenimiento} = (n1*1 + n2*2 + n3*3) / (n1+n2+n3)$$

Para el ejemplo del Cuadro 3 se tiene

$$\text{Calidad del Mantenimiento} = \frac{12 * 1 + 8 * 2 + 2 * 3}{22} = 1,54$$

Obsérvese que valor obtenido será un número fraccionado (1,54), por lo tanto, se convierte a una escala de 1 a 100 para facilidad de interpretación:

$$\text{Calidad 1-100} = (1 + (1-\text{calidad}) / 2) * 100$$

$$\text{Calidad del Mantenimiento} = (1+(1-1,54)/2)*100 = 73$$

Al calcular la calidad global de mantenimiento se tendrá un parámetro importante para decidir si el mantenimiento ha sido el adecuado o, si requiere de cambios y mejoras con el fin de conducir la plantación a una mayor productividad y calidad. Este valor de un 73 debe considerarse como aceptable. Este valor relativamente bajo se explica por la presencia de dos árboles con una calificación de "3" debido a la ausencia de acciones inaceptables (sanidad y ausencia de corrección oportuna al daño por viento), además de varios árboles con presencia de rama gruesa, entre otras faltas por no realizar la poda oportuna.

5. Calidad del crecimiento

El crecimiento es posiblemente el mejor criterio técnico para determinar el buen estado y desarrollo de una plantación forestal. Por ser un fenómeno de los más complejos de la silvicultura, resulta un tanto complejo poder definir parámetros de alta o baja calidad con relación al crecimiento. Sin embargo, recientemente se han desarrollado modelos de crecimiento más precisos basados en los primeros 3 a 5 años. Con esto se puede determinar tres parámetros de crecimiento que se pueden utilizar para fines de comparación y verificación, de si un proyecto va con buen ritmo de desarrollo. Estos tres parámetros son **a)** la tasa de crecimiento promedio anual (IMA), **b)** el crecimiento interanual (ICA) y **c)** el valor promedio del DAP a una edad determinada.

a) El uso del IMA del DAP debe utilizarse con cautela, ya que es dependiente de la edad de comparación y de la densidad de plantación. Por esta razón, en el área de apéndices donde se incluye el modelo de crecimiento para cada especie, se muestra el valor del IMA del DAP determinado para varias edades de referencia. En la mayoría de los casos se planta a una densidad entre 625 y 714 árboles/ha, por lo que se estima que la gran mayoría de las plantaciones tendrá una densidad de plantación inicial similar.

b) El ICA tiene un valor relevante porque permite conocer si un proyecto tuvo un buen inicio, pero luego se estanca y pierde su vigor. Fenómeno observado en sitios marginales con algún factor limitante de sitio, que al cabo de 2 a 3 años se puede observar que el ICA pierde su tasa de crecimiento interanual. Si se observa este comportamiento a buen tiempo, en la mayoría de los casos es posible corregir el factor limitante y aumentar de nuevo su tasa de productividad, por ejemplo, si este factor limitante ha sido baja fertilidad o acidez excesiva, que en múltiples ocasiones se puede remediar con una acción inmediata de enmiendas (encalado) y fertilización, como en el caso del laurel y melina en la Zona Norte de Costa Rica (Guevara *et al.*, 2025, Murillo *et al.*, 2025). En algunos sitios podría estar asociado con fenómenos de compactación y baja profundidad efectiva, que podría ser mejorado con un subsolado entre calles.

c) La comparación del valor promedio del DAP versus el modelo de crecimiento para la especie. De todas las variables de crecimiento el DAP resulta ser el mejor parámetro de verificación de la calidad del crecimiento. El DAP es altamente sensible a la competencia y rápidamente va a expresar una disminución en la tasa de crecimiento interanual (ICA) o entre meses dentro de un mismo año. Por tanto, resulta ser uno de los mejores indicadores para determinar la calidad del crecimiento de una plantación. Para su estimación se procede a ubicar el DAP promedio de la plantación en el modelo de crecimiento de la especie. En la Figura 4 se muestra la ubicación gráfica del DAP promedio de la plantación (rombo negro) con respecto al valor promedio de la función a la edad de referencia.

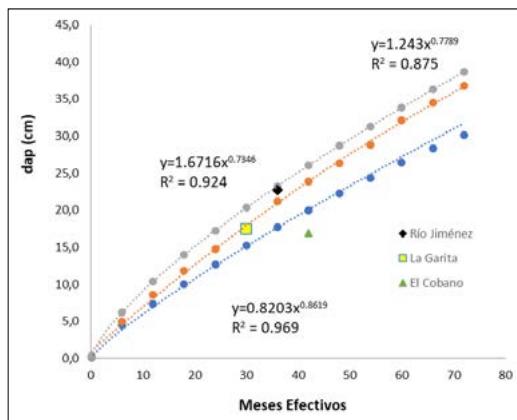


Figura 4. Localización geográfica de una plantación monoclonal de melina (*Gmelina arborea*) de 3 años, Río Jiménez, Guácimo (Caribe de Costa Rica) en el modelo de crecimiento mensual efectivo (Murillo et al., 2025).

El desvío del DAP con respecto al diámetro de la función se calcula matemáticamente con valores de la función de crecimiento ajustada. Para este ejemplo, la plantación monoclonal tiene 3,1 años y se localiza en una región pluvial del país, donde los 12 meses del año son efectivos en crecimiento. Del modelo de crecimiento mensual se obtiene que el DAP esperado para 37 meses debería ser = $1,243 * (37\text{meses})^{0,7789} = 20,69$ cm. El valor del DAP de esta plantación monoclonal a la misma edad fue

de 22,70 cm. Por tanto, el desvío en crecimiento fue de $22,70/20,69 = 1,097$ o también, un crecimiento 9,7% superior al modelo.

Es importante recordar que el crecimiento mensual efectivo varía según la región del país. Por ejemplo, en el Pacífico seco de Costa Rica (Guanacaste) se registra por lo general 7 meses lluviosos al año o meses efectivos. Especies como teca y melina van a manifestar una pérdida de follaje como indicador simple de que se detuvo su crecimiento.

En el anexo del documento se incluye un modelo de crecimiento y un cuadro con los parámetros mencionados de calidad del crecimiento, para los primeros 3 a 6 años de cada una de las especies teca (*Tectona grandis*), melina (*Gmelina arborea*), laurel (*Cordia alliodora*) balsa (*Ochroma pyramidale*), pilón (*Hieronyma alchorneoides*) y almendro (*Dipteryx oleifera*).

