

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**“EVALUACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MÓDULO DE
ELASTICIDAD POR MÉTODOS DINÁMICO Y ESTÁTICO DE
TORNILLO (*Cedrelinga Cateniformis* Ducke)”**

**TESIS PARA OPTAR TITULO DE:
INGENIERO FORESTAL**

JORGE ALBERTO MARES YAÑEZ

LIMA -PERU

2021

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente
investigación**

(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

**“EVALUACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MÓDULO DE
ELASTICIDAD POR MÉTODOS DINÁMICOS Y ESTÁTICO DE TORNILLO
(*Cedrelinga cateniformis Ducke*)”**

Presentada por:

JORGE ALBERTO MARES YAÑEZ

Tesis para Optar el Título Profesional de:

Ingeniero Forestal

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

.....
Dr. Manuel Chavesta Custodio
PRESIDENTE

.....
Mg. Sc. Milciades Leónidas Miguel Castro
MIEMBRO

.....
Mg. Sc. Julio César Canchucaja Rojas
MIEMBRO

.....
Mg. Sc. Luis Shuseki Yoza Yoza
ASESOR

.....
Mg.Sc. Moisés Acevedo Mallque
COASESOR

DEDICATORIA

A Luisa, mi madre y a la memoria de Jorge mi padre.

A mi compañera de toda la vida, Mariella y mis queridos hijos Yelka y Jorge.

AGRADECIMIENTOS

A mi co-asesor, el Ing. Moisés Acevedo Mallque, por su continuo, paciente e incondicional apoyo, brindando su conocimiento y experiencia académica en la elaboración del presente trabajo de tesis.

A mi asesor, el Ing. Luis Yoza Yoza, por sus aportes puntuales en la elaboración del presente trabajo.

Al Dr. Eloy Cuellar, quien me brindó la confianza para realizar el presente trabajo de investigación.

A la Ing. Alina Camacho por su gran preocupación y aliento en que llevase a cabo la realización del presente trabajo de tesis.

Al Ing. Carlos Chuquicaja, compañero de trabajo en los inicios profesionales, por su continua motivación derivada de las conversaciones que no dejan de ser hasta ahora reconfortantes, amenas y alentadoras.

Finalmente, al proyecto 121 PINIA “Innovación en el uso de maderas mediante la generación de tablas de propiedades tecnológicas relacionada a edad utilizando métodos no destructivos en especies procedentes de plantaciones forestales de la región amazónica”; del Programa Nacional de Innovación Agraria.

INDICE GENERAL

Página

I	INTRODUCCION	1
II	REVISION DE LITERATURA	3
	2.1. Clasificación taxonómica.....	3
	2.2. Descripción botánica	3
	2.3. Descripción y habitud	4
	2.4. Descripción de la madera.....	4
	2.4.1. Características generales.....	4
	2.4.2. Características anatómicas.....	5
	2.4.3. Propiedades físico mecánicas.....	6
	2.5. Propiedades físico mecánicas de la madera y factores que influyen.....	7
	2.5.1. Propiedades físicas de la madera.....	7
	2.5.2. Propiedades mecánicas de la madera	8
	2.5.3. Variabilidad de la madera.....	9
	2.5.4. Madera juvenil	11
	2.5.5. Influencia de la anatomía de la madera en la resistencia mecánica	12
	2.5.6. Influencia del manejo silvicultural en las propiedades de la madera.....	12
	2.5.7. Comportamiento viscoelástico de la madera	13
	2.5.8. Método no destructivo	14
	2.5.9. Técnicas no destructivas	15
	2.5.10. Velocidad de propagación de ondas en la madera	16
	2.5.11. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico y módulo de ruptura.....	18
	2.5.12. Factores que influyen en la velocidad de propagación de ondas de ultrasonido	19
	2.6. Antecedentes de estudio sobre el tema	23
III	METODOLOGIA	25
	3.1. Zona de estudio	25

3.2.	Descripción del área en estudio.....	26
3.2.1	Clima	26
3.2.2	Suelo	26
3.2.3.	Topografía.....	26
3.3.	Lugar de ejecución de los ensayos	26
3.4.	Materiales y equipos.....	26
3.4.1.	Especie.....	26
3.4.2.	Equipos y accesorios	27
3.5.	Procedimiento	28
3.5.1.	Colección y selección de muestras	28
3.5.2.	Elaboración de probetas.....	29
3.5.3.	Determinación de las propiedades físico y mecánicas	30
3.5.4.	Calculo del módulo de elasticidad dinámico	30
3.5.5.	Número de ensayos según método destructivo y no destructivos	33
3.5.6.	Procesamiento de datos y evaluación de resultados	34
IV	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1.	Ensayos destructivos	36
4.1.1.	Análisis del comportamiento longitudinal MOE y MOR en Flexión Estática.....	38
4.2.	Ensayos destructivos	40
4.2.1.	MOE dinámico (MOEd) según equipo Microsecond y Ultrasonic timer por posición de sensores en la probeta	40
4.2.2.	Análisis del comportamiento longitudinal del MOEd.....	43
4.3.	Comparación de los MOEe vs MOEd	46
4.4.	Diferencia estadística entre métodos estático y dinámicos.....	49
4.5.	Predicción del Módulo de elasticidad estático y el Módulo de ruptura mediante los módulos dinámicos	50
4.5.1.	Predicción del Módulo de elasticidad (MOEe) mediante los Módulos dinámicos (MOEd) en probetas método primario y secundario	50
4.5.2.	Predicción del Módulo de Ruptura (MOR) mediante los Módulos Dinámicos (MOEd) en probetas método primario y secundario.....	54

V	CONCLUSIONES	58
VI	RECOMENDACIONES	59
VII	BIBLIOGRAFIA	60
VIII	ANEXOS	68

INDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Densidad básica, MOR y MOE en Flexión estática para tornillo según diferentes autores	6
Tabla 2:	Ecuaciones de regresión lineal y coeficiente r^2 Carnero (2007)	23
Tabla 3:	Ecuaciones de regresión lineal y coeficiente r^2 Sucksmith (2009)	24
Tabla 4:	Característica de la plantación de <i>Cedrelinga cateniformis</i>	27
Tabla 5:	Número de probetas obtenidas por nivel longitudinal y por método.....	30
Tabla 6	Número de ensayos totales realizados por métodos según ensayos destructivos y no destructivos	34
Tabla 7:	Valores promedios de densidad, humedad, MOR y MOE de Flexión Estática según niveles longitudinales por método primario y secundario.....	37
Tabla 8:	Pruebas de comparación de medias MOE y MOR según métodos primario y secundario.....	37
Tabla 9:	Comparativo tornillo de 17 años con tornillo de 20 años	38
Tabla 10:	Valores MOE _d según equipo y posición de los sensores en probeta	40
Tabla 11:	Valores de MOE _d según niveles longitudinales por método primario y secundario.....	43
Tabla 12:	Comparación de medias a nivel longitudinal del MOE Microsecond y MOE Ultrasonic.....	45
Tabla 13:	Valores promedios del MOE estático, MOE Microsecond y MOE Ultrasonic por niveles longitudinales.....	47
Tabla 14:	Comparación de medias entre MOE estático, MOE Microsecond y MOE ultrasonic por niveles longitudinales	49
Tabla 15:	Tabla de comparaciones entre método estático y métodos dinámicos	49
Tabla 16:	Coefficiente de determinación, correlación y ecuaciones de regresión lineal MOE _e vs MOE _d , método primario y secundario	51
Tabla 17:	Coefficiente de determinación, correlación y ecuaciones de regresión lineal MOR vs MOE _d , método primario y secundario.....	55

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Vista corte de tornillo tangencial	4
Figura 2: Anatomía microscópica del leño de <i>Cedrelinga Cateniformis</i> (Ducke)	6
Figura 3: Variación de la densidad del árbol (kg/m^3), ángulo de microfibrilla (grados) y rigidez (MOE) (GPa) en un abeto de 140 años.....	9
Figura 4: Velocidad de ultrasonido según sección	21
Figura 5: Mapa conteniendo la ubicación de la parcela de tornillo	25
Figura 6: Ubicación de los niveles longitudinales considerados.....	29
Figura 7: Perforaciones cara transversal de la probeta en ensayo con equipo Microsecond Timer.....	31
Figura 8: Evaluación con equipo Microsecond Timer.....	32
Figura 9: Diagrama de evaluación con equipo Ultrasonic timer	33
Figura 10: Evaluación Equipo Ultrasonic timer	33
Figura 11: Colocación de sensores equipo Ultrasonic Timer.....	33
Figura 12: Rodajas de <i>Cedrelinga cateniformis</i> (Ducke) mostrando la albura y duramen.....	39
Figura 13: Diagrama de cajas del MOR y MOE, diferencias por niveles longitudinales determinados en método primario	39
Figura 14: Diagrama de cajas del MOR y MOE, diferencias por niveles longitudinales en método secundario	40
Figura 15: Diagrama de cajas, promedios de MOE_d según posiciones en cara transversal Microsecond timer- método primario	41
Figura 16: Diagrama de caja, promedios de MOE_d según posición en cara transversal Microsecond timer, método secundario	41
Figura 17: Diagrama de caja, promedios de MOE_d según en cara radial y tangencial Ultrasonic timer –Método Primario	42
Figura 18: Diagrama de caja, promedios de MOE_d según en cara radial y tangencial	

Ultrasonic timer –Método Secundario.....	42
Figura 19: Gráfico de valores MOE Microsecond , MOE Ultrasonic por niveles y por métodos.....	44
Figura 20: Gráfico de valores por probeta en MOEe y MOEd Método primario	46
Figura 21: Gráfico de valores por probeta en MOEe y MOEd Método secundario.....	46
Figura 22: Valores promedio MOEe , MOE Microsecond y MOE Ultrasonic por niveles y por método primario.....	48
Figura 23: Valores promedio MOEe y MOE Microsecond y MOE Ultrasonic por niveles y por método secundario	48
Figura 24: Regresión MOE _e - MOE Microsecond, método primario	52
Figura 25: Regresión MOE _e - MOE Ultrasonic método primario	53
Figura 26: Regresión MOE _e .-MOE Microsecond método secundario	53
Figura 27: .Regresión MOE _e - MOE Ultrasonic método secundario	54
Figura 28: Regresión MOR - MOE _d Microsecond método primario	55
Figura 29: Regresión MOR - MOE Ultrasonic método primario	56
Figura 30: Regresión MOR –MOE Ultrasonic método secundario	56
Figura 31: Regresión MOR –MOE Microsecond método secundario	57

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Tabla de Valores Experimentales método primario.....	68
Anexo 2: Tabla de Valores experimentales método secundario.....	71
Anexo 3: Coeficiente de variación permisible para MOE y MOR según Wood Hambook 1974	73
Anexo 4: Clasificación de las propiedades mecánicas de la maderas mexicanas en condición seca al aire Davalos e Ibarcelas (1999)	73
Anexo 5: Clasificación de los coeficientes de correlación según Amat (2016)	74
Anexo 6: Comparación de medias de MOE y MOR por niveles según método Primario y secundario	75
Anexo 7: Comparación de medias por posiciones en probeta, MOE Microsecond y Ultrasonic Método primario y secundario	79
Anexo 8: Comparación de medias entre niveles longitudinales MOE dinámico método primario y secundario.....	81
Anexo 9: Comparación de medias entre método MOEe y métodos MOE Microsecond y MOE Ultrasonic	83
Anexo 10: Análisis de regresión MOEd vs MOE y MOR método primario	88
Anexo 11: Análisis de regresión MOEd vs MOE y MOR método secundario	92

RESUMEN

Se evaluaron las variables módulo de elasticidad dinámico (MOE_d); así como el módulo de elasticidad (MOE_e) y módulo de ruptura (MOR) en flexión estática de acuerdo con las normas ASTM D-143-2007 y ASTM D 5536 -2007 método primario y método secundario con el fin de evaluar el grado de predicción del MOE_e y MOR mediante el MOE_d .

En la determinación del MOE_d , se utilizó el Microsecond timer (23Khz), en tres posiciones de la sección transversal de la probeta y el Ultrasonic timer (45Khz) en las caras tangencia y radial. En ambos casos no se encontraron diferencias estadísticas tanto para el método primario como secundario.

El comportamiento en los tres niveles longitudinales en los MOE_d con equipos Microsecond y Ultrasonic timer es similar al mostrado con el MOE_e , tanto en el método primario como en el secundario y la regresión lineal que mejor estima el MOE_e , es: $MOE_d = 32220 + 0,7915 MOE_{d \text{ microsecond}}$, del método primario.

Palabras clave: MOE Microsecond, MOE Ultrasonic, nivel longitudinal, método primario, método secundario.

ABSTRACT

The variables dynamic modulus of elasticity (MOEd) as well as the modulus of elasticity (MOEe) and the modulus of rupture (MOR) in static flexion were evaluated in accordance with the ASTM D-143-94-2000 and ASTM D-5536-94 -2004 method primary method and secondary method in order to estimate the degree of prediction of MOEe and MOE through MOEd

For the determination of MOEd, the Microsecond timer (23KH) was used in three positions of the transverse section of the specimen and the Ultrasonic timer (45 kh) in the tangential and radial faces. In both cases, no statistical differences were found in both the primary and secondary methods.

The behavior in the three longitudinal levels in the MOEd with Microsecond and Ultrasonic timer equipment is similar to the obtained with the MOEe, both in the primary and secondary method and the linear regression that best estimates the MOEe is: **MOEd = 32220 + 0.7915 MOEd microsecond**, of the primary method.

Keywords: MOE Microsecond, MOE Ultrasonic, longitudinal level, primary method, secondary method.

I. INTRODUCCION

Según SERFOR (2010-2019) , la extracción de madera rolliza en el Perú en los últimos 10 años fue de casi 18.4 millones de m³ de los cuales el 9 % es decir, 1.7 millones de m³ correspondió a la madera de tornillo (*Cedrelinga cateniformis*), durante este mismo período en lo que respecta específicamente al tornillo, la extracción de esta madera fue decreciendo gradualmente tanto es así, que el volumen rollizo de esta variedad extraído para el año 2019 representó el 43.4 % de su volumen extraídos en el 2010 o sea , 108 593 m³ menos.

La madera de tornillo se caracteriza por ser una madera medianamente pesada, con una densidad básica media de 0.45 g/cm³ y MOE de 108,000 Kg/cm², Arostegui (1982) , de fácil trabajabilidad, presenta contracciones lineales media y contracción volumétrica estable, es resistente al ataque de hongos y de insectos, de buen comportamiento ante un secado artificial y natural , de uso muy variado como en la fabricación de mobiliarios , en construcción de viviendas (puertas , ventanas ,vigas , columnas ,etc.), pisos y carpintería en general, además de usos externos como crucetas y brazos en conducción de líneas aéreas eléctricas donde se aprecia sus bondades mecánicas de tracción, flexión y compresión, trabajando a la intemperie previo preservado .

La gran demanda de esta especie por la alta versatilidad de su madera para los principales productos a base de madera ha generado una sobreexplotación de esta especie, donde la capacidad de reposición del bosque, teniendo como única opción la regeneración natural, no ha sido capaz de mantener una respuesta acorde al volumen demandado principalmente en el mercado nacional, notándose en los últimos años el decrecimiento gradual del abastecimiento en esta madera.

Bajo este contexto, paralelamente con las técnicas de enriquecimiento del bosques, experimentadas por los proyectos de cooperación internacional desarrollados sobre el manejo y conservación de los bosques naturales, se ha ido estableciendo plantaciones experimentales con especies nativas dentro de las cuales se consideró a *Cedrelinga cateniformis* Ducke, como la realizada en la Estación Experimental Alexander Von

Humboldt perteneciente al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), que luego de 17 años de edad, fueron sometidas a evaluaciones en base a estudios tecnológicos de la madera con la finalidad de evaluar la calidad, resistencia y estado de madurez de la madera, estudios los cuales formaron parte del proyecto 121 INIA **“Innovación en el uso de la madera mediante la generación de tablas de propiedades tecnológicas relacionadas a edades utilizando métodos no destructivos en especies procedentes de plantaciones forestales de la Región amazónica”**.

En el presente trabajo de investigación se plantea establecer regresiones lineales para predecir el módulo de elasticidad y módulo de ruptura en flexión estática a partir de módulos dinámicos, mediante equipos basados en la propagación de ondas acústicas en el material: Microsecond Timer (23 kHz) y Ultrasonic Timer (45 kHz), para la madera de tornillo (*Cedrelinga cateniformis* Ducke) de plantaciones forestales experimentales de 17 años; provenientes del Bosque Nacional Alexander von Humboldt.

Los resultados del presente trabajo de investigación contribuirán a desarrollar estadísticas conocimientos y criterios en la evaluación del MOE de la madera tornillo por niveles longitudinales con metodología no destructiva, la cual puede ser una opción que permita estimar la madurez de una plantación en forma económica y práctica, entendiéndose que esta metodología ya es una alternativa idónea para poder determinar entre otras la rigidez de la madera esperada definiendo su oportuno aprovechamiento y el mejor uso, consiguiéndose de esta manera trascender en un apropiado manejo sostenido y rentable de una plantación con fines de producción.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Clasificación taxonómica

Esta clasificación es dada según Flores (2018)

Familia botánica: Fabácea

Nombre científico: *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke

Nombres comunes: “Tornillo”

Sinónimos botánicos: *Piptadenia cateniformis* Ducke, *Pithecellobium cateniformis* (Ducke) L.

2.2. Descripción botánica

Reynel *et al.*, (2003) menciona que es árbol dominante de 0,5 – 2 m. de diámetro y 20-40m. de altura total, con fuste cilíndrico, la ramificación desde el segundo o tercer tercio y la base del fuste es recto. Corteza externa agrietada a fisurada, color marrón pardo a rojizo, con placas de ritidoma de unos 3-5 x 8-13 cm; ritidoma coriáceo. La corteza muerta se desprende en placas rectangulares por encima de las aletas, la cual es leñosa, corchosa y de 1 cm de espesor. Corteza interna homogénea, color crema a rosado blanquecino, sin secreciones. Tiene un espesor de 0,5 cm, presenta textura arenosa y sabor dulce. Hojas compuestas bipinnadas, alternas y dispuestas en espiral, de unos 30 a 40 cm de longitud, el pecíolo de unos 6 a 30 cm de longitud, las hojas usualmente con 4 pinas, las zonas de articulación de las pinas con una glándula de unos 2 a 5 mm de diámetro, las 3 láminas foliares ovadas, asimétricas, de unos 4 a 15 cm de longitud y 2 a 9 cm de ancho, enteras, el ápice acuminado, la base aguda e inequilátera, la nervación pinnada con 5 a 7 pares de nervios secundarios, los nervios terciarios muy paralelos y transversales al nervio central, las hojas glabras. Presentan inflorescencias en panículas de 12 a 30 cm de longitud conteniendo numerosas cabezuelas agrupadas en manojos, las cabezuelas de 2,5 a 3,5 cm de longitud con pedúnculos de 1 a 2 de longitud. Flores pequeñas, hermafrodita, de unos 1 a 1.5 cm de longitud, actinomorfas, con cáliz y corola presentes, el cáliz pequeño, de 1 a 2 mm de longitud, la corola blanquecina, de 4 a 5 mm de longitud tubular, con 5 dientes; androceo con muy numerosos estambres de 1 a 1.5 mm de longitud, el pistilo único con un largo y estigma obsoleto.

Los frutos, legumbres muy largas y aplanadas, de 30 a 40 cm de longitud y 2 a 3 cm de ancho, con 6 a 15 semillas, la legumbre estrechada entre las semillas y revirada helicoidalmente, que, al ser vistos de lejos, semejan grandes tomillos, y de allí el nombre común de esta especie.

2.3. Distribución y hábitat

En la región amazónica del Perú en altitudes de hasta 1200 msnm., en áreas de pluviosidad elevada y constante; es una especie con tendencia esciófita, presente en bosques primarios, en suelos arcillosos, usualmente ácidos, en zonas bien drenadas y con pedregosidad baja o nula (Reynel *et al.*, 2003).

2.4. Descripción de la madera

2.4.1. Características generales

Acevedo y Kikata (1994), mencionan que, en condición seca al aire, la albura es de color rosado claro y el duramen rosado oscuro (Figura N° 1). Anillos de crecimiento poco diferenciados limitados por bandas oscuras en forma irregular. Grano recto a ligeramente entrecruzado, textura gruesa y brillo medio. Veteado ausente.



Figura 1: Vista corte tangencial tornillo . Fuente : <https://www.peruforestal.org/tornillo/html>

2.4.2. Características anatómicas

Campos (2009), en cuanto a la caracterización macroscópica detalla poros visibles a simple vista, difusos predominantemente múltiples, ocurriendo también solitarios, ocasionalmente obstruidos por gomas de coloración amarilla-blanquecina, líneas vasculares rectilíneas en sección tangencial. Parénquima axial poco visible a simple vista, predominantemente vascicentrico, ocurriendo también, ocasionalmente aliforme losangular y unilateral. Radios visibles solamente sobre lupa 10 x en la sección transversal y a simple vista en la sección tangencial no estratificados, brillo contrastando la sección radial. Canales secretores axiales, máculas medulares y floema incluso ausente. En cuanto a la caracterización microscópica describe vasos difusos, predominantemente múltiples, de contorno oval a circular con medias de 1,5 vasos /mm² y área de 9, 21 %, con diámetro próximo a 273 μ m, pudiendo ser clasificados como grandes, apéndices ausentes, placa de perforaciones radio-vasculares, con areolas distintas semejantes a las intervasculares y de menor tamaño comparándolas, presencia de gomas raramente en el plano transversal. Fibras libriformes con paredes delgadas a espesas, teniendo una media de 1,33 mm para la longitud y 5,07 μ m para la espesura de la pared. Lumen de las fibras con media de 16,30 μ m. Septos y puntuaciones ausentes. Parénquima axial predominantemente paratraqueal vascicéntrico, de 6 a 8 células de parénquima por serie. Parénquima axial apotraqueal difuso visualizado ocurrente frecuentemente en el eje longitudinal, formado generalmente por serie. Radios homogéneos, formados exclusivamente por células procumbentes, biseriadas en predominancia (72%), ocurriendo también triseriados (16%) y uniseriados (12%), raramente fusionados, con altura entre 230 y 340 μ m. (Figura 2).

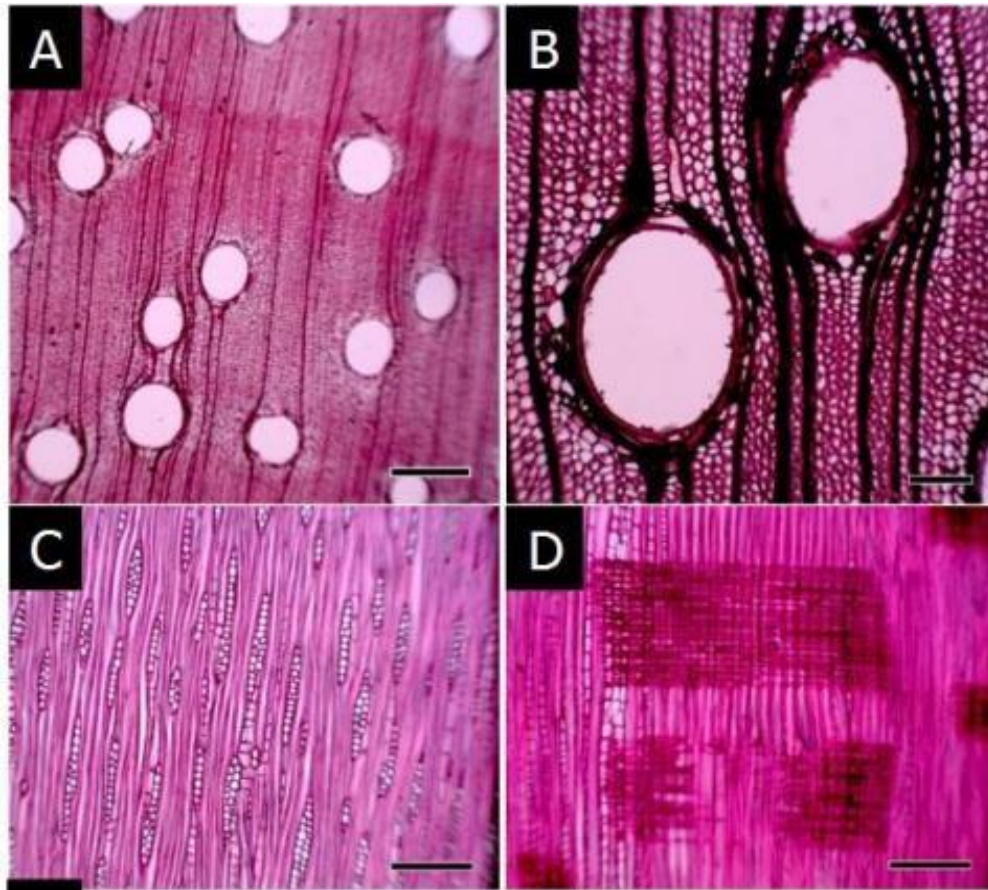


Figura 2: Anatomía microscópica de leño de *Cedrelinga cateniformis*, Plano (A) transversal (25x) y B(100x), (C) tangencial (100x), D radial (100x). Fuente: Campos (2009)

2.4.3. Propiedades Físico Mecánicas

En la tabla 1 se muestran los valores de densidad básica y MOR y MOE en flexión estática para la madera de tornillo procedente de bosque natural y de plantaciones según diferentes autores.

