

COMPORTAMIENTO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CAPIRONA *Calycophyllum spruceanum* DETERMINADO CON MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN PLANTACIONES DE 19 AÑOS

INFORME TÉCNICO N° 03



PERÚ

Ministerio
de Agricultura y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

**MINISTERIO DE AGRICULTURA Y RIEGO
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN AGRARIA
SUBDIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS ESPECIALES
Proyecto 121 - PNIA**

**“COMPORTAMIENTO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD
DE CAPIRONA *Calycophyllum spruceanum* DETERMINADO
CON MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN PLANTACIONES
DE 19 AÑOS”**

INFORME TÉCNICO N° 03

2018

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y RIEGO

INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA

Ministro de Agricultura
Gustavo Eduardo Mostajo Ocola

Viceministro de políticas Agrarias
William Arteaga Donayre

Viceministro de Desarrollo e Infraestructura Agraria y Riego
Pablo Edgar Aranibar Osorio

Jefe del Instituto Nacional de Innovación Agraria
Miguel Ángel Barandiarán Gamarra

**COMPORTAMIENTO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CAPIRONA *Calycophyllum spruceanum*
DETERMINADO CON MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN PLANTACIONES DE 19 AÑOS**

Publicado: Setiembre 2018
Primera edición: Junio 2018
Tiraje: 1000 ejemplares

Editado por:
© 2018, Instituto Nacional de Innovación Agraria
Av. La Molina N° 1981, Lima 12, Casilla N° 2791 – Lima 1
Central telefónica/Fax 511 – 240 2100

Todos los derechos reservados.
Prohibida la reproducción por cualquier medio,
total o parcialmente, sin permiso expreso.

Diseño e Impresión:
CG Andina S.A.C.
Calle Huancabamba 100 – Zona Industrial
San Juan de Miraflores

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2018 – 14527.
Proyecto 121 PNIA “Innovación en el uso de maderas mediante la generación de tablas de propiedades tecnológicas relacionadas a edad utilizando métodos no destructivos en especies procedentes de plantaciones forestales de la Región Amazónica”.

Equipo técnico que participó en la investigación

José Eloy Cuellar Bautista (Investigador Responsable del Proyecto)
Moisés Pascual Acevedo Mallque
Luis Shuseki Yoza Yoza
Haru Angelina Garcia Meza
Sheyla Yanett Chumbimune Vivanco
Haydeé Miriam Ramos León
Jorge Augusto Alencar Vela

Índice General

PRESENTACIÓN	5
1. INTRODUCCIÓN	5
2. MATERIALES Y MÉTODOS	7
2.1. Materiales	7
2.1.1. Ubicación de las plantaciones de <i>Calycophyllum spruceanum</i>	7
2.1.2. Descripción de equipos y materiales utilizados.....	8
2.2. Metodología.....	9
2.2.1. Selección y georeferenciación de árboles	9
2.2.2. Evaluación en campo con TreeSonic Timer	10
2.2.3. Determinación de la densidad en condición saturada	13
2.2.4. Determinación del Módulo de Elasticidad	15
2.2.5. Análisis de datos.....	15
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	16
4. CONCLUSIONES	18
5. RECOMENDACIONES	18
6. BIBLIOGRAFÍA	19

Índice de cuadros

Cuadro 1. Información de las plantaciones en estudio	7
Cuadro 2. Información de la plantación en Cordillera Escalera	9
Cuadro 3. Información de las plantaciones	10
Cuadro 4. Número de probetas evaluadas en San Alejandro	14
Cuadro 5. Número de probetas evaluadas en Cordillera Escalera.....	14
Cuadro 6. Estadísticos básicos para las variables MOE, DAP y altura	16
Cuadro 7. Análisis de varianza y Prueba de Tukey	16
Cuadro 8. Prueba de Tukey - Cordillera Escalera	17

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de las plantaciones de capirona	7
Figura 2. Treasonic Timer.....	8
Figura 3. Materiales utilizados en la evaluación	8
Figura 4. Flujograma de actividades	9
Figura 5. Proceso de evaluación con TreeSonic timer	10
Figura 6. Evaluación en campo con TreeSonic timer.....	11
Figura 7. Plantaciones evaluadas.....	12
Figura 8. Determinación de la densidad.....	13
Figura 9. Probetas de densidad.	13
Figura 10. Determinación de la densidad básica	14
Figura 11. MOE según zonas en CE.....	17
Figura 12. Densidad de acuerdo a las zonas en CE	17

COMPORTAMIENTO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CAPIRONA *Calycophyllum spruceanum* DETERMINADO CON MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN PLANTACIONES DE 19 AÑOS

PRESENTACIÓN

El presente trabajo se desarrolló en el Marco del Proyecto 121 PNIA “Generación de tablas de propiedades tecnológicas relacionadas a edad utilizando métodos no destructivos en especies procedentes de plantaciones forestales de la región amazónica”, que busca cubrir un vacío de información en la promoción adecuada de las plantaciones forestales, esto referido al comportamiento de las propiedades tecnológicas de maderas de acuerdo a la edad del árbol, utilizando pruebas no destructivas, debido a que la información disponible es de maderas provenientes de bosques naturales, esta información no es extrapolable a plantaciones porque se desconoce la edad del árbol.

El proyecto plantea la generación de datos en base a pruebas no destructivas, previa validación, mediante herramientas tecnológicas modernas para la generación de ecuaciones y datos de densidad básica en base a la aplicación de la teoría. El desarrollo de estas tablas de propiedades de la madera permitirá a todos los agentes de la cadena forestal, contar con datos reales para la generación de volúmenes de producción, tablas de uso de maderas en base a propiedades tecnológicas, que deben servir para planificar toda inversión forestal a futuro.

1. INTRODUCCIÓN

La heterogeneidad de la madera debido a su origen biológico es una limitante para incrementar su uso industrial (Baettig, 2001).

Existen diversos factores bióticos y abióticos que influyen en las propiedades físicas y mecánicas de la madera, Arroyo (1983) comenta que estas variaciones son en gran parte el resultado de los patrones de crecimiento de los árboles, así como también de las influencias ambientales que afectan ese crecimiento, tales como clima, suelo, humedad y competencia.

Según Reynel *et al.* (2003), la especie *Calycophyllum spruceanum* Benth de la familia RUBIACEAE se encuentra distribuida en toda la Amazonía, debajo de los 1200 msnm, la madera es de muy buena calidad, dura, pesada, con grano recto a ondulado y textura fina, de excelente durabilidad, usada para construcción rural. En años recientes, su demanda para la producción de parquet a nivel nacional e internacional es creciente. La Cámara Nacional Forestal (1996) señala que puede ser utilizada en vigas, columnas, pisos y machihembrados y postes. Pantigoso (2009) determinó para *C. spruceanum* de 9 años una densidad básica de 0,61 g/cm³ y un valor de Módulo de Elasticidad en flexión estática de 105 t/cm².

Las propiedades mecánicas de la madera se definen como la expresión de su comportamiento bajo la aplicación de fuerzas o cargas, el cual va a depender del tipo de fuerza aplicada y de las diferencias básicas en la organización estructural de la madera (Arroyo, 1983). Así mismo, Aróstegui (1982) define la flexión estática a la resistencia que ofrece la madera a una carga que actúa sobre una viga; esta propiedad presenta tres esfuerzos: el Módulo de Ruptura (MOR) es aquel esfuerzo en el cual se produce la falla en la viga; mientras que el Módulo de Elasticidad (MOE) es un índice de la facilidad o dificultad que tienen las maderas para su deformación, siendo la regla cuanto mayor es el MOE, menor es su deformación y la resistencia máxima. El MOE es según Walker, citado por Rocha (2012), como una de las propiedades mecánicas más importantes para muchos usos finales de la madera en construcción, muros estructurales, vigas, pilares, escaleras, entre otros.