6. Calidad de los árboles de la plantación

La calidad de la plantación ha sido un tema de desarrollo constante en el país desde inicios de los años 90 (Murillo 1991; Murillo y Camacho, 1997; Rojas y Murillo 2000; Murillo 2000; Murillo y Badilla 2004; Murillo y Badilla en prensa). El método se basa en la calificación de cada una de las primeras cuatro trozas individuales, de cada árbol evaluado en una muestra.

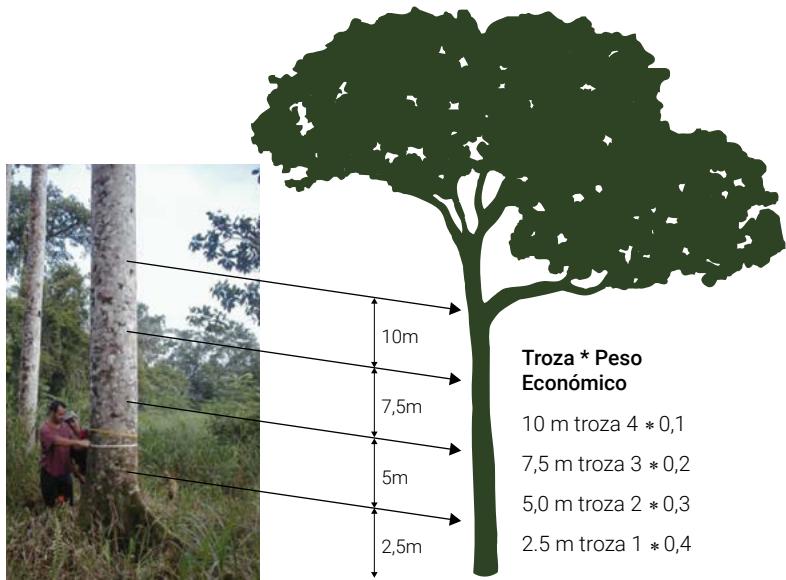


Figura 5. Evaluación de la calidad individual de las primeras cuatro trozas (de 2,5m de largo) en una escala de 1 a 4 (Murillo & Badilla 2015).

Se califica individualmente cada troza de 2,5 metros de largo según sus atributos cualitativos para la producción de madera sólida (Figura 5). La calificación se hace con un valor de 1 a 4, donde un valor de “1” significa excelente en todos los atributos de calidad de fuste para aserrío (rectitud, conicidad, ausencia de rama gruesa, ausencia de rama en primeros 5m,

entre otros); un valor de “2” significa que se observaron defectos menores en uno o varias variables (presencia de rama gruesa, presencia de gamba, tronco levemente torcido, entre otros); se califica con un “3” cuando la troza registra defectos severos de fuste que no permiten su utilización industrial en más de un 50%. Como ejemplo está un daño causado por alguna plaga o una torcedura severa en el fuste. Finalmente se califica con un valor de “4” aquella troza claramente sin posibilidad de aserrío, por ejemplo, con torceduras excesivas, presencia de grano en espiral, bifurcada, dañada completamente por alguna plaga. Se continúa sucesivamente calificando una a una y de manera independiente las siguientes trozas de 2,5 metros de longitud, hasta alcanzar los 10 metros de altura del fuste o primeras cuatro trozas (Figura 5).

Con esta calificación individual de las primeras 4 trozas, se obtiene una nueva variable que se denomina **Calidad del Árbol**, que se calcula como sigue:

Calidad del árbol =

$$\text{Cal Troza 1} * 0,4 + \text{Cal Troza 2} * 0,3 + \text{Cal Troza 3} * 0,2 + \text{Cal Troza 4} * 0,1$$

Como se puede notar, la Calidad del árbol se puede también determinar mediante el promedio ponderado de la calidad individual de sus primeras cuatro trozas comerciales. El coeficiente de cada troza corresponde con su aporte proporcional al volumen de los 10 metros de fuste del árbol. Se asume que el volumen arriba de los 10m es marginal o de menor valor.

$$\begin{aligned} \text{Troza 1} &= 40\% & (0 \text{ a } 2,5\text{m}) \\ \text{Troza 2} &= 30\% & (2,5 \text{ a } 5\text{m}) \\ \text{Troza 3} &= 20\% & (5,0 \text{ a } 7,5\text{m}) \\ \text{Troza 4} &= 10\% & (7,5 \text{ a } 10\text{m}) \end{aligned}$$

De cada árbol evaluado en la muestra se obtendrá una calificación expresada en fracciones con valores entre 1,0 y 4,0. Para facilitar el análisis e interpretación se transforman a una escala de 1 a 100 mediante la expresión: $\text{Calidad100} = (1 + [(1 - \text{Calidad}) / 3]) * 100$

Ejemplo, si un árbol fue calificado Troza 1 = 1, Troza 2 = 1, Troza 3 = 2 y Troza 4 = 2.

La **Calidad del Árbol** será = $1 * 0,4 + 1 * 0,3 + 2 * 0,2 + 2 * 0,1 = 1,3$.

En la escala 1 a 100 = $(1 + [(1 - 1,3) / 3]) * 100 = 90$

Generación de índices de calidad para evaluar la plantación. Para poder calificar la calidad de una plantación se propusieron una serie de índices basados en la cantidad de árboles/ha de las cuatro categorías de calidad (Rojas & Murillo 2000, Murillo 2000). Para poder agrupar los árboles en esta categorización se propuso que los árboles cuya calidad sea > 90 se registraran como Calidad 1. La categoría de Calidad 2 fue para los árboles con calidad entre 80 y 90, la categoría de Calidad 3 para aquellos entre 70 y 80, para dejar en la Calidad 4 aquellos individuos con valores < 70 .