Tabla 1: Densidad básica, MOR y MOE en flexión estática para tornillo según diferentes edades

Propiedades	Unidades	Tornillo plantaciones años				Tornillo bosque natural (4)
		10(1)	15(2)	20 (3)	29 (2)	
Densidad básica	Gr/cm ²	0.35	0.41	0.41	0.43	0.45
Módulo de Ruptura	Kg/cm ²	569.36	429.49	621.26	506.77	576
Módulo de Elasticidad	Kg/cm ²	85490	74360	91030	86400	108000

Fuente: (1) Durán (2003) valores ajustadas al 14% de contenido de humedad.

(2) Condori (2007) valores en condición saturada.

(3) Vega (2010) valores en condiciones seca al aire.

(4) Aróstegui (1982) valores en condición seca al aire.

Condori (2007), en relación a las plantaciones a campo abierto del CIJH (Loreto), indica que, a las edades de 15 y 29 años, en condición saturada el comportamiento mecánico presenta diferencias significativas sólo para los esfuerzos de flexión estática (ELP y MOR), compresión paralela, dureza y tensión perpendicular (radial) y que se obtienen mejores resultados en resistencia mecánica a campo abierto que con fajas de enriquecimiento, debido a diferencias en características anatómicas, entre ellas el tamaño de fibras y principalmente el diámetro tangencial, así como la cantidad de materia leñosa.

Soudre (2004), referente a las plantaciones del Bosque Nacional AVH (Ucayali), señala que el factor de mayor influencia en los resultados de densidad básica es la edad seguido del tipo de suelo, fisiografía y tipo de regeneración. Además, señala que la edad tiene influencia directa y proporcional con los valores de densidad básica, estableciendo que desde los 9 hasta los 14 años no se presentan variaciones significativas en el incremento de la densidad. Así mismo, Durán (2003), destaca los mayores valores de densidad básica y propiedades mecánicas en muestras procedentes de relieve plano, suelo acrisol y de regeneración natural y campo abierto.

Silva (2005), con respecto a las plantaciones del Centro de Investigación Jenaro Herrera-Loreto, refiere el efecto significativo de la edad sobre la densidad básica entre las edades de 15 y 29 años a campo abierto. Mientras que la de 24 años en fajas de enriquecimiento presenta un valor promedio menor que las anteriores. Axialmente, para las edades 15 y 29 años, existen un incremento significativo del nivel basal al nivel medio seguido por una disminución en el nivel apical, mientras que para la edad de 24 años la densidad básica disminuye del nivel basal al apical.

2.5. Propiedades físico mecánicas de la madera y factores que la influyen

2.5.1. Propiedades físicas de la madera

Arroyo (1983), al referirse a la variabilidad del peso específico en la dirección longitudinal señala que se pueden presentar 3 tendencias según la especie; disminución uniforme del peso específico desde la base hasta la copa, disminución en la parte inferior del tronco y aumento en la parte superior; por último, aumento del peso específico desde la base hasta la copa en forma irregular. Este mismo autor, al referirse a latifoliadas, menciona que se ha encontrado comúnmente la última tendencia o patrón, el de aumentar desde la base hasta la copa en forma irregular. Cobas *et al.*, (2014), señala que los patrones de variación radial (médula-

corteza) y patrones de variación axial (base-ápice) en el fuste, están asociados a diferentes edades fisiológicas del cambium y por lo tanto a la formación de madera juvenil y madura.

Megraw, citado por Pereyra y Gelid (2002), menciona que durante los primeros años el árbol produce madera con anillos de crecimiento anchos, donde hay una mayor proporción de madera temprana de baja densidad. Por otra parte, respecto a la altura, la densidad es mayor en la base y va disminuyendo hacia la copa.

Haygreen y Bowyer (1982) haciendo referencia a la relación peso específico – resistencia señala que no todas las propiedades mecánicas son afectadas en igual grado debido a cambios en el peso específico. Es así que algunas propiedades incrementan con el peso específico mucho más rápido que otras. Así el U.S. Department of Agriculture (1974) menciona que es necesario hacer la relación con los resultados obtenidos para los diferentes ensayos.

Díaz-Vaz y Cuevas., citados por Navia (2006) menciona que las resistencias mecánicas están directamente relacionadas con la densidad; las especies con maderas densas tienen resistencias altas y maderas livianas menor resistencia. Esta relación se entiende al considerar que la densidad es la cantidad de estructura leñosa por unidad de volumen de madera y que esta cantidad de sustancia leñosa es la que debe soportar las tensiones.

2.5.2. Propiedades mecánicas de la madera

La madera es un material ampliamente usado en Ingeniería que se comporta mecánicamente como un sólido elástico y que obedece las leyes de la resistencia de materiales. Sin embargo, al paso del tiempo, los elementos estructurales de madera sometidos a cargas permanentes sufren deformaciones, denotando un carácter viscoso en la madera. Este comportamiento depende de la intensidad y duración de la carga y de la rigidez del miembro estructural entre otros factores. Una de las características mecánicas más necesarias en ingeniería de la madera es el módulo de elasticidad, el cual encuentra su utilidad como parámetro de diseño, cálculo e indicador de calidad (Sotomayor, 2014). Los bajos valores obtenidos en ensayos de módulo de elasticidad conforman una importante limitación en la madera destinada con fines de construcción. Esto se aprecia en plantaciones de Pino radiata, con periodos de rotaciones cortas, asociándose el concepto de madera juvenil como sinónimo de reducción de calidad (Timbersa, 2005).

La flexión estática es la resistencia que ofrece la madera a una carga que actúa sobre una viga, la cual varía según los defectos de crecimiento, densidad, contenido de humedad,

temperatura y duración de la carga. Se tienen tres índices en esta propiedad: esfuerzo al límite proporcional (ELP), módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR). El primero indica que la carga aplicada es proporcional a la deformación; el segundo es un índice de la facilidad o dificultad que tienen las maderas para su deformación, donde un mayor MOE indicará una menor deformación; y el último indica el momento en el que se produce la falla. (Aróstegui, 1982).

2.5.3. Variabilidad de la madera

Downes *et al.*, citado por Vieira *et al.*, (2019), señalan que estudios más recientes han investigado la variación de los árboles a alta resolución espacial, lo que permite una mejor comprensión de la verdadera variabilidad de las características como la densidad, ángulo microfibrilar y MOE dentro de los árboles. La Figura 3 ilustra éstos resultados.

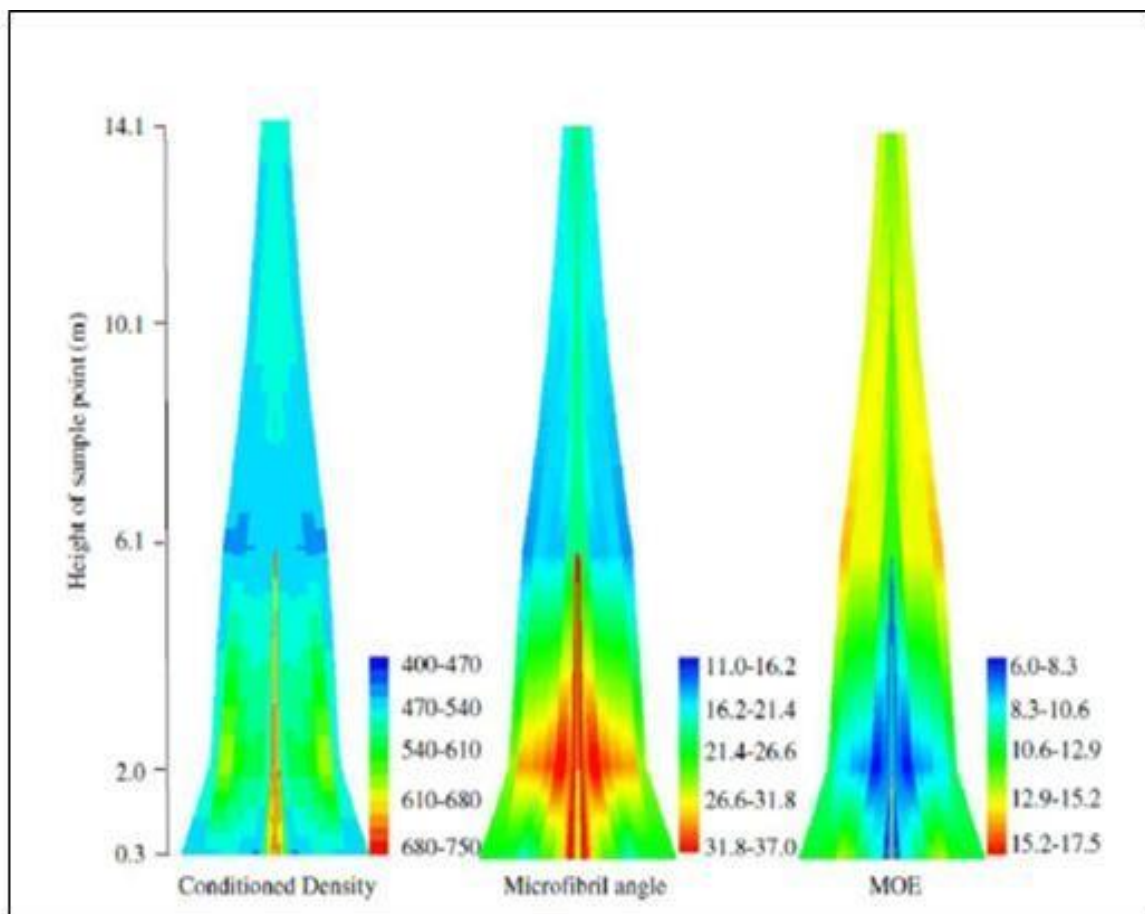


Figura 3: Variación de la densidad del árbol (kg/m³), ángulo de microfibrilla (grados) y rigidez (Gpa) en un abeto de 140 años. Fuente: Downes *et al.* (2009)

Arroyo (1983), menciona que existen variaciones que afectan la calidad de la madera por su estructura anatómica y por lo tanto las propiedades físicas, las cuales se deben a que las actividades fisiológicas del árbol son afectadas por los factores genéticos, que son una de las causas principales de la variabilidad entre árboles; los factores ambientales, como la precipitación, temperatura, tipo de suelo etc. Los cuales afectan tanto la variabilidad dentro como entre los árboles de la misma especie. Agrega, que modificaciones en el cambium producidas por maduración o envejecimiento determinan la variabilidad de la madera dentro arboles de una misma especie.

El mismo autor, añade que la variabilidad dentro de una especie es producto de un sistema complejo de factores interrelacionados, los cuales actúan como modificadores de los procesos fisiológicos que originan la formación de la madera. La determinación de cualquier propiedad indicará que para ella existe una escala de valores que se ajusta a las leyes estadísticas y se aproxima a la curva de distribución normal, siempre y cuando se haga un número suficiente de mediciones. Esta variabilidad sólo puede ser determinada después de análisis minuciosos de elementos anatómicos, tales como longitud de las fibras. A su vez este mismo autor menciona, que los patrones de variabilidad se deben a variaciones del cambium producidas por la edad y modificadas por los cambios en las condiciones de crecimiento.

Panshin *et al.*, (1980), manifiesta que la madera producida por árboles de la misma especie es a veces erróneamente asumida de ser idéntica en todas sus características físicas y estructurales. De hecho, diferentes piezas de madera incluso del mismo árbol nunca son idénticas y son similares sólo dentro de amplios límites. Así mismo agrega que entender la variabilidad de la madera es importante porque los usos de cada tipo de madera están relacionados a ciertas características. Señala, además, que es difícil atribuir la variabilidad de las características de la madera a un sólo factor o incluso a una combinación de factores que afecten el crecimiento del árbol. Asimismo, mencionan que las características normales de la madera pueden ser modificadas como resultado de condiciones de crecimiento de largo plazo existentes en diferentes lugares, incluso en áreas pequeñas. Las condiciones de crecimiento como la competencia por el sitio o la fertilidad del suelo pueden causar mayores diferencias en la magnitud y patrones de la variabilidad en las propiedades de la madera de árboles de la misma especie creciendo en el mismo sitio.

Herrera (1987), manifiesta que la variación dentro de un árbol se da en los siguientes aspectos: dimensiones de la célula, variaciones de densidad, en la composición química en las propiedades físicas, en los anillos de crecimiento o entre la madera juvenil y adulta.

Wakefield (1951), manifiesta que las propiedades mecánicas de la madera y el peso específico están influenciadas por la posición dentro del árbol de donde han sido tomadas las muestras, siguiendo un patrón general de incremento desde la médula hacia la corteza como es el caso de Douglas fir, White spruce y Engelmann spruce, las cuales muestran un incremento tanto en la resistencia como en el peso específico. Respecto a la relación de la resistencia de la madera con la altura en el árbol esta muestra una tendencia considerablemente menor que la relación entre la resistencia y la posición radial dentro del árbol; es así que hay resultados contradictorios, pues White spruce y Engelmann spruce muestran un incremento del peso específico desde la base hacia la copa a diferencia de Douglas fir en la cual disminuye en la parte inferior y superior del tronco alcanzando valores mayores entre los 10 y 30 pies de altura .

2.5.4. Madera juvenil

Panshin *et al.*, (1980) sostiene que la madera juvenil y madura deben considerarse como dos poblaciones en el mismo árbol. La madera madura posee características que son consideradas normales para las especies, mientras que la madera juvenil tiene características estructurales y físicas inferiores a las de la madera madura del mismo árbol. En general las pobres propiedades de la madera juvenil en relación a la madera madura normal hacen de esta, indeseable para propósitos estructurales y se oponen al uso de la madera de árboles jóvenes para algunos propósitos. Por regla general la baja calidad de la madera juvenil es más marcada en maderas de coníferas que en latifoliadas.

Haygreen y Bowyer (1982) mencionan que la madera juvenil ha sido definida como un xilema secundaria producido por regiones cambiales que son influenciadas por la actividad en el meristemo apical. Esta definición explica, por qué existe una transición gradual en las propiedades entre la madera juvenil y la madera madura. Señala que la madera juvenil, es difícil de identificar mediante una observación visual, especialmente en coníferas, aunque diversas características normales son algunas veces modificadas. En latifoliadas, los vasos de la madera juvenil son frecuentemente más pequeños y arreglados de manera diferente a partir de aquellos característicos de una madera madura Una característica consistente, que

normalmente se convierte en una variable en la madera juvenil, es el tipo de perforaciones en platinas de vasos.

Arroyo (1983), menciona que la madera formada cerca de la médula denominada juvenil, se caracteriza anatómicamente por un incremento progresivo en sus dimensiones y cambios correspondientes de forma, estructura y disposición de las células. La principal característica de la madera juvenil es su estructura celular y los bajos valores de resistencia. En los árboles de plantaciones, la madera juvenil puede estar relacionada al crecimiento rápido cerca de la médula, pero los anillos anchos no están necesariamente asociados con ella en todos los árboles. La duración del periodo juvenil varía de 5 a 20 años .

Vignote *et al.*, (1996), analizando la densidad de la madera en la sección transversal y altura del árbol, señala como la madera formada durante los primeros años de vida del árbol es mucho más ligera que la formada en años posteriores, pudiéndose no detectar la diferencia de apariencia, en consecuencia, es una madera liviana y menos resistente la cual es llamada madera juvenil.

2.5.5. Influencia de la anatomía de la madera en la resistencia mecánica

Gutiérrez, citado por Chambergo y Aróstegui (1984), determinó una relación inversa entre el diámetro de fibra y la resistencia mecánica, encontrando en una regresión lineal simple una correlación (R) de -0.79, -0.81, -0.81 para módulo de ruptura en flexión estática. León y Espinoza (2001), agregan que la longitud de las fibras ejerce un papel preponderante cuando se aplican esfuerzos en dirección paralela al grano (ej. resistencia a la compresión, la resistencia a la tensión y la dureza de los extremos); pues especies con fibras de mayor longitud o de paredes gruesas presentan mayores valores en dichas propiedades.

Maeglin (1987), especifica que las características anatómicas relacionadas en el cambio de madera juvenil a madera madura son la longitud y ángulo de fibra, la proporción de tipo de células, el diámetro celular, el grosor de la pared celular, y el contenido de celulosa, lignina y humedad. Adiciona que de estas características anatómicas depende el peso específico, resistencia y la contracción e hinchazón de la madera.

2.5.6. Influencia del manejo silvicultural en las propiedades de la madera

Zobel (1992), manifiesta que el espaciamiento en una plantación afecta en gran medida la calidad de la madera. Un aumento inapropiado de distanciamiento entre árboles afecta

negativamente el módulo de elasticidad de la madera. Estas disminuciones es gran parte debido al tamaño y número de nudos desarrollados.

Navarrete *et al.*, (2009) analizó el efecto de la intensidad de poda y del raleo, en la variación de la densidad básica de la madera de *Eucalyptus nitens* en una plantación de 10 años, intervenida a los dos años y medio de establecida. Los resultados determinaron que el raleo afectó la densidad básica, presentando los rodales sin intervención, una densidad básica promedio menor que aquellos intervenidos; mientras en aquellas unidades muestrales con tratamiento de poda, se presentaron los mayores valores promedios para esta propiedad física.

Según Leitch, citado por Muñoz *et al.*, (2010), la aplicación de raleo en plantaciones forestales comerciales es una práctica frecuente y tiene efecto en la calidad de la madera, principalmente en su densidad debido a que la tasa de crecimiento de los árboles remanentes se incrementa, generando una mayor proporción de madera juvenil y por lo tanto, una menor densidad básica de madera.

2.5.7. Comportamiento viscoelástico de la madera

Evangelista y Afanador (2016), indican que los materiales viscoelásticos lineales se caracterizan por tener un comportamiento intermedio entre un sólido elástico lineal (el cual cumple la ley de Hooke) y un fluido viscoso (que cumple la ley de Newton). Este comportamiento intermedio tiene capacidad de almacenar energía como un sólido elástico y disipar esta energía siguiendo la ley de los fluidos viscosos.

Acuña *et al.*, (2009), señala que la madera es un material que presenta un comportamiento viscoelástico, desde el punto de vista físico–mecánico, lo que implica que, sometida a esfuerzos crecientes, en una primera fase se deforma de una manera proporcional a la magnitud de las fuerzas o tensiones que ocasionan dicha deformación, es decir, sigue la Ley de Hooke, de esta manera la madera se comporta elásticamente y que, tras desaparecer las cargas, ésta recupera su forma original. Superada esta etapa la madera comienza a comportarse como un cuerpo plástico o inelástico. En esta fase la deformación aumenta en mayor medida que las fuerzas o tensiones que la originan y al desaparecer las mismas, la deformación es ya permanente. Por último, si se incrementan las cargas, se alcanza el punto de rotura. Este comportamiento puede resultar un punto a favor del uso arquitectónico de la madera, puesto que con su deformación progresiva avisa de su rotura. La selección de los

parámetros de estudio, tensión de rotura y módulo de elasticidad, no se ha realizado al azar, ya que ambos se encuentran relacionados con la resistencia a la flexión estática, que es el esfuerzo que con mayor frecuencia debe de soportar la madera de uso estructural.

Haines *et al.*, (1996) menciona que las propiedades viscoelásticas de la madera influyen en la diferencia de valores entre los módulos de elasticidad dinámicos y estáticos. Bodig y Jayne, citados por Sotomayor y Villaseñor (2006), señalan que el carácter viscoelástico de la madera aumenta la rigidez aparente de las probetas debido a que la velocidad de carga en los métodos dinámicos es superior a la velocidad de carga en el método estático, por lo que se espera que el módulo de elasticidad dinámico sea mayor que el estático. Asimismo, Divos y Tanaka (2005), mencionan que un gran número de trabajos sobre la determinación del módulo de elasticidad en flexión (MOE) y su correlación con el módulo de rotura en flexión (MOR) demostrando que el mejor parámetro predictor de la resistencia es el MOE. Este predictor ha sido determinado por métodos estáticos y dinámicos, siendo este último aproximadamente un 10% más alto que el MOEe, agregan que varios autores compararon la determinación de MOE estático y dinámico (Perstorper 1994; Tanaka *et al.*, 1991; Kliger *et al.*, 1992, Jugo y Ozarska 1996) y encontraron una buena correlación (r^2 : 0.90 - 0.96) entre los dos valores de MOE. Ambos autores señalan que la diferencia puede explicarse por el efecto de la fluencia pues la deflexión de una viga bajo carga se compone de la suma de la deflexión elástica y la deflexión causada por la fluencia que normalmente no se tiene en cuenta en la determinación dinámica.

La velocidad de carga es un parámetro experimental que manifiesta el carácter viscoelástico de la madera. En otras palabras, la resistencia elástica aumenta cuando las deformaciones son provocadas por cargas súbitas o periódicas. Ese es el caso de las sollicitaciones dinámicas, tales como vibraciones y sollicitaciones de tipo acústico, por ejemplo, el ultrasonido y las ondas de esfuerzo (Sotomayor, 2015).

2.5.8. Métodos no destructivos

Sotomayor (2016), manifiesta que el comportamiento mecánico de la madera en condiciones dinámicas y los fundamentos de los métodos no destructivos, se basan en la hipótesis fundamental que la energía mecánica en la madera se puede almacenar con a la propagación de del sonido o disipar con la atenuación de la misma y que ambas están controladas por los mismos mecanismos que determinan su comportamiento mecánico en condiciones estáticas. Como consecuencia es posible relacionar estadísticamente estas propiedades utilizando

análisis numérico como son las correlaciones estadísticas. Proposición que ha sido verificada experimentalmente.

Ross (1999), define las pruebas no destructivas como una técnica para identificar las propiedades físicas y mecánicas de materiales sin alterar su capacidad de tener un uso final y emplear esta información para la toma de decisiones con respecto a las aplicaciones adecuadas. El mismo autor añade que esta tecnología de evaluación ha contribuido significativamente en la eliminación de los inconvenientes técnicos para evaluar la madera a nivel de planta, determinándose su MOE lo que permitirá trabajar y llegar a un producto final en la madera de acuerdo a sus propiedades mecánicas. Ross y Pellerin (1991), agregan esta técnica aplicada a la madera, difieren mucho de los materiales homogéneos e isotrópicos como metales, vidrio, plásticos y cerámica, materiales no derivados de la madera, cuyas propiedades mecánicas son conocidas y estrictamente controladas por los procesos de fabricación, ante estos materiales las técnicas no destructivas se usan para detectar la presencia de discontinuidades, vacíos o inclusiones.

Soto *et al.*, (2012) señala que en la madera se pueden determinar dos tipos de MOE, uno estático (MOE_e) y otro dinámico (MOE_d). Para el primer caso se utiliza un dispositivo que aplica una carga y registra la deflexión dentro del rango elástico, lo que permite calcular el MOE_e ; mientras que en el MOE_d se emplean dispositivos que facilitan la propagación de las ondas acústicas a través de la madera y registra la velocidad de tránsito de ellas, que junto con la densidad permiten obtener su valor. El mismo autor indica que se ha determinado que ambos módulos de elasticidad están bien correlacionados.

2.5.9. Técnicas no destructivas

Bucur, citado por Toro (2005), manifiesta que las técnicas de evaluación no destructivas han utilizado la propagación del sonido generado (onda) en un material bajo condiciones de esfuerzo inducido. Dentro de los parámetros considerados importantes en la aplicación de estas técnicas, se mencionan la velocidad de la transmisión del sonido, así como la atenuación de la onda sonora producto de las características del material.

Marín *et al.*, (2013), agrega, que el ensayo por ondas sonoras acústicas se realiza mediante vibraciones mecánicas que se propagan a través del material. Su propagación es distinta según el lugar por el cual se transmiten (longitudinalmente, transversalmente y superficialmente). Asimismo, que la propagación de las ondas acústicas a través de los

materiales está íntimamente relacionada con su microestructura; en el caso de la madera, dada la influencia de su carácter anisótropo provoca una elevada atenuación. Para ello, se opta por trabajar con ondas de baja frecuencia por lo cual la madera pasa a poder considerarse como un material homogéneo con simetría ortotrópica. Con respecto a los ultrasonidos, ondas mecánicas longitudinales con frecuencia por encima de 20 kHz, señalan que es una de las técnicas de inspección no destructiva más potentes y versátiles que existen; ya que permite localizar y cuantificar el tamaño de los defectos internos para diferentes geometrías y evaluar propiedades físicas, mecánicas o estructurales del material examinado.

Sotomayor y Villaseñor (2016), utilizando técnicas con ultrasonido, empleando el equipo Sylvatest, con frecuencia de 22 kHz, calculó entre dos posiciones en los extremos del plano longitudinal tangencial de las probetas, los módulos de elasticidad de las maderas de *T. plicata* y *A. saccharum* para 10 direcciones en el plano longitudinal-tangencial. Los resultados mostraron una variación gradual en los valores del módulo de elasticidad al pasar de la dirección longitudinal a la tangencial, de esta manera se confirmó experimentalmente el comportamiento anisotrópico de las maderas estudiadas.

Brémaud *et al.*, citado por Sotomayor y Villaseñor (2016) reporta para el módulo de elasticidad determinado con métodos dinámicos, relaciones de anisotropía para las direcciones longitudinal-tangencial de 18,5 para maderas de gimnospermas y de 15,4 para maderas de angiospermas.

2.5.10. Velocidad de propagación de ondas en la madera

Bucur y Mc Donald citados por Toro y Velázquez (2005), señalan que las ondas de ultrasonido tienden a desplazarse con mayor rapidez en el sentido longitudinal en comparación con el sentido transversal al grano. Esta atenuación de la onda, básicamente se debe a la orientación de las células y al espesor de la pared celular, asimismo señalaron que en el plano radial la velocidad del sonido es mucho mayor que en el plano tangencial, este comportamiento es producto de la presencia de las células radiales, las cuales se encuentran conectadas a todo lo largo del plano de observación, facilitando el desplazamiento de la onda elástica a lo largo de los radios medulares.