Timbera citado por Navia (2006) menciona que el MOE de una sección de madera es una medida de su resistencia a un cambio de forma o de tamaño bajo la acción de varias fuerzas en esta sección. El MOE es considerado muchas veces más importante que el Módulo de ruptura para predecir la calidad de la madera. Esta propiedad de resistencia se ve influenciado por variables como la densidad de plantación, genotipo, ángulo microfibrilar, madera de compresión, entre otros.

Con el método convencional, para poder determinar el MOE en una pieza de madera se debe acudir a una prensa que evalúe flexión estática, tomando datos de carga y deformación lo que posteriormente calculará el valor de MOE, siendo esta técnica un procedimiento lento, caro y con equipos que no son

portátiles. Ante esta situación, surgen investigaciones sobre la determinación del MOE dinámico (MOEd), que tiene buena correlación con el MOE estático (MOEe). Este MOEd se obtiene midiendo la velocidad de una onda acústica a través del material utilizando el Treasonic timer.

El MOE se calcula mediante la ecuación $Módulo\ de\ Elasticidad = V^2 * D$, en donde V es la velocidad de la onda en m/seg y D es la densidad verde de la madera. Elmore y Heald, citados por Sucksmith (2009) señalan que los métodos que miden velocidades de propagación longitudinal son utilizados para determinar MOE longitudinales, mientras que los métodos de vibración en dirección transversal son utilizados para la determinación de MOE en flexión, existiendo una relación de velocidades de propagación del modo transversal y del longitudinal. Así mismo, Kabir *et al.*, citados por Sotomayor (2014) sostiene que el tiempo de transmisión de impulso es mayor en madera húmeda en comparación con el de madera seca.

Los métodos no destructivos pueden ser utilizados para detectar, localizar y medir defectos, para determinar propiedades de los materiales, así como determinar su composición o garantizar su adecuado comportamiento de uso. La presencia de estos defectos (nudos, fendas, desviaciones de fibra, etc.) hacen disminuir los valores de resistencia y elasticidad del material (Acuña *et al.*, s.f.).

Navia (2006) menciona que para que la medición de MOEd de árboles en pie tenga validez es necesario que exista una correlación significativa entre este método y la medición en trozas cortadas del mismo árbol o tablas libres de defecto; por lo cual en el extranjero varios estudios dan validez a este método, siendo probado con distintas especies forestales.

Según Falfán (2011) la madera de reacción es una anomalía que afecta muchas características y propiedades de la madera, se define como aquella madera que se forma como reacción del árbol ante los esfuerzos anormales que se presentan cuando el árbol crece inclinado. Se produce por un desbalance en los niveles de hormonas. Estas diferentes concentraciones en los niveles hormonales influyen en la actividad del cambium, pues este tejido reacciona y produce un tipo de madera de características diferentes a la que se produciría si los niveles fueran los normales (Diaz-vaz, 2003, citado por Falfán (2011)). Además el mismo autor señala que la modificación de los niveles hormonales se debe a la pérdida de verticalidad temporal o permanente de los árboles producto de cargas sobre ellos como viento, nieve, árboles caídos, animales, entre otros.

El presente estudio consistió en la determinación preliminar del módulo de elasticidad (MOE), siendo una de las propiedades mecánicas más importantes para la determinación del uso potencial de la madera, utilizando técnicas no destructivas con el TreeSonic Timer de Fakopp, que básicamente funciona bajo el principio de propagación de una onda de ultrasonido que se transmite de un sensor a otro en un material, siendo en este caso la madera. La ventaja de dicho equipo es que la evaluación es realizada en árboles de pie sin la necesidad de elaborar probetas de madera lo que permitirá poder tomar decisiones antes del aprovechamiento.

Antecedentes

Navia (2006) señala que estudios realizados en Uruguay demostraron para *Eucalyptus grandis* una alta correlación de $r=0,855$ entre el Módulo de Elasticidad tomado con técnicas no destructivas (Fakopp) y el método de ensayo de flexión estática tradicional, con lo cual se obtiene el MOE con técnicas destructivas.

Soto *et al.* (2012) en su estudio de *Pinus radiata* encontró que la velocidad no fue influenciada por la densidad de plantación inicial, sin embargo, el tratamiento de menor densidad mostró el mayor valor. Por su parte Navia (2006) en su estudio para la misma especie encontró diferencias significativas entre tres sitios para el Módulo de Elasticidad, avalando así la importancia del sitio en esta variable.

Además, Laserre *et al.* citado por Navia (2006), realizó un estudio cuyo objetivo general fue evaluar mediante un método no destructivo sobre árboles en pie el comportamiento del módulo de elasticidad en madera juvenil en tres condiciones de sitio en clones de *Pinus radiata* en donde muestran una fuerte correlación ($r=0,96$) entre el MOEd usando Fakopp y el MOEe determinado desde flexión estática tradicional para individuos de 11 años.

Divos (2010) señala que en base a los resultados de investigaciones recientes existe un vínculo muy claro entre la microestructura y la calidad de la madera. El menor ángulo de microfibrilla da como resultado una alta velocidad en la dirección de la fibra, alta rigidez, alta resistencia y traqueidas largas. Entre los parámetros enumerados, la determinación de la velocidad es la más fácil y rápida de determinar. Menciona además que los árboles con alta

velocidad producen material de madera de alta resistencia, por lo que son preferidos para la producción de madera de calidad.

Otra investigación con el uso del TreeSonic timer acústico fue utilizado para la medición del tiempo de vuelo de árboles en pie de plantaciones de *Pinus taeda* L. establecidas a diferentes densidades, según lo menciona Amateis *et al* citado por Holley *et al* (2015). Posterior a las evaluaciones en campo, los árboles fueron tumbados y elaboraron probetas, siendo posteriormente ensayados en flexión estática en dos puntos de carga. Las propiedades evaluadas fueron el módulo de ruptura y el módulo de elasticidad. Los métodos de regresión se usaron para relacionar estas propiedades de flexión con las mediciones de tiempo de vuelo recopiladas de los árboles en pie. Los resultados sugieren que es poco probable que las mediciones de tiempo de vuelo por sí solas sean adecuadas para predecir MOR y MOE de madera de pino de abetos de árboles en pie que crecen a diferentes densidades de siembra.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

2.1.1. Ubicación de las plantaciones de *Calycophyllum spruceanum*

Las dos plantaciones evaluadas están ubicadas en el Área de Conservación Regional (ACR) Cordillera Escalera, ubicado en la provincia de Tarapoto, región San Martín, y en el distrito de Irazola en la región Ucayali, ambas, con 19 años de edad con diámetro promedio de 25,23 y 23,14 cm, IMA de diámetro de 1,33 y 1,22, altura total promedio de 20,74 y 22,50 m para el Área de Conservación Regional (ACR) Cordillera Escalera e Irazola respectivamente. En el Cuadro 1 se presenta la información de coordenadas UTM, altitud y edad de las plantaciones estudiadas.

Cuadro 1. Información de las plantaciones en estudio

Ubicación de la plantación	Coordenadas (UTM)		Altitud (msnm)	Edad (años)
	N	E		
Cordillera Escalera – San Martín	9285287	353447	725	19
San Alejandro - Ucayali	9022162	487142	265	19

En la Figura 1 se muestra la ubicación de las plantaciones de *C. spruceanum*, estudiadas en los departamentos de San Martín y Ucayali.