Entre los índices propuestos el más simple y fácil de interpretar es el denominado **Calidad de Cosecha**, que se refiere a determinar cuántos árboles hay de **Calidad 1 + Calidad 2** (N_1+N_2) por hectárea. Hoy día con el desarrollo de la silvicultura clonal basada en árboles de alto rendimiento y mayor calidad de fuste, se ha propuesto utilizar como umbral o valor de referencia que la cantidad de árboles de Calidad 1 + Calidad 2 sea de al menos 400 árboles. Este índice tiene la ventaja que es poco afectado por los raleos, dado que, en un sistema tradicional de raleo por lo bajo, la tendencia será eliminar primero árboles de las calidades 4 y 3. Algunos pocos árboles de calidad 1 y 2 son incluidos en los raleos cuando registran un diámetro bajo, pero la tendencia será que su cantidad no disminuya significativamente durante los primeros 8-10 años de plantación. De esta manera, es posible evaluar de manera simple la calidad de una plantación con base en este valor de referencia. Si por ejemplo una plantación registra 350 árboles $N_1 + N_2$, entonces su calificación será de $350/400 = 87,5$. Por el contrario, si una plantación es de muy alta calidad y registrara 500 árboles $N_1 + N_2$, entonces su calidad sería de $500/400 = 125$ y recibiría en proporción (1,25) de reconocimiento en su calificación. Si se quisiera evaluar la calidad de una plantación de mayor edad que haya tenido varios raleos y la cantidad total de árboles en pie (N_T) sea relativamente baja, se podría entonces modificar este índice de cosecha para que sea expresado en porcentaje. En este caso una proporción de $> 90\%$ de árboles $N_1 + N_2$ se valora como excelente (100%), entre 80 y 90% como muy buena (se califica con 80%), 70% como aceptable (se califica con 50%), menos de 70% será deficiente (calificación 0%).

Los índices de Calidad Máxima ($N_1/400$) y Calidad General ($(N_1+N_2+N_3+N_4)/N_{total}$) podrían ser de utilidad como indicadores complementarios para la evaluación de la calidad de plantaciones (Murillo 2000).

7. Calidad del manejo de la plantación

La calidad del manejo es quizá el criterio de mayor interés para ser evaluado en una plantación forestal. Pero también, posiblemente uno de los más complejos desde el punto de vista objetivo. Para un mejor análisis es necesario definir qué se entiende por manejo o buen manejo de una plantación. Los temas de mantenimiento y calidad del crecimiento ya fueron atendidos apropiadamente en secciones anteriores. Por lo tanto, podría entenderse el manejo como *el conjunto de prácticas silviculturales aplicadas para optimizar el crecimiento, producción y salud en función de la obtención del máximo valor comercial de la plantación forestal*. Dado que el tema de sanidad fue abordado en las secciones de análisis de mantenimiento y de evaluación de la calidad de los árboles, y el tema de crecimiento fue debidamente abordado en otra sección, queda entonces los temas de producción y valoración. De manera simple puede establecerse que el máximo objetivo será maximizar el valor de la plantación en el menor tiempo posible. En esta dirección el diámetro o DAP se convierte en la variable determinante, dada su alta sensibilidad a la densidad y competencia y, a que por lo general, influye significativamente para definir el momento apropiado de cosecha.

El área basal ha sido por lo general, el mejor criterio de referencia para el manejo de plantaciones. Sin embargo, se vuelve un criterio sumamente complejo cuando se necesite establecer un criterio universal para todas las especies, calidad de sitio y calidad genética de los árboles. El área basal tiene como dificultad que integra el número total de árboles (N) con su diámetro, donde la cantidad de árboles idónea en pie para todos los casos, requeriría una gran amplitud de valores que imposibilita su uso como criterio de evaluación.

La evaluación de la calidad del manejo podría entonces basarse en dos simples criterios, que de manera indirecta y objetiva, permiten detectar si se ha practicado un correcto manejo de la densidad de la plantación. Por tanto, **a)** la variación del DAP (coeficiente de variación) y **b)** la presencia de árboles de posición sociológica intermedio o suprimidos, permiten

valorar si se han aplicado raleos oportunos y si se ha logrado manejar adecuadamente la competencia dentro de la plantación.

a) Variación del DAP como indicador de calidad de manejo. Este es un criterio muy simple de evaluar y tiene como enorme ventaja que el DAP se mide en el terreno. En una plantación que no ha sido raleada de manera oportuna, se observará al poco tiempo que el coeficiente de variación (CV) diamétrica aumentará considerablemente.

Otros criterios relacionados se han propuesto que permiten determinar el grado de competencia en la plantación, basados en relaciones entre diámetro mínimo y máximo (cociente); el análisis de diferencia diamétrica entre los tres árboles más próximos (Füldner y Gadow, 1992), la estandarización de la desviación diamétrica entre el DAP de raleados - DAP remanentes (Gadow y Stüber, 1993 en Gadow 1997) y la relación número de árboles/área basal (N/G) propuesta por Gadow (1997). Salvo el criterio de cociente entre el DAP máximo y DAP mínimo, los otros criterios son de difícil utilización a nivel operativo.

b) Presencia de árboles de posición sociológica intermedia y suprimida. Este criterio es sumamente simple de utilizar e interpretar. Una plantación bajo buen manejo de la densidad mediante raleos oportunos debería tener solamente árboles dominantes y codominantes en pie. Por lo tanto, este criterio será de muy fácil utilización siempre y cuando el procedimiento de muestreo sea el apropiado para su determinación. De manera general, la calificación será de un 100% ante ausencia total de estos dos tipos de árboles, un 50% (<5% de árboles intermedios y ninguno suprimido) y 0% (> 5% de árboles intermedios o al menos un árbol suprimido).

8. Evaluación de la Plantación Forestal

8.1 Análisis del riesgo de la plantación para cumplir objetivos de inversión

a) Riesgos bióticos.

Análisis de si la plantación logrará alcanzar al final del ciclo productivo esperado. Los factores bióticos se refieren al análisis de la presencia de plagas o enfermedades que claramente hayan sobrepasado el umbral económico, ameritan la intervención de medidas de control, la incidencia y severidad claramente disminuirá el potencial productivo y retorno económico. Ejemplos conocidos, presencia severa de *Ceratocystis fimbriata* en melina (marchitez de la melina), el ataque de barrenadores del tronco (coleópteros de la familia *Scolytidae*), ataque severo de hormiga cortadora en el primer año, entre otros casos (Cuadro 4).