Pelizan (2004), precisa que la propagación de una onda en el interior de la madera es caracterizada por un efecto de disminución de su amplitud (atenuación de la onda) resultado de los fenómenos de dispersión y absorción. Asimismo, menciona que la velocidad de

propagación de una onda dentro de la madera es mayor en la dirección longitudinal que en la dirección radial, siendo menor aún en la dirección tangencial; mayor cuanto mayor sea el largo de las fibras y menor, cuanto mayor es la porosidad y permeabilidad de la pared celular, a una densidad constante en la dirección considerada. Mayor cuanto mayor es la densidad, en cualquiera de las tres direcciones considerando un contenido de humedad constante a lo largo de la muestra; y mayor cuanto mayor es la continuidad de regiones cristalinas de la pared celular (mayor presencia de celulosa que de lignina y hemicelulosa), decreciendo con el aumento de regiones amorfas (mayor presencia de hemicelulosa y lignina que de celulosa).

Mora (2003), menciona que, si golpeamos un pedazo de madera con un martillo, la madera vibra en su frecuencia de resonancia o natural, emitiendo ondas sonoras. El sonido como un fenómeno de onda se puede caracterizar por sus propiedades físicas que son: longitud de onda (λ), amplitud (A), frecuencia (f) y velocidad de sonido (V). Si la onda sonora se mueve a una velocidad definida V, se forma la siguiente relación:

$$V = \lambda f$$

La pieza de madera vibra si alguna fuerza actúa sobre ella. La amplitud de vibración depende de la frecuencia y de la fuerza aplicada. Hay ciertas frecuencias en la cual el objeto de madera responde con máxima amplitud de vibración, estas frecuencias son las de resonancia o frecuencias naturales de la pieza.

Mora (2003), señala que la aplicación y medición de ondas acústicas en el método de ondas tensión longitudinal, consiste en el posicionamiento de dos transductores sobre el material a ser evaluados. La onda acústica es introducida en el material por uno de los transductores y receptionada por el otro transductor, siendo la medición del tiempo de transmisión en microsegundos y es realizada por el mismo instrumento. Así, en una barra de longitud L, la velocidad de propagación de la onda (V), en la dirección longitudinal, puede ser determinada mediante la medición del tiempo transcurrido entre la salida y la llegada del pulso (Δt).

$$V = \frac{L}{\Delta t}$$

Navia (2006), manifiesta que el módulo de elasticidad estático, que mide la resistencia de la madera a la deflexión bajo cargas, es utilizado como un criterio en la máquina de grados de tensión de madera estructural y laminada para determinar su calidad. El módulo de elasticidad de una pieza de madera o de una troza, puede medirse en un aparato que evalúe

la flexión estática, registrando la deflexión cuando la carga es aplicada, y calculando el módulo de elasticidad (MOE), que es una medida del “stiffness”. Este mismo autor, señala a Carter *et al.*, quien menciona que el módulo de elasticidad dinámico se obtiene midiendo la velocidad de una onda acústica a través del material, de tal forma que el módulo de elasticidad dinámico queda expresado de la siguiente manera:

$$MOE_d = \rho v^2$$

Donde:

ρ = Densidad de la madera aparente.

v^2 = Velocidad de la onda de tensión.

Mora (2003); menciona dos métodos experimentales para la determinación de los Módulos de elasticidad, estos son: método de ondas de tensión longitudinal y método de onda transversal. En métodos ondas de esfuerzo longitudinal, los parámetros más frecuentemente usados son la velocidad del sonido y la atenuación de ondas de esfuerzo, inducidas en el material.

La teoría de ondas de esfuerzo unidimensionales, relaciona la magnitud de la velocidad de propagación de la onda de esfuerzo, con el módulo de elasticidad dinámico, según la fórmula siguiente:

$$V^2 = \frac{MOE_d}{\rho}$$

Donde:

V = Velocidad de propagación de la onda de esfuerzo

MOE_d = Módulo de elasticidad dinámico

ρ = Densidad aparente del material

2.5.11. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico y módulo de ruptura

Mcdonald *et al.*, (1990), encontró que altas correlaciones han sido observadas entre los módulos de elasticidad obtenidos a partir de técnicas acústicas y el MOE en flexión estática

y que es más difícil relacionar MOR con MOE a partir de técnicas acústicas, pues la presencia de defectos y la inclinación de las fibras tienen efecto más significativo en el MOR que en la velocidad de longitud de onda. El mismo autor señala que como los defectos en la madera afectan la inclinación de las fibras, cualquier método que sea susceptible a eso, tendrá un potencial para determinar la resistencia de la madera.

Halabe *et al.*, citado por Oliveira (2003), manifiestan que obtuvieron bajos coeficientes de determinación para regresiones entre MOR y MOE determinado por técnicas acústicas para la especie Southern pine. Los bajos valores de r^2 ocurren también porque la tensión inducida en la madera durante los ensayos dinámicos es muy pequeña, es decir, las mediciones dinámicas son basadas en las propiedades mecánicas apenas en el límite elástico. El módulo de ruptura (MOR) se da a mayor tensión y después del límite elástico resultando en pobre correlación con los parámetros de los ensayos no destructivos.

2.5.12. Factores que influyen en la velocidad de propagación de las ondas de ultrasonido

a. Anatomía y propiedades de la madera

Raquelé (2004), precisa que la propagación de una onda en el interior de la madera es caracterizada por un efecto de disminución de su amplitud (atenuación de la onda) resultado de los fenómenos de dispersión y absorción. Asimismo, menciona que la velocidad de propagación de una onda dentro de la madera es:

1. Mayor en la dirección longitudinal (propagación por las fibras) que en la dirección radial (propagación por los radios), siendo menor aún en la dirección tangencial.
2. Mayor, cuanto mayor sea el largo de las fibras.
3. Menor, cuanto mayor es la porosidad y permeabilidad de la pared celular, a una densidad constante en la dirección considerada.
4. Mayor, cuanto mayor es la densidad, en cualquiera de las tres direcciones a un contenido de humedad constante a lo largo de la muestra.
5. Mayor, cuanto mayor es la continuidad de regiones cristalinas de la pared celular (mayor presencia de celulosa que de lignina y hemicelulosa), decreciendo con el aumento de regiones amorfas (mayor presencia de hemicelulosa y lignina que de celulosa).

Ross y Pellerin (1994), mencionan que la estructura interna y heterogénea de la madera, propicia un comportamiento diferente en cada uno de los planos de observación (carácter anisotrópico), por lo que las propiedades de la energía almacenada y disipada en forma de ondas a través de estas estructuras, está mayormente controlada por la orientación de estas células y la composición estructural en las diferentes capas que conforman la pared celular.

Navia (2006), expresa que las ondas sonoras son vibraciones mecánicas que viajan a través de la madera a una velocidad específica, dirección predecible, y cuando las ondas encuentran un límite con un medio distinto y con diferente impedancia mecánica, las ondas se reflejarán o se transmitirán según reglas conocidas. La velocidad del sonido depende del medio en el cual se transmite. En términos generales, puede decirse que la velocidad del sonido es mayor en los materiales más densos.

b. Humedad:

Sakai *et al.*, citado por Fernández (2016), mencionan que por debajo del punto de saturación de las fibras (PSF), la velocidad de las ondas ultrasónicas en dirección paralela a la fibra disminuye drásticamente con el aumento del contenido de humedad, sin embargo, por encima del punto de saturación de las fibras esta variación es despreciable.

Sandoz citado por Fernández (2016), realizó ensayos con el equipo de ultrasonidos Steinkamp BP-V y la variedad Picea, observó que se produjo un descenso de la velocidad aproximado del 0,80% por cada incremento de un 1% en el contenido de humedad dentro del rango entre 5% y 30% de humedad en la madera.

Fernández (2016), encontró influencia del contenido de humedad de la madera en variedades de pinos radiata, silvestre, laricio y pinaster con la velocidad de propagación obtenida a partir de equipos de transmisión de onda (Sylvatest Duo (22Kh), USLab (45Kh), Steinkamp BPV (50 Kh) siendo esta influencia más acentuada por debajo, que por encima del punto de saturación de la fibra.

c. Temperatura

Bucur, citado por Fernández (2016), manifiesta que la influencia de la temperatura en las propiedades mecánicas y en la velocidad de propagación de ultrasonidos es menos significativa que la del contenido de humedad.

d. Influencia de las dimensiones de la sección transversal y longitud de la probeta
 Bucur, citado por Fernández (2016), presentó los resultados obtenidos sobre probetas de Picea de longitud constante de 300 mm y una sección inicial de 100x100 mm, las cuales fueron reducidas en altura modificando el ratio espesor-altura desde el inicial hasta 14. La velocidad longitudinal de ultrasonidos se vio fuertemente afectada por la relación entre base y altura, obteniéndose la velocidad máxima de ondas ultrasónicas cuando dicha relación se encontraba entre uno y dos (Figura 4).

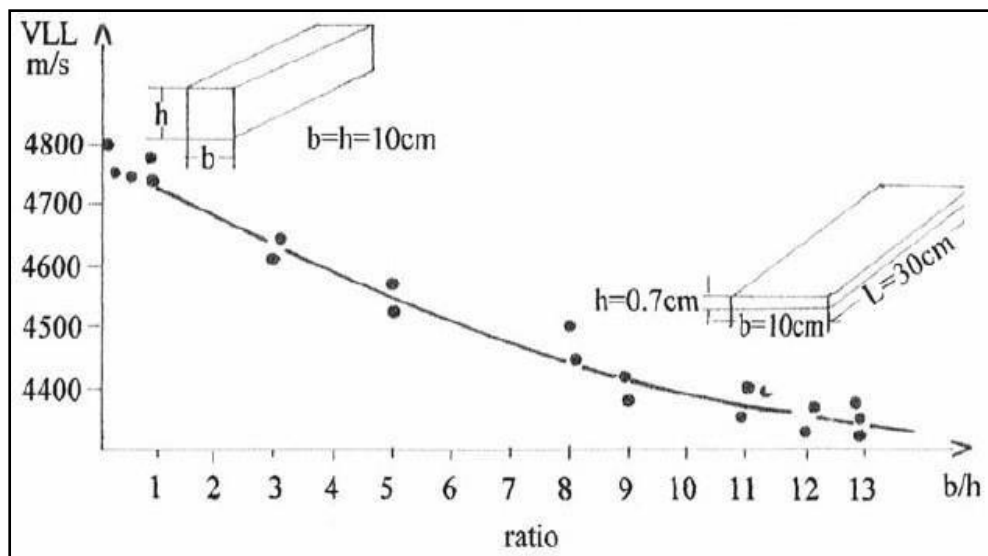


Figura 4 : Velocidad de ultrasonidos según sección. Fuente: Fernández (2016)

Con respecto a la influencia de la longitud de las piezas, Acuña *et al.*, citado por Fernández (2016) realizó ensayos en diversas piezas de pequeña escuadría, al 12% de CH, de diferentes especies de procedencia española: 14 de *Pinus radiata*, 12 de *P. silvestre* y 16 de *P. Pinaster*, fueron evaluadas longitudinalmente mediante el uso del equipo de ultrasonidos Sylvatest.(22Khz) Partiendo de una longitud aproximada de 3,5 m, se fue recortando sucesivamente 0,1 m de longitud, hasta llegar a 0,5 m. concluyendo que la velocidad de la onda ultrasónica aumentaba 182 m/s en *Pinus radiata*, 120 m/s en pino silvestre y 109 m/s en *Pinus pinaster*, por cada metro que disminuía la longitud de la pieza.

e. Relación L / λ

El efecto de la longitud de la pieza en la velocidad de ondas ultrasónicas fue también estudiado por varios autores, se observó que con medidas realizadas en piezas de menor longitud puede ocasionar problemas de dispersión y obtener resultados con lecturas erróneas. Al respecto Oliveira *et al.*, citado por Fernández (2016), investigaron la variación de la

velocidad de onda ultrasónica, de 22 kHz de frecuencia nominal, en piezas de madera estructural de sección 50x120 mm de 4 especies diferentes: pino del Caribe, eucalipto aromático (*Eucalyptus citriodora* Hook.), *Eucalyptus saligna* (*Eucalyptus grandis* Hill. Ex Maid.) y jatoba (*Hymenaea courbaril* L.), con longitudes comprendidas entre 0,1 m y 3 m. Se encontró un claro efecto de la relación longitud de pieza y longitud de onda (L/λ) cuando dicha relación se encontraba por debajo de tres, sin embargo, la velocidad permanecía constante por encima de tres.

Bartholomeu *et al.*, (2003), realizó ensayos con eucalipto (*Eucalyptus sp.*), efectuándose mediciones por equipos de ultrasonidos con sensores de frecuencia nominal de 45 kHz, encontró que el uso de ultrasonido es posible cuando la relación entre longitud de la pieza y la longitud de la onda es superior a cinco, para evitar los fenómenos de dispersión que afectan de manera importante a la velocidad de las ondas por debajo de dicho valor. Este último requisito forma parte de la norma brasileña de ensayos no destructivos NBR 15521.

f. Influencia de la posición y ángulo de los sensores

Ozuna (2017), manifiesta que la velocidad obtenida a través de diferentes medidas con métodos de ultrasonidos es variable según la posición en la que se coloquen los sensores. Estas medidas se han realizado poniendo los sensores, receptor y emisor, en las siguientes posiciones: si se sitúan en los extremos, se denomina medidas de testa-testa; si se sitúan en la misma cara donde se realiza la medición, se denomina medidas superficiales y si se sitúan en caras opuestas en la pieza de madera, se denomina medidas cruzadas.

Arriaga *et al.*, (2017), trabajando con equipos de ultrasonido Microsecond Timer (22 kHz.), USLab (45 kHz.) y Sylvatest duo (22 kHz.) concluyó que existe una diferencia entre la velocidad superficial y la de testa-testa y que varía en un intervalo entre el 1,5 y el 4%. Este trabajo se realizó en probetas de Pino silvestre de 90x 140x4000 mm.

Niemz *et al.*, citado por Fernández (2016), en un estudio fue realizado sobre 20 piezas de dimensiones 20x20x200 mm de Picea y Haya, con el equipo de ultrasonidos Steinkamp BP-V (50 KHz) y con diferentes ángulos respecto a la fibra (0, 15, 30, 45, 60 y 90 grados); concluyó que los valores de velocidad se redujeron en los 10 primeros grados al 80% del valor inicial en Picea y al 85% en Haya, los valores siguieron reduciéndose al aumentar el ángulo, pero más lentamente.

2.6. Antecedentes de estudios sobre el tema

Carnero (2007), utilizando la frecuencia de vibración transversal mediante la transformada de Fourier Rápida (FFT) y el método de propagación de ondas longitudinal (onda de 23 kHz. Microsecond timer y 45 kHz. Ultrasonic timer), determinó los módulos de elasticidad para cada metodología mencionada. Obtuvo regresiones lineales que le permitieron predecir MOE en flexión estática con altos coeficiente de determinación (r^2). Asimismo, encontró correlaciones entre MOE y MOR en flexión estática; cuyas regresiones lineales y valores del r^2 se presentan en la tabla 2.

Tabla 2: Ecuación de regresión lineal y coeficientes r^2 en *Cedrelinga cateniformis*

Módulo de Elasticidad		Regresión Lineal	r^2
Destructivo	No Destructivo		
MOE F.E.	FFT flexión	Y= 0.9947X + 804.34	0.96
MOE F.E.	Propagación de onda 23 kHz.	Y= 0.7666X+6555.6	0.93
MOE F.E.	Propagación de onda 45 kHz.	Y= 0.8177X - 800.05	0.92
MOR F.E.	FFT Analyzer	Y= 0.0065X + 11.246	0.74
MOR F.E.	Propagación de onda 23 kHz.	Y= 0.005X + 36.407	0.84
MOR F.E.	Propagación de onda 45 kHz.	Y = 0.0053X - 9.7718	0.83

Fuente: Elaborado por Carnero (2007)

Sucksmith (2009), ensayó el método de propagación de ondas longitudinal (23 kHz. y 45 kHz.) y el método de vibración longitudinal y transversal usando la transformación de Fourier rápida (FFT) en probetas de *Cedrelinga cateniformis* y encontró que ambos eran válidos y eficientes para estimar MOE longitudinal y transversal; cuyas regresiones lineales y r^2 se muestran en la tabla 3.

Tabla 3: Ecuaciones de regresión lineal y coeficientes r^2 en *Cedrelinga cateniformis*

Módulo de Elasticidad		Regresión Lineal	r^2
Destructivo	No destructivo		
MOE F.E.	Propagación de onda 23 kHz.	$Y = 0.7152X - 2128$	0.77
MOE F.E.	Propagación de onda 45 kHz.	$Y = 0.6996X - 5386.1$	0.80
MOE F.E.	FFT flexión	$Y = 0.7642X + 5767.6$	0.71
MOE F.E.	FFT vibración longitudinal	$Y = 0.7508X - 3199.2$	0.74

Fuente: Elaborado por Sucksmith (2009)

III. METODOLOGIA

3.1. Zona de estudio

Los árboles seleccionados fueron extraídos de una plantación piloto de la Estación Experimental Alexander Von Humboldt perteneciente al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) ubicada en el km 86 de la carretera Federico Basadre, ubicada en el distrito de Irazola, provincia de Padre Abad, región de Ucayali a 225 msnm. Las coordenadas geográficas del primer punto de la plantación son 493979 norte y 9023725 este (Figura 5).

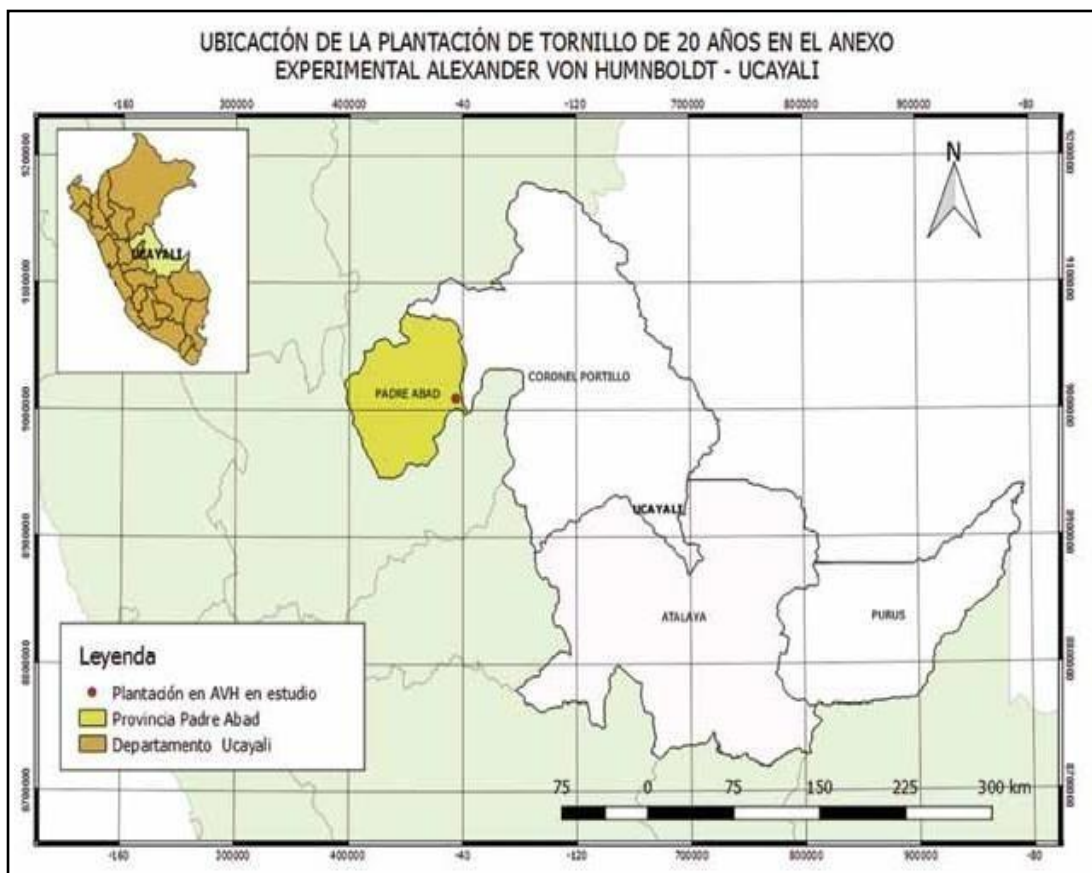


Figura 5: Ubicación de la parcela de *Cedrelinga Cateniformis*. Fuente: INIA 2018, Proyecto 121

3.2. Descripción del área de estudio

3.2.1. Clima

La temperatura promedio es de 26.7° C (29.3°C - 24°C), la humedad relativa promedio es de 78.9 % y la precipitación anual promedio es de 3600 mm con una estación muy lluviosa (noviembre - marzo) y otra de menor precipitación (abril- octubre) (Vega, 2010).

3.2.2. Suelo

Las parcelas de estudio corresponden a los suelos del tipo Gleysol. Vidaurre (1995), menciona que los suelos de la Estación Experimental Alexander Von Humboldt son de origen sedimentario, de textura arcillo- arenosa, drenaje pobre, fácilmente compactable y Ph promedio de 5.1.

3.2.3. Topografía

El Bosque Nacional Alexander von Humboldt está ubicado a una altitud entre 240 y 340 msnm., se divide en tres zonas características: plana, sin ningún accidente topográfico; ondulada, formación de ondas regulares de 5 a 10 m., las partes altas presentan buen drenaje y la parte baja es húmeda y con mal drenaje; y colinosa, con elevaciones de 10 a 50 m., con pendientes muy pronunciadas (Vidaurre, 1995).

3.3. Lugar de ejecución de los ensayos

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio Multipropósito ubicado en las instalaciones del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)-La Molina y en el Laboratorio de Tecnología de la Madera del Departamento Académico de Industrias - Forestales de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

3.4. Materiales y equipos

3.4.1. Especie

Las muestras de madera fueron tomadas en el año 2017 y corresponden a dos árboles de la especie *Cedrelinga cateniformis* de 17 años de edad de la plantación se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4 : Características de la plantación de *Cedrelinga cateniformis*

Especie	Tornillo
Fecha de Instalación	1997
Tipo de Plantación	Campo abierto
Actividades silviculturales	Ninguno
D.A.P	56.44 cm
Altura total	23.67 m
Altura comercial	8.75 m
Distanciamiento	10 m x 10 m
Fisiografía y suelo	Plana y ondulada, suelos principalmente gleysol y acrisol
Árboles plantados	Pijuayo (<i>Bactris gasipaes</i>), Centrocema (<i>Centrocema sp.</i>)
Vegetación anterior	Sistema agroforestal con pasturas degradadas

3.4.2. Equipos y accesorios

a. Evaluación y extracción de árboles

- Cinta métrica.
- Wincha.
- Brújula.
- Cinta diamétrica.
- Machetes.
- Motosierra
- Pintura

b. Preparación de probetas

- Motosierra.
- Sierra circular.
- Garlopa.
- Wincha.
- Escuadra

c. Ensayos destructivos

- Prensa Universal de ensayos Mecánicos Tinius Olsen.
- Accesorios de la prensa: Base, guía, soporte, placas de acero, cabezal o bloque de carga, y deflectómetro.
- Vernier digital "Mitutoyo" con precisión de 0.01 mm.
- Balanza digital con precisión de 0,05 g.

- Estufas eléctricas "Memmert" de hasta 220 °C.
- Campanas desecadoras de humedad provistas de silicagel.
- Formatos diseñados para la toma de datos.
- Cámara Fotográfica.
- Pinzas.
- Wincha.
- Escuadra.
- Cuchilla.
- Lápiz de cera

d. Ensayos no destructivos

- Equipo de 23 kHz Microsecond timer marca Fakopp.
- Equipo 45kHz Ultrasonic timer marca Fakopp.
- Detector de humedad.
- Balanza de precisión 0.01 gr.
- Vernier digital "Mitutoyo" de precisión 0,01 mm.
- Plumones indelebles.
- Lápices de cera.

3.5. Procedimiento

3.5.1. Colección y selección de muestras

En la zona de estudio, se procedió a la selección al azar de 18 árboles de tornillo los cuales fueron evaluados con criterios morfológicos (forma y sanidad del árbol), dasométricos (DAP) y con el equipo no destructivo, Treasonic timer (velocidad de propagación de la onda acústica que indica de calidad de la madera); parámetros que permitió la colección de dos árboles representativos para la presente investigación.

