

“ESTIMACIÓN INDIRECTA DE LA DENSIDAD BÁSICA MEDIANTE EL USO DEL PILODYN EN LA ESPECIE TORNILLO *Cedrelinga cateniformis* PROCEDENTE DE PLANTACIONES DE DIFERENTES EDADES EN LORETO”

INFORME TÉCNICO N° 01



PERÚ

Ministerio
de Agricultura y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

EL PERÚ PRIMERO

**ESTIMACIÓN INDIRECTA DE LA DENSIDAD BÁSICA
MEDIANTE EL USO DEL PILODYN EN LA ESPECIE
TORNILLO *Cedrelinga cateniformis* DUCKE
PROCEDENTE DE PLANTACIONES DE
DIFERENTES EDADES EN LORETO**

**INFORME TÉCNICO N° 01
2018**



PERÚ

Ministerio
de Agricultura y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

EL PERÚ PRIMERO

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y RIEGO

VICEMINISTERIO DE INFRAESTRUCTURA AGRARIA Y RIEGO

Ministro de Agricultura
Gustavo Eduardo Mostajo Ocola

Viceministro de políticas Agrarias
Juan José Marcelo Risi Carbone

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

ESTIMACIÓN INDIRECTA DE LA DENSIDAD BÁSICA MEDIANTE EL USO DEL PILODYN EN LA ESPECIE TORNILLO *Cedrelinga cateniformis* PROCEDENTE DE PLANTACIONES DE DIFERENTES EDADES EN LORETO

Primera edición, Mayo 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.

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2018 – 07073

Equipo técnico que participó en la investigación

José Eloy Cuellar Bautista (Investigador Responsable del Proyecto)
Moisés Pascual Acevedo Mallque
Luis Shuseki Yoza Yoza
Sheyla Yanett Chumbimune Vivanco
Haru Angelina Garcia Meza
Haydeé Miriam, Ramos León
Arturo Tomas Macedo Ramírez
Wilbert Eddy Cruz Hilacondo

Índice General

| | |
|--|----|
| JUSTIFICACIÓN | 5 |
| 1. INTRODUCCION | 5 |
| 2. MATERIALES Y MÉTODOS | 6 |
| 2.1. Materiales | 6 |
| 2.1.1. Ubicación de las plantaciones de <i>Cedrelinga cateniformis</i> (Ducke) Ducke | 6 |
| 2.1.2. Descripción de los equipos utilizados | 8 |
| 2.2. Metodología | 9 |
| 2.2.1. Selección de individuos..... | 9 |
| 2.2.2. Evaluación con Pilodyn..... | 10 |
| 2.2.3. Colecta de muestras con el Barreno forestal | 12 |
| 2.2.4. Determinación de la densidad básica | 13 |
| 2.2.5. Análisis estadístico | 14 |
| 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES..... | 15 |
| 3.1. Con respecto a la penetración (mm)..... | 15 |
| 3.2. Con respecto a la densidad básica | 15 |
| 3.3. Con respecto a la relación Penetración y Densidad básica | 16 |
| 3.3.1. Plantación en el Anexo El Dorado San Roque | 16 |
| 3.3.2. Plantación en la UNAP | 17 |
| 3.3.3. Plantación en el Km 50..... | 17 |
| 3.3.4. Resultados totales..... | 18 |
| 4. CONCLUSIONES | 18 |
| 5. RECOMENDACIONES | 18 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA | 19 |

Índice de Cuadros

| | | |
|-----------|---|----|
| Cuadro 1. | Información de las plantaciones en estudio | 8 |
| Cuadro 2. | Estadísticos básicos de los valores de penetración en las tres plantaciones de tornillo | 15 |
| Cuadro 3. | Estadísticos básicos de los valores de densidad básica en las tres plantaciones de tornillo | 15 |
| Cuadro 4. | Coeficientes de determinación y ecuaciones lineales de las plantaciones de tornillo en estudio..... | 16 |

Índice de Figuras

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 1. | Mapa de ubicación de plantaciones | 6 |
| Figura 2. | Plantaciones evaluadas | 7 |
| Figura 3. | Pilodyn y accesorios | 8 |
| Figura 4. | Barreno y accesorios | 8 |
| Figura 5. | Flujograma de actividades para la estimación indirecta de la densidad básica..... | 9 |
| Figura 6. | Árbol de tornillo | 9 |
| Figura 7. | Metodología para la evaluación con Pilodyn..... | 10 |
| Figura 8. | Forma correcta de usar el Pilodyn. | 10 |
| Figura 9. | Proceso para el uso del Pilodyn..... | 11 |
| Figura 10. | Metodología para la colecta de muestras con el barreno forestal | 12 |
| Figura 11. | Uso adecuado del barreno | 12 |
| Figura 12. | Evaluación de la densidad básica..... | 13 |
| Figura 13. | Determinación de la densidad..... | 14 |
| Figura 14. | Análisis de regresión simple en el Anexo el Dorado | 16 |
| Figura 15. | Análisis de regresión simple UNAP..... | 17 |
| Figura 16. | Análisis de regresión simple en el km 50..... | 17 |
| Figura 17. | Análisis de regresión simple en todas las plantaciones | 18 |

ESTIMACIÓN INDIRECTA DE LA DENSIDAD BÁSICA MEDIANTE EL USO DEL PILODYN EN LA ESPECIE TORNILLO *Cedrelinga cateniformis* DUCKE PROCEDENTE DE PLANTACIONES DE DIFERENTES EDADES EN LORETO

JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se desarrolló en el Marco del Proyecto 121, que busca cubrir un vacío en la información que permita una 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, ya que la información disponible actualmente es de maderas provenientes de bosques naturales, ésta información no es extrapolable a plantaciones debido a que 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 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 debe servir para planificar toda inversión forestal a futuro.

1. INTRODUCCIÓN

La densidad básica (Db) es la propiedad que mejor expresa la calidad de la madera por su fácil determinación y por presentar correlación con otras características de la madera (Rall, 2006). Delmastro *et al.* citado por Figueroa (2007) sostiene que esta propiedad se emplea normalmente como criterio de evaluación, permitiendo predecir las posibilidades de uso, la calidad de los productos que se obtendrán, el rendimiento de la materia prima y los requerimientos técnicos en la producción.

La toma de muestras tradicional para la determinación de propiedades de la madera implica costosas inversiones, además de un proceso destructivo del árbol (Giraldo *et al.*, 2014). Mientras que la evaluación no destructiva de la madera para la determinación de sus características tecnológicas es una herramienta importante para conocer la variabilidad de los individuos y caracterizar el material en campo (Gouvêa *et al.*, 2011). Por ello el desarrollo de una metodología capaz de inferir con rapidez y precisión la densidad de la madera, posibilitará promover las estimaciones volumétricas, peso y rendimiento industrial de los individuos evaluados (Thiersch *et al.*, 2006).

Según Palaia (2014) el penetrómetro o comercialmente conocido como Pilodyn de origen suizo se emplea desde hace varias décadas tanto en la evaluación de árboles en pie como en el diagnóstico de la madera en servicio. A partir de la penetración que logra se puede estimar su densidad ya que es inversamente proporcional siendo importante el contenido de humedad, ya que afecta a las propiedades físicas del material, Notivol *et al.*, (1992) señala que la relación inversa se expresa a través de un análisis de regresión entre los valores de densidad, medida convencionalmente de una muestra representativa de la población y las medidas de penetración del Pilodyn en el xilema del tronco de los árboles.