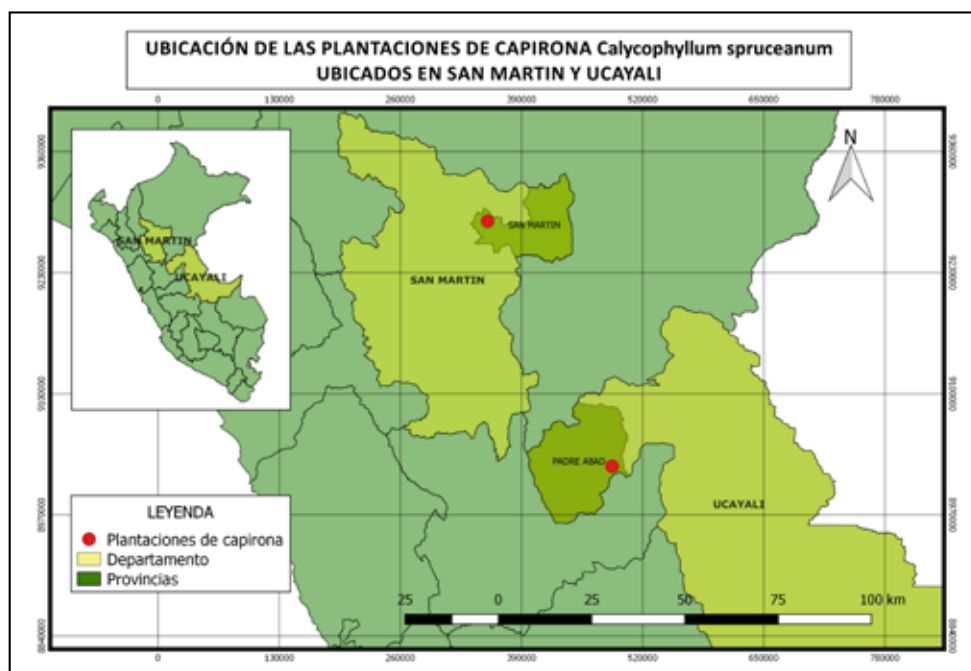


Figura 1. Ubicación de las plantaciones de Capirona.

2.1.2 Descripción de equipos y materiales utilizados

TreeSonic Timer

Es un equipo portátil de 2,90 kg de origen húngaro, diseñado para la predicción de rigidez del árbol en pie. El procedimiento consiste en medir el tiempo de onda de tensión entre un transductor de inicio y un transductor receptor (en microsegundos), midiendo la velocidad de onda longitudinal propagada por un pequeño golpe de un martillo. Con dicha información luego es posible determinar el Módulo de elasticidad dinámico verde. Este equipo consta de: (A) caja temporizadora, (B) transductor de inicio y receptor con martillo deslizante, (C) martillo de acero y (D) guantes de trabajo (Figura 2). Luego de 10 a 12 horas de uso la batería debe recargarse. Una de las limitantes de este método es que sólo mide el módulo de elasticidad dentro de unos pocos anillos de crecimiento. .

Otros:

Brújula, GPS, wincha, balanza digital, formatos, lápices de cera, vaso de precipitado de 100 ml, agua destilada, soporte universal. (Figura 3).

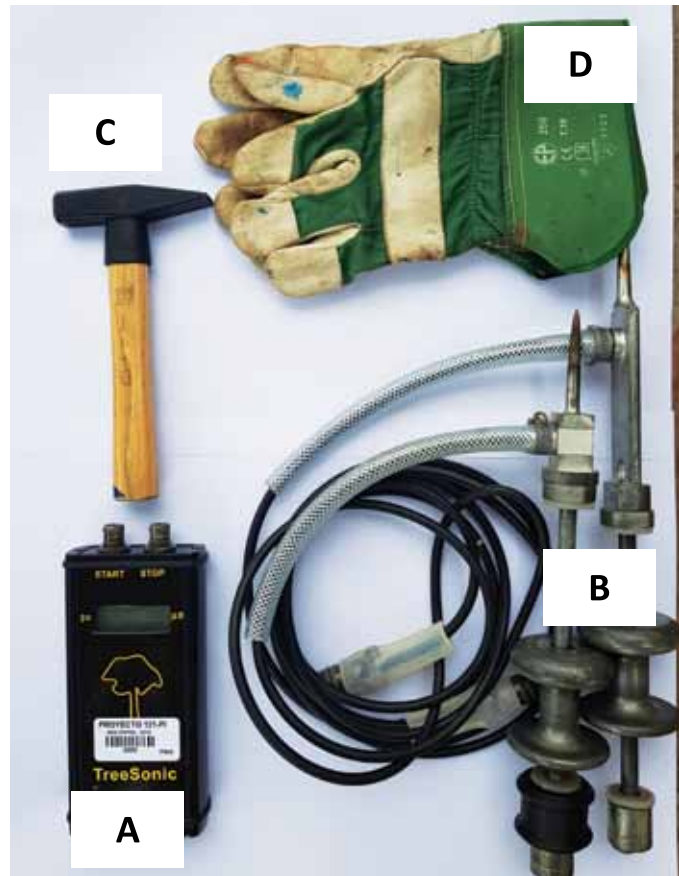


Figura 2. TreeSonic timer.



Figura 3. Materiales utilizados en la evaluación. A. Brújula Suunto. B. GPS Garmin. C. Vaso de precipitado de 100 ml. D. Soporte universal para la determinación de volumen. E. Balanza digital. F. Wincha metálica .

2.2 Metodología

A continuación, en la Figura 4 se detallan las actividades que se realizan para desarrollar el presente estudio, el cual se divide principalmente en 3 fases según la metodología propuesta:

- Fase de campo (evaluación de los árboles en pie), incluye las actividades 1 y 2.
- Fase de laboratorio (evaluación de las probetas), actividad 3.
- Fase de gabinete, incluye las actividades 4 y 5.

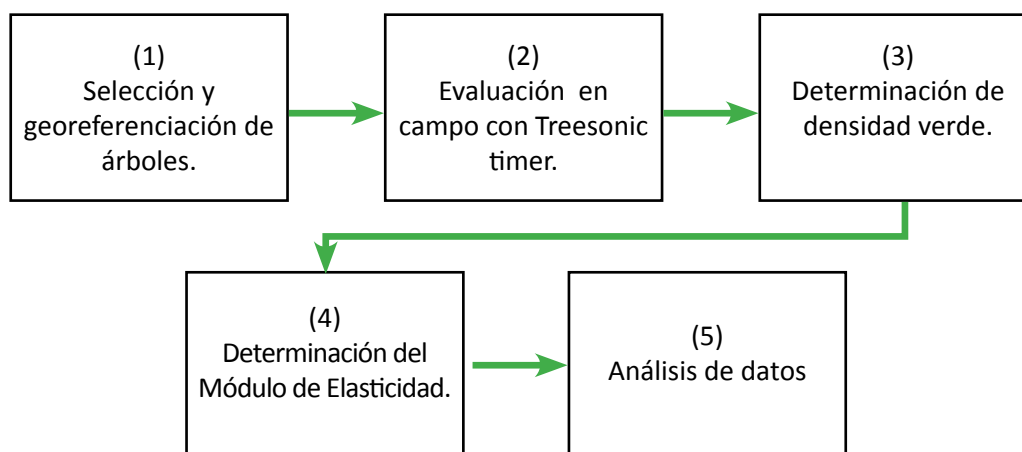


Figura 4. Flujograma de actividades.

2.2.1. Selección y georeferenciación de árboles

Para el presente estudio se seleccionaron 18 árboles de Capirona en cada una de las dos plantaciones. En ambas plantaciones se realizó una zonificación previa de acuerdo a las características del lugar, diferenciando tres zonas principalmente por condiciones marcadas de pendiente. Posterior a ello se realizó la selección de los árboles de Capirona de forma equitativa y aleatoria en cada zona. Se codificaron colocando en el fuste un número y letra que represente a la plantación y la zona. En campo todos los árboles fueron georeferenciados con las coordenadas UTM utilizando GPS, se tomaron además características morfológicas y dasométricas (diámetro a la altura del pecho, altura comercial, altura total, forma de fuste, ramificación, etc.) y se realizó la evaluación con las técnicas no destructivas.