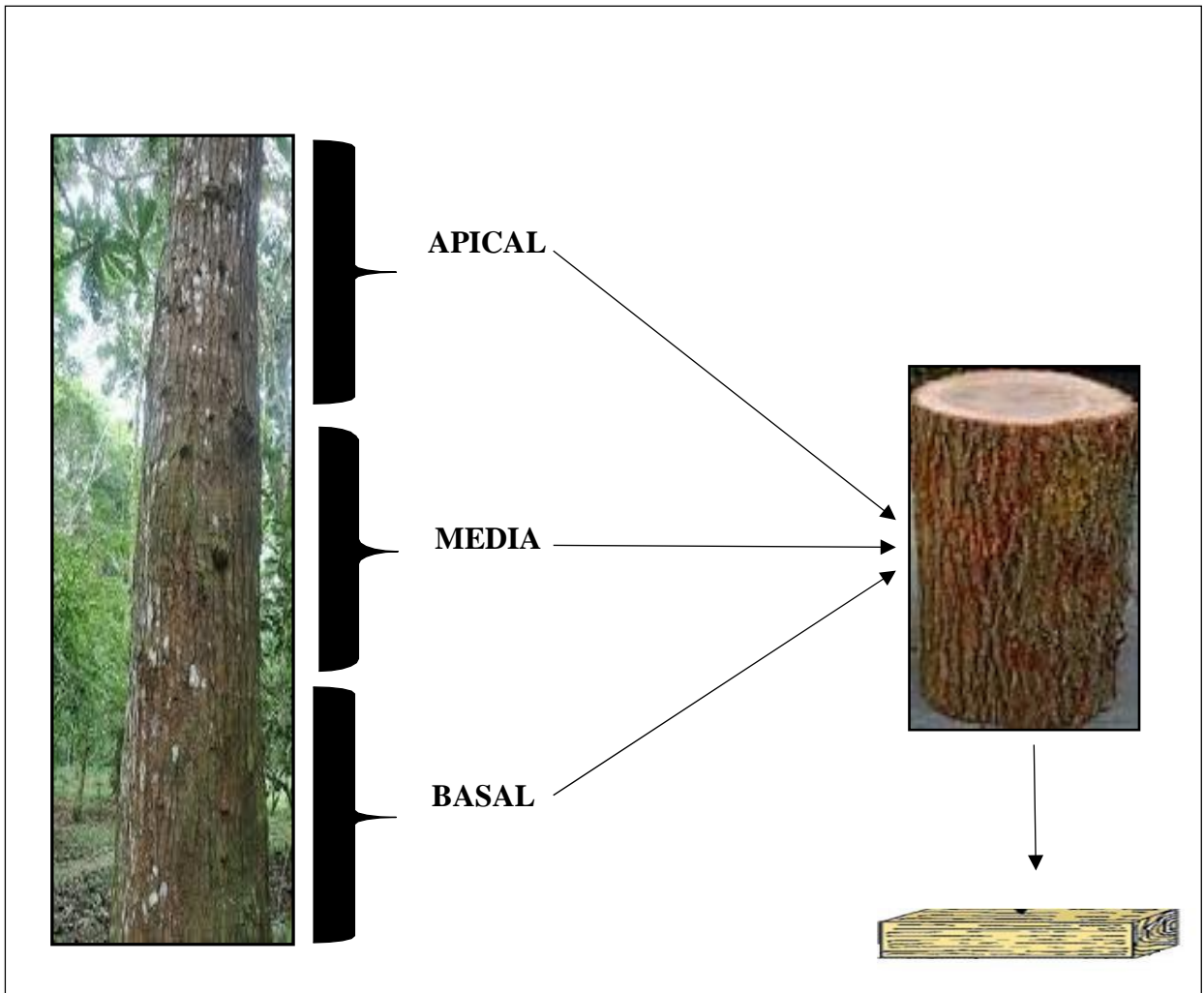


Figura 6: Ubicación de los niveles longitudinales considerados

3.5.2. Elaboración de probetas

Los árboles seleccionados fueron divididos en tres secciones o niveles longitudinales: basal, medio y apical de 3.0 m. de longitud, obteniéndose de estas trozas secciones de 0.80 m, según lo mostrado en la Figura 6.

Las trozas fueron codificadas y aserradas longitudinalmente para la elaboración de probetas de cada una de las tres secciones longitudinales, de tal manera que se obtuvieran probetas 5 x 5 x 76 cm. y 2.5 x 2.5 x 41 cm., cuya distribución de las probetas se realizó tratando de adecuarse a la norma ASTM D5536-94- 2004, El número de probetas ensayadas se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5: Número de probetas obtenidas por nivel longitudinal y por método

Especie	Nivel Longitudinal	Método Primario	Método Secundario	Total
Tornillo	Basal	24	26	50
	Medio	24	18	42
	Apical	19	20	39
Total		67	64	131

3.5.3. Determinaciones de las propiedades físicas y mecánicas

Se determinaron las propiedades físicas con las normas técnicas peruanas; NTP 251.010-2014 método para determinar el contenido de humedad y la NTP 251.011 -2014 métodos para determinar la densidad; y las propiedades mecánicas se evaluaron de acuerdo a lo estipulado por la Norma ASTM D143 – 94 (2000)- “Standard Test Methods for sallé Clear Specimens of Timber”.

3.5.4. Cálculo de módulo de elasticidad dinámico

a. Método de propagación longitudinal con una onda de 23 kHz. (Microsecond timer) Fakopp Enterprise (2005)

Para el desarrollo del método de propagación longitudinal, se utilizó el equipo Microsecond Timer, el cual mide el tiempo de propagación de una onda, de 23 kHz., inducida por un impacto, Este método mide el módulo de elasticidad longitudinal.

El procedimiento de la prueba consistió en los siguientes pasos:

- a. Calibración del equipo.
- b. Medición de las dimensiones y del peso de la tabla
- c. Clavar los sensores en los extremos de las tablas y conectarlos al equipo.
- d. Efectuar un golpe en el transductor de inicio “Start”
- e. Leer el tiempo de propagación en recorrer la distancia entre dos transductores
- f. Calcular la velocidad de propagación
- g. Calcular el módulo de elasticidad.

A continuación, se efectuaron los cálculos para determinar la velocidad de propagación de la onda y el módulo de elasticidad, para lo cual se utilizaron las siguientes formulas:

Velocidad de propagación:

$$V = \frac{L}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde:

V: Velocidad de propagación de la onda (m/seg)

L: Longitud o distancia entre los sensores (m)

Δt : Tiempo de propagación de la onda (s)

Módulo de elasticidad:

$$MOE_d = \rho V^2 \quad (2)$$

Donde:

MOE_d: Módulo de elasticidad dinámico.

V: Velocidad de propagación de la onda de esfuerzo.

ρ : Densidad de la madera.

Para efectos de la presente investigación, se realizaron tres evaluaciones en la cara transversal de la probeta, que corresponden a cada ubicación para la toma de valores: posición centro, derecha e izquierda, (Ver Figura 7 y Figura 8).



**Figura 7: Posiciones en cara transversal de la probeta en evaluación con Microsecond Timer.
Fuente: INIA 2018, proyecto 121**



Figura 8: Evaluación con Microsecond timer. Fuente: INIA 2018, proyecto 121

Los valores por posición de cada probeta son sujetos de un análisis estadístico comparativo para evaluar la significancia entre posiciones y métodos.

b. Método de propagación radial y tangencial longitudinal con una onda de 45 kHz. Equipo (Ultrasonic timer) Fakopp Interprise (2005)

El equipo mide el tiempo que demora en propagarse una onda ultrasónica, de 45 kHz., al recorrer la distancia entre los dos transductores. Al igual que el método anterior mediante esta técnica es posible determinar el MOE longitudinal.

El ensayo se realizó con los siguientes pasos:

- a. Calibración del equipo
- b. Entornillar los sensores a los extremos de la tabla y conectarlos al equipo
- c. Calibración del equipo
- d. Medir la distancia entre los transductores según la Figura 9
- e. Leer el tiempo de propagación de la onda ultrasónica
- f. Calcular la velocidad de propagación (Ecuación 1)
- g. Calcular el módulo de elasticidad (Ecuación 2)

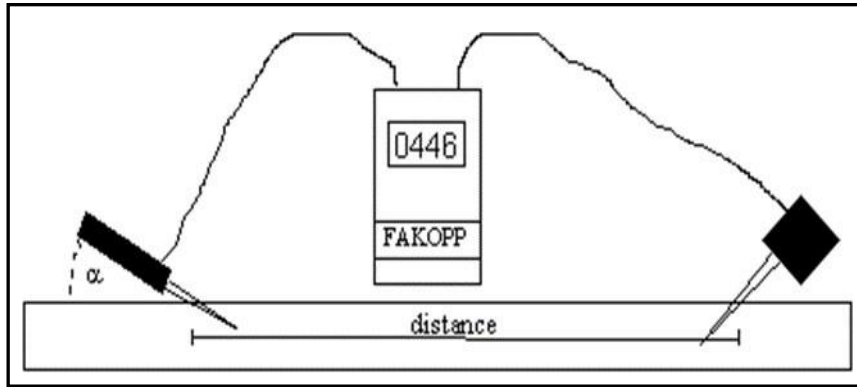


Figura 9: Diagrama de evaluación con equipo Ultrasonic Timer

El ángulo considerado en la colocación de los sensores, según el dibujo, es de 45° y la distancia de separación de los sensores fue de 66 y 35 cm, con equipo Ultrasonic método primario y secundario respectivamente. Para el uso del equipo Ultrasonic Timer, se estableció la diferenciación de la cara radial y la cara tangencial en cada probeta. Figura 10.



Figura 10 : Evaluación equipo Ultrasonic Timer
.Fuente : INIA 2018, proyecto 121



Figura 11: Colocación de sensores equipo Ultrasonic timer . Fuente :INIA 2018, Proyecto 121

3.5.5. Número de ensayos según métodos destructivos y no destructivos

El número de ensayos que se muestran en la Tabla 7. Se realizaron pruebas no destructivas con equipos Microsecond timer y Ultrasonic timer para determinar el módulo de elasticidad dinámico y pruebas destructivas para el módulo de elasticidad en flexión estática según método primario y secundario.

Tabla 6: Número de ensayos totales realizados en método primario y secundario según ensayos destructivos y no destructivos

Metodología	Esfuerzo	Nivel longitudinal	Métodos		Total por nivel longitudinal
			Primario	Secundario	
Destructiva Flexión Estática	MOE	Basal	24	26	50
		Medio	24	18	42
		Apical	19	20	39
		Total	67	64	131
No destructiva Microsecond Timer	MOE	Basal	24	26	50
		Medio	24	18	42
		Apical	19	20	39
		Total	67	64	131
No destructiva Ultrasonic Timer	MOE	Basal	24	26	50
		Medio	24	18	42
		Apical	19	20	39
		Total	67	64	131
Total ensayos			201	192	393

3.5.6. Procesamiento de datos y evaluación de resultados

Para el procesamiento de datos se empleó el programa R versión 3.6.1. Librería Agricolae versión 1.3-2. Inicialmente se realizó un análisis estadístico descriptivo para los esfuerzos MOE_e y MOR, en flexión estática y MOE dinámicos (MOE_d), obteniéndose valores como: medias, valores máximos y mínimos para intervalos de confianza al 95% y coeficientes de variabilidad.

Para determinar la variación longitudinal y determinar diferencias significativas con un p-valor ≤ 0.05 entre promedios MOE_e y MOE_d se utilizó la comparación estadística ANOVA que requiere la corroboración de supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, no cumpliéndose estos supuestos se recurrió a pruebas no paramétricas.

Comparando MOR y MOE para ambos métodos se utilizó la prueba ANOVA y pruebas de Tukey-Kramer, también se empleó la prueba de Welch y subsecuentemente la prueba post hoc de Games –Howell, siendo la primera utilizada para la comparación de medias bajo la coyuntura del no cumplimiento de la homocedasticidad y la prueba post hoc para realizar la comparación de parejas posteriormente. Las pruebas de Tukey –Kramer y Games –Howell

se emplearon para determinar específicamente las diferencias entre los niveles longitudinales.

En lo concerniente a los MOE dinámicos, se determinó con una prueba ANOVA la no existencia de diferencias significativas entre los MOE obtenidos de las diferentes posiciones adoptadas por los sensores en la probeta, según equipo Microsecon y Ultrasonic, obteniéndose valores promedio representativos por método primario y secundario.

Determinándose la homogeneidad para las metodologías dinámicas por probetas método primario y secundario se procedió a la comparación por niveles para MOE por equipo Microsecond y Ultrasonic timer recurriéndose al empleo de un diseño en bloques completamente aleatorio donde la variable de interés es la posición longitudinal y el bloque es el árbol, se utilizó en el análisis de comparación la prueba ANOVA y la prueba de comparación múltiple Tukey.

Para definir si existen diferencias significativas entre el método estático MOE_e y el método dinámico MOE obtenido con equipo Micro y Ultrasonic en probetas método primario, esta se determinó a través de un ANOVA y posteriormente con una prueba de Tukey. Con respecto a probetas métodos secundario se recurrió a las pruebas no paramétricas, como la de Signos y de Wilcoxon para definir también la existencia de diferencias significativas entre los promedios métodos no destructivos y destructivos.

Finalmente se halló la relación de dependencia e independencia entre el MOE_e y MOR de flexión estática con MOE_d, utilizándose regresiones lineales simples tanto en método primario como secundario y con el objeto de demostrar que es aplicable dicho modelo lineal se evaluaron los supuestos básicos para una regresión; normalidad de los errores mediante la prueba de Shapiro Wilk, homocedasticidad mediante la prueba de varianzas constantes y colinealidad, al no cumplirse estos supuestos se aplicó según el caso una transformación Box-Cox (tipo potencia cuadrada) como también otra transformación Box-Cox (con transformación potencia cubica), esto con el fin de garantizar todos los supuestos del modelo lineal.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Ensayos Destructivos

Los resultados experimentales indican que la madera de tornillo, presenta una densidad básica promedio de $0,405 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ y los contenidos de humedad para los esfuerzos en flexión estática son: $14,4 \pm 0,27\%$, en probetas ensayadas por el método primario, y $13,8 \pm 0,18\%$ en las ensayadas por el método secundario. Respecto a los resultados del esfuerzo en flexión estática: la resistencia en módulo de rotura (MOR) y la rigidez o módulo de elasticidad (MOE_e) para los tres niveles de estudio, tienen comportamientos disimiles.

Así, el análisis estadístico para el método primario, a un nivel de significancia del 95%, indica que en MOR no se ha demostrado que existen diferencias significativas entre los niveles, mientras que en MOE_e si hay diferencias. Para el método secundario, el comportamiento es lo contrario; en MOR hay evidencia estadística que al 95% de nivel de significancia si presenta diferencias y en MOE_e , no. Las Tablas 7 y 8, así como las Fig. 13 y 14 ilustran los resultados experimentales y análisis estadísticos. Se puede observar que hay un mayor MOR y MOE_e al aumentar la densidad básica. También, que el coeficiente de variabilidad en método primario es menor que el método secundario; sin embargo, sólo los coeficientes de variabilidad de método primario están por debajo del valor referente de Wood Handbook (1,974).

Respecto a la variación longitudinal del peso específico, muy relacionada con la densidad básica, esta sigue uno de los tres patrones propuestos por Panshin (1980), menor en la parte inferior con aumentos en las partes superiores; causado, entre otras razones, por la presencia de nudos, pues las muestras estudiadas provienen de árboles con distanciamientos de 10 x 10 m. y sin ningún tratamiento silvicultural (INIA, 2018), de altura total promedio de 23,6 m. y comercial de apenas 8,8 m.

Tabla 7: Valores promedios de densidad básica, humedad , MOR y MOE en flexión estática según niveles longitudinales por método primario y secundario

Método	Esfuerzo	Nivel	Promedio Kg/cm ²	CV%	Densidad Básica	Humedad %
Primario	MOR Kg/cm ²	Basal	507.00±32.0	15.80	0.415±0.01	14.6 ± 0.40
		Medio	535.50±47.40	22.10	0.423±0.03	14.3 ± 0.40
		Apical	488.20±62.20	28.30	0.420±0.02	14.3 ± 0.70
	MOE _e Kg/cm ² x10 ³	Basal	74.57±3.10	10.40	0.415±0.01	14.6 ± 0.40
		Medio	87.34±4.20	11.50	0.423±0.03	14.3 ± 0.40
		Apical	87.90±6.50	16.30	0.420±0.02	14.3 ± 0.70
Secundario	MOR Kg/cm ²	Basal	475.72±46.90	25.30	0.388±0.02	13.8 ± 0.26
		Medio	480.00±47.20	21.30	0.396±0.01	13.7 ± 0.43
		Apical	389.41±48.24	38.50	0.384±0.02	13.8 ± 0.39
	MOE _e Kg/cm ² x10 ³	Basal	62.13±7.00	28.8	0.388±0.02	13.8 ± 0.26
		Medio	68.39±6.20	19.6	0.396±0.03	13.7 ± 0.43
		Apical	59.91±7.80	29.65	0.384±0.02	13.8 ± 0.39

Tabla 8: Comparación de medias MOE y MOR, según método primario y secundario

Método	Esfuerzo	Significancia	Prueba de comparación
Primario	MOR	NS	--
	MOE	*	Games -Howel
			B: b
			M: a
A: a			
Secundario	MOE	NS	--
	MOR	*	Tuckey- Kramer
			B: a
			M: a
A:b			

B: Nivel basal, M: Nivel medio A: Nivel apical. Las medias longitudinales que no comparten la misma letra son significativamente diferentes. NS: NO significativo. (*): Significativo a un $p \leq 0.05$

4.1.1. Análisis del comportamiento longitudinal MOE y MOR en flexión estática

En relación al comportamiento de la variación longitudinal de los valores de resistencia y rigidez, si bien Arroyo (1983) menciona que está directamente en relación con la morfología de los elementos fibrosos, es decir con la longitud de las células, diámetro, espesor de las paredes celulares, ángulo de las microfibrillas, así como por la relación celulosa-lignina y organización molecular de la celulosa; esta morfología es consecuencia de las condiciones de crecimiento. Así, en la Tabla 9, al comparar los resultados con el de Vega (2010), se observa que la plantación de 20 años de antigüedad, tanto la densidad básica (DB) como la resistencia y rigidez tienden a crecer desde la base hasta el ápice y que los esfuerzos promedios son mayores y los coeficientes de variabilidad menores, a medida que aumenta la edad y las mejores condiciones de crecimiento, pues el de menor edad, tornillo de 17 años, se desarrolló bajo un sistema agroforestal sobre suelos de pasturas degradables, en distanciamiento de 10 x10 m. y sin ningún tratamiento silvicultural); mientras que el de mayor edad en suelos del tipo gleysol y acrisol, distanciamiento de 3 x 3 m, y actividades de limpieza desde los dos años hasta los cinco años, con raleos del 30% a los tres y nueve años.

Tabla 9: Comparativo MOE y MOR en tornillo de 17 años vs tornillo de 20 años.

Esfuerzo	Tornillo 17 años (DB 0.40 gr/cm ³)				Tornillo 20 años (DB 0.41 gr/cm ³)			
	Posición	Promedio	Clasific*	CV(%)	Posición	Promedio	Clasific*	CV (%)
MOE x 10 ³ kg/cm ²	Basal	68.10	MB	23.00	Basal	83.08	B	10.40
	Medio	79.22	B	19.00	Medio	91.08	B	6.40
	Apical	73.55	MB	29.00	Apical	94.86	B	10.80
Promedio		73.62	MB	23.60		89.67	B	9.20
MOR Kg/cm ²	Basal	491.72	MB	21.20	Basal	558.20	B	7.20
	Medio	511.67	MB	22.30	Medio	559.20	B	9.90
	Apical	437.50	MB	30.30	Apical	634.20	B	5.99
Promedio		479.96	MB	24.60		583.87	B	9.20

* Clasificaciones: MB: muy baja, B: Baja (Dávalos y Bárcenas, 1999)

Con respecto a las diferencias en valores promedio de MOR y MOE según método primario y secundario ; los de menor magnitud y altos valores de coeficiente de variación, atribuidos al método secundario, sugieren la posibilidad de una interacción de varios factores agrupados en el concepto de madera juvenil, como son las características anatómicas de las que dependen el peso específico, contracción y resistencia mecánica de la madera, así como de la distribución no homogénea y no definida de la madera en los individuos estudiados

(Maeglin, 1987). Hay que tener en consideración también que el tallo de un árbol presenta dos regiones: albura y duramen que influyen en los valores de las propiedades físicas y mecánicas. En la Figura 12 se ilustran en las rodajas lo señalado.



Figura 12 : Rodajas de *Cedrelinga cateniformis*, mostrando la albura y duramen. Fuente: INIA 2018, Proyecto 121

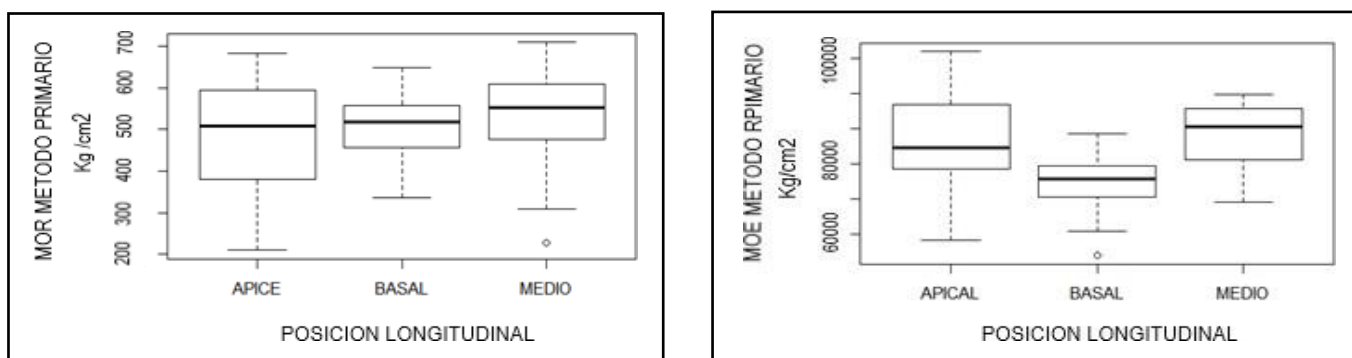


Figura 13 : Diagrama de cajas del MOR y MOE , diferencias por niveles longitudinales determinados en método primario

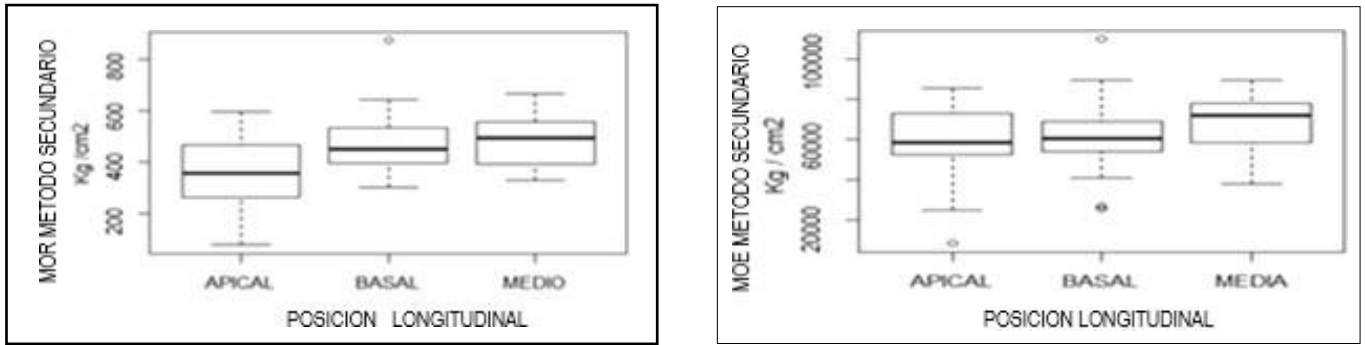


Figura 14: Diagrama de cajas del MOR y MOE, diferencias por niveles longitudinales determinadas en método secundario

4.2. Ensayos no Destructivos

4.2.1. MOE dinámico (MOE_d) según equipo Microsecond Timer y Ultrasonic Timer y posición de sensores en la probeta

En la Tabla 10, se muestran los promedios de las evaluaciones efectuadas con Microsecond timer y Ultrasonic timer, según posición de los sensores. Asimismo, la comparación de medias permite afirmar que no existen diferencias significativas entre los promedios según posición de los sensores en las probetas. Los diagramas de caja de las Figuras 15, 16, 17 y 18 ilustran este comportamiento. Estos resultados, les dan consistencia a las determinaciones experimentales.