En el Perú no existe experiencia en el uso del Pilodyn y todos los estudios consultados corresponden a maderas de coníferas, por lo que este trabajo tiene por objetivo evaluar la eficiencia de dicho método como mecanismo de valoración indirecta de la densidad en *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke procedente de plantaciones.

Antecedentes

Taylor, citado por Palaia (2014) menciona que las primeras investigaciones realizadas con el Pilodyn estaban destinadas a establecer un método rápido para la determinación de la densidad de la madera de árboles en pie de *Pinus taeda*, por lo cual en el estudio que realizó el objetivo fue aplicar un método simplificado de diagnóstico cualitativo y cuantitativo, obteniendo una correlación entre penetración y densidad con un $r=0,81$ siendo estadísticamente relevante. A su vez, Hoffmeyer y Cown citados por Palaia (2014) realizaron estudios con el Pilodyn con *Abies Alba* y *Pinus radiata* respectivamente ambos enfocados en clasificar los árboles antes de su aprovechamiento.

En un estudio realizado por Gouvêa *et al.*, (2011) cuyo objetivo fue caracterizar la madera de clones de Eucalipto por medio de métodos de evaluación no destructiva, se obtuvo como resultado un coeficiente de determinación de 57% entre los valores obtenidos de densidad por el método convencional y con Pilodyn.

Monteoliva (2014), realizó una investigación sobre calibración del Pilodyn, para predecir la densidad de la madera de tres tipos de clones de *Salix babylonica* en árboles en pie, en distintos sitios y condiciones, realizando la asociación entre densidad y penetración lo cual obtuvo como resultados que ninguna ecuación tuvo altos valores de R^2 , sólo resultó con un R^2 de 0,50 para la asociación de todos los clones y sitios.

Así mismo, Palaia (2014) señala que el uso del Pilodyn proporciona un buen diagnóstico de la madera en servicio en edificaciones antiguas, ya que realizó estudios en un edificio del siglo XIX en el centro histórico de Valencia, en donde los muros son de ladrillo y la estructura horizontal y cubierta son de madera. Realizó una inspección visual de la estructura y el Pilodyn, resultando adecuado para determinar parámetros acerca de sus cualidades resistentes. Además que identifica la zona afectada, corroborando y precisando la alteración que afecta la pieza. Finalmente propone una normalización para la realización de este ensayo con Pilodyn.

Por otra parte, Giraldo *et al.* (2014) en el estudio que realizó de estimación de la densidad para clones de *Eucalyptus pellita* cuyo objetivo fue evaluar la eficiencia del método con el Pilodyn como mecanismo de valoración indirecta de la densidad, encontró que es una estrategia eficiente al nivel promedio de clones, mas no para árboles individuales. La relación entre valores obtenidos con Pilodyn y la densidad por discos es buena con un R^2 de 0,46.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

2.1.1. Ubicación de las plantaciones de *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke

Los muestreos se realizaron en marzo del 2017 en tres plantaciones de distintas edades y tipos de establecimientos, en la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP) se encuentra instalada en un sistema de fajas de enriquecimiento, el Km 50 camino a Nauta es una plantación a campo abierto y el Anexo Experimental “El Dorado” es una plantación en macizo. El ámbito de estudio fue en la provincia de Maynas, región Loreto (Figura 1).

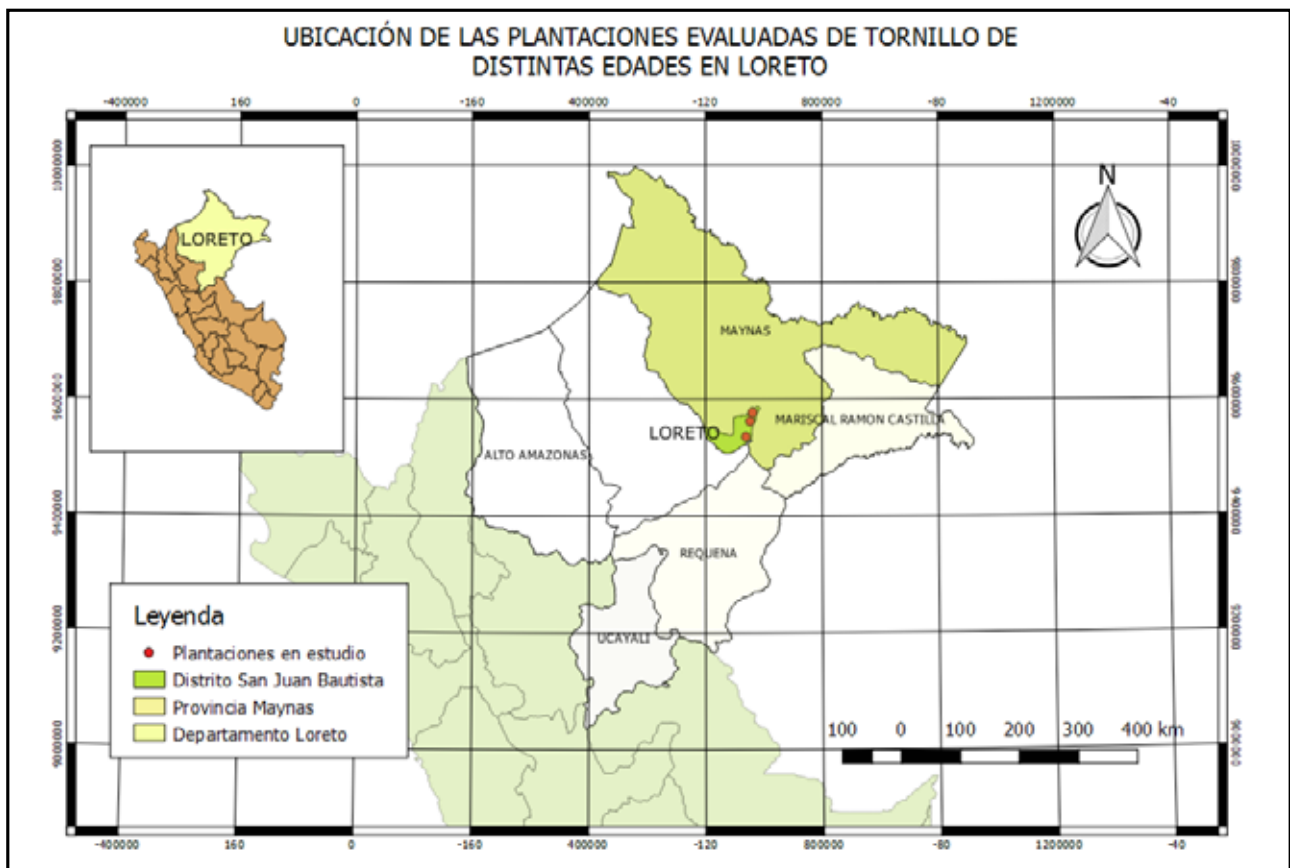


Figura 1. Mapa de ubicación de plantaciones.



Figura 2. Plantaciones evaluadas: A. Anexo “El Dorado”. B. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana. C. Km 50 Camino a Nauta.

En la Figura 2 se observa las plantaciones de distintas edades en donde se realizaron las evaluaciones y toma de datos con el pilodyn. Se puede apreciar que en la imagen A pertenece al Anexo Experimental “El Dorado” E.E.A. San Roque y se trata de una plantación uniforme en macizo con un distanciamiento determinado. La imagen B pertenece a una plantación en fajas de enriquecimiento ubicado en el campo experimental forestal Puerto Almendra de la UNAP, distrito de San Juan Bautista. Finalmente la imagen C muestra la plantación ubicado en el Km 50 carretera Iquitos – Nauta en el distrito también de San Juan Bautista, es una plantación a campo abierto con una distribución de árboles aleatoria.