Califique Sin Riesgo (**SR = 100**) o sin evidencia de incidencia de plagas o enfermedades; Riesgo Bajo o con presencia leve de daños que no sobre pasa el umbral económico (**RB = 80**); Riesgo Moderado a alto, con incidencia y severidad evidente, con daño económico para el proyecto (**RM = 60**); Riesgo Alto y pérdidas Inminentes de la inversión (**RA = 0**), incidencia y severidad en más del 40% de los árboles, el productor tendrá que cosechar cuanto antes para recuperar parcialmente la inversión, la plantación no llegará hasta el término de la rotación.

Daños causados por la presencia de venado o de ganado en una plantación joven, podrían estar asociado a la ausencia de medidas de protección como la existencia de cercas.

Cuadro 4. Evaluación de riesgos bióticos en la plantación forestal

Evaluación de riesgo biótico	Melina monoclonal Río Jiménez, Guácimo, Caribe (3,1 años)	Melina monoclonal El Cóbano, Los Chiles, zona norte (3,75 años)	Melina monoclonal Bosques La Garita, Los Chiles (2,5 años)	Balsa Santa Clara, San Carlos, zona norte (2,4 años)
Riesgo por plaga	100	100	100	100
Riesgo por enfermedad	80	100	80	60
Riesgo por ingreso de ganado, venado, monos, otros	80	100	100	100
Calificación (Utilice el Menor valor)	80	100	80	60

b) Riesgos abióticos.

Los factores abióticos incluyen el análisis de riesgo por inundación, por deslaves, historial de paso de huracanes, historial de erupciones volcánicas o de lluvia ácida, historial de cambio del cauce de ríos cercanos, historial de incendios forestales de gran magnitud, entre otros fenómenos (Cuadro 5). Se deberá valorar en regiones propensas al daño por incendios forestales, si el productor/el proyecto está organizado para prevenir o disminuir este riesgo (rondas cortafuegos, caminos, brigadas entrenadas, etc.).

Califique, Sin Riesgo (**SR = 100**); Riesgo Bajo o existencia de algún factor de riesgo natural leve (**RB = 80**); Riesgo Moderado a alto existente, con

evidencia y amenaza de riesgo natural importante (**RM = 60**); Riesgo Alto o inminente amenaza por riesgo natural, historial de eventos en el sitio como inundaciones, deslaves, actividad volcánica, etc. (**RA**) no hay garantía de que el proyecto llegará a su fin.

Cuadro 5. Evaluación de riesgos abióticos en la plantación forestal

Evaluación de riesgo abiótico	Melina monoclonal Río Jiménez, Guácimo, Caribe (3,1 años)	Melina monoclonal El Cóbano, Los Chiles, zona norte (3,75 años)	Melina monoclonal Bosques La Garita, Los Chiles (2,5 años)	Balsa Santa Clara, San Carlos, zona norte (2,4 años)
Riesgo de inundación	60	100	80	100
Riesgo de deslave	100	100	100	100
Historial de paso de huracanes o tormentas	100	80	80	80
Cambios en cauces de ríos	60	100	100	100
Riesgo volcánico o de lluvia ácida	100	100	100	100
Riesgo de incendios	100	80	80	100
Calificación (Utilice el menor valor)	60	80	80	80

c) Riesgos por fenómenos sociales y ambientales.

Califique, Sin Riesgo (**SR = 100**) proyecto en finca con legalidad completa en documentos y en región sin conflictos sociales de invasiones de fincas o de disputas con pueblos indígenas. Así también, tierras que no incluyan zonas de importancia ecológica alta, belleza escénica o patrimonio natural en proceso de inclusión bajo algún régimen de protección; Riesgo Bajo (**RB = 80**), proyecto con alguna limitante legal menor o en regiones con algún conflicto social, ambiental o de patrimonio natural leve; Riesgo Moderado a alto existente (**RM = 60**), proyecto en propiedad con alguna limitante en documentos legales de posesión, con historial cercana de conflictos por invasiones, dentro de zona de recarga de agua o con presencia de acuíferos, con algún recurso biológico, natural o escénico de alta importancia; Riesgo Alto e Inminente (**RA**) propiedad sin documentos legales y de dudosa claridad en tenencia de la tierra, en zona de conflicto agrario o en disputa con comunidades indígenas, en zonas que han sido declaradas bajo régimen de protección natural, zonas de interés ambiental o de fuentes de agua, de recarga de agua para las comunidades (Cuadro 6). Podría también incluirse como riesgo alto, si la propiedad se ubica en alguna ruta declarada como vía pública o de infraestructura de interés nacional (ejemplo, proyecto hidroeléctrico).

Cuadro 6. Evaluación de riesgos sociales y ambientales para la plantación forestal

Evaluación de riesgo social o ambiental	Melina monoclonal Río Jiménez, Guácimo, Caribe (3,1 años)	Melina monoclonal El Cóbano, Los Chiles, zona norte (3,75 años)	Melina monoclonal Bosques La Garita, Los Chiles (2,5 años)	Balsa Santa Clara, San Carlos, zona norte (2,4 años)
Documentación legal de propiedad	100	100	100	100
Zona con conflictos agrarios en disputa	100	100	100	100
Territorio indígena en disputa agraria	100	100	100	100
Zona de recarga de aguas o con acuíferos	100	100	100	100
Zona con proyección de infraestructura pública	100	100	100	100
Riesgo ambiental	100	100	100	100
Calificación	100	100	100	100

d) Riesgos en relación con el acceso a la plantación, facilidad de cosecha, tamaño de plantación y distancia al mercado futuro.

Califique Sin Riesgo, acceso todo el año a la plantación, distancia menor a 50km del mercado, plantación > 50 ha (**SR = 100**); Riesgo Bajo: acceso aceptable a la propiedad, distancia entre 50 a 100 km del mercado, limitaciones en terreno para la cosecha, plantación entre 20 y 50ha (**RB = 80**); Riesgo Moderado a alto: acceso solo en periodo seco a la propiedad o distancia entre 100 y 150 km al mercado, terreno con limitaciones importantes para la cosecha de madera, plantación entre 10 y 20 ha (**RM = 60**); Riesgo Alto e Inminente (**RA**), acceso muy limitado, solo en periodo seco, ausencia de caminos internos y dificultad para extraer la madera, con distancia de más de 150 km al mercado de venta de madera, plantación menor a 10 ha.

Cuadro 7. Riesgos asociados a la facilidad de cosecha y distancia al mercado de la madera.