Tabla 10: Valores MOE_d según equipo utilizado y posición de los sensores en la probeta

Método	Equipo	Posición de evaluación	MOEd	
			Promedio (Kg/cm ²)	C.V. (%)
Primario	Ultrasonic timer	Radial	72944.5	18.5
		Tangencial	75872.6	15.7
	Microsecond timer	Izquierda	92697.5	11.5
		Derecha	95599.2	12.7
Secundario	Ultrasonic timer	Radial	58133.1	16.6
		Tangencial	57709.6	12.9
	Microsecond times	Centro	82609.8	14.2
		Izquierda	81525.5	14.1
		Derecha	81610.8	13.9

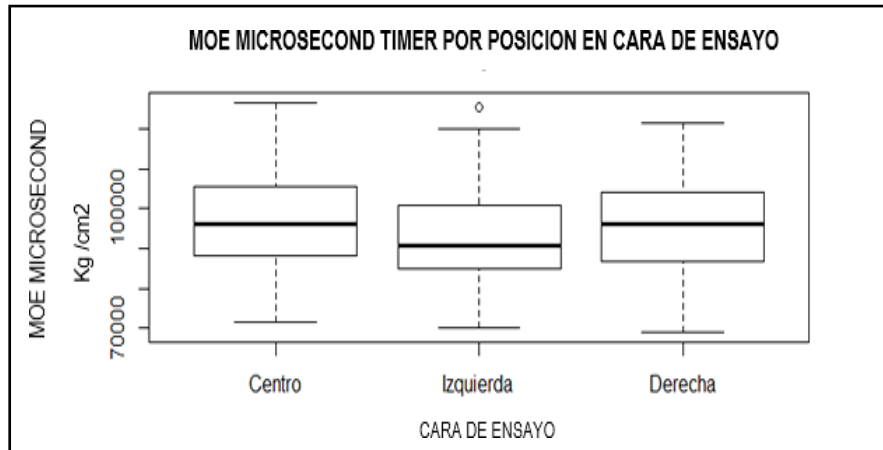


Figura 15: Diagrama de cajas, promedios de MOEd según posiciones en cara transversal Microsecond timer -método primario

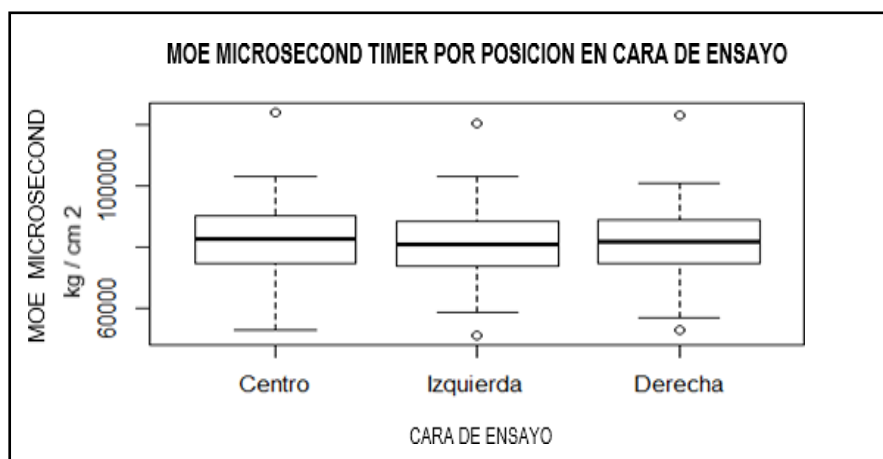


Figura16: Diagrama de cajas, promedios de media de MOEd según posiciones en cara transversal Microsecond timer -método secundario

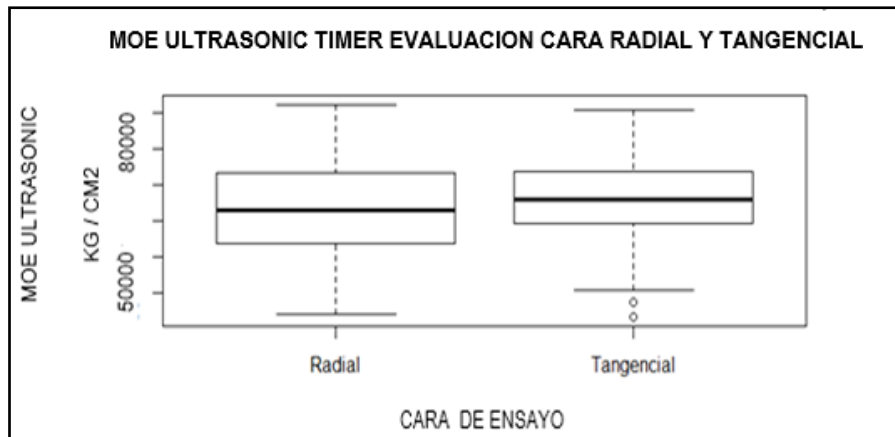


Figura 17: Diagrama de cajas, promedio de MOEd según cara radial y tangencial , Ultrasonic timer -método primario

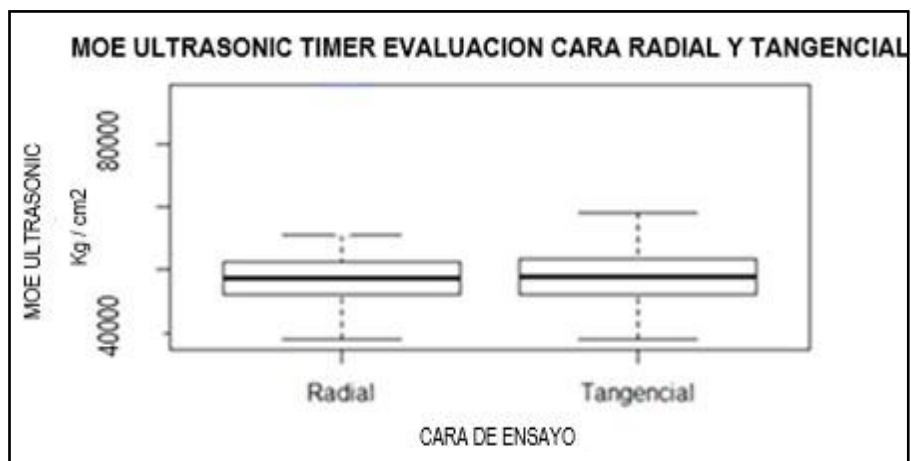


Figura 18: Diagrama de cajas, promedios de MOEd en cara radial y tangencial , Ultrasonic timer -método secundario

4.2.2. Análisis del comportamiento longitudinal del MOE_d

Los valores promedios del comportamiento longitudinal del MOE_d se presentan en la Tabla 11 y los resultados de la significancia de la comparación de las medias en la Tabla 12.

Tabla 11: Valores MOE_d según niveles longitudinales y por método primario y secundario

Método	Nivel	MOE _d (kg/cm ²)			
		Microsecond timer		Ultrasonic timer	
		Promedio (kg/cm ²)	C.V. (%)	Promedio (kg/cm ²)	C.V. (%)
Primario	Basal	88 934.4	9,4	69 448.5	12.9
	Medio	97 030.8	11.1	76 351.9	18.1
	Apical	100166.5	10.1	78 148.9	12,8
Secundario	Basal	79 426.4	12.3	55 854.5	10.6
	Medio	84 657.8	12.1	59 868.3	10.7
	Apical	80756.2	19.2	57 582.1	20.5

En la tabla 11 se observa que los MOE_d muestra una tendencia ascendente del nivel basal hasta el nivel apical en método primario, luego en método secundario la tendencia es el incremento de la base a nivel medio y luego decrece en el nivel apical. Esta tendencia se grafica en la figura 19.

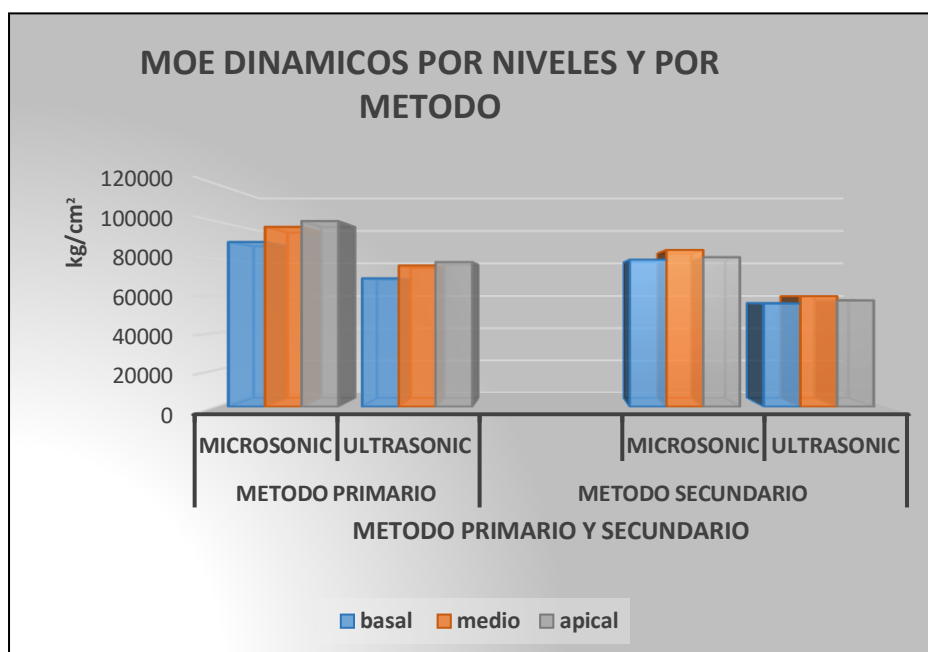


Figura 19: MOE Microsecond timer y MOE Ultrasonic timer por niveles longitudinales y por métodos

Así mismo, se aprecia que los valores promedios de los MOE_d del método primario son mayores con Microsecond timer y Ultrasonic timer, esta diferencia podría explicarse por la menor densidad básica de las probetas del método secundario, pues como Raquelé (2004) lo manifiesta, la propagación de una onda es mayor cuanto mayor es su densidad en cualquiera de las tres direcciones a lo largo de la madera.

Respecto a la influencia de la longitud y humedad de las probetas evaluadas, es probable que ambas se hallan compensado, pues mientras Acuña *et al.*, citado por Fernández (2016), determinó experimentalmente con equipo Sylvatest (22Khz) en pino radiata, silvestre y pinaster que la velocidad de la onda ultrasónica aumenta en promedio 137 m/s por cada metro que disminuía la longitud de la pieza, Sakai *et al.*, citado por Fernández (2016), señala que por debajo del punto de saturación de las fibras (PSF), la velocidad de las ondas en dirección paralela a las fibras disminuye con el aumento de la humedad. Sobre esta misma propiedad es importante la influencia del agua higroscópica y los micro vacíos de la pared celular en relación con la distorsión de la celulosa en las zonas amorfas (Lu *et al.*, 2012), siendo estas zonas amorfas distorsionantes decrecientes en la velocidad de las ondas de ultrasonido. Adicionalmente Bartholomeu *et al.*, (2003) señala que existe un claro efecto entre la relación de longitud de piezas y la longitud de la onda (L/λ).

En relación al comportamiento longitudinal, se observa en la tabla 12 que el promedio MOE en probetas del método primario con Microsecond timer y con Ultrasonic timer son

similares. Así, los niveles medio y apical son similares, pero son significativas las diferencias de los promedios entre el nivel basal y medio, así como basal y apical. Mientras que en el método secundario los promedios de MOE determinados con Microsecond timer no presentan diferencias significativas en sus tres niveles; y en el MOE medido con Ultrasonic timer hay diferencias significativas entre los niveles basal y medio, pero no existe diferencias entre el nivel medio y apical ni entre el nivel basal y apical.

Tabla 12: Comparación de promedios por niveles longitudinales del MOE Microsecond y MOE Ultrasonic

Método	Nivel	MOE _d			
		Microsecond timer		Ultrasonic timer	
		Prueba	Comparación	Prueba	Comparación
Primario	Basal	Tuckey	b	Tuckey	b
	Medio		a		a
	Apical		a		a
Secundario	Basal	N.S.		Tuckey	b
	Medio				a
	Apical				ab

Las medias longitudinales que no comparten la misma letra son significativamente diferentes

Es evidente la influencia del contenido xilemático de las probetas, producto de las condiciones de crecimiento del árbol por el comportamiento del tejido meristemático, en el ápice y parte media predomina el meristema primario; al respecto, Arroyo (1983), menciona que la formación de madera juvenil está asociada a la prolongada influencia del tejido meristema apical en las partes activas de la copa durante el período de crecimiento. En la base, probablemente el distanciamiento entre árboles y el tratamiento silvicultural. Así como la respuesta a agentes externos, como el viento y otros factores físicos adversos, van afectar el desarrollo anatómico axial de los tejidos leñosos. Asimismo, podría influir las dimensiones de las probetas, tal como lo mencionan Bucur, citado por Fernández (2016), Oliveira *et al.*, citado por Ozuna (2017) y Bartholomeu *et al.* (2003) que existía un claro efecto entre la relación de longitud de las piezas y la longitud de la onda (L/λ).

4.3. Comparación de los MOEe vs MOEd

Una primera aproximación de los resultados experimentales se presenta en las Figuras 20 y 21 que ilustran el comportamiento de los valores por probeta de los MOE estático y dinámico.

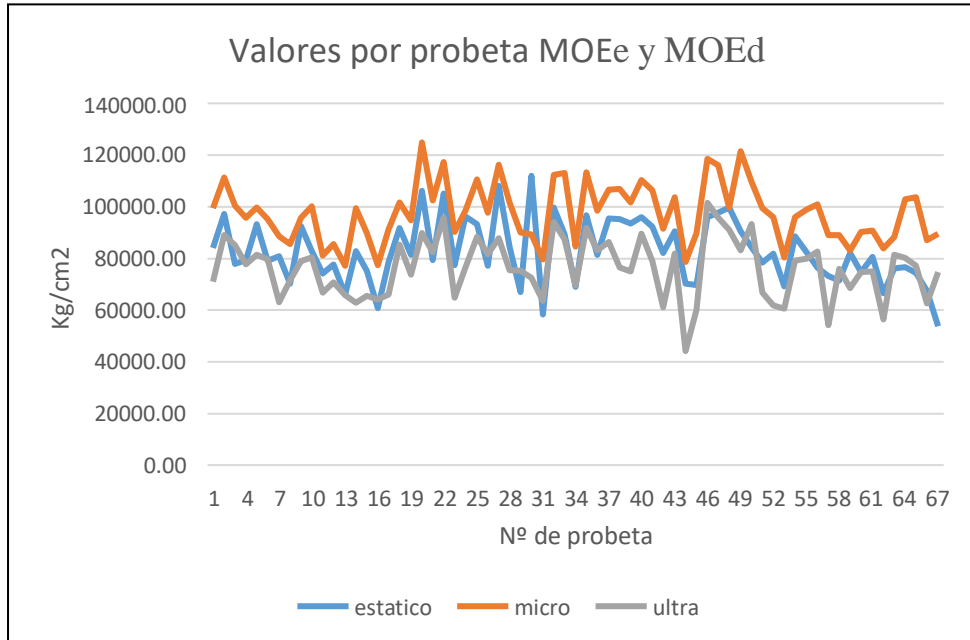


Figura 20: Gráfico de valores por probeta en MOEe y MOEd método primario

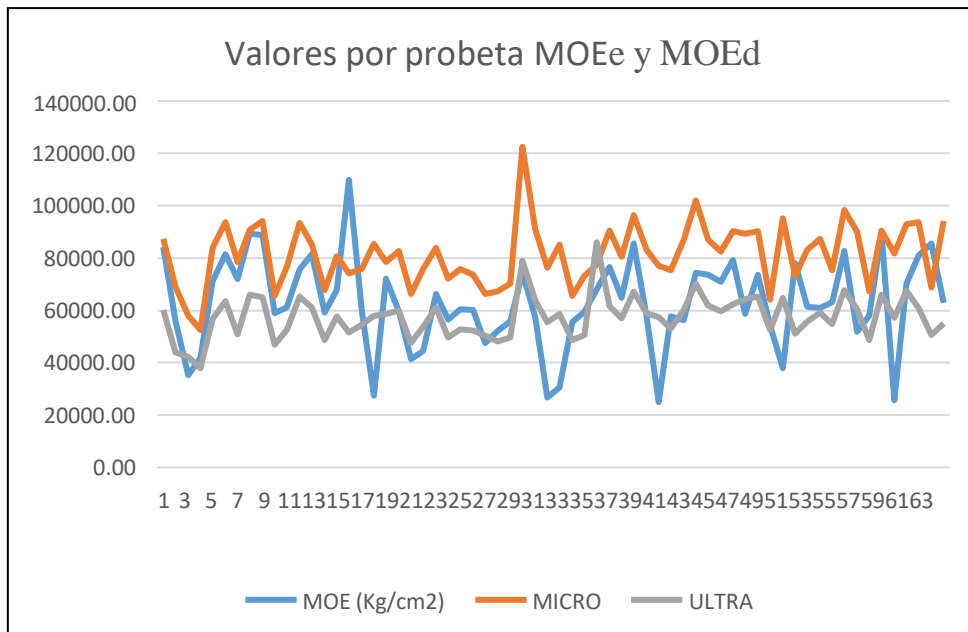


Figura 21: Gráfico de valores por probeta en MOEe y MOEd método secundario

Nótese que en la Figuras mencionadas se puede apreciar que los valores respectivos para cada MOE_d y MOE_e, siguen el mismo patrón y siguen una tendencia proporcional entre sí. Asimismo, se observa en la Tabla 13 y en las figuras 22 y 23 que los valores promedios de MOE_d determinados con Microsecond timer son mayores a los MOE_e, al respecto Divós y Tanaka (2005) mencionan que en el MOE_d la deformación de fluencia usualmente no es tomada en cuenta a diferencia del MOE_e. Sin embargo, en las mediciones con Ultrasonic timer ocurren lo contrario, explicable en parte por lo mencionado por Arriaga et al., citado por Ozuna (2017), que observaron que la velocidad superficial era 3% menor que la de testa a testa así mismo, Llana *et al.*, citado por Ozuna (2017) encontró una diferencia entre velocidad superficial a la de testa a testa entre 1.5 a 4%. Los resultados presentados en la Tabla 14 ilustran el comportamiento estadístico de las medias de los MOE_e y MOE_d.

Tabla 13: Valores promedios de MOE estático y MOE Microsecond y MOE Ultrasonic por niveles longitudinales

Método	Nivel	MOE _e (kg/cm ²)		MOE _d (kg/cm ²)			
		Promedio	C.V.	Microsecond timer		Ultrasonic timer	
				Promedio Kg/cm ²	C.V. %	Promedio Kg/cm ²	C.V. %
Primario	basal	74 568.6	10.4	88 934.4	9,4	69 448.5	12.9
	medio	87340.69	11.5	97 030.8	11.1	76 351.9	18.1
	apical	87897.22	16.3	100166.5	10.1	78 148.9	12,8
Secundario	basal	62128.57	29.4	79 426.4	12.3	55 854.5	10.6
	medio	68 385.9	19.6	84 657.8	12.1	59 868.3	10.7
	apical	59 916.2	26.6	80756.2	19.2	57 582.1	20.5

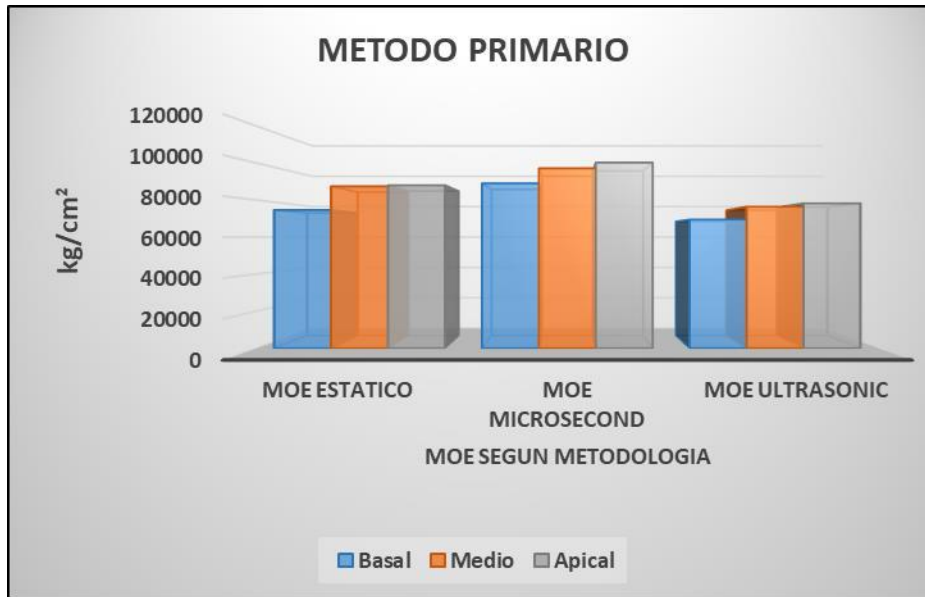


Figura 22: Valores promedios MOE estático , MOE Microsecond y MOE Ultrasonic por niveles y por método primario

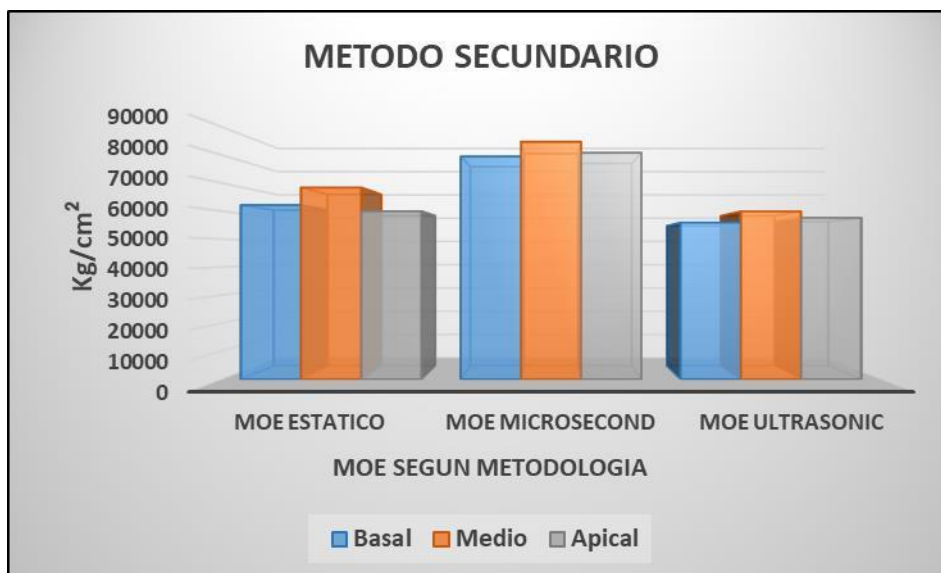


Figura 23: Valores promedio MOE estático , MOE Microsecond y MOE Ultrasonic por niveles y por método secundario

Tabla 14: Comparación de medias entre MOE estático y MOE Microsecond y MOE Ultrasonic por niveles longitudinales

Método	Nivel	MOE _e	MOE _d	
			Microsecond timer	Ultrasonic timer
Primario	Basal	b	b	b
	Medio	a	a	a
	Apical	a	a	a
Secundario	Basal	N.S.	N.S.	b
	Medio			a
	Apical			ab

Las medias longitudinales que no comparten la misma letra son significativamente diferentes

Los resultados de la comparación estadística por niveles en MOE_d con los obtenidos en el MOE_e, se observa una tendencia de comportamiento similar tanto para el método primario como para el método secundario.

4.4. Diferencia estadística entre Método estático y Métodos dinámicos

Se determinó la existencia de diferencias significativas entre los métodos para hallar el MOE en flexión y los MOE obtenidos con equipos Microsecond y Ultrasonic timer, los resultados encontrados expresan diferencias significativas entre los métodos estáticos y dinámicos con un nivel de confianza del 95%, se muestran las comparaciones y resultados en la Tabla 15.

Tabla 15 : Tabla de comparaciones entre Métodos estático y Métodos dinámicos

Método	Esfuerzo	Prueba	Comparación
Primario	MOE _e		a
	MOE _d Micro	Tukey	b
	MOE _d Ultra		c
Secundario	MOE _e	Signos	a
	MOE _d micro		b
	MOE _e	Wilcoxon	a
	MOE _d Ultra		b
	MOE _d micro	Wilcoxon	a
	MOE _d ultra		b

Las medias que no comparten la misma letra son significativamente diferentes

Los resultados de la tabla 15 muestran, con un nivel de confianza de 95%, que existen diferencias significativas entre MOE_e y MOE_d obtenido con Microsecond y equipo Ultrasonic timer, tanto en probetas de método primario y secundario., diferencias donde se aprecia particularmente un MOE_d Microsecond mayor que el MOE estático. Al respecto, Divos y Tanaka (2005), señalan que la diferencia puede explicarse por el efecto de la fluencia, pues la deflexión de una viga bajo carga se compone de la suma de la deflexión elástica y la deflexión causada por la fluencia que normalmente no se tiene en cuenta en la determinación dinámica. Bodig y Jayne, citados por Sotomayor y Villaseñor (2006), señalan que el carácter viscoelástico de la madera aumenta la rigidez aparente de las probetas debido a que la velocidad de carga en los métodos dinámicos es superior a la velocidad de carga en el método estático, por lo que se espera que el módulo de elasticidad dinámico sea mayor que el estático.

4.5. Predicción del Módulo de Elasticidad Estático y Módulo de Ruptura mediante los Módulos Dinámicos.

Sotomayor (2016), señala que en la madera sus propiedades de almacenar y disipar energía (MOE_d) están controladas por el mismo mecanismo que su comportamiento mecánico en condiciones estáticas (MOE_e), en consecuencia, es posible relacionar estadísticamente utilizando análisis numérico como son las correlaciones estadísticas. Agrega, que este tipo de pronóstico se puede estimar empleando regresiones estadísticas previamente calculadas a partir de los resultados experimentales. El análisis del comportamiento de las variables ya se hizo por lo que el objetivo de este ítem es estimar las regresiones para predecir el módulo de elasticidad en flexión estática. y proponer la mejor en función al mejor coeficiente de determinación (r^2).

4.5.1. Predicción del módulo de elasticidad (MOE_e) mediante los módulos dinámicos (MOE_d) en probetas método primario y secundario.

En la Tabla 16 se presentan los coeficientes de correlación y determinación, ecuaciones de regresión Lineal MOE_e vs MOE_d , las figuras 24,25, 26 y 27 ilustran las ecuaciones de regresión.

Respecto a los MOE_e estimados por método primario, los coeficientes de determinación, para MOE_d Microsecond y MOE_d Ultrasonic, fueron de 0.67 y 0.53 respectivamente, clasificados según Amat (2016) como asociaciones moderadas. Al respecto trabajos de regresión en tornillo reportados por Sucksmith (2009), mostraron coeficientes de

determinación en MOE_d Microsecond de 0.77 y con MOE_d Ultrasonic 0.80., valores provenientes de tornillos de plantaciones de 20 a 23 años con manejo silvicultural.

En relación a los MOE_e estimados por método secundario, los coeficientes de determinación, para MOE_d Microsecond y MOE_d Ultrasonic de 0.26 y 0.28, respectivamente, considerados como asociaciones pequeñas, (Amat, 2016). Al parecer la densidad básica y la alta variabilidad mostrada en los MOE_e promedios determinados en los ensayos de flexión estática influyen en mayor magnitud y podrían explicar su bajo valor de predicción.