La información de coordenadas UTM, altitud y edad de cada plantación se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Información de las plantaciones en estudio

| Ubicación de la plantación | Coordenadas (UTM) | | Altitud (msnm) | Edad (años) |
|--------------------------------|-------------------|---------|----------------|-------------|
| | N | E | | |
| UNAP | 680452 | 9576533 | 99 | 35 |
| Km 50 camino Nauta | 669004 | 9536485 | 104 | 26 |
| Anexo Experimental "El Dorado" | 676252 | 9562733 | 124 | 18 |

2.1.2. Descripción de los equipos utilizados

Pilodyn

Es un aparato sencillo diseñado para disparar una aguja que penetra en la madera con una fuerza determinada, puesto que existe una relación entre resistencia a la penetración de la aguja (milímetros) y densidad de la madera. Consta de una aguja de acero de 2,5 mm de diámetro y 60,2 mm de longitud que se dispara con una energía constante de 6 J (Nm) en la madera de árboles en pie (Figura 3). La penetración es variable que va de 0 a 40 mm dependiendo de la especie que se está evaluando. La punta se cambia cada 5000 golpes aproximadamente. El Pilodyn tiene como ventajas que es un instrumento ligero y fácilmente transportable, brinda resultados cuantificables de la calidad de la madera. Este equipo presenta los siguientes accesorios: descortezador, cachimba, agujas de acero de cambio y tornillos de ajuste.



Figura 3. Pilodyn y accesorios.

Barreno de Pressler

Es un instrumento que se utiliza para obtener muestras de árboles en pie, para estudios de dendrocronología (evolución y desarrollo del árbol), plagas, control de la densidad y calidad de madera, entre otros. Permite obtener muestras de forma cilíndrica de madera, frecuentemente de 5 milímetros de diámetro y más de 10 cm de largo, que se saca perpendicularmente al tronco (generalmente desde la corteza del árbol hasta la médula). Consta de tres partes principales: extractor de muestra, barreno de acero, y mango (Figura 4). Requiere de un mantenimiento y cuidado especial. Cuando esté almacenado, el barreno y el extractor deben estar sin ningún residuo de madera ni resinas o látex, y lubricados por dentro y fuera con un aceite protector como WD-40.



Figura 4. Barreno y accesorios.

Otros

Brújula, GPS, wincha, balanza digital, vaso de precipitado, agua destilada, aguja, formatos, plumón indeleble, sobres de papel, desecador, silicagel, estufa.

2.2. Metodología

A continuación en la Figura 5 se detalla el flujograma del proceso en general de la evaluación con el Pilodyn:

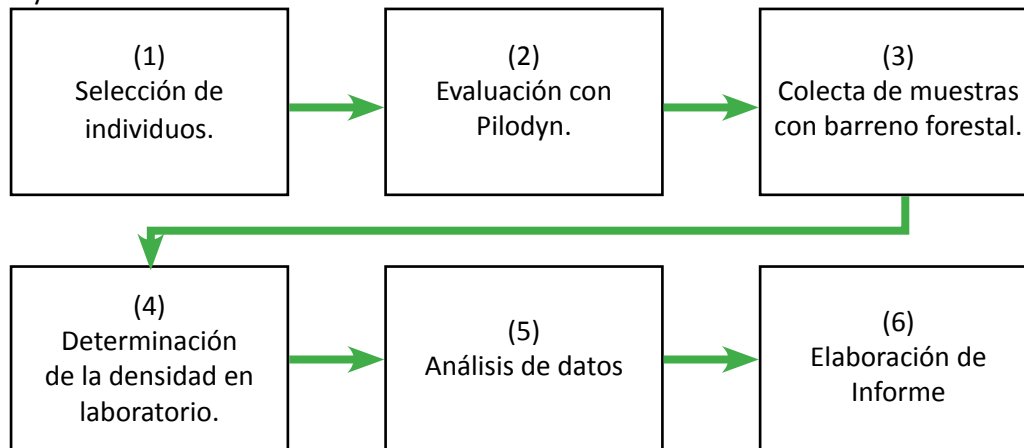


Figura 5. Flujograma de actividades para la estimación indirecta de la densidad básica.

2.2.1. Selección de individuos

En primer lugar se realiza el reconocimiento del lugar de la plantación respecto al medio que lo rodea (fuentes de agua, cultivos, caminos, carreteras, etc) verificando si existe alguna diferencia en fisiografía, relieve o alguna otra característica del sitio que permita clasificar en zonas.

Distribución de las parcelas

En el caso de las plantaciones evaluadas, el sitio por cada tipo de plantación mostraba algunas diferencias de topografía, por lo que se realizó una zonificación de 3 subparcelas por cada plantación, de los cuales se seleccionaron 3 árboles por cada subparcela, evaluando 9 árboles por plantación. Ésta selección se realizó de forma aleatoria considerando árboles de fuste recto y de buen estado fitosanitario (Figura 6).

En total se evaluaron 9 árboles por tipo de plantación, siendo un total de 27 árboles en estudio. Se realizó la codificación de los árboles evaluados con una numeración y código de acuerdo a la plantación y subparcela de donde provenían, para lo cual se utilizó un spray acrílico color rojo.

Evaluación dasométrica y morfológica

Se georeferenciaron los árboles tomando sus coordenadas UTM con GPS y se evaluaron las características dasométricas como el diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total y altura comercial; y morfológicas como forma de fuste, bifurcación, ángulo de ramas, etc. Luego con una brújula se marcó en cada árbol los ejes cardinales (norte, sur, este y oeste).



Figura 6. Árbol de tornillo.

2.2.2. Evaluación con Pilodyn

La metodología que se propone para la toma de datos es la que se muestra en la Figura 7.

Paso 1: En cada eje cardinal se descortezaza previamente la zona en el fuste donde se realizará la evaluación.



Paso 2: Se carga la varilla metálica con una cachimba, empujando la varilla metálica hasta quedar ésta retenida por la acción de un tope en el interior del aparato.



Paso 3: Se presiona con firmeza, de forma perpendicular contra la superficie descortezada.



Paso 4: Se dispara la varilla metálica sobre la madera la cual es impulsada por la fuerza elástica de un resorte, presionando el extremo posterior del pilodyn.

Figura 7. Metodología para la evaluación con Pilodyn.

Forma correcta del uso del Pilodyn en la toma de datos

En la Figura 8, imagen A se presenta la posición correcta del Pilodyn apuntando al centro del árbol. Se debe mantener con firmeza y ejercer la presión sobre el extremo posterior hasta que se dispare la varilla metálica y penetre en la madera, manteniéndolo presionado para tomar la lectura del dato. Mientras que en la imagen B se presenta la forma incorrecta de colocar el Pilodyn sobre la superficie del árbol, ya que la varilla apunta a otra dirección.