Evaluación de la facilidad de cosecha, transporte y distancia al mercado	Melina monoclonal Río Jiménez, Guácimo, Caribe (3,1 años)	Melina monoclonal El Cóbano, Los Chiles (3,75 años)	Melina monoclonal Bosques La Garita, Los Chiles (2,5 años)	Balsa Santa Clara, San Carlos, zona norte (2,4 años)
Acceso a la propiedad (10%)	100	60	100	100
Acceso a la plantación dentro de la propiedad (20%)	100	60	80	100
Topografía del terreno (30%)	100	100	80	100
Tamaño de la propiedad (10%)	80	100	100	60
Distancia al mercado (30%)	100	100	100	80
Con el Peso Económico	10+20+30 +8+30	6+12+30 +10+30	10+16+24 +10+30	10+20 +30+6+24
Calificación	98	88	92 o 90	88 o 90
Calificación con el valor más bajo	80	60	80	60

8.2 Calificación global de los riesgos del proyecto

Cuadro 8. Evaluación global de riesgos del proyecto de plantación forestal

Criterios de evaluación del riesgo	Melina monoclonal Río Jiménez, Guácimo, Caribe (3,1 años)	Melina monoclonal El Cóbano, Los Chiles (3,75 años)	Melina monoclonal Bosques La Garita, Los Chiles (2,5 años)	Balsa Santa Clara, San Carlos, zona norte (2,4 años)
Evaluación biótica (15%)	87*0,15 = 13,05	100 = 15	93 = 13,95	87 = 13,05
Valor más bajo	80	100	80	60
Evaluación abiótica (15%)	87*0,15 = 13,05	93 = 13,95	90 = 13,5	97 = 14,55
Valor más bajo	60	80	80	80
Evaluación de riesgo social o ambiental (10%)	100*0,1 = 10	100 = 10	100 = 10	100 = 10
Valor más bajo	100	100	100	100
Evaluación de la facilidad de cosecha, transporte y distancia al mercado (60%)	96*0,6= 57,6	84 = 50,4	92 = 55,2	88 = 52,8
Valor más bajo	80	60	80	60
Calificación global del riesgo	93,7	89,35	92,65	90,4
Valor más bajo	79	73	82	73

8.3. Evaluación de la calidad de árboles, calidad del manejo y del crecimiento

a) Calidad del material genético utilizado

Con respecto a la calidad genética se resume en investigar el origen o procedencia genética de las plantas (**Fuente Semillera**).

Cuadro 9. Evaluación de la calidad genética utilizada en la plantación

Fuente Semillera o calidad genética de las plantas	Aceptable (20%)	Baja (40%)	Media (60%)	Alta (80%)	Muy alta (100%)
Melina monoclonal Río Jiménez, Guácimo, Caribe (3,1 años)					100
Melina monoclonal El Cóbano, Los Chiles (3,75 años)					100
Melina monoclonal Bosques La Garita, Los Chiles (2,5 años)					100
Balsa Santa Clara, San Carlos, zona norte (2,4 años)	20				

b) Calidad del mantenimiento.

Se califica en una escala de 1 a 2 o de 1 a 3, donde un "1" es la mejor calificación y le corresponde todo el peso del criterio, un "2" es la peor calificación y no registra un valor. Cuando el criterio se califica de 1 a 3, un "2" registra el 50% del criterio y un "3" se califica como 0%. El tema de mantenimiento de la plantación es uno de los de mayor relevancia en la evaluación de plantaciones.

Cuadro 10. Evaluación de la calidad del mantenimiento de la plantación

Criterios de calidad del mantenimiento	Melina monoclonal Guácimo, Caribe (3,1 años)	Melina monoclonal El Cóbano, Los Chiles (3,75 años)	Melina monoclonal Los Chiles (2,5 años)	Balsa San Carlos, zona norte (2,4 años)
Control de malezas en la plantación (1 2 3) (30%)	3 (0%)	1 (30%)	2 (15%)	1 (30%)
Control de malezas en alrededores (1 2 3) (20%)	1 (20%)	2 (10%)	2 (10%)	1 (20%)
Poda baja, deshija (1 2) (15%)	1 (15%)	1 (15%)	1 (15%)	1 (15%)
Sanidad de los árboles (1 2 3) (15%)	2 (7,5%)	1 (15%)	2 (7,5%)	3 (0%)
Caminos internos (1 2) (5%)	1 (5%)	2 (0%)	1 (5%)	1 (5%)
Drenajes (1 2) (5%)	1 (5%)	2 (0%)	1 (5%)	1 (5%)
Ronda cortafuegos (1 2) (5%)	1 (5%)	2 (0%)	2 (0%)	1 (5%)
Cercas de protección (1 2) (5%)	1 (5%)	1 (5%)	1 (5%)	1 (5%)
Calidad Mantenimiento Escala 1 a 3	1,5	1,428	1,57	1,4
Calidad Mantenimiento Escala 1 a 100	62,5%	75%	62,5%	85%

c) Calidad de los árboles de la plantación (Índice de calidad de cosecha)

En el Cuadro 11 se muestran tres índices de calidad a manera informativa. Pero la calificación se basa solamente en el índice de Calidad de Cosecha, que va a producir un valor en porcentaje.

Cuadro 11. Evaluación de la calidad de los árboles de la plantación

Índices de calidad	Melina monoclonal Río Jiménez, Guácimo, Caribe (3,1 años)	Melina monoclonal El Cóbano, Los Chiles (3,75 años)	Melina monoclonal Bosques La Garita, Los Chiles (2,5 años)	Balsa Santa Clara, San Carlos, zona norte (2,4 años)
Calidad General (Calificación 1 a 100)	93,42	95	95	83,33
Calidad de cosecha $(N1 + N2)/400*100$	285 (71,25%)	457 (114,25%)	650 (162,5%)	270 (67,5%)
Calidad Máxima $(N1/400)*100$	94,0	114,25	162,0	30,0
Calificación final	71,25	114,25	162,5	67,5

Puede observarse que el criterio final de evaluación se basa en la calidad de cosecha $((N1 + N2)/400*100)$ dado que es un mejor indicador de cumplimiento de objetivos de una plantación. Los otros dos índices de calidad son importantes a nivel informativo.

d) Calidad del Manejo y del Crecimiento de la plantación forestal

En el Cuadro 12 se muestra la evaluación de la calidad del manejo y crecimiento de la plantación. Como se podrá observar, los criterios son solamente tres, que buscan explicar si ha habido un buen control de la densidad y competencia dentro de la plantación, así como evaluar la tasa de crecimiento a la edad de evaluación. Junto con la calidad del mantenimiento de la plantación, el crecimiento es uno de los criterios de mayor importancia en la evaluación de plantaciones forestales.