Tabla 16: Coeficiente de determinación ,correlación y ecuaciones de regresión lineal MOE_e vs MOE_d método primario y ssecundario

Método	Equipos	Coeficiente de determinación r ²	Coeficiente de correlación r	Ecuación lineal
Primario	Microsecond	0.67	0.82	MOE _e = 32220+0.7915 MOE Microsecond
	Ultrasonic	0.53	0.73	MOE _e = 24920+0.7584 MOE Ultrasonic
Secundario	Microsecond	0.26	0.51	MOE _e = - 2.99x10 ⁹ +8.892x10 ⁴ MOE Microsecond
	Ultrasonic	0.28	0.53	MOE _e = -3.972x10 ⁹ +1.436x10 ⁷ MOE Ultrasonic

Dentro del método primario, la bondad de ajuste mostrada en esta relación de regresión lineal entre MOE_e – MOE_d Microsecond es la más significativa con un r² de 0.67, justificado por la poca dispersión de los valores MOE estático y dinámico. Adicionalmente a este concepto, la incidencia de las lecturas de evaluación con este equipo, lecturas directas, contribuyen a un r² con poca distorsión, siendo el desplazamiento de las ondas de ultrasonido en forma directa, testa–testa, lo que no es el caso para el equipo Ultrasonic cuyas las lecturas superficiales mostraron un r² de 0.53. Al respecto Iñiguez (2007), manifiesta que las lecturas en superficie son menos adecuadas porque la amplitud de la señal recibida es significativamente menor que la registrada en las lecturas directas, lo que se traduce en una peor recepción de la señal y un mayor error experimental. Este fenómeno también podría afectar negativamente en el coeficiente de determinación de la regresión lineal (r²).

Inciendo en la alta dispersión de los valores MOE_e en probetas método secundario se puede observar que el CV% se duplicó con respecto a su similar en método primario,

incrementándose por consecuencia las diferencias entre los valores observados y los valores predictivos, produciéndose por ende un aumento en los errores residuales. Este alto CV% se refleja en la inestabilidad del diseño y podría explicar el bajo r^2 mostrado en las regresiones con los MOE dinámicos. Adicionalmente los bajos r^2 determinados en método secundario sugiere la posibilidad de encontrarse en estas probetas los valores más bajos de densidad como se observa en la tabla 8, manifestándose las correlaciones r^2 clasificadas como pequeñas.

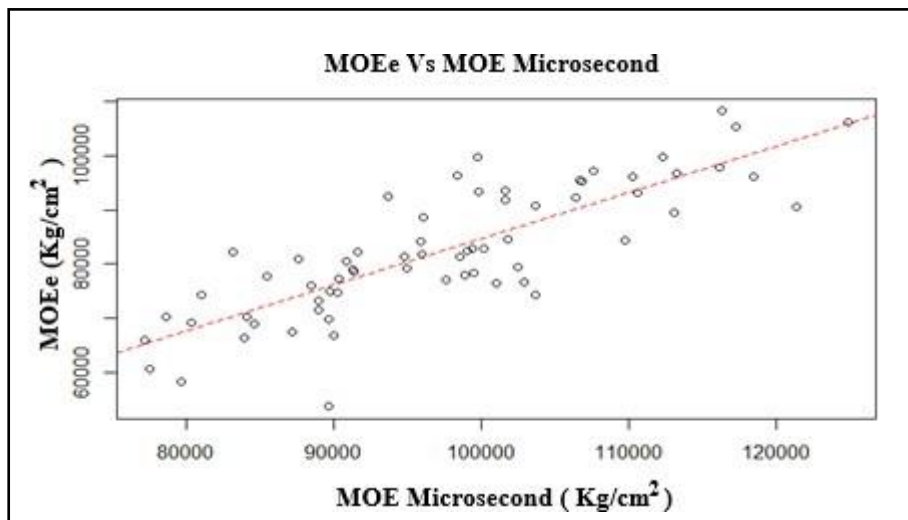


Figura 24: Regresión MOEe-MOE Microsecond Timer Método primario

El estadístico r^2 mide la proporción de variabilidad en MOE que es explicado por el modelo. En este caso r^2 es igual a 0,67 es decir, la variación del MOE del Microsecond explica el 67,3% de la varianza del MOE destructivo. La ecuación **MOE Destructivo=32220+0.7915 MOE Microsecond** expresa que por cada unidad que aumenta el MOE promedio hallado con el Microsecond, el MOE destructivo aumenta en 0,7915 kg/cm².

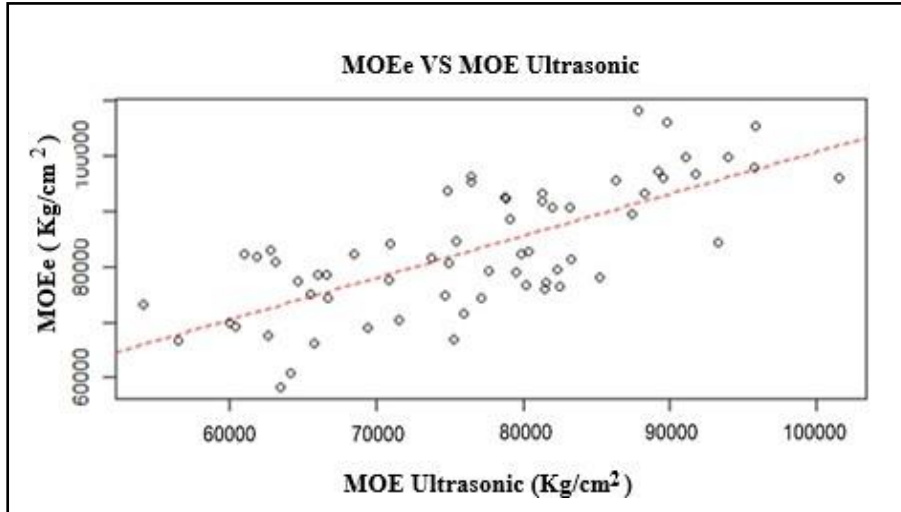


Figura 25: Regresión MOEe-MOE Ultrasonic Timer Método primario

La variación del MOE Ultrasonic explica el 52,64% de la variación del MOE destructivo. La ecuación $MOE \text{ Destructivo} = 24920 + 0.7584 MOE \text{ Ultrasonic}$ expresa que por cada unidad que aumenta el MOE hallado con el Ultrasonic, el MOE destructivo aumenta en 0,7584kg/cm².

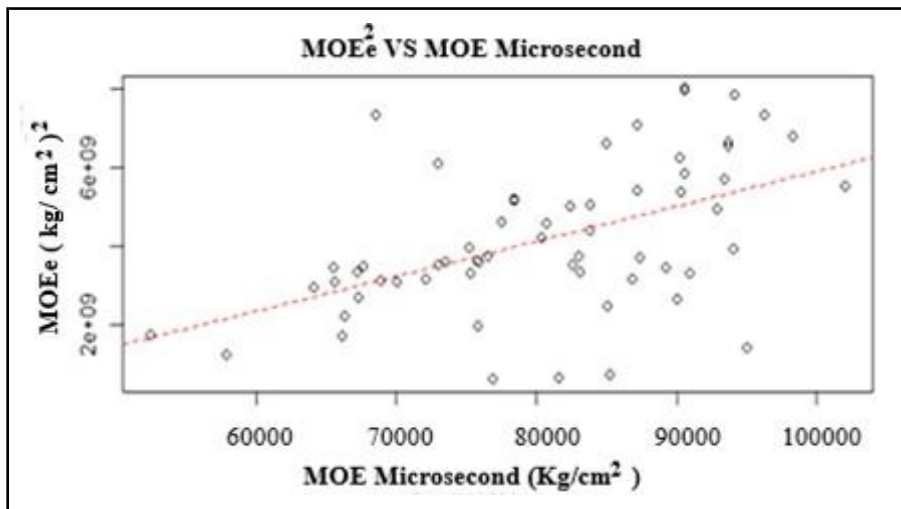


Figura 26: MOEe-MOE Microsecond Timer Método secundario

La variación del MOE del Microsecond explica el 26.12% de la variación del MOE destructivo al cuadrado. La ecuación $MOE^2 \text{ Destructivo} = - 2.99 \times 10^9 + 8.892 \times 10^4 MOE \text{ Microsecond}$ expresa que por cada unidad que aumenta el MOE hallado con el Microsecond, el MOE destructivo aumenta en 8.892×10^4 kg/cm².

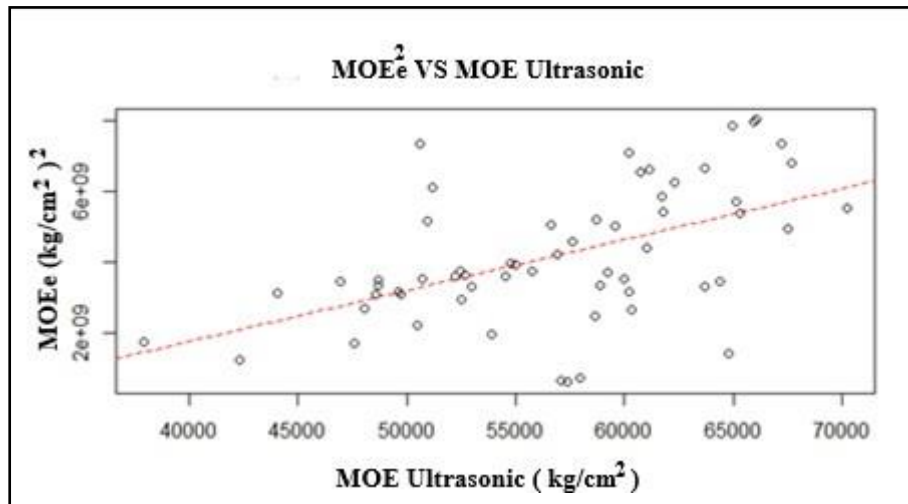


Figura 27: Regresión MOEe-MOE Ultrasonic Timer Método secundario

La variación del MOE del Ultrasonic explica el 28,15% de la variación del MOE destructivo al cuadrado. La ecuación $MOE^2_{Destructivo} = -3.972 \times 10^9 + 1.436 \times 10^7 MOE_{Ultrasonic}$ expresa que por cada unidad que aumenta el MOE hallado con el Ultrasonic, el MOE destructivo aumenta en 1.436×10^7 kg/cm².

4.5.2 Predicción del Módulo de Ruptura (MOR) mediante los módulos dinámicos (MOEd) en probetas Método primario y secundario.

Es menester destacar lo señalado por Halabe *et al.*, citado por Oliveira (2003), que los bajos valores de r^2 ocurren porque la tensión inducida en la madera durante los ensayos dinámicos son muy pequeña es decir, las mediciones dinámicas son basadas en las propiedades mecánicas apenas en el límite elástico. El módulo de ruptura (MOR) se da a mayor tensión y después del límite elástico resultando en pobre correlación con los parámetros de los ensayos no destructivos. Agrega McDonald *et al.*, (1990), que es más difícil relacionar MOR que MOE a partir de técnicas acústicas, pues la presencia de defectos y la inclinación de las fibras tienen efecto más significativo en el MOR que en la velocidad de longitud de onda.

En la tabla 17 se presentan los coeficientes de correlación, determinación y ecuaciones de regresión Lineal MOR vs MOEd, las Figuras 28, 29, 30 y 31 ilustran las ecuaciones de regresión.

Respecto a los MOR estimados por método primario, los coeficientes de determinación, para MOE Microsecond y MOE Ultrasonic fueron de 0.45 y 0.40 respectivamente, valores considerados por Amat (2016), como asociaciones medianas, mientras que los estimados por método secundario, los coeficientes de determinación, para MOE Microsecond y MOE

Ultrasonic, fueron de 0.54 y 0.57 respectivamente, considerados también por Amat (2016) como asociaciones moderadas.

Tabla 17: Coeficiente de determinación, correlación y ecuaciones de regresión lineal MOR vs MOE Método primario y secundario

Método	Equips	Coeficiente de determinación r^2	Coeficiente de correlación r	Ecuación Lineal
Primario	Microsecond	0.45	0.67	$MOR^3 = -3,12 \times 10^8 + 4.795 \times 10^3 \text{ MOE } Microsecond$
	Ultrasonic	0.40	0.63	$MOR = 114,9 + 0,00538 \text{ MOE } Ultrasonic$
Secundario	Microsecond	0.54	0.73	$MOR = -130,1 + 0,007094 \text{ MOE } Microsecond$
	Ultrasonic	0.57	0.75	$MOR = -197,1 + 0,01136 \text{ MOE } Ultrasonic$

La regresión MOR –MOE Microsecond y MOR- Ultrasonic tanto en método primario como secundario podrían presentar una baja correlación consecuencia de características anatómicas propias de la madera joven, como también por la baja densidad de la madera en estudio, la posibilidad de un pobre alcance de la inducción dinámica durante la evaluación dinámica al no poder evaluar la probeta más allá del límite elástico, así como la alta dispersión de los valores MOR podría influir en las r^2 clasificadas como medianas para método primario y moderadas para método secundario.

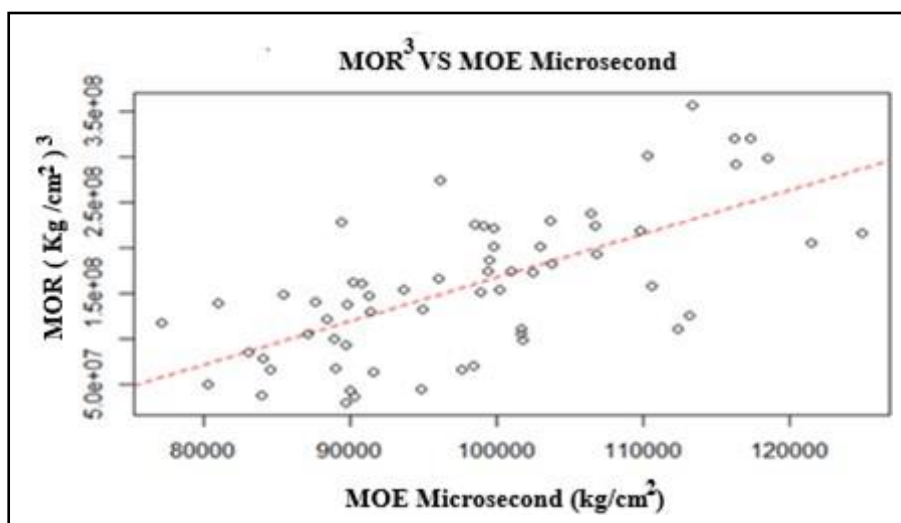


Figura 28: Regresión MOR-MOE Microsecond Timer Método primario

El 44.78% de la variabilidad del MOR es explicado por la variabilidad del MOE Microsecond. La interpretación de la ecuación de regresión $MOR^3 = -3,12 \times 10^8 + 4.795 \times 10^4 MOE \text{ Microsecond}$ es: por cada unidad que aumenta el MOE Microsecond, el MOR^3 aumenta $4,795 \times 10^3$ unidades.

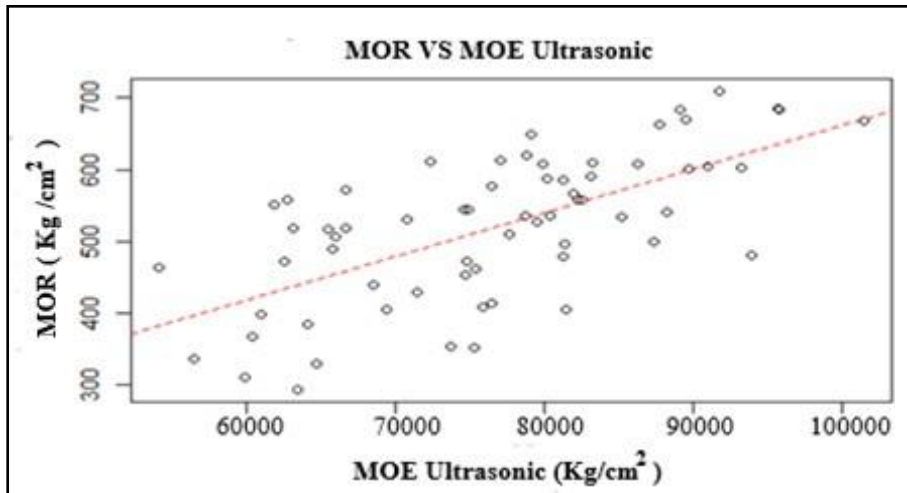


Figura 29: Regresión MOR-MOE Ultrasonic Timer Método primario

El 39.66% de la variabilidad del MOR no es explicado por la variabilidad del MOE con Ultrasonic. La interpretación de la ecuación de regresión $MOR = 114,9 + 0,00538 MOE \text{ Ultrasonic}$ es: por cada unidad que aumenta el MOE Ultrasonic, el MOR aumenta en 0,00538 unidades.

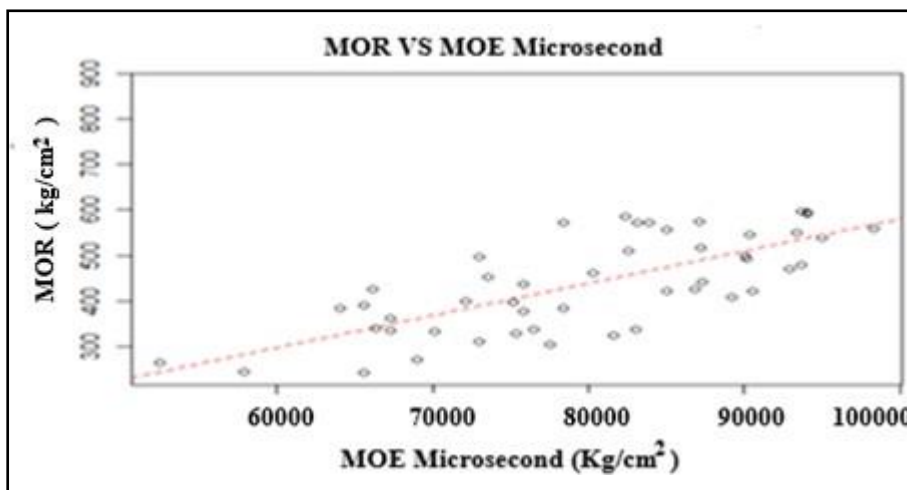


Figura 30: Regresión MOR-MOE Microsecond Timer Método Secundario

El 54,1% de la variabilidad del MOR es explicado por la variabilidad del MOE con Microsecond. La interpretación de la ecuación de regresión: $MOR = -130,1 + 0,007094 MOE$ *Microsecond* es: por cada unidad que aumenta el MOE Microsecond, el MOR aumenta en 0,007094 unidades.

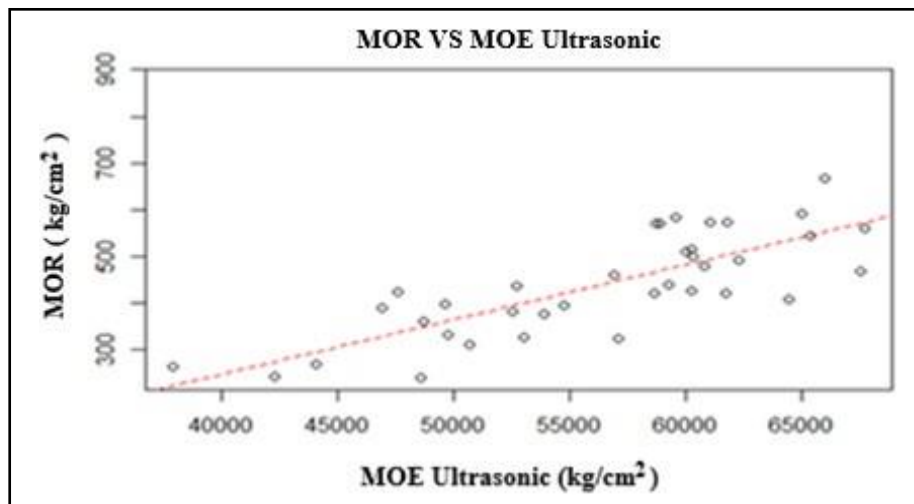


Figura 31: Regresión MOR-MOE Ultrasonic Timer Método secundario

El 57,76% de la variabilidad del MOR es explicado por la variabilidad del MOE con Ultrasonic. La interpretación de la ecuación de regresión es: $MOR = -197,1 + 0,01136 MOE$ *Ultrasonic* es: por cada unidad que aumenta el MOE Ultrasonic, el MOR aumenta en 0,01136 unidades

V. CONCLUSIONES

1. La madera estudiada se puede clasificar como de baja densidad básica , su resistencia y rigidez en flexión estática como bajas y muy bajas.
2. En las evaluaciones de MOE_d , por posiciones de los sensores en las probetas, según el método utilizado y obtenidos con equipos Microsecond timer y Ultrasonic timer; no se encontraron diferencias significativas.
3. El comportamiento en los tres niveles longitudinales en los MOE_d con equipos Microsecond y Ultrasonic timer es similar al mostrado con el MOE_e , tanto en métodos primario como en el secundario.
4. La regresión lineal que mejor estima el MOE_e , es : **$MOE_{Destructivo}=32220+0.7915 MOE_{Microsecond}$** , método primario.

VI. ECOMENDACIONES

1. Las ecuaciones de regresión para estimar el Módulo de rotura por presentar r^2 bajos no es recomendable su uso.
2. Realizar investigaciones adicionales con un mayor número de árboles y consecuentemente mayor número de probetas, según método primario y secundario, que nos permitan asentar mayores estudios comparativos entre ambos métodos.
3. Incidir en estudios que profundicen las metodologías no destructivas que permitan determinar con mayor precisión las técnicas de evaluación considerándose características propias dentro de la metodología de evaluación como ubicación de los sensores en las probetas, tamaños y orientación de las probetas, contenidos de humedad y frecuencia de ondas utilizada por el equipo.

VII. BIBLIOGRAFIA

Acevedo, M.; Kikata, Y. 1994. Atlas de maderas del Perú. Lima, PE, UNALM -Universidad de Nagoya Japón. Lima .PE. 202p.

Acuña, L; Casado, M; Herráez, F; Diez. R; Martin, D; Sánchez del Caño, V. 2009 Caracterización de la resistencia y rigidez a flexión de *Q. pyrenaica* Willd. según diversos métodos de ensayo .Quinto Congreso Forestal Español Montes y Sociedad: Saber qué hacer .Ref.:5CFE01-602. : <https://www.researchgate.net/publication/329990633>

Amat, J. 2016. Correlación lineal y Regresión lineal simple. Easay Web publishing from R. Junio 2019. <https://www.cienciadedatos.net/documentos/24correlacion-y-regresion-lineal> .

Arostegui, A. 1982. Recopilación y análisis de estudios tecnológicos de maderas peruanas. Lima, PE. PNUD-FAO. 57 p.

Arriaga, F; Llana, D. F; Esteban M. y Iñiguez-González, G. 2017. Influence of length and sensor positioning on acoustic time-of-flight (ToF) measurement in structural timber. *Holzforschung*. 0(0), Mayo 29. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0214>

Arroyo, J. 1983. Propiedades físico mecánicas de la madera. Texto para estudiantes de Ingeniería Forestal. UNIANDES. Mérida, Venezuela. 186p.

American society for testing and materials, 2000. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. Designation: D 143 – 94

American society for testing and materials, 2004. Standard practice for sampling forest trees for determination of clear wood properties. Designation: D5536 – 94

Bartholomeu, A; Gonçalves, R; Bucur, V. 2003. Dispersion of ultrasonic waves in Eucalyptus lumber as a function of the geometry of boards. *Scientia Forestalis*, 63,p. 235-240.

Campos, L. 2009 Dendrocronología en árboles de Tornillo, *Cedrelinga cateniformis* Ducke (Fabaceae), del Centro de Investigaciones Jenaro Herrera en el noreste de la Amazonia, Región Loreto Perú. Tesis M.S. Lima, Perú, UNALM. 129 p.

Carnero, P. 2007. Determinación preliminar del módulo de elasticidad mediante el empleo de técnicas no destructivas para maderas tropicales peruanas. Tesis Ing. Forestal. Lima, Perú, UNALM. 62 p.

Chambergo, A.; Aróstegui, A. 1984. Influencia de los elementos xilemáticos en las propiedades físico- mecánicas de 45 maderas del Perú. Revista forestal del Perú. 12(1-2):1-16.

Condori, C. 2007. Propiedades mecánicas de *Cedrelinga cateniformis* Ducke (Tornillo) proveniente de dos tipos de plantaciones y diferentes edades del centro de investigación Jenaro Herrera - Loreto. Tesis Ing. Forestal. Lima. PE, UNALM. 127 p.

Cobas, A; Área, M; Monteoliva, S. 2014. Patrones de variación de la densidad de la madera y morfometría celular de *Salix babylonica* para la determinación de la edad de transición entre madera juvenil y madura. Maderas, Ciencia y Tecnología. 16(3):343-354.

Dávalos, R; Ibárcenas, G. 1999. Clasificación de las propiedades mecánicas de las maderas mexicanas en condición “seca” (en línea). Madera y Bosques vol. 5, pp. 61-69. Consultado 10 Marzo 2009. Disponible en <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/617/50107.pdf>

Divos, F; Tanaka T. 2005 Relation between Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Wood Article in Acta Silvatica et Lignaria Hungarica · Acta Silv. Lign. Hung., Vol. 1 (2005) 105- 110.

Downes, G; Drew, D; Battaglia, M; Schulze, D. 2009 Measuring and modelling stem growth and wood formation: an overview. Dendrochronologia, 27(2): 147-157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2009.06.006>.

Durán, P. 2003. Evaluación de las propiedades mecánicas de la madera de *Cedrelinga cateniformis* Ducke proveniente de plantaciones, con respecto a la influencia de cuatro factores de crecimiento. Tesis Ing. Forestal. Lima, PE. UNALM. 105 p.