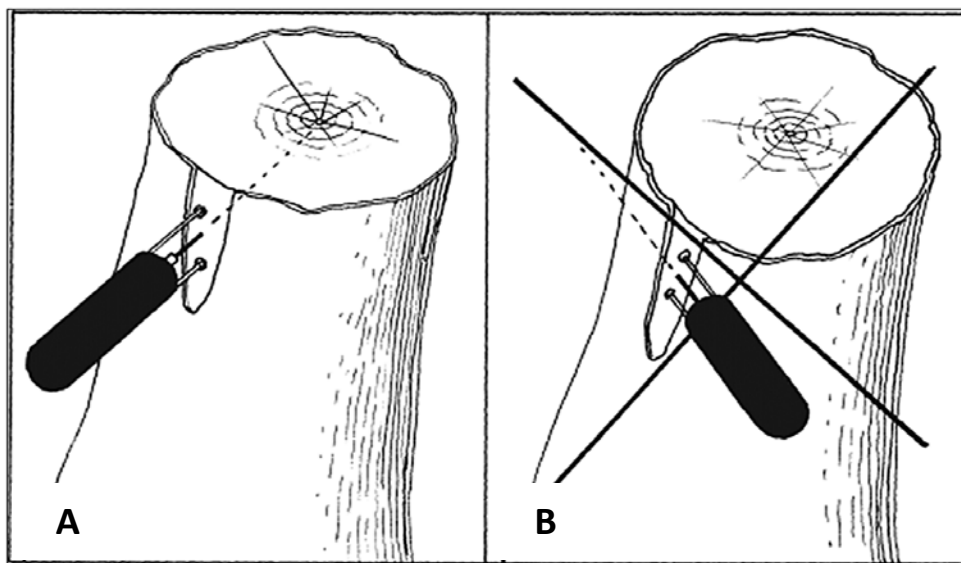


Figura 8. Forma correcta de usar el Pilodyn. Fuente: Hansen, 2000.



Figura 9. Proceso para el uso del Pilodyn. A. Ubicación y codificación del árbol.

B. Descortezado de la zona a evaluar. C. Uso del Pilodyn. D. Lectura de penetración.

En la Figura 9 se muestra algunas imágenes del proceso para el uso del pilodyn. En la imagen A se observa el marcado del árbol respecto a su codificación a una altura de 1,30 m sobre el suelo (DAP). En la imagen B se observa el descortezado previo de 1,50 cm de espesor aproximadamente con la finalidad de que la varilla del pilodyn evalúe únicamente madera. En la imagen C se presenta la colocación correcta del equipo de tal forma que los dos clavos de apoyo se ubiquen de forma paralela al eje del árbol. Finalmente en la imagen D se muestra la barra de lectura del equipo el cual tiene como unidad el milímetro.

2.2.3. Colecta de muestras con el Barreno forestal

La metodología que se propone para la toma de datos es la que se muestra en la Figura 10.

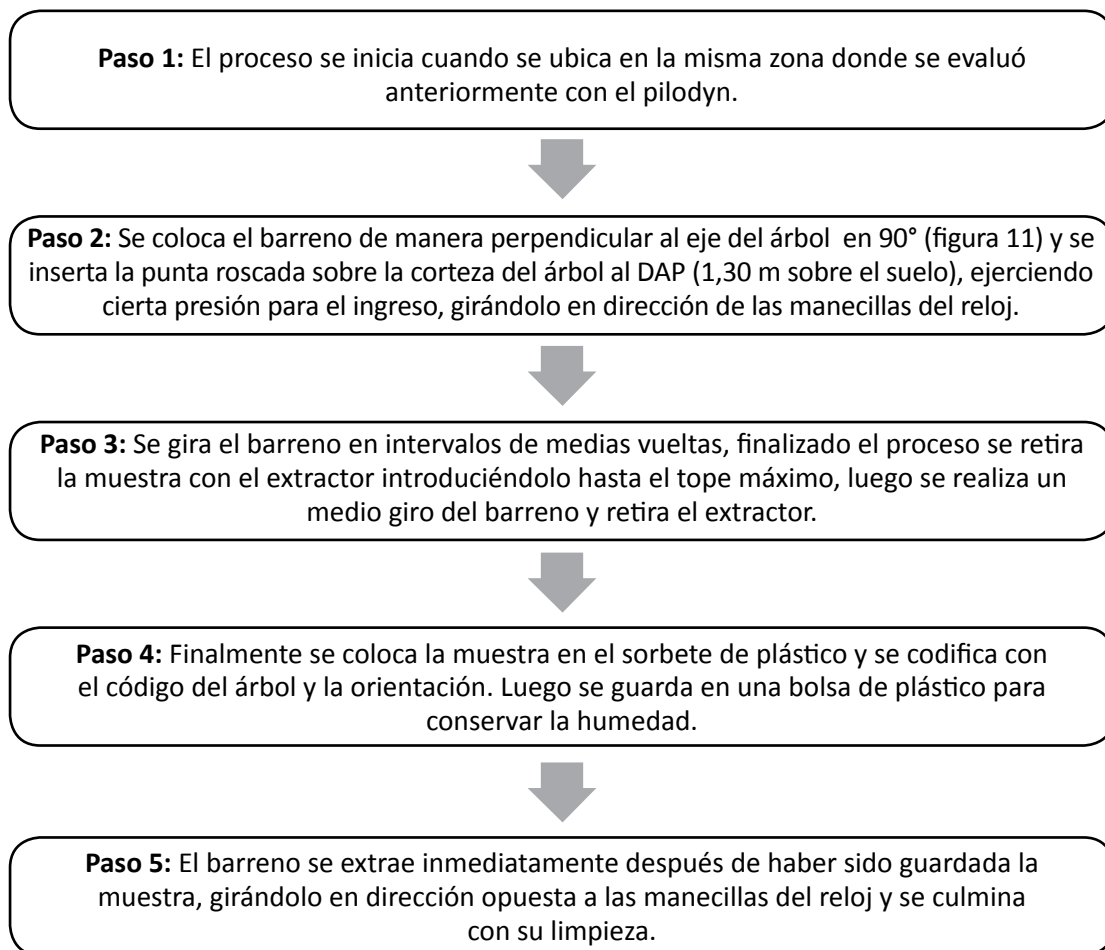


Figura 10. Metodología para la colecta de muestras con el barreno forestal.

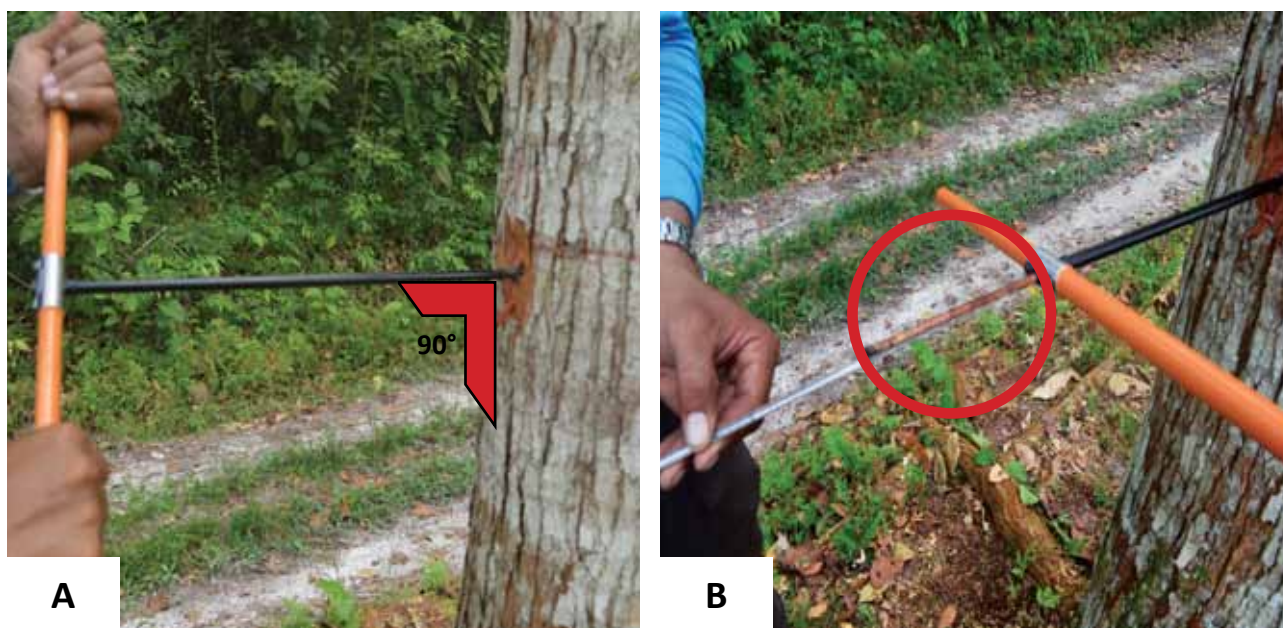


Figura 11. Uso adecuado del barreno. A. Ubicación del barreno en forma perpendicular con el eje.
B. Extracción con barreno forestal.