Finalmente se seleccionaron tres árboles de cada plantación utilizando los criterios de clases diamétricas y zonificación, los cuales fueron aprovechados para estudios de las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

En la plantación de Cordillera Escalera, la cual presenta una pendiente pronunciada más marcada que en San Alejandro, se realizó una zonificación considerando como criterio principal la pendiente. A continuación se presenta en el Cuadro 2 con la información de dicha característica.

Cuadro 2. Información de la plantación en Cordillera Escalera

Zona	Este	Norte	Altitud msnm	Pendiente (%)
Zona 1	353447	9285287	726	8,2
Zona 2	353446	9285271	716	27,2
Zona 3	353441	9285227	703	33,4

Información de las plantaciones de *C. spruceanum*

En el Cuadro 3 se presenta la información de las principales características de las plantaciones en estudio:

Cuadro 3. Información de las plantaciones.

DESCRIPCIÓN	SAN ALEJANDRO	CORDILLERA ESCALERA
<i>Ubicación</i>	Ucayali	San Martín
<i>Topografía</i>	5 - 10 %	8,3 – 33,4%
<i>Distanciamiento</i>	2,5 m	5,0 m
<i>Tipo de plantación</i>	Campo abierto	Campo abierto
<i>Diseño de la plantación</i>	Cuadrado	Tresbolillo
<i>Altitud</i>	265 msnm	725 msnm

2.2.2. Evaluación en campo con TreeSonic Timer

A continuación se presenta la metodología propuesta para la medición en campo (Figura 5).

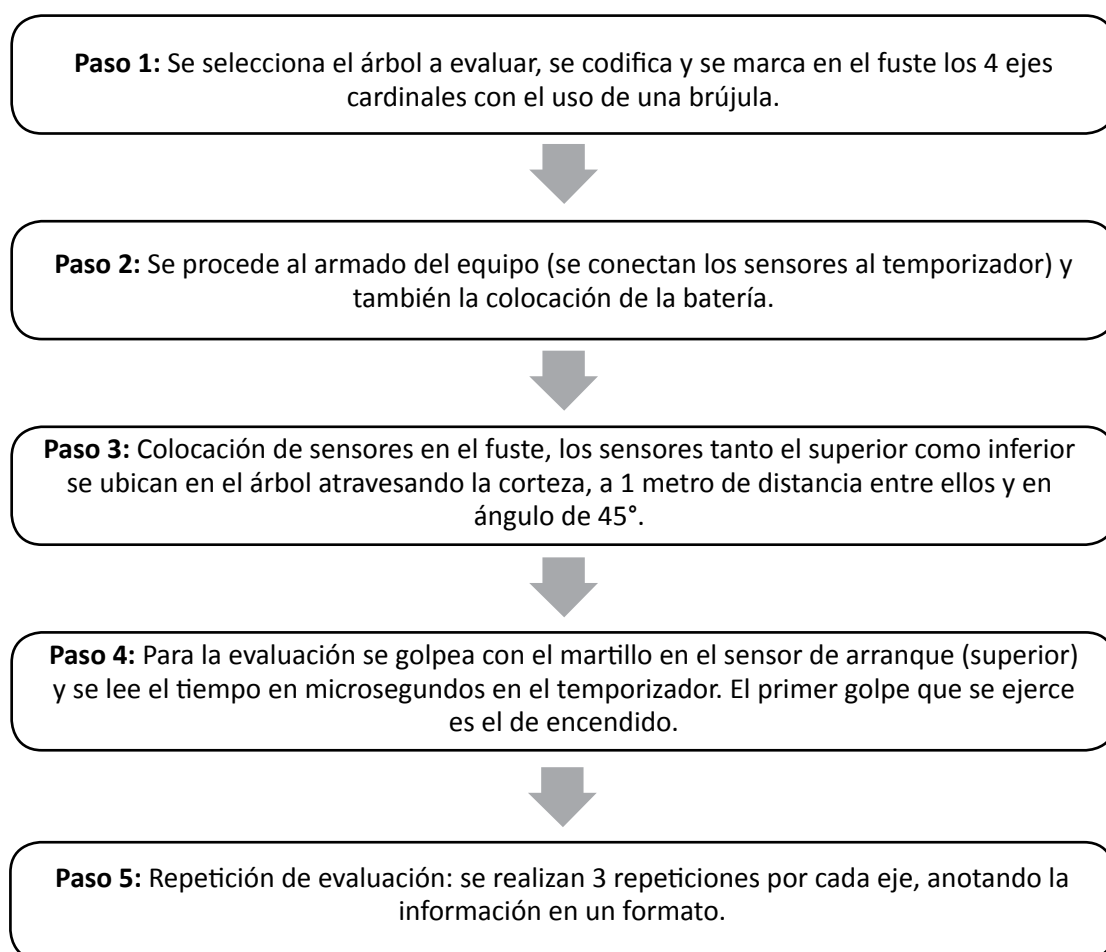


Figura 5. Proceso de evaluación con TreeSonic timer.