Evangelista, F; Afanador, N. 2016. Un enfoque de polinomio de expansión de caos al análisis de la incerteza en elementos estructurales visco elástico. DYNA. 83(199):172-182

Fakopp Enterprise BT. 2005. FAKOPP Microsecond Timer: User's Guide. HU. Fakopp Enterprise publication.

Fakopp Enterprise BT. 2005. FAKOPP Ultrasonic Timer: User's Guide. HU. Fakopp Enterprise publication.

Fernández, D. 2016. Influencia de factores físicos y geométricos en la clasificación estructural de la madera mediante técnicas no destructivas- Tesis Doctoral, Escuela técnica superior de ingeniería de montes, forestal y del medio ambiente natural de Madrid, España. 376p.

Flores, Y. 2018. Árboles Nativos de la Región de Ucayali. Estación Experimental Agraria Pucallpa. Pucallpa, PE. 375p

Haines, D; Leban, J; Herbé, C. 1996. Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. Wood Science and Technology. (30):253-263.

Haygreen, J; Bowyer, J. 1982. Forest products and Wood science. An introduction. Iowa ,US, The Iowa State University. 495 p.

Herrera, Z. 1987. Interrelación entre la densidad básica y las características anatómicas en tornillo (*Cedrelinga cateniformis* Ducke) y Pumaquiro (*Aspidosperma macrocarpon* Mart.) Tesis (Mag.Sc.) Lima, Perú - UNALM. 221p.

Instituto Nacional de Innovación Agraria. 2018. Evaluación del Módulo de Elasticidad del Tornillo *Cedrelinga cateniformis* Ducke proveniente de una plantación en Ucayali mediante técnicas no destructivas. Lima, Perú. Informe técnico N° 02

Iñiguez ,G. 2007. Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural. Tesis doctoral. Escuela técnica superior de Ing. de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. 223 p.

León, W; Espinoza de Pernia,N. 2001. Anatomía de la madera. Mérida, Venezuela, Universidad de los Andes. 510 p.

Lu, J; Jiang, J; Wu, Y; Li, X; Cai, Z. 2012 Effect of moisture sorption state on vibrational properties of Wood. Forest Products Journal. Vol 62 N°3: 171-176.

Mc Donald.K. 1990. Nondestructive testing of Wood products and Structure: State of the art and research needs. Madison, W.L.: US. Department of Agriculture, Forest Service Forest Products Laboratory. P 137-147

Maegling, R. 1987. Juvenile Wood, Tension Wood, and Growth Stress Effects on Processing hardwoods. In: Applying the latest research to Hardwood problems: Proceedings of the 15th annual hardwood symposium of the Hardwood Research Council. Hardwood Research Council. EUA; Memphis, TN. p 100-108.

Marin, R.; Sergués, E.; Monton, J. 2013. Estudios sobre técnicas de ensayo no destructivas (NDT) y semi-destructivas (SDT) con el objetivo de determinar algunas de las propiedades mecánicas de la madera. Universidad Politécnica de Cataluña .Volumen I.

Mora, P. A. 2003. Empleo de Técnicas no Destructivas y Ensayos de tracción en la determinación de Propiedades Mecánicas en Madera de uso Estructural de Pino radiata. Tesis Ing. Talca, Chile. P.20-25

Muñoz F; Neira A; Cancino J. 2010. Efecto del raleo en la densidad básica de la madera de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden. Interciencia, Caracas, Venezuela. Vol. 35, núm. 8. 581-585 p

Navia, F. 2006. Comportamiento del módulo de elasticidad en madera juvenil de *Pinus radiata* D. Don en tres condiciones de sitio. Tesis Ing. Forestal, Universidad Austral de Chile. Facultad de ciencias Forestales. 34 p.

Navarrete, E.; Figueroa, X.; Novoa, P.; Espinosa, M. 2009. Efecto del manejo silvícola y clase de copa sobre la densidad básica de *Eucalyptus nitens*. Curitiba, BR. FLORESTA 39(2): 345 – 354p.

NTP (Normas Técnicas Peruanas). 2014. Método para determinar la densidad. NTP 251.011. Lima, Perú.

_____. 2014. Métodos para determinar el contenido de humedad. NTP 251.010. Lima, Perú.

Oliveira, F. 2003. Avaliação de propriedades mecánicas de madeira por meio de ultra –som (en línea). Disponible en <http://aaende.org.ar/ingles/sitio/biblioteca/material/T-104.pdf>.

Ozuna C. 2017. Particularidades de la Aplicación de las Técnicas no Destructivas en la estimación de Propiedades Mecánicas en piezas de madera de gran longitud procedentes

de estructuras existentes. Proyecto fin de carrera. Ingeniería de Gestión Forestal y Ambiental. Universidad Politécnica de Madrid. 109 p.

Panshin A; De Zeeuw, C. 1980. Textbook of wood technology. 4 th. Ed. New York, US, Me Graw-Hill. 722p.

Pelizan, T. 2004. Estudio de Propiedades Mecánicas de Peças Roliças de *Eucalipto Citriodora* utilizando a Técnica de Ultra-Som. Sao Paolo, Brasil.

Pereyra, O; Gelid, M. 2002. Estudio de la variabilidad de la densidad básica de la madera de *Pinus taeda* para plantaciones de Misiones y norte de Corrientes. Revista Floresta. 33(1):3-19.

Perú Forestal .com. Catálogo de especies. Perú forestal madera, muebles y tecnología 2000-2018 Tropical Forest Business EIRL.Lima –Perú.

Raquelé, T. 2004. Estudo de propriedades mecânicas de peças rolicas de *eucalipto citriodora* utilizando a técnica de ultra-som. Tesis mestre em ciência e engenharia de materiais. Sao Carlos, Brasil, USP.

Reynel, C; Pennington. T; Pennington, T. D; Florez, C.; Daza, A; 2003. Árboles útiles de la amazonia peruana y sus usos. Lima, PE, Darwin initiative ICRAF. 509p

Ross, R. 1999. Using sound to evaluate standing timber. International Forestry Review. 1(1):43-44.

Ross, R; Pellerin, R. 1991. Nondestructive Evaluation of Wood—Past, Present, and Future. In: Ruud C.O., Bussièrè J.F., Green R.E. (eds) Nondestructive Characterization of Materials

IV. Springer, Boston, Estados Unidos.

_____. 1994, Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A review, Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-70 (Rev.), Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, USA.

SERFOR 2010 Anuario Perú Forestal. Dirección General de Información y Ordenamiento Forestal y de Fauna Silvestre (DGIIOGFFS). Lima, Perú.

_____ 2011 Anuario Perú Forestal. Dirección General de Información y Ordenamiento Forestal y de Fauna Silvestre (DGIIOGFFS). Lima, Perú.

_____ 2012 Anuario Perú Forestal. Dirección General de Información y Ordenamiento Forestal y de Fauna Silvestre (DGIIOGFFS). Lima, Perú.

_____ 2013 Anuario Perú Forestal. Dirección General de Información y Ordenamiento Forestal y de Fauna Silvestre (DGIIOGFFS). Lima, Perú.

_____ 2014 Anuario Perú Forestal. Dirección General de Información y Ordenamiento Forestal y de Fauna Silvestre (DGIIOGFFS). Lima, Perú.

_____ 2015 Anuario Perú Forestal. Dirección General de Información y Ordenamiento Forestal y de Fauna Silvestre (DGIIOGFFS). Lima, Perú.

_____ 2016 Anuario Perú Forestal y de Fauna Silvestre. Dirección General de Información y Ordenamiento Forestal y de Fauna Silvestre (DGIIOGFFS). Lima, Perú.

_____ 2017 Anuario Perú Forestal y de Fauna Silvestre. Dirección General de Información y Ordenamiento Forestal y de Fauna Silvestre (DGIIOGFFS). Lima, Perú.

_____ 2018 Anuario Perú Forestal y de Fauna Silvestre. Dirección General de Información y Ordenamiento Forestal y de Fauna Silvestre (DGIIOGFFS). Lima, Perú.

_____ 2019 Anuario Perú Forestal y de Fauna Silvestre. Dirección General de Información y Ordenamiento Forestal y de Fauna Silvestre (DGIIOGFFS). Lima, Perú.

Silva, Z. 2005. Características anatómicas y propiedades físicas de *Cedrelinga cateniformis* Ducke (Tornillo) de diferentes edades, proveniente de plantaciones de Jenaro Herrera. Tesis para optar el título de Ingeniero Forestal. Lima, Perú. UNALM. 105 p.

Soto, L; Valenzuela, L; Lasserre, JP. 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. *Maderas, Ciencia y Tecnología*. 14(2):209-244.

Sotomayor, J. 2014. Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos. 1 ed. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 339 p.

_____. 2015. Comportamiento elástico de la madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 319 p.

_____. 2016. Predicción del módulo de elasticidad de la madera empleando módulos dinámicos. *Ciencia Nicolaita* N° 67: 72 – 83.

Sotomayor, JR; Villaseñor, JM. 2006. Comportamiento viscoelástico de la madera de *Prosopis sp.* *Madera y Bosques*. 12(2):3-15.

_____. 2016. Ultrasonido y anisotropía en madera de *Thuja plicata* y *Acer saccharum*. *Maderas, Cienc. tecnol.* vol.18 no.3 Concepción. UMSNH.

Soudre, K. 2004. Influencia de cuatro factores de crecimiento en la variación de las propiedades físicas en la madera de *Cedrelinga cateniformis Ducke* (Tornillo), de las plantaciones establecidas en el Bosque Alexander Von Humboldt, Ucayali. Tesis Ing. UNALM. Lima ,Perú. 109 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 Ing. Forestal. Lima, Perú, UNALM. 77 p.

Timbersa. 2005. International Grading Comparison . (en línea). Disponible en <http://www.timbersa.co.za/ICD/GradingComparison/gradingcomparison.asp#1-1>

Toro, M ; Velásquez, J.E. 2005. Laboratorio Biotecnológico de Productos forestales. Universidad Nacional Experimental de Guyana. Copérnico Revista Arbitrada Interdisciplinaria, Año II N° 3 Julio – diciembre 2005.

U.S. Department of Agriculture 1974. Wood handbook Agriculture Handbook Wood as an Engineering material US. 454 p.

Vidaurre, A. 1995. Análisis de las características de sitio que prefiere la regeneración natural de *Cedrelinga cateniformis Ducke* (Tornillo). Tesis Ing. Forestal. Lima. PE, Universidad Nacional Agraria La Molina. 128 p.

Vega, N. 2010. Evaluación de las propiedades Físico mecánicas de *Cedrelinga cateniformis (Ducke)* procedente de plantaciones de 20 años del Bosque Nacional Alexander Von Humboldt, Ucayali (Perú). Tesis Ing. Forestal. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 178 p.

Vignote, S; Jiménez, F. 1996. Tecnología de la madera. Madrid. ES. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación .602 p.

Vieira M.; Abreu R .; Diaz B. C ; Caxito de Araujo A.; Macedo A. ; Gherardi P. 2019 Do the Growing Conditions of Trees Influence the Wood Properties Floresta e Ambiente ?. Wood Science and Technology, Review Article.

Wakefield, 1951. The Mechanical and Physical Properties of Canadian Woods in Relation to Their Uses. Canadian Woods; Their Properties and Uses. Forest Products Laboratories, Ottawa – Canada. p. 105 – 114.

Zobel, B. 1992. Silvicultural effects on wood properties. IPEF International. Piracicaba, Vol.2, No.1, pp. 31-38, ISSN 0100-8137. 11 Agrobacterium-Mediated .

VIII. ANEXOS

ANEXO 1

VALORES EXPERIMENTALES METODO PRIMARIO

NIVEL	RESULTADOS FLEXION ESTATICA ARBOL 1 METODO PRIMARIO				RESULTADOS MOE MICROSECONDD TIMER ARBOL 1 METODO PRIMARIO					RESULTADOS MOE ULTRASONIC TIMER ARBOL 1 METODO PRIMARIO			
	MOR(Kg/cm ²)	MOE(Kg/cm ²)	CH%	DB	Densidad Kg/M ³	MOE CENTRO	MOE DERECHO	MOE IZQUIERDO	PROMEDIO MOE MICROKg/cm ²	Densidad Kg/M ³	MOE RAD	MOE TAG	PROMEDIO MOE ULTRA Kg/cm ²
APICAL 1	209.62	84095.19	14.3±0.7	0.42±0.03	494.92	99132	99909.5	99132	99391.17	494.92	62868.14	79002.68	70935.41
	683.76	97222.61	12.8	0.42±0.03	511.31	111637.42	112092.61	110288.34	111339.46	511.31	90640.62	87698	89169.31
	533.5	77997.99	12.4	0.42±0.03	480.75	97939.76	99106.86	103990.25	100345.62	480.75	83283.2	87121.71	85202.45
	509.45	79323.1	14.3±0.7	0.42±0.03	461.17	96980.46	94694.17	95447.2	95707.28	461.17	76821.51	78446.64	77634.07
	586.23	93298.41	14.3±0.7	0.42±0.03	461.87	100721.73	97910.1	100721.73	99784.52	461.87	80919.58	81773.43	81346.51
APICAL 1	527.84	79086.23	13.9	0.42±0.02	499.31	95018.24	94658.67	96477.24	95384.72	499.31	78585.76	80523.52	79554.64
	519.25	80949.59	12.2	0.42±0.02	452.81	89993.91	86598.22	88954.53	88515.55	452.81	51651.19	74634.72	63142.96
	428.63	70343.74	13.8	0.42±0.02	455.6	85173.55	83904.69	87464.38	85514.21	455.6	71224.46	71791.3	71507.88
	536.08	92578.5	14.3±0.4	0.42±0.02	473.87	96028.08	95651.13	95276.39	95651.87	473.87	78424.06	79163.38	78793.72
	536.36	82777.3	13.4	0.42±0.02	474.5	100992.57	98206.7	101400.2	100199.82	474.5	84257.57	76491.65	80374.61
BASAL 1	517.89	74299.58	13.4	0.42±0.01	445.39	82242.12	81630.65	79251.75	81041.51	445.39	66361.22	67110.69	66735.95
	530.37	77700.61	14.4	0.42±0.01	466.46	85809.87	86778.55	83920.54	85502.99	466.46	69741.3	71922.53	70831.92
	489.11	66131.42	13.9	0.42±0.01	430.64	77477.81	77192.7	76909.17	77193.23	430.64	66531.53	65039.67	65785.6
	558.95	82957.42	14.8	0.46	526.85	95490.04	105806.14	96920.58	99405.58	526.85	64622.24	60959.1	62790.67
	516.83	75075.69	14.5	0.42	468.8	88304.76	91037.44	89998.01	89780.07	468.8	57240.19	73753.71	65496.95
	384.63	60723.97	14.6±0.4	0.42±0.01	430.34	78371.06	77218.56	76934.4	77508.01	430.34	63478.73	64867.02	64172.88
	506.25	78559.32	12.3	0.42±0.01	461.66	90693.65	92110.72	91398.06	91400.81	461.66	59917.88	72201.05	66059.47

NIVEL	RESULTADOS FLEXION ESTATICA ARBOL 2 METODO PRIMARIO				RESULTADOS MOE MICROSECOND TIMER ARBOL 2 METODO PRIMARIO					RESULTADOS MOE ULTRASONIC TIMER ARBOL 2 METODO PRIMARIO			
	MOR(Kg/cm ²)	MOE(Kg/cm ²)	CH%	DB	Densidad Kg/M ³	MOE CENTRO	MOE DERECHO	MOE IZQUIERDO	PROMEDIO MOE MICRO Kg/cm ²	Densidad Kg/M ³	MOE RAD	MOE TAG	PROMEDIO MOE ULTRA Kg/cm ²
APICAL 2	479.83	91863.58	15	0.44	511.94	103072.91	95454.69	106377.64	101635.08	511.94	84415.61	78136.08	85435.29
	354.65	81445.92	14.3±0.7	0.42±0.02	485.67	96033.11	99075.55	89345.46	94818.04	485.67	74475.75	73094.74	73785.24
	600.69	106081.95	14.6	0.47	571.13	126750.71	121711.43	126232.83	124898.32	571.13	81468.66	98079.84	89774.25
	557.66	79474.57	14.3±0.7	0.42±0.02	495.1	102469.19	101264.86	103695.13	102476.39	495.1	80783.03	83872.35	82327.69
	683.97	105216.87	12.8	0.42±0.02	517.6	116777.36	119727.41	115343.06	117282.61	517.6	93360.96	98223.99	95792.48
	330.41	77356.11	15.4	0.38	480.15	91132.06	91478.9	88427	90345.99	480.15	56552.27	72856.55	64704.41
	413.79	96310.93	15.2	0.43	505.87	100150.06	97487.12	97487.12	98374.77	505.87	75546.63	77451.22	76498.93
	541.01	93214.58	14.3±0.7	0.42±0.02	485.9	111460.9	106522.67	113819.8	110601.12	485.9	86940.46	89612.78	88276.62
	405.65	77178.16	13.2	0.42±0.02	513.14	97763.71	97024.48	98136.5	97641.56	513.14	84168.25	78903.99	81536.12
	663.48	108171.11	14.8	0.46	536.46	114481.96	116820.66	117776.24	116359.62	536.46	90766.75	84870.03	87818.39
	461.78	84600.99	14.5	0.4	490.74	105147.43	103471.8	96778.96	101799.4	490.74	68084.51	82758.07	75421.29
	352.83	66953.95	14.7	0.43	506.25	90745.23	91756.31	87492.98	89998.17	506.25	78799.96	71779.82	75289.89
	611.9	111992.45	14.9	0.44	402.33	88924.53	89289.34	90025.75	89413.21	402.33	72477.26	72292.96	72385.11
294.02	58248.77	15.5	0.36	430.77	81759.16	79036.56	78159.2	79651.64	430.77	65058.67	61961.38	63510.02	
MEDIO 2	480.03	99735.46	13.12	0.42±0.02	471.29	114399.71	110105.64	112460.77	112322.04	471.29	92637.27	95324.1	93980.69
	500.21	89415.44	13.45	0.42±0.02	534.03	116766.21	112600.46	109945.92	113104.19	534.03	85503.67	89250.76	87377.21
	404.63	68973.08	15.09	0.36	457.37	85088.02	86054.01	82590.16	84577.4	457.37	69507.42	69345.05	69426.23
	709.45	96678.45	14.85	0.46	563.42	114338.29	111268.94	114338.29	113315.17	563.42	93093.02	90462.2	91777.61
	608.93	81293.76	12.64	0.42±0.02	498.42	98053.36	99582.44	98053.36	98563.05	498.42	84958.79	81522.35	83240.57
	607.63	95558.97	14.65	0.42	515.66	106444.31	106866.29	106866.29	106725.63	515.66	86925.72	85689.36	86307.54
	577.66	95295.3	14.34	0.43	476.54	106473.36	110984.45	103059.61	106839.14	476.54	70051.51	82932.73	76492.12
	471.7	93571.93	14.8	0.4	485.18	103123.87	99888.81	101892.55	101635.07	485.18	65183.41	84507.7	74845.56
	670.16	96055.37	12.87	0.42±0.02	491.77	110991.37	112386.01	107396.74	110258.04	491.77	88215.23	90813.02	89514.13
	619.95	92262.42	14.4	0.39	476.26	106130.42	108343.72	104834.84	106436.33	476.26	87046.86	70686.22	78866.54
	397.89	82188	15.57	0.43	496.69	93558.67	91814.83	89454.22	91609.24	496.69	74578.52	47387.94	60983.23
	567.48	90678.52	14.65	0.41	493.18	105523.16	102612.31	103020.72	103718.73	493.18	80080.43	83822.48	81951.46
	226.99	70258.9	15.38	0.38	430.87	78883.36	76588.7	80370.29	78614.12	430.87	45128.97	43123.49	44126.23
	310.36	69815.48	15.64	0.43	493.55	90456.46	91134.03	87498.95	89696.48	493.55	61200.63	58729.4	59965.01
	668.6	96099.02	15.13	0.42	520.79	119646.98	115748.36	120148.12	118514.49	520.79	102365.97	100615.78	101490.88
	684.69	97775.06	14.63	0.44	546.52	116306.9	118194.2	114010.67	116170.59	546.52	95933.56	95529.97	95731.76
	604.68	99780.28	14.3±0.4	0.42±0.02	475.62	101499.34	98308.99	99487.51	99765.28	475.62	92842.55	89278.87	91060.71
	590.21	90568.43	14.58	0.45	536.83	122494.54	116119.56	125615.29	121409.8	536.83	77114.2	89270.4	83192.3
	602.31	84437.4	15.12	0.45	521.77	112248.67	110014.92	106998	109753.86	521.77	96409.41	90053.07	93231.24

NIVEL	RESULTADOS FLEXION ESTATICA ARBOL 2 METODO PRIMARIO				RESULTADOS MOE MICROSECOND TIMER A RBOL 2 METODO PRIMARIO					RESULTADOS MOE ULTRASONIC TIMER A RBOL 2 METODO PRIMARIO			
	MOR (Kg/cm ²)	MOE (Kg/cm ²)	CH%	DB	Densidad Kg/M ³	MOE CENTRO	MOE DERECHO	MOE IZQUIERDO	PROMEDIO MOE MICRO Kg/cm ²	Densidad Kg/M ³	MOE RAD	MOE TAG	PROMEDIO MOE ULTRA Kg/cm ²
BASAL2	571.92	78448.36	15.83	0.42	483.13	99335.69	98556.59	100521.78	99471.36	483.13	57852.33	75468.88	66660.6
	550.65	81846.7	14.9	0.39	476.3	96527.11	96149.68	95401.44	96026.08	476.3	62649.94	61044.75	61847.35
	367.12	69298.79	14.93	0.44	482.82	80220.94	79374.29	81371.05	80322.09	482.82	53866.9	67061.42	60464.16
	649.6	88609.26	14.6±0.4	0.41±0.05	508.04	96679.01	98163.5	93459.58	96100.7	508.04	79422.51	78797.87	79110.19
	607.89	82343.91	14.55	0.41	523.87	100836.48	98566.32	97826.61	99076.47	523.87	78843.21	80966	79904.6
	558.43	76507.79	15.28	0.45	544.83	102392.99	98278.99	102392.99	101021.65	544.83	83481.11	81585.15	82533.13
	463.16	73184.61	12.67	0.41±0.05	504.8	89821.62	87557.98	89492.91	88957.5	504.8	53146.64	55187.65	54167.15
	408.35	71517.83	14.25	0.41±0.05	513.7	89661.04	88692.61	88692.61	89015.42	513.7	70479.5	81398.09	75938.8
	439.16	82151.95	15.3	0.42	509.93	83535.39	82371.15	83535.39	83147.31	509.93	66110.83	70931.95	68521.39
	545.13	74818.65	14.15	0.41±0.05	459.27	91164.54	90461.93	89080.85	90235.77	459.27	74544.6	74755.37	74649.98
	544.44	80568.27	14.65	0.41	488.36	91643.91	88938.71	91990.72	90857.78	488.36	54869.32	94938.37	74903.84
	336.53	66542.62	14.6±0.4	0.41±0.05	442.64	84110.02	80399.74	87401.68	83970.48	442.64	48827.74	64155.11	56491.43
	495.73	76072.89	15.16	0.36	474.59	89971.65	85699.64	89631.81	88434.37	474.59	92545.83	70330.09	81437.96
	586.85	76611.3	14.83	0.39	488.41	104372.24	106076.25	98334.64	102927.71	488.41	80535.02	79852.32	80193.67
	612.43	74431.8	14.8	0.43	535.52	107262.79	100492.13	103200.17	103651.7	535.52	69905.59	84317.35	77111.47
	473.04	67457.86	15.87	0.4	459.88	88389.83	88389.83	84785.81	87188.49	459.88	51807.47	73395.12	62601.3
452.84	53785.79	15.68	0.42	482.03	89203.67	92294.24	87553.32	89683.74	482.03	74528.47	74999.79	74764.13	