2.2.4. Determinación de la densidad básica

Esta fase corresponde a trabajos realizados en el laboratorio, siendo la metodología que se propone para la determinación de la densidad de la madera la que se muestra en la Figura 12.

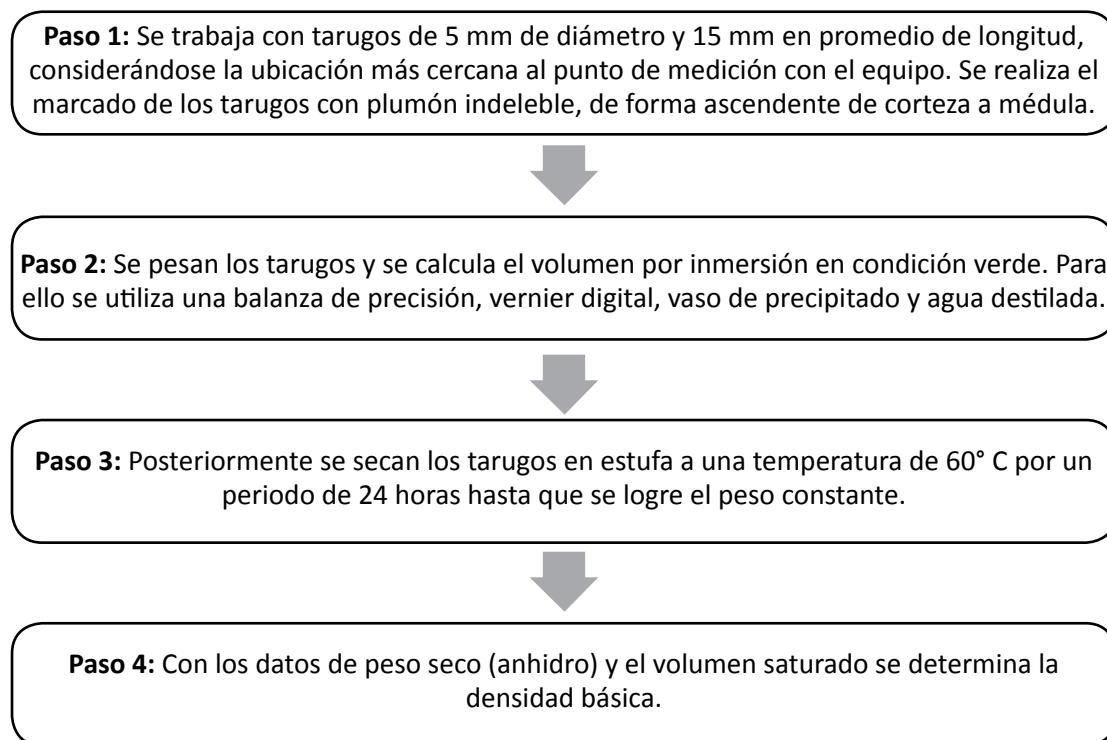


Figura 12. Evaluación de la densidad básica.

En el presente trabajo de investigación, las muestras de madera extraídas del campo debidamente transportadas fueron evaluadas en el Laboratorio Multipropósito del Instituto Nacional de Innovación Agraria ubicado en el centro Experimental La Molina. Con los datos de peso anhidro y volumen verde obtenidos en el laboratorio se calculó la densidad básica mediante la siguiente ecuación:

$$Db = \frac{Mo}{Vs}$$

Db: Densidad básica (g/cm³)
Mo: Peso anhidro (g)
Vs: Volumen saturado (cm³)

Entre los aspectos a tener en cuenta de la muestra (tarugo de madera), es que la densidad determinada en la sección más cercana a la corteza es la que se considera para realizar las correlaciones con los datos de penetración del Pilodyn, ya que es la zona más cercana de donde se evalúa con el equipo y penetra la varilla. Sin embargo la densidad se determina a lo largo de todo el tarugo de madera con la finalidad de observar la variabilidad de la densidad de médula a corteza (radial).

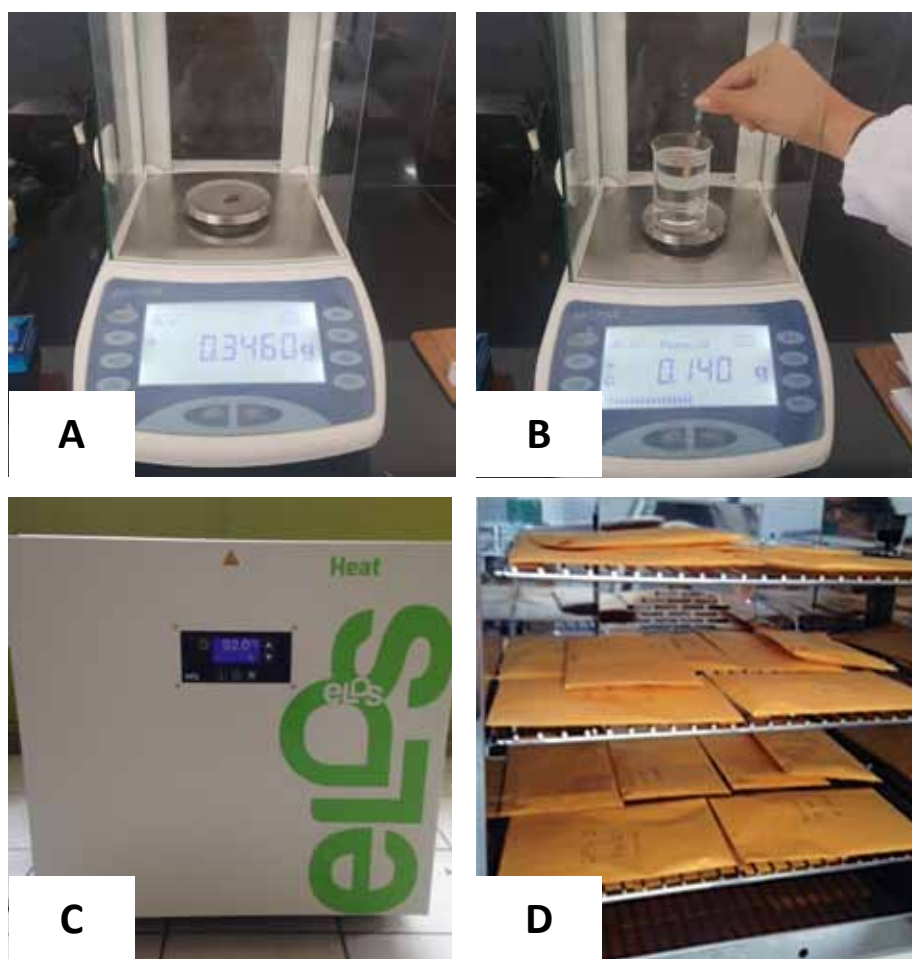


Figura 13. Determinación de la densidad A. Determinación del peso. B. Determinación del volumen. C y D. Secado de muestra.