Coeficiente de variación alto (CV>20%) significa que la plantación mantiene un alta densidad y competencia como resultado del manejo no oportuno (raleos) de la densidad de la plantación.

Cuadro 12. Evaluación de la calidad del manejo y del crecimiento de la plantación

Criterios de manejo y de crecimiento	Melina monoclonal Guácimo, Caribe (3,1 años)	Melina monoclonal El Cóbano, Los Chiles (3,75 años)	Melina monoclonal Bosques Los Chiles (2,5 años)	Balsa San Carlos, zona norte (2,4 años)
DAP promedio (Desvío en %) (Peso en la calificación 60%)	1,1	0,7	1	1
Proporción de árboles suprimidos o intermedios (peso 10%) 0% = 100% < 5% = 50% 5-10% = 0%	1	1	1	1
Coeficiente de variación (%) del DAP <15 = 100% 15-20 = 50% > 20 = 25% (peso 30%)	1	0,5	0,5	0,25
Calificación promedio	1,07%	0,64	0,85	0,77

Calificación Global de la calidad de la plantación y potencial de cumplimiento de objetivos

En el cuadro 13 se muestra la evaluación final de la calidad de plantación en un caso de melina monoclonal de tres años, plantada en Río Jiménez, Guácimo, Región Caribe de Costa Rica.

Cuadro 13. Calificación global de la calidad de la plantación de melina monoclonal (3 años) en Río Jiménez, Guácimo, Región Caribe de Costa Rica.

Criterios de evaluación	Evaluación
Calidad del material genético utilizado (15%)	80
Calidad del establecimiento (10%)	NA
Calidad del mantenimiento (30%)	62,5
Calidad de los árboles de la plantación (15%)	71,25
Calidad del crecimiento y del manejo (30%)	107
Calificación global del potencial productivo = 80*0,15+0,1+62,5*0,3+71,25*0,15+107*0,3	73,64

Literatura

Alfaro, A. 2005. Optimización de la estratificación de fincas y asignación de parcelas permanentes en la empresa Flor y Fauna, San Carlos, Alajuela. Práctica de Especialidad. Escuela de Ing. Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 79p.

Fallas, J.L. 2017. Funciones alométricas, de volumen y de crecimiento para clones de teca (*Tectona grandis* L. F.) en Costa Rica. Tesis M.Sc., Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica.

Füldner, K. & Gadow, K. Von. 1994. How to define a thinning in a mixed deciduous beech forest. En: Proc. IUFRO Conf. en Lousa, Portugal: Mixed Stands - research plots, measurements and results, models: 31-42.

Gadow, K. Von. 1997. Waldwachstum (Crecimiento Forestal). Universidad de Göttingen, Alemania. Instituto de Manejo y Rendimiento Forestal. 200 p.

Gamboa, J.P. 2023. Validación de una metodología de avalúo para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.). Tesis Lic. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 59 p.

Garro, L., Murillo, O., Guevara, M., Moya, R., Badilla, Y., Rodríguez, M., Villalobos, V. 2025. Manual de cultivo de balsa (*Ochroma pyramidalis* (Cav. ex Lamb) Urban)). Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ing. Forestal. Taller de Publicaciones. Cartago, Costa Rica. 51 p.

Guevara, M., Murillo, O., Badilla, Y. Rodríguez, M. 2025. Cultivo del Laurel (*Cordia alliodora*). Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ing. Forestal. Taller de Publicaciones. Cartago, Costa Rica. 51 p.

Méndez, D., Murillo, O., Badilla, Y. Hernández, W. 2021. Genetic tolerance to *Ceratocystis* wilt in melina (*Gmelina arborea* Roxb.). *Silvae Genetica* (70): 195 – 204.

Méndez, D., Badilla, Y., Murillo, O., Ferreira, R. 2023. Genetic resistance to *Ceratocystis fimbriata* in elite genotypes of *Gmelina arborea*. *Agronom. Mesoamericana* Volumen 34(3): doi.org/10.15517/am.2023.52968

Montoya, A. 2005. Restructuración de la red de parcelas permanentes de la empresa Expomaderas S.A. Rica. Práctica de Especialidad. Escuela de Ing. Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 89p.

Murillo, O. 1991. Metodología para el control de calidad en plantaciones forestales. *Tecnología en Marcha* 11(1): 19-30.

Murillo, O. & Camacho, P. 1997. Metodología para la evaluación de la calidad de plantaciones recién establecidas. *Agronomía Costarricense* 21 (2):189-206.

Murillo, O. 2000. Índices de calidad para la reforestación en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 24 (2): 41-48.

Murillo, O., Badilla, Y. & Gallegos, A. 2003. Calidad en el Establecimiento de Plantaciones Forestales. Manual. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 36 p.

Murillo, O. & Badilla, Y. 2004. Calidad y valoración de plantaciones forestales. Manual. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 51 p.

Murillo, O.; Badilla, Y.; Morales, M. 2011. Método de inventario para plantaciones pequeñas. En: V Congreso Forestal Latinoamericano. 18-21 octubre, 2011, Lima, Perú.

Murillo, O. & Badilla, Y. 2015. Consultoría. Definición de una metodología de muestreo de contratos del programa de pago de servicios ambientales para la medición de la biomasa, para el desarrollo de proyectos de comercialización de créditos de carbono. FONAFIFO. San José, Costa Rica. 108 p.

Murillo, Olman; Vallejos, Johnatan; Badilla, Yorleny; Guzmán, Nancy; Luján, Ricardo; González, Ernesto. 2016. Crescimento efetivo mensal inicial em plantações de teca (*Tectona grandis*) em Costa Rica. *Revista Nativa (Brasil)* vol 4(2): 87-90.

Murillo, O., Guevara, M., Badilla, Y., Esquivel, E. 2025. Manual de cultivo de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en ciclo corto. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ing. Forestal. Taller de Publicaciones. Cartago, Costa Rica. 56 p.

Murillo, O. & Badilla, Y. En prensa. Calidad de la Plantación Forestal. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 132 p.