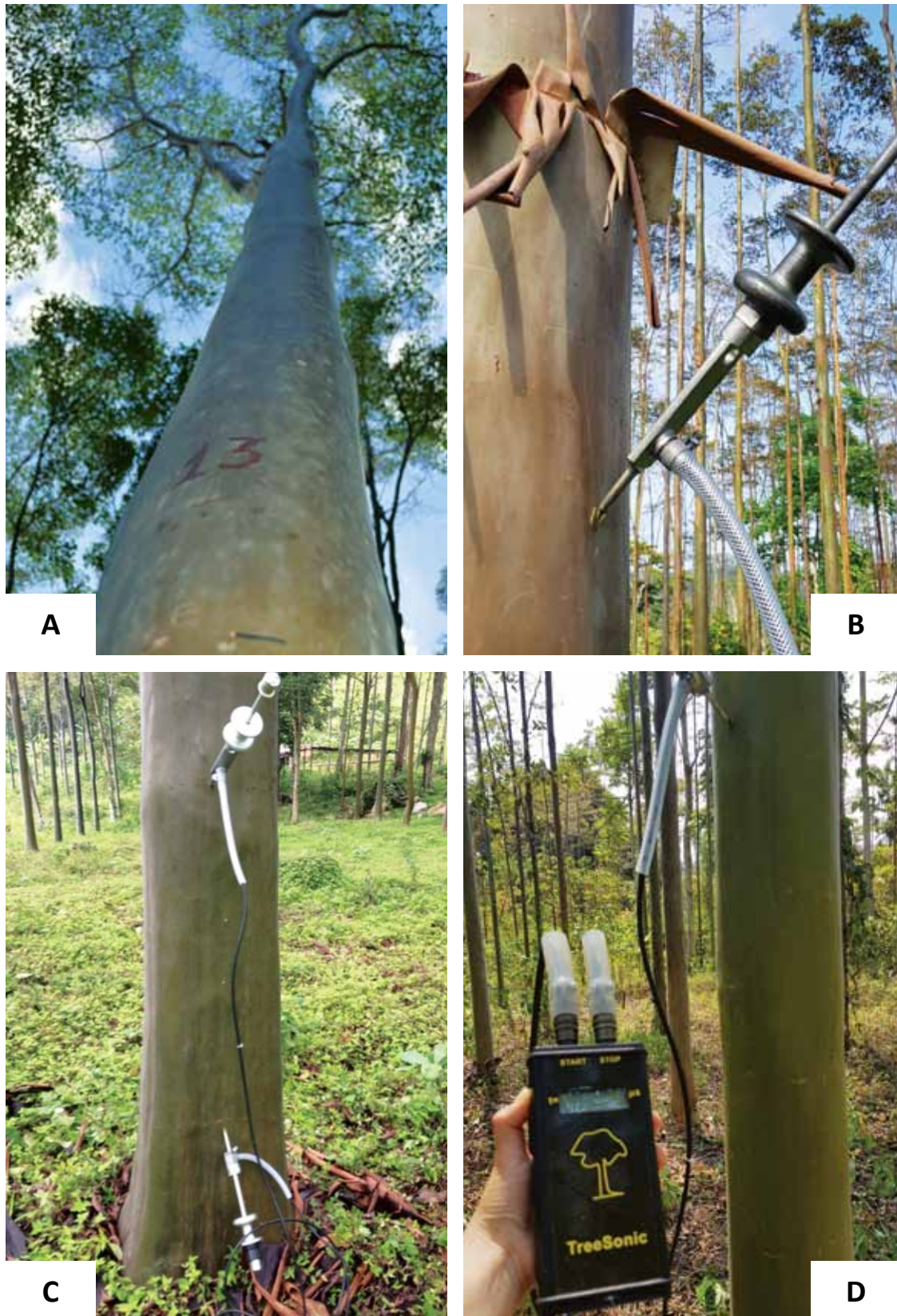


Figura 6. Evaluación en campo con TreeSonic timer. A. Selección del árbol. B. Penetración del sensor superior. C. Penetración del sensor inferior. D. Toma del tiempo.

En la Figura 6 se presenta la evaluación en campo con el equipo TreeSonic Timer (Fakopp) de árboles en pie de *C. spruceanum*, en la imagen A se observa la selección y marcado del árbol así como de cada eje cardinal (norte, sur, este y oeste) en el DAP (diámetro a la altura del pecho). En la imagen B la ubicación y colocación del sensor superior, el cual debe llegar a la madera atravesando la corteza del árbol. En la imagen C se muestra la forma de colocar los dos sensores a 1 metro de distancia entre ellos y en ángulo de 45° respecto al eje del fuste. Y en la imagen D se muestra la lectura del dato en el temporizador luego de ser inducida la onda con el golpe de un martillo de acero en el cabezal del sensor superior.

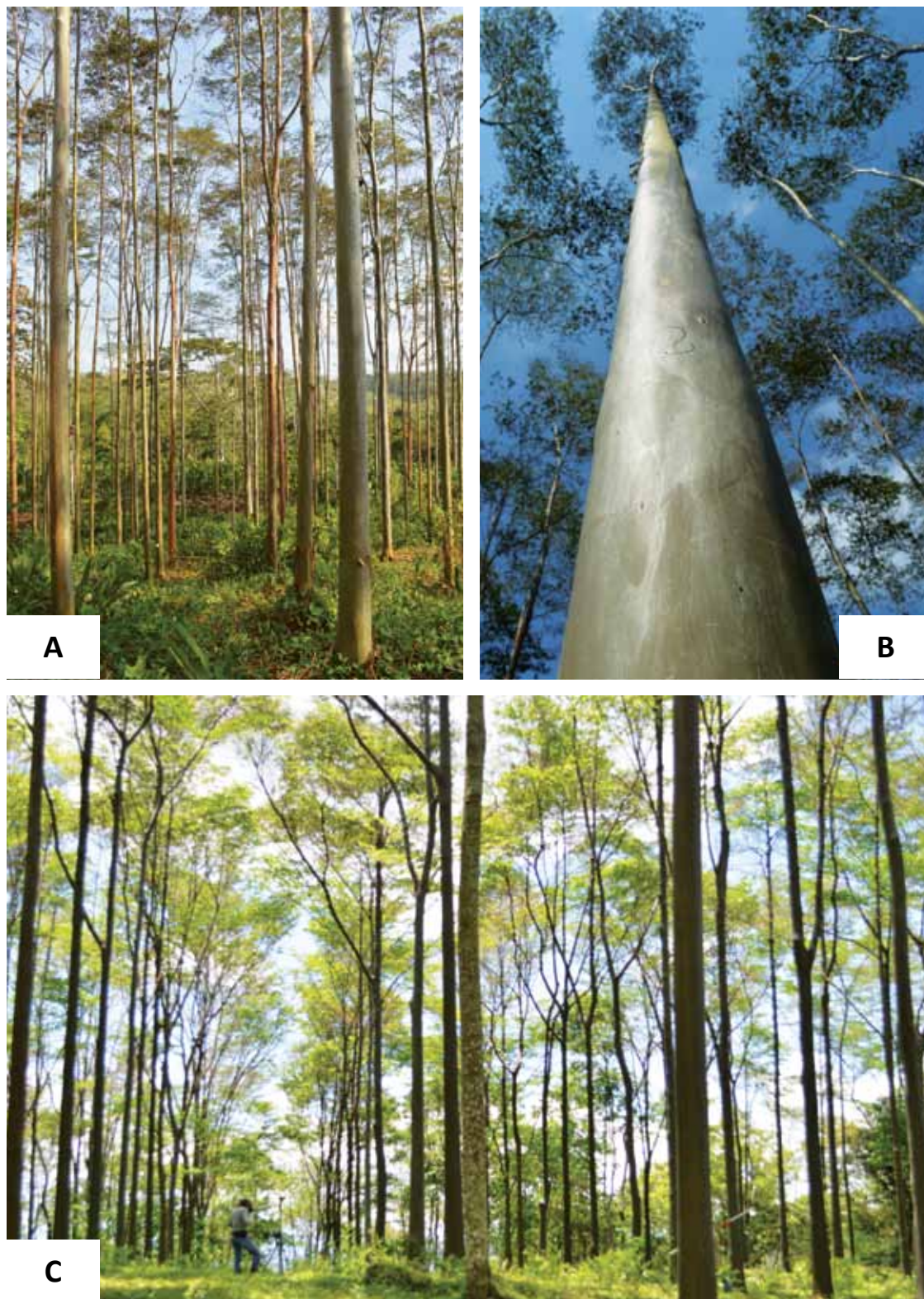


Figura 7. Plantaciones evaluadas. A. Plantación ubicada en San Alejandro. B. Árbol de capirona de 19 años. C. Cordillera Escalera en San Martín.

En la Figura 7 se presentan las plantaciones de *C. spruceanum* de 19 años en estudio. En la imagen A se muestra la plantación ubicada en el distrito de San Alejandro en la región Ucayali con un distanciamiento de 2,50 metros entre árboles. En la imagen B se observa un fuste recto de un árbol evaluado. Y finalmente, en la imagen C se observa la plantación evaluada en el Área de Conservación Regional Cordillera Escalera ubicada en la región de San Martín, con un distanciamiento entre árboles de 5 metros.

2.2.3. Determinación de la densidad en condición saturada

Esta prueba se determinó en el laboratorio Multipropósito del Centro Experimental La Molina en Lima. Para la determinación de la densidad se trabajó con probetas de 3 árboles de ambas plantaciones. En los cuadros 4 y 5 se puede observar el número de probetas evaluadas por cada lugar. El procedimiento que se siguió fue según lo establecido en la Norma Técnica Peruana 251.011:2004. "Método de determinación de la densidad", en el siguiente esquema se presenta los pasos que se siguieron: (Figura 8).