En la Figura 13 se presenta la evaluación en laboratorio de peso y volumen para la determinación de la densidad básica. En la imagen A se observa la sección de tarugo de madera registrando el peso verde en gramos utilizando una balanza de precisión de 4 decimales. En la imagen B se observa la evaluación del volumen de la misma muestra por el método de Arquímedes (inmersión) en estado verde, para lo cual se utilizó un vaso de precipitado de vidrio de 100 ml y agua destilada. Para la manipulación de la muestra de madera se requirió de una aguja quirúrgica, lo que permitió realizar la evaluación sin dificultades. Posteriormente las muestras fueron llevadas a estufa a 60°C (imagen C y D) en sobres de papel por un periodo de 24 horas realizando controles periódicos de peso hasta llegar al peso constante (peso anhidro).

En este paso es importante tener en cuenta el uso de la misma balanza durante el proceso de evaluación en el laboratorio tanto de peso y volumen de todas las muestras de madera involucradas en la investigación, con el propósito de disminuir el error. Además es muy importante tener en cuenta la calibración periódica de los equipos utilizados. Además es recomendable el uso de agua destilada durante las evaluaciones ya que ésta se caracteriza por su pureza, esterilidad y se encuentra libre de sales, evitando interferir en las evaluaciones, garantizando un proceso adecuado.

2.2.5. Análisis estadístico

Se realizan los análisis estadísticos básicos de media, desviación estándar y coeficientes de variación para el análisis de cada plantación y para las tres plantaciones en conjunto, para lo cual se utilizó el programa estadístico InfoStat 2017. Además se realizan gráficos de dispersión y una regresión simple con la finalidad de asociar la densidad básica y los valores de penetración obtenidos con el Pilodyn en las plantaciones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Con respecto a la penetración (mm)

En el Cuadro 2 se muestran los resultados de penetración obtenidos con el Pilodyn para las tres plantaciones de *C. cateniformis* y en total para la especie. Se presentan valores de media, desviación estándar, coeficiente de variabilidad, valores máximos y mínimos.

Cuadro 2. Estadísticos básicos de los valores de penetración en las tres plantaciones de tornillo.

| Plantación | Penetración (mm) | | | | | | |
|------------|------------------|-------|------|-------|------|-------|-------|
| | N | Media | D.E. | CV | E.E. | Min. | Máx. |
| El Dorado | 9 | 23,69 | 4,34 | 18,33 | 1,45 | 20,00 | 34,50 |
| km 50 | 9 | 24,92 | 2,45 | 9,83 | 0,82 | 20,00 | 28,00 |
| UNAP | 9 | 22,52 | 2,08 | 9,25 | 0,69 | 17,50 | 25,00 |
| Total | 27 | 23,71 | 3,16 | 13,33 | 0,61 | 17,50 | 34,50 |

Si se comparan los valores promedios de penetración entre las plantaciones, se observa que en el Km 50 encontramos el mayor valor y el menor en la UNAP. En función a los estadísticos básicos obtenidos se puede observar que el lugar que presenta mayor coeficiente de variación es el Anexo El Dorado con 18,33%, mientras las plantaciones de km 50 y la UNAP presentan datos más homogéneos. Resultado que no guarda relación con la edad de las plantaciones y estaría ligado a la sanidad y calidad de sitio.

3.2. Con respecto a la densidad básica

En el Cuadro 3 se muestran los resultados de densidad básica para las tres plantaciones de *C. cateniformis* y en total para la especie.

Cuadro 3. Estadísticos básicos de los valores de densidad básica en las tres plantaciones de tornillo.

| Plantación | Densidad básica | | | | | | |
|------------|-----------------|-------|------|------|-------|------|------|
| | n | Media | D.E. | E.E. | CV | Mín. | Máx. |
| El Dorado | 9 | 0,47 | 0,09 | 0,03 | 18,30 | 0,29 | 0,56 |
| km 50 | 9 | 0,52 | 0,06 | 0,02 | 12,57 | 0,44 | 0,62 |
| UNAP | 9 | 0,48 | 0,07 | 0,02 | 14,61 | 0,34 | 0,55 |
| Total | 27 | 0,49 | 0,07 | 0,01 | 15,19 | 0,29 | 0,62 |

De las tres plantaciones la que presenta mayor densidad es la ubicada en la UNAP con 0,52 g/cm³, sin embargo no se encontraron diferencias significativas en la densidad entre las plantaciones a pesar que en la literatura se dice que varía con la edad. Además el valor obtenido para la especie es de 0,49 g/cm³ guarda relación con lo reportado por Aróstegui (1982). Los valores obtenidos de densidad son clasificados dentro de densidad media.

Respecto al coeficiente de variabilidad, El Dorado sigue presentando el valor más alto con 18,3 %. Esto puede estar relacionado a que su rango de valores entre el mínimo y el máximo es más amplio a diferencia de las otras dos plantaciones en estudio.

3.3. Con respecto a la relación Penetración y Densidad básica

Para ello se realizó un análisis de regresión simple entre la densidad básica obtenida en el laboratorio con las muestras de barreno y la penetración en milímetros con Pilodyn en los tres tipos de plantaciones de diferentes edades.

En el Cuadro 4 se muestran los coeficientes de determinación y sus ecuaciones para cada plantación, se puede observar que la plantación en el Anexo El Dorado presenta un mayor coeficiente de determinación con un valor 0,67, mientras que el menor valor se observa en la plantación del Km 50, lo cual puede estar relacionado a la homogeneidad de la plantación, en comparación con el Anexo El Dorado y Km 50 camino a Nauta. Para el caso de la plantación ubicada en la UNAP de 35 años, se obtuvo un $R^2=0,3969$, menor al obtenido en el Anexo El Dorado, lo cual puede ser explicado en gran parte por el manejo silvicultural de cada plantación.

Cuadro 4. Coeficientes de determinación y ecuaciones lineales de las plantaciones de tornillo en estudio

| Variables | Coefficiente de determinación (r^2) | Ecuación |
|--------------------|---|-----------------------|
| Anexo el Dorado | 0,670 | DB = -0,016 P + 0,861 |
| Km 50 Camino Nauta | 0,199 | DB = -0,012 P + 0,816 |
| UNAP | 0,397 | DB = -0,021 P + 0,948 |
| Todos | 0,295 | DB = -0,013 P + 0,793 |

En las ecuaciones obtenidas con la forma $y = a + bx$, la pendiente (b en la ecuación) indica que existe un cambio de $0,016 \text{ g/cm}^3$ en la densidad básica promedio por cada milímetro de penetración obtenida con el Pilodyn, esto para el caso de la plantación en el Anexo El Dorado. El valor negativo indica la relación inversa que existe entre la densidad básica y penetración.

3.3.1. Plantación en el Anexo El Dorado San Roque

En la Figura 14 se muestra la dispersión con datos tomados el Anexo El Dorado de 18 años, en donde se observa que la relación es inversa entre la densidad básica y penetración, con un R^2 de 0,6673.