Oficina Nacional de Semillas. *Reglamento Técnico para la Certificación de Semillas y Plántulas de Especies Forestales*. 2da Versión. 2012. San José, Costa Rica.

Rojas, O. & Murillo, O. 2000. Calidad de las plantaciones de teca en la Península de Nicoya, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 24 (2): 65-76.

Rojas, J. 2014. Sistema de inventario forestal continuo para reforestación Grupo Internacional RGI S.A., zona norte, Costa Rica. Tesis Lic. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 78 p.

Vargas, L. 2005. Ordenamiento y desarrollo de un Sistema de Información para las fincas del Grupo Eco-DIRECTA. Práctica de Especialidad. Escuela de Ing. Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 48 p.

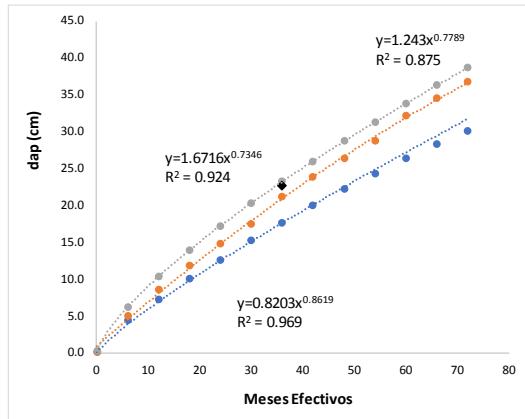


Figura 5. Modelo de crecimiento mensual efectivo de melina en Costa Rica.

En el Cuadro 14 se puede observar los valores de crecimiento, del IMA y del ICA para la melina según el número de meses efectivos.

Cuadro 14. Tasa de crecimiento mensual, IMA e ICA de plantaciones clonales de melina en Costa Rica (Murillo et al., 2025).

Mes Efectivo	Percentil25	Promedio	Percentil75	IMA	ICA
6	4,47	5,02	6,23	10,04	5,02
12	7,31	8,61	10,37	8,61	3,59
18	10,05	11,81	13,97	7,87	3,20
24	12,69	14,78	17,26	7,39	2,97
30	15,22	17,58	20,33	7,03	2,81
36	17,66	21,27	23,25	7,09	3,68
42	20,00	23,85	26,04	6,81	2,59
48	22,23	26,36	28,72	6,59	2,50
54	24,37	28,79	31,31	6,40	2,44
60	26,40	32,17	33,83	6,43	3,38
66	28,33	34,50	36,29	6,27	2,32
72	30,16	36,77	38,68	6,13	2,28

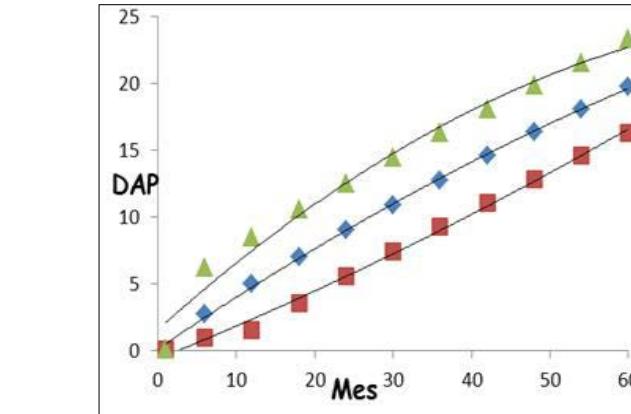


Figura 6. Crecimiento mensual efectivo de plantaciones clonales de teca en Costa Rica (Murillo et al., 2016). DAP = 0,5917*(Meses Efectivos)^0,8574 (R² ajustado = 0,827).

En el cuadro 15 se muestra la información del crecimiento esperado de teca en Costa Rica, del IMA y del ICA, para los primeros 6 años de desarrollo.

Cuadro 15. Crecimiento mensual efectivo de plantaciones clonales de teca en Costa Rica (Murillo et al., 2016).

Edad (meses)	Bajo (cm)	Promedio (cm)	Alto (cm)	IMA (cm)	ICA (cm)
6	2,53	2,75	2,97	5,50	
12	4,76	4,98	5,21	4,98	4,98
18	6,83	7,05	7,28	4,70	
24	8,80	9,03	9,25	4,51	4,04
30	10,71	10,93	11,15	4,37	
36	12,55	12,78	13,00	4,26	3,75
42	14,36	14,58	14,81	4,17	
48	16,13	16,35	16,58	4,09	3,57
54	17,87	18,09	18,31	4,02	
60	19,58	19,80	20,03	3,96	3,45
66	21,26	21,49	21,71	3,91	
72	22,93	23,15	23,38	3,86	3,35

La Figura 7 se incluye con el propósito de permitir la evaluación de plantaciones hasta los 18-20 años.

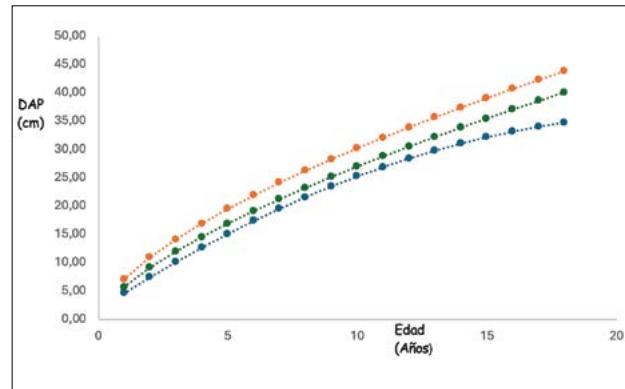


Figura 7. Curva de crecimiento para plantaciones clonales de teca (*Tectona grandis*) en Costa Rica

Cuadro 16. Crecimiento mensual efectivo del diámetro (DAP) en plantaciones de laurel en la Zona Norte y Caribe de Costa Rica (Guevara *et al.*, 2025).