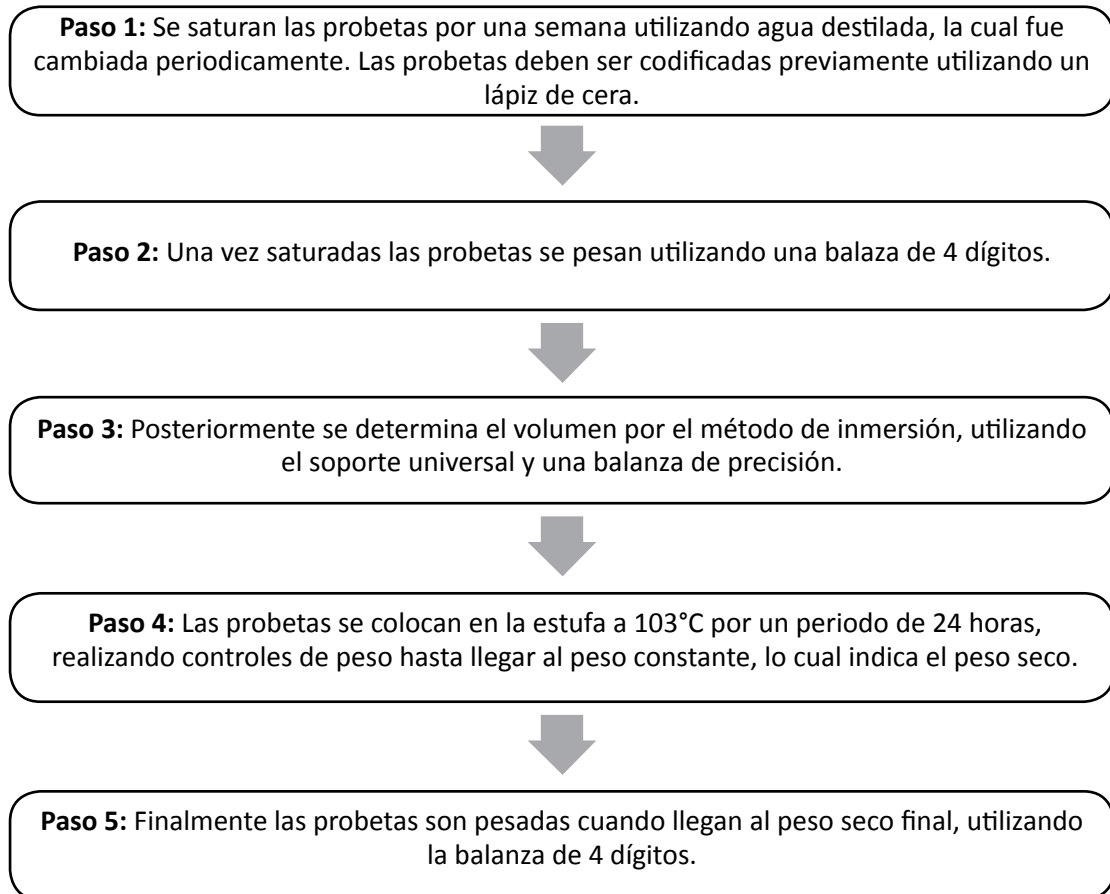


Figura 8. Determinación de la densidad.

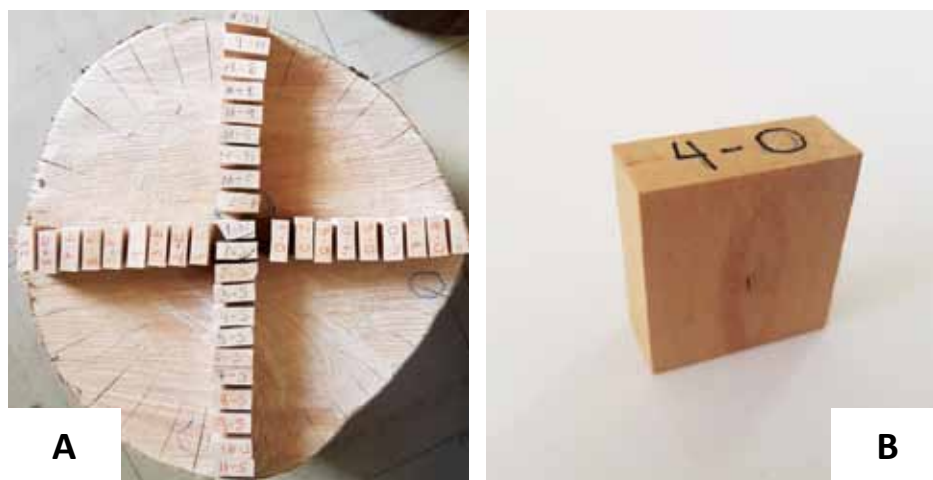


Figura 9. Probetas de densidad. A. Distribución de probetas. B. Probeta para densidad básica.

Las probetas tienen dimensiones de 2,5 x 2,5 x 1,0 cm como se presenta en la Figura 9. En la imagen A se muestra cómo es que se distribuyeron las probetas de forma radial en la troza, en forma de cruz identificando los ejes cardinales norte, sur, este y oeste. En la imagen B se presenta la dimensión final de las probetas para densidad básica debidamente codificada por su posición y orientación.

La cantidad de probetas que se evaluaron para determinar la densidad se detallan por árbol y por eje cardinal en los Cuadros 4 y 5. En total, para la plantación de San Alejandro, en la región Ucayali, se evaluaron 115 probetas; y para la plantación ubicada en el ACR Cordillera Escalera, en la región San Martín, un total de 114 probetas. La cantidad de probetas por árbol depende del diámetro de los árboles. Además las rodajas de donde se elaboraron fue la ubicada en la parte basal del fuste.

Cuadro 4. Número de probetas evaluadas en San Alejandro

Árbol	Probetas Plantación San Alejandro				Total
	Norte	Sur	Este	Oeste	
8	8	9	8	8	33
21	9	12	9	9	39
14	10	11	10	12	43
TOTAL					115

Cuadro 5. Número de probetas evaluadas de Cordillera Escalera

Árbol	Probetas Plantación San Alejandro				Total
	Norte	Sur	Este	Oeste	
20	11	10	9	9	39
46	12	11	9	10	42
19	13	11	9	10	43
TOTAL					114

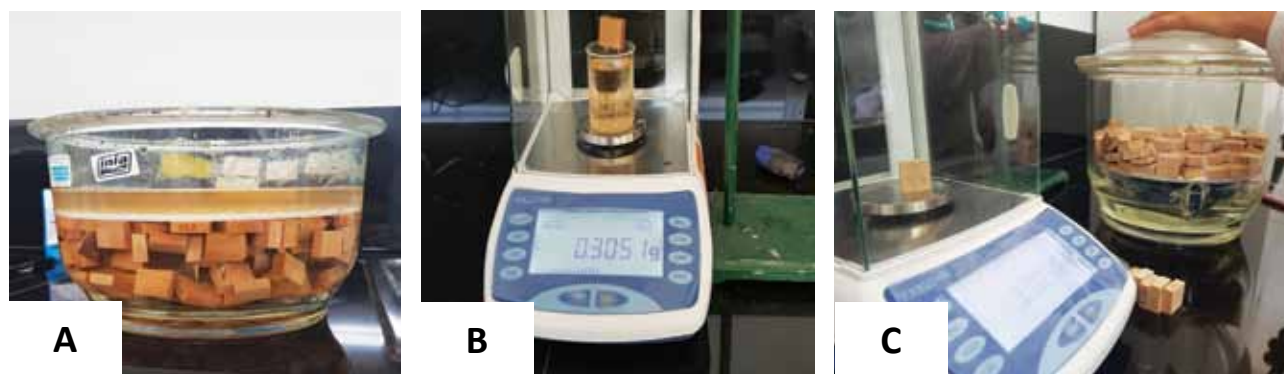


Figura 10. Determinación de la densidad básica. A. Saturación de las probetas. B. Volumen por inmersión. C. Peso seco.

En la Figura 10 se presenta el proceso para la determinación de la densidad, observando en la imagen A la saturación de las probetas de Capirona por 7 días en agua destilada, realizando controles de peso verificando el contenido de humedad y cambiando el agua periódicamente. En la imagen B se observa la determinación del volumen por el método de inmersión mediante el uso del soporte universal y finalmente en la imagen C las probetas son pesadas luego de permanecer en la estufa por 24 horas a una temperatura de 103°C, hasta obtener el peso seco.