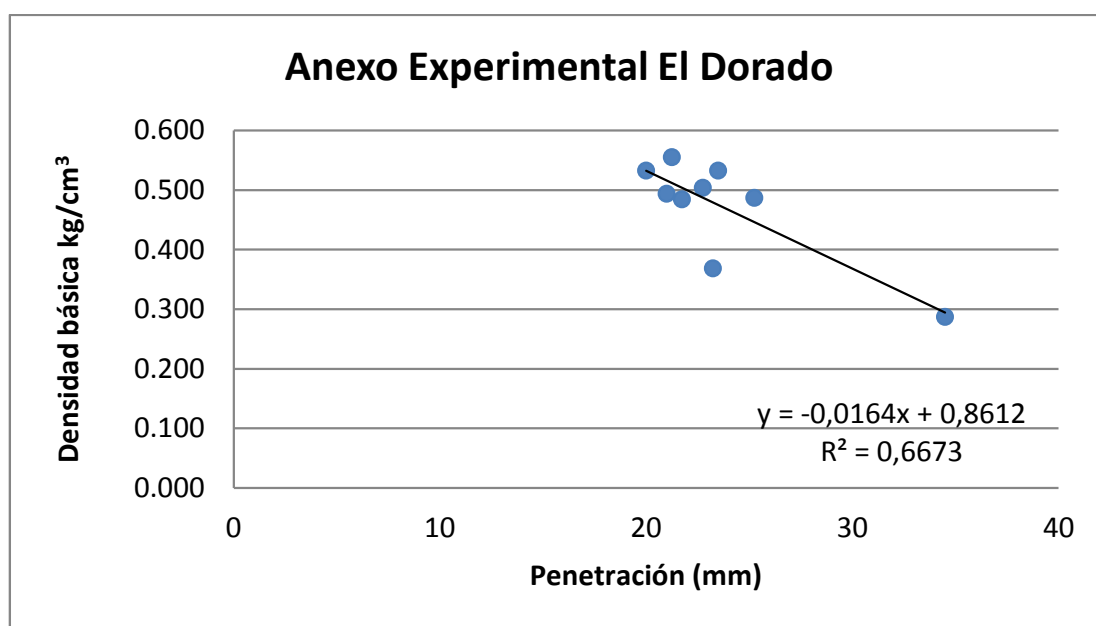


Figura 14. Análisis de regresión simple en el Anexo el Dorado.

3.3.2. Plantación en la UNAP

Para el caso de la plantación ubicada en la UNAP de 35 años, se obtuvo un $R^2=0,3969$ (Figura 15) menor al obtenido en el Anexo El Dorado, pudiendo estar relacionado al manejo silvicultural de cada plantación, en lo que se observó durante las evaluaciones en campo que El Dorado presenta mayores evidencias de un mejor manejo. Otro factor importante que influye es la edad de la plantación.

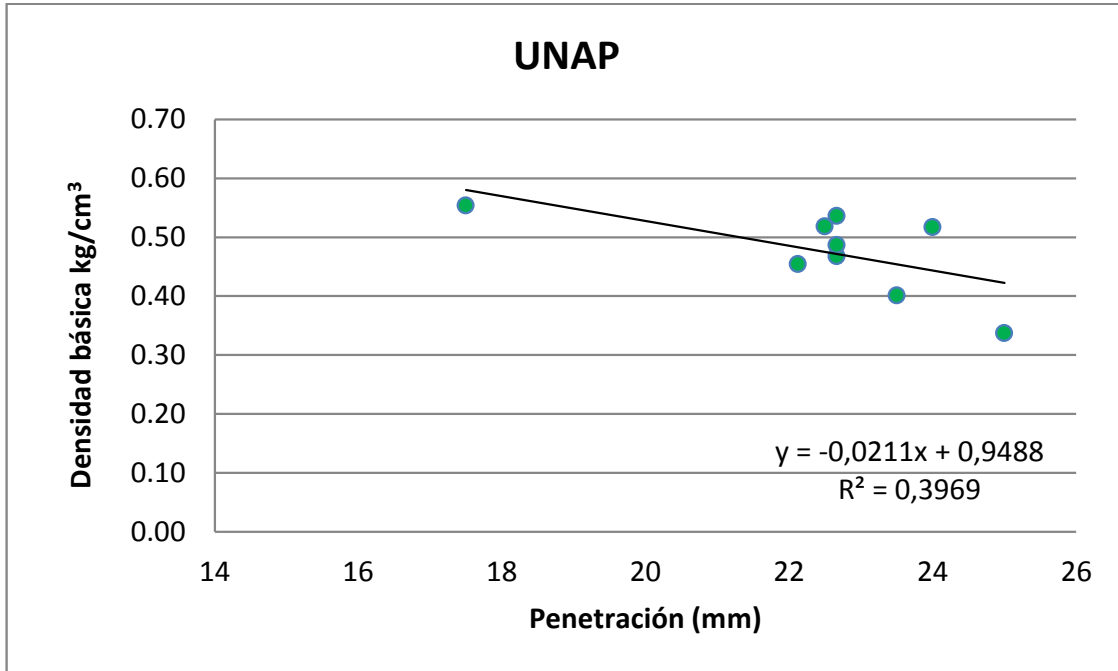


Figura 15. Análisis de regresión simple UNAP.

3.3.3. Plantación en el Km 50

De acuerdo a la plantación ubicado en el Km 50 camino a Nauta, se obtuvo un $R^2=0,1994$ (Figura 16), siendo el valor más bajo obtenido, lo cual puede estar relacionado a la heterogeneidad de la plantación, ya que los árboles de tornillo se encontraron más dispersos y rodeados de otras especies forestales.

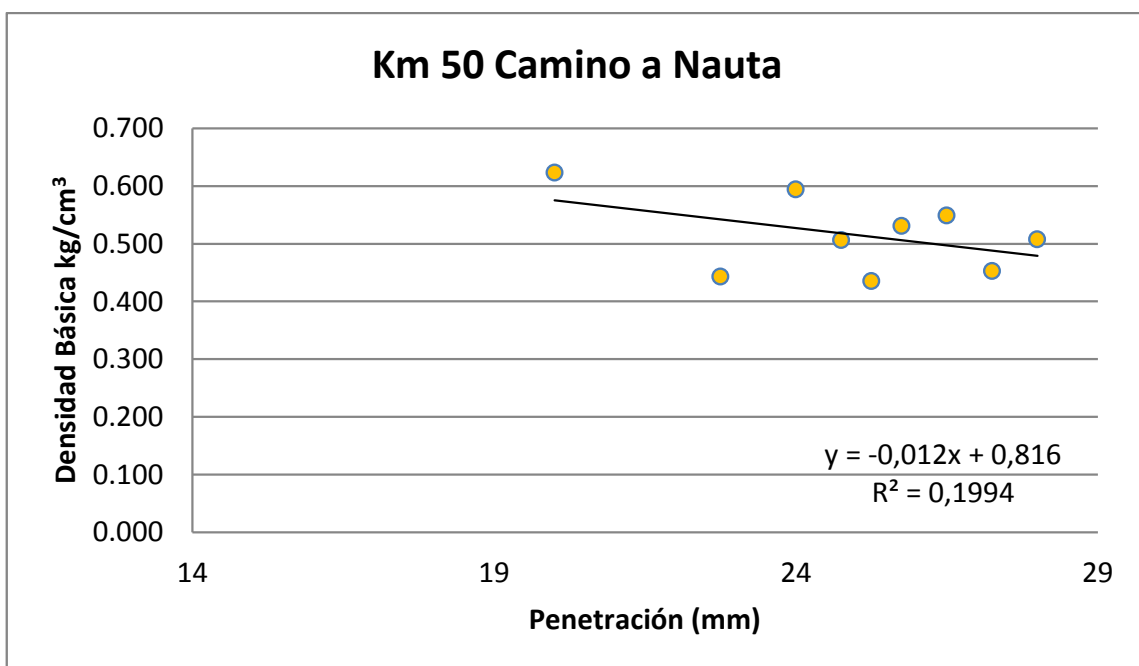


Figura 16. Análisis de regresión simple en el km 50.