Edad (meses)	Baja productividad	Sitio promedio	Alta productividad	ICA (cm)	IMA (cm)
6	3,4	4,0	4,7		
12	6,1	6,9	7,8		
18	8,6	9,7	10,8		
24	10,9	12,3	13,7	5,4	6,15
30	13,2	14,9	16,5		
36	15,4	17,4	19,1	5,1	5,8
42	17,5	19,8	21,6		
48	19,6	22,1	23,9	4,7	5,53
54	21,6	24,3	26,1		
60	23,7	26,4	28,2	4,3	5,28
66	25,6	28,4	30,2		
72	27,6	30,4	32,0	4	5,07

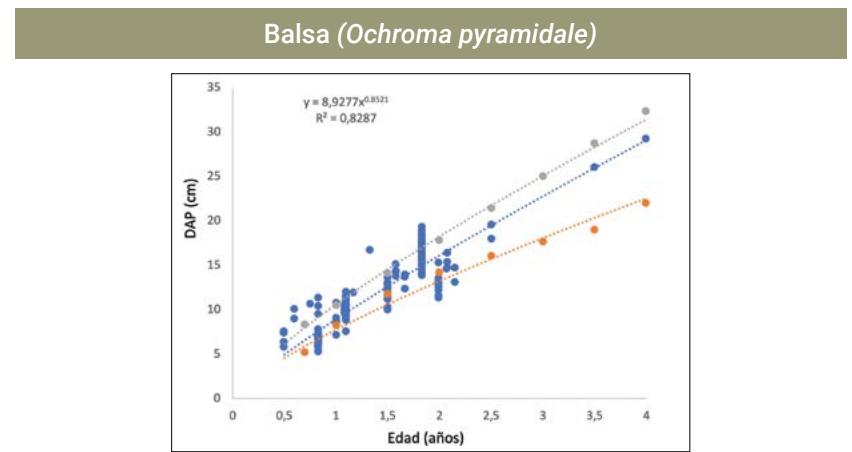


Figura 9. Crecimiento mensual efectivo del diámetro (DAP) en plantaciones de balsa en la Zona Norte y Caribe de Costa Rica (Garro *et al.*, 2025).

Cuadro 17. Crecimiento mensual efectivo del diámetro (DAP) en plantaciones de balsa en la Zona Norte y Caribe de Costa Rica (Garro *et al.*, 2025).

Edad (años)	Bajo (cm)	Promedio (cm)	Superior (cm)	ICA (cm)	IMA (cm)
1	8,24	8,93	10,49		
2	14,15	16,12	17,77	7,19	8,06
3	17,61	22,77	25,05	6,65	7,59
3,5	18,92	25,96	28,69		
4	20,06	29,09	32,33	6,32	7,27
5	21,96	35,18	39,61	6,09	7,04

Pilón (*Hieronyma alchorneoides*)

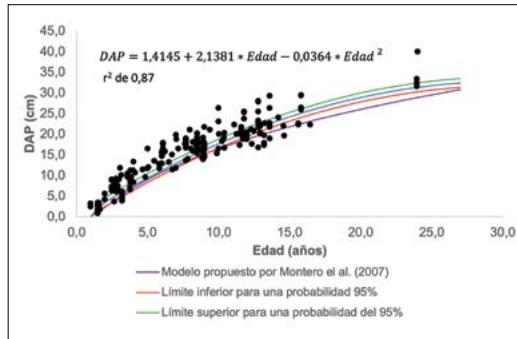


Figura 10. Crecimiento mensual efectivo del diámetro (DAP) en plantaciones de pilón en la Zona Norte y Caribe de Costa Rica (Vallejos et al., 2025).

Cuadro 18. Crecimiento mensual efectivo del diámetro (DAP) en plantaciones de pilón en la Zona Norte y Caribe de Costa Rica (Vallejos et al., 2025).

Edad (años)	Bajo (cm)	Promedio (cm)	Superior (cm)	ICA (cm)	IMA (cm)
2	3,05	5,55	8,04	2,03	2,77
3	5,00	7,50	10,00	1,96	2,50
4	6,89	9,38	11,88	1,88	2,34
5	8,70	11,20	13,69	1,81	2,24
6	10,43	12,93	15,43	1,74	2,15
8	13,69	16,19	18,69	1,59	2,02
10	16,66	19,16	21,65	1,45	1,92
12	19,33	21,83	24,33	1,30	1,82
14	21,71	24,21	26,71	1,16	1,73
16	23,81	26,31	28,80	1,01	1,64
18	25,61	28,11	30,61	0,86	1,56
20	27,12	29,62	32,12	0,72	1,48

Almendro (*Dipteryx oleifera*)

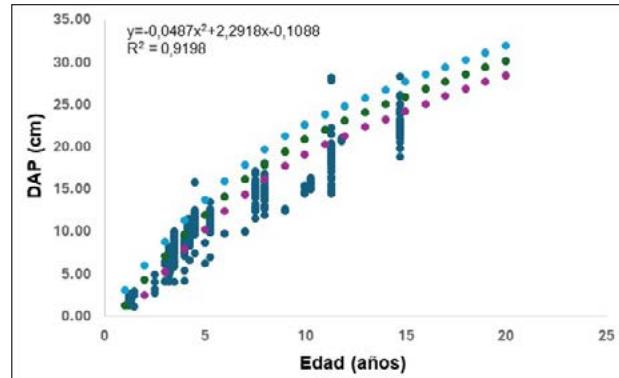


Figura 11. Crecimiento mensual efectivo del diámetro (DAP) en plantaciones de almendro en la Zona Norte y Caribe de Costa Rica (Badilla et al., 2025).

Cuadro 19. Crecimiento mensual efectivo del diámetro (DAP) en plantaciones de almendro en la Zona Norte y Caribe de Costa Rica (Badilla et al., 2025).

Edad (años)	Bajo (cm)	Promedio (cm)	Superior (cm)	ICA (cm)	IMA (cm)
2	2,51	4,25	5,99	2,97	2,13
3	5,29	7,02	8,76	2,77	2,34
4	7,86	9,60	11,33	2,57	2,40
5	10,23	11,97	13,71	2,38	2,39
6	12,41	14,15	15,89	2,18	2,36
8	16,17	17,91	19,65	1,78	2,24
10	19,13	20,87	22,61	1,38	2,09
12	21,31	23,04	24,78	0,99	1,92
14	23,26	24,99	26,73	0,95	1,79
16	25,09	26,82	28,56	0,90	1,68
18	26,82	28,55	30,29	0,85	1,59
20	28,45	30,18	31,92	0,80	1,51



EVALUACIÓN DE LA PLANTACIÓN FORESTAL

Escuela de Ingeniería Forestal