Con los datos obtenidos en el laboratorio de peso seco y volumen saturado se calcula la densidad básica mediante la siguiente fórmula:

$$D_b = \frac{P_s}{V_s}$$

D_b : Densidad básica (g/cm^3)

P_s : Peso seco (g)

V_s : Volumen saturado (cm^3)

2.2.4. Determinación del Módulo de Elasticidad

Con los datos de tiempo en microsegundos (μs) obtenidos en campo con el equipo TreeSonic Timer y con la distancia entre sensores, se calcula primero la velocidad con la siguiente fórmula:

$$V = \frac{D}{T}$$

V : Velocidad (m/s)

D : Distancia entre sensores (m)

T : Tiempo (s)

Luego de obtenida la velocidad, se determina el Módulo de Elasticidad dinámico con la siguiente fórmula, donde V corresponde a la velocidad sónica de la onda de esfuerzo que se mide en m/s y ρ que corresponde a la densidad verde de la madera.

$$MOE = \rho \cdot V^2$$

MOE : Velocidad (Kg/cm^2)

ρ : densidad (Kg/m^3)

V : Velocidad m/s

2.2.5. Análisis de datos

Se determinaron los estadísticos básicos para cada plantación y se realizó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con un análisis de varianza para las dos plantaciones en estudio (ACR Cordillera Escalera y San Alejandro) y por tipos de zona para una plantación.

Para ello se trabajó con el programa estadístico InfoStat 2017 y se realizó la prueba de Tukey cuando se encontró diferencias significativas.

Las variables comparadas fueron: Módulo de Elasticidad, DAP y altura para ambas plantaciones de *C. spruceanum*. Además se realizaron gráficos de valores de MOE según las zonas de la plantación ubicada en ACR Cordillera Escalera.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En el Cuadro 6 se puede observar que los mayores valores de MOEd se obtienen en la plantación de San Alejandro y los menores en Cordillera Escalera, ambas de 19 años de edad. Respecto al coeficiente de variación, la plantación de San Alejandro (Selva Baja) presenta datos homogéneos con un CV de 9,59, mientras que la plantación de Cordillera Escalera (Selva Alta) presenta datos más variables con un CV de 51,41; esto puede deberse a que presentó 3 zonas diferenciadas en la plantación y 2 de ellas presentaban pendiente pronunciada. Respecto a las variables DAP y altura, la plantación en Cordillera Escalera presenta los valores más altos, lo cual puede estar relacionado a las condiciones del lugar.

Cuadro 6. Estadísticos básicos para las variables MOE, DAP y altura

Lugar	Variable	Medias	D.E.	E.E.	C.V.	Min	Máx
San Alejandro	MOE (kg/cm ²)	118695	11380,39	2682,38	9,59	93753,59	138775,46
	DAP (cm)	23,14	3,08	0,73	13,32	16,10	29,90
	Altura (m)	22,50	1,76	0,41	7,81	19,00	25,00
Cordillera Escalera	MOE (kg/cm ²)	65534,87	33692,52	0.60	51,41	36579,68	126166,91
	DAP (cm)	31,56	2,67	0,63	8,46	27,20	37,80
	Altura (m)	23,39	2,43	0,57	10,40	19,39	26,93

Los resultados obtenidos en el análisis de varianza y prueba de Tukey para las variables de MOEd (kg/cm²), DAP (cm) y altura total (m) se observan en el Cuadro 7. Para el caso del MOEd se observa que la plantación ubicada en San Alejandro (Ucayali) difiere de la de Cordillera Escalera (San Martín), para el DAP las dos plantaciones presentan diferencias entre sí y para la altura total las ambas plantaciones no presentan diferencias significativas.

Cuadro 7. Análisis de varianza y Prueba de Tukey

Lugar de la plantación	Edad (años)	MOE (kg/cm ²)		DAP (cm)		Altura total (m)	
		p < 0,0001		p < 0,0001		p < 0,0001	
		Media ± D.E.	Tukey	Media ± D.E.	Tukey	Media ± D.E.	Tukey
San Alejandro	19	118695 ± 11380,39	A	23,14 ± 3,08	A	22,5 ± 1,76	A
Cordillera Escalera	19	65671,04 ± 33692,52	B	31,56 ± 2,67	B	23,39 ± 2,43	A

Para el caso de la plantación de Cordillera Escalera en la que se observó diferencias marcadas en los valores promedios de MOEd se realizó un análisis de varianza presentando diferencias significativas, la prueba de Tukey para esta plantación se observa en el Cuadro 8, donde las zonas 2 y 3 difieren de la zona 1. Lo que guarda relación con las características del lugar, en donde la zona 2 y 3 poseen una pendiente pronunciada, mientras que la zona 1 presentaba zona plana.

Esta diferencia entre zonas está relacionada directamente a los valores de MOEd, pues se ejerce el crecimiento de madera de reacción, la cual debe ser resistente a la pendiente. El árbol desarrolla mecanismos de defensa que le permite mantenerse erguido resistiendo todas las fuerzas.

Cuadro 8. Prueba de Tukey - Cordillera Escalera

Zona	Medias	n	E.E.	Tukey
3	40229,33	6	3001,42	A
2	44096,70	6	3001,42	A
1	112687,08	6	3001,42	B

En base a este resultado se puede decir que la pendiente y condiciones del sitio afectan la velocidad de transmisión de ondas en árboles en pie y con ello el Módulo de Elasticidad, pues presentan una relación directamente proporcional. Estos valores bajos pueden deberse a la existencia de madera de compresión y de acuerdo a Navia (2006) se caracteriza por presentar menor MOE.

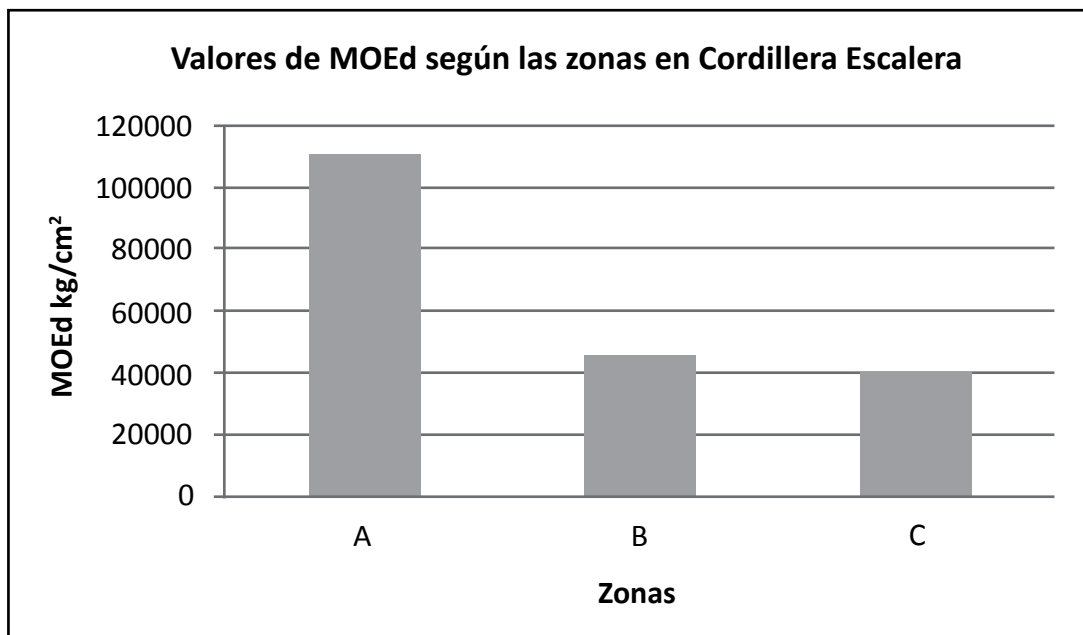


Figura 11. MOE según zonas en CE.