3.3.4. Resultados totales

En la Figura 17 se observa el análisis de regresión de todos los árboles de tornillo de las tres plantaciones estudiadas de distintas edades, en el cual se observa un valor bajo de $R^2=0,2951$. Este resultado está relacionado a que las plantaciones presentan distintas edades y por lo tanto existe variación en los valores de densidad.

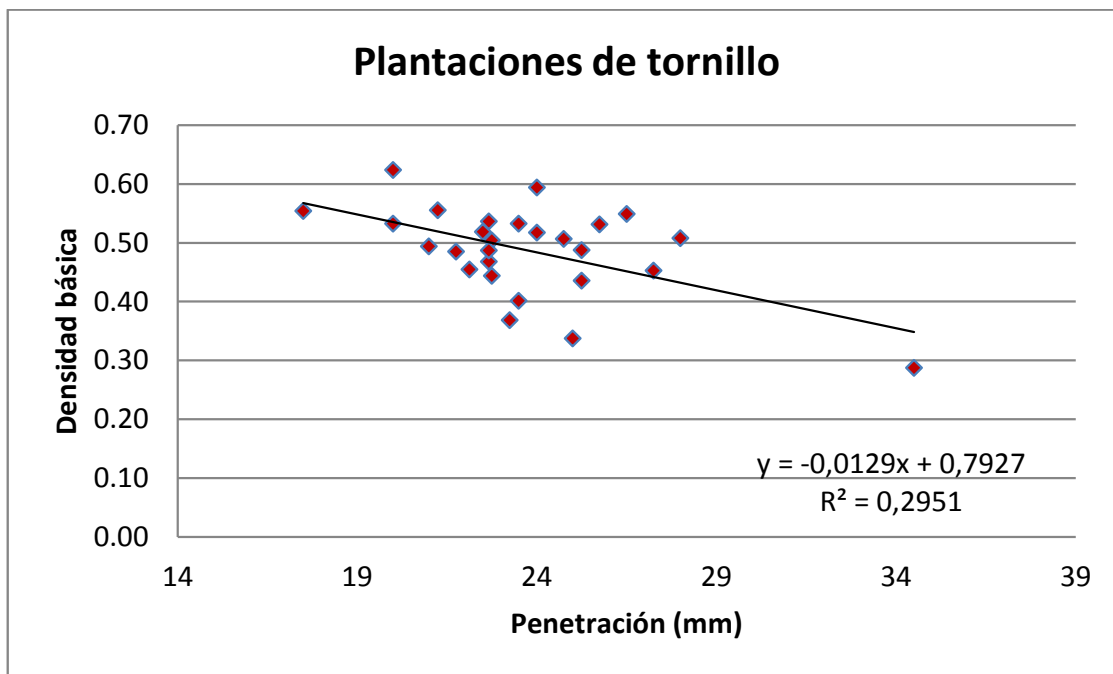


Figura 17. Análisis de regresión simple en todas las plantaciones.

4. CONCLUSIONES

- En cuanto a los valores de densidad y penetración se observa que el mayor coeficiente de variación corresponde a la plantación del Anexo El Dorado.
- Las plantación del Km 50 presentó el menor coeficiente de determinación en la relación densidad – penetración.
- La ecuación que más se ajusta para el uso del Pilodyn en la determinación de la densidad básica de forma indirecta es la obtenida en el Anexo El Dorado.
- La ecuación lineal puede ser utilizada en plantaciones de distintas edades al no presentar diferencias significativas de densidad básica y penetración.
- La plantación ubicada en el Km 50 camino a Nauta presentó el valor más alto de densidad básica para tornillo con $0,52 \text{ g/cm}^3$.

5. RECOMENDACIONES

- Realizar evaluaciones a un mayor número de individuos, ya que de esta forma mejorará la calibración del equipo.
- Realizar calibraciones entre densidad y penetración en diferentes especies comerciales.
- Usar la misma balanza en la evaluación del peso y volumen de todas las muestras hasta culminar la investigación, con el propósito de reducir el error.
- En base a los resultados obtenidos se debería proponer esta metodología para futuros trabajos de evaluación de la densidad con pruebas no destructivas.

6. BIBLIOGRAFÍA

Aróstegui, A. 1982. Recopilación y Análisis de Estudios tecnológicos de Maderas Peruanas. Proyecto PNUD/FAO/PER/81/002 Fortalecimiento de los Programas de Desarrollo Forestal en Selva Central. Lima, PE. 57 p.

Figueroa, A. 2007. Variación de densidad básica en la madera de *Pinus taeda* L. Tesis para optar al título de Ingeniero en Maderas. Universidad Austral de Chile. Valdivia, CL. 47 p.

Gouvêa, A., Trugilho, P., Gomide, J., Moreira, R., Andrade, C. & Nogueira, I. 2011. Determinação da densidade básica da madeiras de eucalyptus por diferentes métodos não destrutivos. *Árvore*, 35 (2), 349-358. BR.

Giraldo, L; Nieto, V; Sarmiento, M; Borralho, N. 2014. Estimación indirecta de la densidad de la madera mediante el uso de Pilodyn en la selección de clones de *Eucalyptus pellita* F. Muell. *Colombia Forestal* Vol. 17(2). CO.

Hansen, C. 2000. Application of the Pilodyn in Forest Tree Improvement. DFSC Series of Technical Notes. TN55. Danida Forest Seed Centre, Humlebaek, DK. 16 p.

Monteoliva, S. 2014. Determinación de densidad de la madera de sauces con Pilodyn: Calibración. Tercer Congreso Internacional de Salicáceas. Trabajo Técnico. AR.

Notivol, E, Gil, L, Pardos, J. 1992. Una metodología para la estimación de la densidad de la madera de árboles en pie y de su grado de variabilidad en *Pinus pinaster* Ait. Departamento de Silvopascicultura. ETSI Montes. Madrid. ES.

Palaia, L. 2014. Empleo del penetrómetro para madera para el diagnóstico de la madera en servicio en edificios antiguos. Informes de la Construcción. Universidad Politécnica de Valencia. ES.

Rall, R. 2006. Influência das características dos anéis de crescimento na Densidade, resistência e rigidez da madeira de *Pinus taeda* L. Tesis presentada para optar al título de Maestría en Agronomía. Universidad Estatal Paulista "Júlio De Mesquita Filho". BR. 86 p.

Thiersch, C; Scolforo, J; Oliveira, A; Rezende, G. & Maestri, R. 2006. O uso de modelos matemáticos na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clones de *Eucalyptus* sp. *Cerne*, 12 (3), 264-278. BR.

Impreso en:
CG Andina S.A.C.
Calle Huancabamba 100 - Zona Industrial
San Juan de Miraflores

Instituto Nacional de Innovación Agraria
Avenida La Molina 1981, La Molina
Teléfono: (01) 240-2100
www.inia.gob.pe