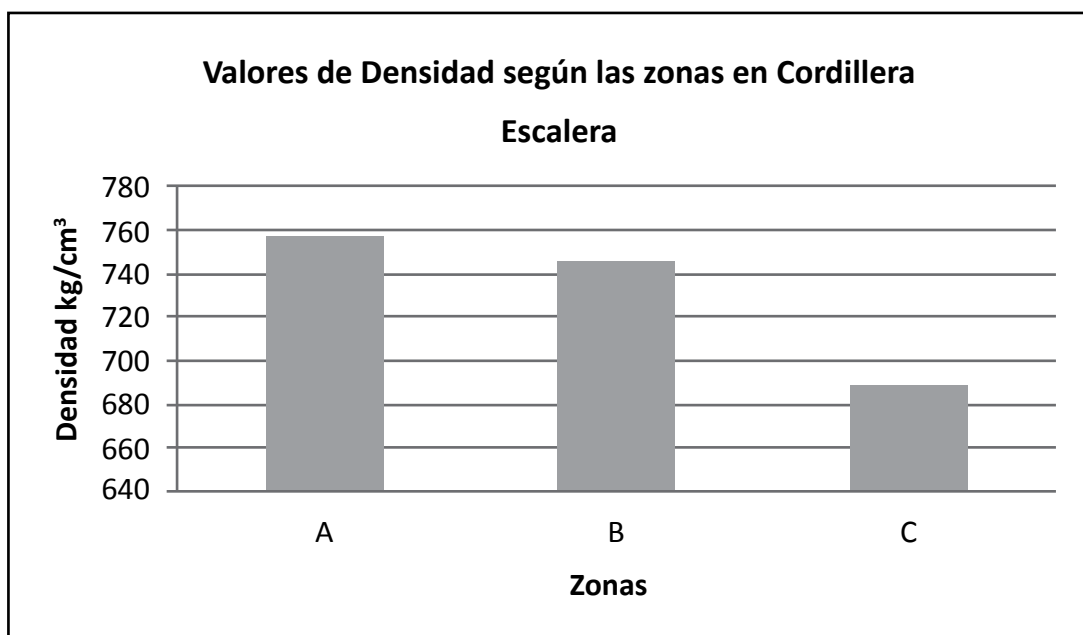


Figura 12. Densidad de acuerdo a las zonas en CE.

En la Figura 11 se muestran los valores de MOEd diferenciados por zonas en la plantación ubicada en el Área de Conservación Regional Cordillera Escalera. Se nota claramente las diferencias marcadas entre la zona A que se caracteriza por no presentar pendiente y ser una zona plana, y las zonas B y C presentan valores menores pero similares entre sí siendo estas zonas de pendientes pronunciadas.

En la Figura 12 se presentan los valores de densidad, lo cual se observa que en la zona A es la que presenta el valor más alto de densidad con 757 kg/cm^3 , presentándose en esta zona árboles de fuste recto, sin defectos. Sin embargo en la zona C se encontraron los menores valores de densidad, con un promedio de 689 kg/cm^3 , puede estar relacionado a la presencia de madera de reacción siendo este tipo de madera más frágil y de menor resistencia.

4. CONCLUSIONES

- En la variable Módulo de Elasticidad se encontraron diferencias significativas entre las plantaciones, siendo la plantación de San Alejandro la que obtuvo mayores valores de MOEd.
- En las características dasométricas se encontraron diferencias significativas entre los lugares de plantación. En el caso del DAP, las dos plantaciones difieren entre sí y en la altura total no existe diferencia significativa.
- Los árboles ubicados en la plantación de Cordillera Escalera en las zonas de pendiente marcada presentaron valores más bajos de Módulo de Elasticidad, por lo que las condiciones de sitio es un factor que afecta de forma considerable a dicha variable.

5. RECOMENDACIONES

- Realizar evaluaciones en otras plantaciones con condiciones de sitio y edades diferentes.
- Ejecutar el estudio con otras especies forestales.
- Programar días extras del plan de trabajo por imprevistos de lluvia u otros.

6. BIBLIOGRAFÍA

Acuña, L; Díez, R; Casado, M; Llorente, A; Lázaro, T; Martín, L; Bastera, A; Relea, E; Cueto, G. s.f. La Transmisión de Ultrasonidos aplicada a la madera Estructural. ES. 11P.

Arroyo, J. 1983. Propiedades físico mecánicas de la madera. Texto para estudiantes de Ingeniería Forestal. Universidad de los Andes, FCF. Mérida, VE. 186 p.

Baettig R. 2001. Determinación del Módulo de Elasticidad de la madera mediante vibraciones transversales. Maderas Ciencia y tecnología 3 (1-2): 44-51. Talca, CL.

CAMARA NACIONAL FORESTAL 1996. Utilización Industrial de Nuevas Especies Forestales en el Perú. Proyecto ITTO PD 37/88. Lima, PE. 240 p.

Divos, F. 2010. Acoustic tolos for seedling, tree and log selection. "The future of Quality Control for Wood & Wood Products". Hungary. 6 p. Disponible en <http://cte.napier.ac.uk/e53>

Falfán, M. 2011. Madera de reacción en canelo (*Drimys winteri*). Trabajo de titulación para optar el título de Ingeniero Forestal. Universidad Austral de Chile. Valdivia. CL. 46p.

Holley, A; Gordon; Connor, Kristina, F.; Haywood, James D., eds. 2015. Proceedings of the 17th biennial southern silvicultural research conference. E-Gen. Tech. Rep. SRS-203. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 551 p.

Navia, F. (2006). Comportamiento del módulo de elasticidad en madera juvenil de *Pinus radiata* D. Don en tres condiciones de sitio. Trabajo para optar al título de Ing. Forestal. Universidad Austral de Chile. Valdivia, CL. 58 p.

Pantigoso, J. 2009. Propiedades físicas y mecánicas de la capirona (*Calycophyllum spruceanum* (Benth) hook ex Schumann) procedente de una plantación experimental en San Alejandro Ucayali-Perú. Tesis Ing. Forestal. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, PE.

Reynel, C.; Pennington, R.; Pennington, T.; Flores, C.; Daza, A. 2003. Árboles útiles de la Amazonía peruana. Lima, PE, Darwin Initiative, ICRAF. PE. 509 p.

Rocha, M. 2012. Variabilidad del módulo de elasticidad de la madera de Pino radiata determinado acústicamente y su relación con características de crecimiento y forma. Trabajo de titulación presentado para optar el título de Ingeniero Forestal. Universidad Austral de Chile. Valdivia, CL. 25 pg.

Soto, L; Valenzuela, L; Laserre, J. 2012. Efecto de la densidad de plantación inicial en el Módulo de elasticidad dinámico de árboles en pie y trozas de una plantación de Pino Radiata de 28 años, en la zona de Arenales, Chile. Madera - Ciencia y Tecnología, 14(2): 209 – 224 p. CL.

Sotomayor, J. 2014. Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. MX. 339 p.

Sucksmith, K. 2009. Evaluación del módulo de elasticidad por métodos no destructivos en la madera de *Cedrelinga cateniformis* Ducke proveniente de plantaciones del Bosque Nacional Alexander Von Humboldt. Tesis para optar al título de Ing. Forestal. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, PE. 83 p.



Instituto Nacional de Innovación Agraria

Instituto Nacional de Innovación Agraria

D: Avenida La Molina 1981, Lima

T: (01) 240-2100

www.inia.gob.pe