ANEXO 2

VALORES EXPERIMENTALES METODO SECUNDARIO

NIVEL	RESULTADOS FLEXION ESTATICA A RBOL 1 METODO SECUNDARIO				RESULTADOS MOE MICROSECOND TIMER ARBOL 1 METODO SECUNDARIO						RESULTADOS MOE ULTRASONIC TIMER ARBOL 1 METODO SECUDARIO		
	MOR (Kg/cm ²)	MOE (Kg/cm ²)	CH%	DB Gr/cm ³	Densidad kg/m ³	MOE CENTRO Kg/cm ²	MOE DERECHO Kg/cm ²	MOE IZQUIERDO Kg/cm ²	MOE MICRO PROMEDIO kg/cm ²	Densidad kg/m ³	MOE RAD KG/CM2	MOE TAG KG/CM2	MOE ULTRA PROMEDIO Kg/cm ³
APICAL 1	515.961	84212.25	13.4	0.40±0.02	443.3	87201.19	87201.19	87201.19	87201.19	443.3	60484.36	59981.72	60233.04
	270.173	55898.5	13.8±0.39	0.40±0.02	405.641	69633.76	72022.39	65199.65	68951.93	405.64	44631.16	43454	44042.58
	243.249	35157.57	14.213	0.312	374.742	58045.23	56951.78	58791.78	57929.6	374.74	42043.04	42525.37	42284.21
	264.487	41749.19	13.8±0.39	0.40±0.02	369.748	53133	53133	51229.88	52498.63	369.75	37882.15	37950.87	37916.51
	466.502	71108.79	13.235	0.378	439.518	82813.76	82813.76	85808.59	83812.04	439.52	57616.16	55585.63	56600.89
	596.09	81492.13	13.5	0.40±0.02	462.808	94835.25	92784.82	93460.85	93693.64	462.81	63945.77	63411.03	63678.4
383.127	71990.62	13	0.40±0.02	423.638	76929.55	81356.26	76929.55	78405.12	423.64	51348.81	50515.91	50932.36	
MEDIO 1	666.571	89302.28	13.208	0.408	477.2	91633.9	92947.63	87248.643	90610.06	477.16	66020.74	65928.18	65974.46
	591.167	88689.29	13.7±0.43	0.40±0.01	506.3	95863.63	92575.25	93869.99	94102.96	506.29	63053.1	66916.2	64984.65
	389.379	58949.12	13.7±0.43	0.40±0.01	402	65571.05	65571.05	65571.049	65571.05	402.03	47046.53	46804.57	46925.55
	337.369	61146.99	13.7±0.43	0.40±0.01	457.6	77518.17	75005.59	77005.656	76509.81	457.63	52363.42	52564.49	52463.96
	548.957	75477.29	12.7	0.40±0.01	469.2	94052.12	92025.93	94052.123	93376.72	469.23	63358.39	66976.19	65167.29
	557.07	81456.72	13.7±0.43	0.40±0.01	444.7	84381.63	83788.44	86818.524	84996.2	444.69	60674.23	61571.99	61123.11
BASAL 1	502.88	59147.54	13.8±0.26	0.39±0.02	420.9	67210.49	66351.58	69432.17	67664.75	420.86	48125.45	49186.55	48656
	554.18	67660.39	14.122	0.364	459.2	81852.85	79655.56	80742.99	80750.47	459.24	57614.71	57653.22	57633.97
	874.95	109843.05	13.858	0.397	473.7	73956.52	73017.4	74913.87	73962.6	473.72	52350.87	50841.21	51596.04
	298.79	60159.29	13.9	0.39±0.02	428.4	76739.24	77267.56	73680.17	75895.66	428.44	53039.65	55972.51	54506.08
	446.07	27370.51	12.95	0.381	461.9	85054.67	83885.55	86854.72	85264.98	461.94	57838.27	58109.49	57973.88
	571.21	72026.63	13.993	0.408	484.7	78925.57	79442.27	76908.39	78425.41	484.7	59333.33	58023.84	58678.58
	509.42	59533.18	12.996	0.392	451.8	83941.55	81641.89	82207.86	82597.1	451.8	60292.25	59632.87	59962.56
	424.5	41345.44	13.5	0.39±0.02	420.1	66755.25	66326.64	65481.73	66187.87	420.06	48652.87	46567.02	47609.95
	376.93	44469.27	13.74	0.365	423.2	76328.57	75290.1	75806.67	75808.45	423.23	54619.84	53133.17	53876.5
	572.97	66265.76	13.214	0.39	453.3	84036.87	81742.45	85821.67	83867	453.25	60989.31	61073.81	61031.56
	398.1	56378.74	13.389	0.339	408.1	70787.17	71753.54	73746.6	72095.77	408.11	51440.55	47819.26	49629.91
	437.06	60429.16	13.492	0.386	441.7	75449.07	75956.29	75956.29	75787.21	441.67	53570.13	51785.73	52677.93
	452.4	60210.24	13.8±0.26	0.39±0.02	434.4	74479.56	76007.3	70162.83	73549.9	434.43	51467.44	53004.97	52236.21
	338.42	47356.67	14.179	0.38	426	67037.85	65340.76	66607.44	66328.68	426.01	50501.95	50403.68	50452.81
334.87	51978.14	14.98	0.342	419.2	68256.11	70088.41	63572.25	67305.59	419.18	49307.93	46733.39	48020.66	

NIVEL	RESULTADOS FLEXION ESTATICA ARBOL 2 METODO SECUNDARIO				RESULTADOS MOE MICROSECOND TIMER ARBOL2 METODO SECUNDARIO						RESULTADOS MOE ULTRASONIC TIMER ARBOL 2 METODO SECUNDARIO		
	MOR (Kg/cm ²)	MOE (Kg/cm ²)	CH%	DB Gr/cm ³	Densidad kg/m ³	MOE CENTRO Kg/cm ²	MOE DERECHO Kg/cm ²	MOE IZQUIERDO Kg/cm ²	MOE MICRO PROMEDIO kg/cm ²	Densidad kg/m ³	MOE RAD KG/CM2	MOE TAG KG/CM2	MOE ULTRA PROMEDIO Kg/cm ³
APICAL 2	332.191	55723.849	14.829	0.378	440.1	70845.69	68164.08	71307.98	70105.92	440.07	50547.21	48876.86	49712.03
	464.936	74259.82	14.5	0.40±0.02	543.4	124062.96	123106.79	120303.69	122491.15	543.4	79707.03	78118.6	78912.82
	260.107	57476.216	13.8±0.39	0.40±0.02	481.2	92856.98	88413.2	91553.74	90941.31	481.16	63858.14	63508.48	63683.31
	375.753	26662.406	14.236	0.401	455.8	75317.19	75317.19	78380.63	76338.38	455.77	55425.53	55462.01	55443.77
	420.761	30505.449	13.62	0.413	483.6	86627.7	85453.1	83174.45	85085.08	483.65	58892.87	58353.81	58623.34
	241.081	55590.874	14.98	0.357	430.9	65171.38	65584.51	66001.58	65585.53	430.94	49529.84	47652.55	48591.19
	311.279	59379.31	13.8±0.39	0.40±0.02	448.7	73788.38	71419.72	73788.38	72998.82	448.72	50215.51	51179.94	50697.73
	303.698	68022.976	13.8±0.39	0.40±0.02	439.2	79602.15	74400.83	78519.14	77507.37	439.23	115648.39	56492.58	86070.49
	421.003	76473.216	14.337	0.405	500.8	90142.3	89528.05	92023.48	90564.61	500.81	60424.74	62998.76	61711.75
	461.719	64869.827	13.781	0.411	476.3	81754.94	80138.74	79087.75	80327.15	476.25	56863.71	56937.92	56900.81
	501.532	85667.586	12.3	0.40±0.02	537.4	96911.35	96248.71	95592.84	96250.97	537.36	69161.02	65304.56	67232.79
	571.485	57784.751	14.236	0.399	464	83687.33	82548.74	83115.11	83117.06	464.04	56916.29	60788.68	58852.49
383.159	24885.929	13.571	0.388	444	77397.79	74847.79	78454.4	76899.99	444.04	57226.98	57538.31	57382.65	
MEDIO 2	327.899	57717.288	13.669	0.39	433.2	75508.65	74498.51	76021.44	75342.87	433.2	51892.18	54094.53	52993.35
	426.481	56217.907	14.029	0.4	457.5	88483.08	86623.59	85416.31	86841	457.49	57356.82	63033.62	60195.22
	433.049	74380.638	13.7±0.43	0.40±0.01	472.5	103038.45	99985.63	103038.45	102020.84	472.55	70996.96	69464.7	70230.83
	574.335	73666.559	13.7±0.43	0.40±0.01	494.4	88561.75	86769.65	86184.36	87171.92	494.45	64905.13	58614.93	61760.03
	584.569	70801.177	13.916	0.429	503.1	83144.25	83144.25	80998.68	82429.06	503.14	59298.07	59839.42	59568.75
	491.683	79154.256	13.7±0.43	0.40±0.01	486.3	93601.59	89106.81	87881.99	90196.8	486.33	60086.99	64455.56	62271.28
	407.414	58774.07	14.013	0.437	495.9	89611.24	88387.89	89611.24	89203.45	495.9	61391.39	67426.41	64408.9
	545.476	73513.183	14.058	0.444	512.1	92168.37	89694.16	89091.18	90317.9	512.07	64804.41	65860.98	65332.69
	383.458	54369.195	13.944	0.355	411.7	64364.46	64364.46	63544.54	64091.16	411.66	53634.36	51371.11	52502.73
	538.49	37880.079	14.599	0.385	477.3	94994.5	92969.8	97086.05	95016.78	477.27	65990.18	63603.43	64796.8
	497.182	78110.663	12.9	0.40±0.01	451.5	73643.69	72220.66	73164.71	73009.69	451.53	50498.17	51896.54	51197.35
	337.71	61341.046	13.7±0.43	0.40±0.01	472	84120.51	85284.79	79693.9	83033.07	471.96	55876.79	55587.75	55732.27
BASAL 2	440.087	60899.725	13.8±0.26	0.39±0.02	495.6	87732.59	86547.03	87732.59	87337.4	495.6	56889.53	61599.42	59244.47
	396.274	63084.693	13.333	0.39	468.8	76961.27	76459.08	72152.41	75190.92	468.79	55321.74	54157.29	54739.52
	559.6	82555.005	13.8±0.26	0.39±0.02	445.3	99065.2	99065.2	96834.91	98321.77	445.28	65836.38	69518.14	67677.26
	499.93	51771.071	13.531	0.442	497.6	90720.21	95296.37	84167.93	90061.5	497.58	61927.58	58681.31	60304.44
	361.36	57957.622	13.74	0.381	441.6	67108.34	67533.75	67108.34	67250.14	441.57	47952.22	49384.68	48668.45
	509.711	89560.342	14.1	0.39±0.02	542.3	89762.06	91566.28	90357.5	90561.95	542.27	64619.82	67534.47	66077.14
	323.56	25639.11	14.643	0.4	471.3	82716.59	81059.54	81059.54	81611.89	471.35	56573.05	57622.76	57097.9
	469.465	70250.696	14.583	0.466	516.5	95497.25	90370.83	92881.02	92916.37	516.53	67943.72	67114.59	67529.15
	478.208	81000.684	13.8±0.26	0.39±0.02	503.4	93980.97	87738.17	99467.77	93728.97	503.36	61657.97	59865.97	60761.97
	644.126	85608.157	13.3	0.39±0.02	436.5	69020.46	68138.42	68577.31	68578.73	436.45	50357.13	50844.69	50600.91
	593.745	62841.831	13.636	0.41	491.7	95564.92	90975.86	95564.917	94035.23	491.69	55268.4	54678.87	54973.63

ANEXO 3

COEFICIENTE DE VARIACION PERMISIBLE PARA MOE Y MOR EN FLEXION ESTATICA SEGÚN WOOD HAMBOOK 1974

Propiedades Mecánicas	Coefficiente de Variación (%)
MOR	16
MOE	22

Fuente : U.S. Department of Agriculture 1974. Wook Hambook Agriculture

ANEXO 4

CLASIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MADERAS MEXICANAS EN CONDICIÓN SECA AL AIRE (CH=12%) DAVALOS IBACRCENAS (1999)

Flexion Estática		Clasificación
Mor kg/cm ²	Moe t/cm ²	
< 550	< 75	Muy bajo
551-800	76-105	Bajo
801-1000	106-125	Medio
1001-1300	126-150	Alto
> 1300	>150	Muy alto

Fuente : Davalos , R; Ibárcena ,G. 1999

ANEXO 5

CLASIFICACIÓN COEFICIENTE DE CORRELACIÓN

Coefficiente de Correlación	Clasificación
0.00- 0.09	Asociación nula
0.1 -0.29	Asociación pequeña
0.30- 0.49	Asociación mediana
0.50- 0.69	Asociación moderada
0.70- 0.89	Asociación alta
0.90- 1.00	Asociación muy alta

Fuente : Amat , J. 2016

ANEXO 6

COMPARACIÓN DE MEDIAS MOE Y MOR POR NIVELES , SEGÚN MÉTODO PRIMARIO Y SECUNDARIO

MÉTODO PRIMARIO – MOE

Prueba de homogeneidad de variancias

Prueba de varianzas iguales: MOE Método primario vs. posición

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Prueba de Levene

	Df	F value	Pr(>F)
group	2	4.1503	0.02019 *
	64		

Prueba de Welch (comparación de medias múltiple)

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una media es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

No se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
POSICIÓN	3	APICAL, BASAL, MEDIO

Prueba de Welch

	GL			
Fuente	Num	GL Den	Valor F	Valor p
POSICIÓN	2	37.5105	14.86	0.000

Comparación de medias post hoc

Comparaciones en parejas de Games-Howell

Agrupar información utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95%

POSICIÓN	Media	Agrupación
APICAL	87896	A
MEDIO	87340	A
BASAL	74568	B

METODO PRIMARIO - MOR

Prueba de homogeneidad de variancias

Prueba de varianzas iguales: MOR Método primario vs. Posición

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Prueba de Levene

	Df	F value	Pr(>F)
group	2	3.0332	0.05514 .
	64		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Prueba de ANOVA (comparación de medias múltiple)

ANOVA unidireccional: MOR Método primario vs posición

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una media es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
POSICIÓN	3	APICE, BASAL, MEDIO

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
POSICIÓN	2	24677	12338	0.97	0.385
Error	64	815276	12739		

MÉTODO SECUNDARIO - MOE

Prueba de homogeneidad de variancias (Prueba de varianzas iguales)

MOE método secundario vs. Posición

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Prueba de Levene

	Df	F value	Pr(>F)
group	2	0.5105	0.6027
	62		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Prueba de ANOVA (comparación de medias múltiple)

ANOVA unidireccional: MOE método secundario vs. posición

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una media es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
POSICIÓN	3	APICE, BASAL, MEDIO

Análisis de Varianza

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
POSICIÓN	2	8.5389e+08	426945714	1.396	0.2553
Residuals	62	1.8961e+10	305829185		

MÉTODO SECUNDARIO – MOR

Prueba de homogeneidad de variancias

Prueba de varianzas iguales: MOR método secundario vs. posición

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Prueba de Levene

	Df	F value	Pr(>F)
group	2	1.2535	0.2926 *
	62		

Prueba de ANOVA (comparación de medias múltiple)

ANOVA unidireccional: MOR método secundario vs. posición

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una media es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
POSICIÓN	3	APICAL, BASAL, MEDIO

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
POSICIÓN	2	179146	89573	6.02	0.004083
Error	62	922809	14884	-	-

Comparación de medias post hoc

Comparación múltiple de medias

Utilizando el método de Tukey-Kramer y una confianza de 95%

	diff	lwr	upr	p adj -
BASAL-APICAL	111.333889	24.90313	197.76464	0.0082334
MEDIO-APICAL	117.117222	21.93479	212.29966	0.0121277
MEDIO-BASAL	5.783333	-83.36318	94.92985	0.9867133

ANEXO 7

COMPARACION DE MEDIAS POR POSICIONES EN PROBETA MOE MICROSECOND Y ULTRASONIC

METODO PRIMARIO

Comparación de medias , MOE Microsecond tres posiciones

Con un F de 2,8683, se puede afirmar, con un 95% de confianza que no existen diferencias significativas entre los promedios de las tres caras (central, izquierdo y derecho).

Analysis of Variance Table					
Response: moe.ms					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
lado	2	7.9283e+08	396413576	2.8683	0.0584 .
Residuals	291	4.0218e+10	138206231	-	-

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Comparación de medias MOE Ultrasonic cara radial y tangencial

Con un valor de $t = -1,4917$, no se puede afirmar, con un 95% de confianza, que existen diferencias significativas entre las medias del MOE dinámico en la cara radial y tangencial.

Two Sample t-test	
data: df\$moe.us by df\$cara	
t = -1.4917, df = 192, p-value = 0.1374	
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0	
95 percent confidence interval:	
-6335.1381 879.0663	
sample estimates:	
mean in group moe_rd_us	mean in group moe_tg_us
72944.53	75672.56

METODO SECUNDARIO

Comparación de medias metodología MOE Microsecond tres posiciones

Con un F de 0.2137, no se puede afirmar, con un 95% de confianza que existen diferencias significativas entre los promedios de las tres caras (central, izquierdo y derecho).

Analysis of Variance Table					
Response: df\$moe.ms					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
df\$lado	2	5.6614e+07	28306901	0.2137	0.8077
Residuals	246	3.2586e+10	132463084	-	-

Comparación de medias MOE Ultrasonic cara radial y tangencial

Con un valor de $t = 0.7438$, no se puede afirmar, con un 95% de confianza, que existen diferencias significativas entre las medias del MOE dinámico en la cara radial y tangencial.

Two Sample t-test	
data: df\$moe.us by df\$cara	
t = 0.74384, df = 164, p-value = 0.458	
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0	
95 percent confidence interval:	
-1840.409 4065.142	
sample estimates:	
mean in group moe_rd_us	mean in group moe_tg_us
58794.93	57682.56

ANEXO 8

COMPARACION DE MEDIAS ENTRE NIVELES LONGITUDINALES MOE DINÁMICO MÉTODO PRIMARIO Y SECUNDARIO

METODO PRIMARIO

MOE Microsecond timer

Anova

	Df	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor P	Significancia
Posición	2	2.2578e+09	1128890055	9.1343	0.0002371	***
Factor (árbol)	1	2.2343e+09	2234256839	18.0783	4.999e-05	***
Residual	94	1.1617e+10	123587920			

Códigos de significancia: '***' 0,001; '**' 0,01; '*' 0,05; '.' 0,1; ' ' 1

Tukey

Treatments with the same letter are not significantly different.

MOE.Micro.Met. primario	groups
APICAL	101395.52 a
MEDIO	98931.37 a
BASE	90295.46 b

MOE Ultrasonic timer

Anova

	Df	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor P	Significancia
Posición	2	1.4335e+09	716725879	6.2012	0.002964	**
Factor (árbol)	1	8.6763e+08	867634225	7.5068	0.007369	**
Residual	93	1.0749e+10	115579105			

Códigos de significancia: '***' 0,001; '**' 0,01; '*' 0,05; '.' 0,1; ' ' 1

Tukey

MOE.Ultra Met. Primario	groups
APICAL	78297.44 a
MEDIO	76351.94 a
BASE	69448.50 b

METODO SECUNDARIO

MOE Microsecon timer

Anova

	Df	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor P	Significancia
Posición	2	271514423	135757212	1.1529	0.320971	
Factor (árbol)	1	1109908171	1109908171	9.4258	0.002933	**
Residual	79	9302385443	117751714			

Códigos de significancia: **** 0,001; *** 0,01; ** 0,05; . 0,1; ' 1

MOE Ultrasonic timer

Anova

	Df	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor P	Significancia
Posición	2	318386217	159193109	3.1439	0.048697	*
Factor (árbol)	1	390920117	390920117	7.7203	0.006857	**
Residual	77	3898917924	50635298			

Códigos de significancia: **** 0,001; *** 0,01; ** 0,05; . 0,1; ' 1

Tuckey

MOE.Ultra.Met. secundario		
MEDIO	60845.73	a
APICAL	57177.22	ab
BASE	56210.20	b

ANEXO 9

COMPARACIÓN ENTRE MÉTODO MOEe Y MÉTODOS MOE MICROSECOND Y MOE UTRASONIC

MÉTODO PRIMARIO

Prueba para verificar normalidad

Shapiro-Wilk normality test

data: rstandard(Modelo)
W = 0.99496, p-value = 0.7407

Prueba para verificar homogeneidad de variancias

H₀: "Las variancias son homogéneas"

H₁: "Las variancias no son homogéneas"

Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)

	Df	F value	Pr (>F)
group	2	0.1832	0.8328
	198		

Comparación de Medias por Métodos

Prueba de hipótesis

H₀: Los tres métodos de ensayo producen promedios similares

H₁: Al menos uno de los tres métodos de ensayo produce promedios diferente"

Anova

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	-
MOE.s	2	1.609e+10	8.044e+09	58.52	<2e-16	***
Residuals	198	2.722e+10	1.375e+08	-	-	-

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Tukey Comparación de las medias de los 3 métodos

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = Valores ~ MOE.s, data = primario)

\$MOE.s

	diff	lwr	upr	p adj
Moe micro.-Moe est.	14719.543	9936.024	19503.061	0.0000000
Moe. Ultra-Moe est.	-6700.259	-11483.777	-1916.741	0.0031922
Moe. Ultra-Moe micro.	-21419.802	-26203.320	-16636.284	0.0000000

MOEe vs. MOE Microsecond

$H_0: \mu_{\text{(moe.estático)}} = \mu_{\text{(moe.microsecond)}}$

$H_1: \mu_{\text{(moe.estático)}} \neq \mu_{\text{(moe.microsecond)}}$

MOEe Vs. MOE Ultrasonic

$H_0: \mu_{\text{(moe.estático)}} = \mu_{\text{(moe.ultrasonic)}}$

$H_1: \mu_{\text{(moe.estático)}} \neq \mu_{\text{(moe.ultrasonic)}}$

MOE Microsecond Vs. MOE Ultrasonic

$H_0: \mu_{\text{(moe.microsecond)}} = \mu_{\text{(moe.ultrasonic)}}$

$H_1: \mu_{\text{(moe.microsecond)}} \neq \mu_{\text{(moe.ultrasonic)}}$

METODO SECUNDARIO

Prueba para verificar normalidad

Shapiro-Wilk normality test

data: rstandard(Modelo2)

W = 0.97528, p-value = 0.00178

Se procedió en la aplicación de Pruebas no Paramétricas.

MOEe Vs. MOE Microsecond

Prueba para verificar simetría de MOEe vs. MOE Microsecond

H_0:"As"=0

H_1:"As"≠0

```
Symmetry test by Miao, Gel, and Gastwirth (2006)
data: moe.estatico$Valores - moe.micro$Valores
Test statistic = -2.2564,      p-value = 0.02404
alternative hypothesis: the distribution is asymmetric.
```

Prueba para comparar medias de MOEe vs. MOE Microsecond

Pueba de Signos

H_0:Med_(moe.estático)=Med_(moe.microsecond)

H_1:Med_(moe.estático)≠Med_(moe.microsecond)

```
The following object is masked from 'package:datasets':
  Orange
Dependent-samples Sign-Test
data: moe.estatico$Valores and moe.micro$Valores
S = 3,      p-value = 4.743e-15
alternative hypothesis: true median difference is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -17610.14 -12934.49
sample estimates:
median of x-y
 -15342.75
```

Achieved and Interpolated Confidence Intervals:

	Conf.Level	L.E.pt	U.E.pt --
Lower Achieved CI	0.9401	-17601.24	-13053.43
Interpolated CI	0.9500	-17610.14	-12934.49
Upper Achieved CI	0.9672	-17625.58	- 12728.29

MOEe Vs. MOE Ultrasonic

Prueba para verificar simetría de MOEe vs. MOE Ultrasonic

H₀: "As"=0

H₁: "As"≠0

Symmetry test by Miao, Gel, and Gastwirth (2006)
data: moe.estatico\$Valores - moe.ultrasonic\$Valores
Test statistic = -1.8126, p-value = 0.06989
alternative hypothesis: the distribution is asymmetric.

Prueba para comparar medias de MOEe vs. MOE Ultrasonic

H₀: Med_(moe.estático)=Med_(moe.Ultrasonic)

H₁: Med_(moe.estático)≠Med_(moe.Ultrasonic)

Asymptotic Wilcoxon signed rank test
data: moe.estatico\$Valores and moe.ultrasonic\$Valores
V = 1511, p-value = 0.001634
alternative hypothesis: true mu is not equal to 0

MOE Microsecond Vs. MOE Ultrasonic

Prueba para verificar simetría de MOE Microsecond vs. MOE Ultrasonic

H₀: "As"=0

H₁: "As"≠0

Symmetry test by Miao, Gel, and Gastwirth (2006)
data: moe.micro\$Valores - moe.ultrasonic\$Valores
Test statistic = -0.38724, p-value = 0.6986
alternative hypothesis: the distribution is asymmetric.

Prueba para comparar medias de MOE Microsecond vs. MOE Ultrasonic

H_0:Med_(moe.microsecond)=Med_(moe.ultrasonic)

H_1:Med_(moe.microsecond)≠Med_(moe.ultrasonic)

Asymptotic Wilcoxon signed rank test

data: moe.micro\$Valores and moe.ultrasonic\$Valores
V = 2079, p-value = 3.697e-12
alternative hypothesis: true mu is not equal to 0

ANEXO 10

ANÁLISIS DE REGRESIÓN MOEd - MOE Y MOR MÉTODO PRIMARIO

MOEe VS MOE MICROSECOND

Análisis de residuales :

Normalidad

```
Shapiro-Wilk normality test
data: ri
W = 0.99, p-value = 0.626
```

Homocedasticidad

```
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 1.22e-05, Df = 1, p = 0.997
```

Anova

```
Analysis of Variance Table  ANOVA

Response: moe_ms

      Df    Sum Sq   Mean Sq    F value    Pr(>F)    -
MOE      1  5742781954  5742781954   131.63   < 2.2e-16  ***
Residuals 64  2792236176   43628690
-----
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Coefficients: Coefficients:
      Estimate Std. Error t value  Pr(>|t|)    -
(Intercept) 3.222e+04  5.748e+03   5.605  4.74e-07  ***
MOE          7.915e-01  6.899e-02  11.473  < 2e-16  ***
-----
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 6605 on 64 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6728,    Adjusted R-squared:  0.6677
F-statistic: 131.6 on 1 and 64 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

MOEe - MOE ULTRASONIC

Análisis de residuales

Normalidad

```
Shapiro-Wilk normality test
data: ri
W = 0.98, p-value = 0.22
```

Homocedasticidad

```
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 0.002 Df = 1, p = 0.96
```

Anova

Analysis of Variance Table ANOVA

Response: moe

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
moe_us	1	4299611227	4299611227	68.907	1.191e-11	***
Residuals	62	3868643618	62397478			-

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	2.492e+04	7.081e+03	3.519	0.000818	***
moe_us	7.584e-01	9.137e-02	8.301	1.19e-11	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 7899 on 62 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.5264, Adjusted R-squared: 0.5187

F-statistic: 68.91 on 1 and 62 DF, p-value: 1.191e-11

Multiple R-squared: 0.4795, Adjusted R-squared: 0.4715

F-statistic: 59.87 on 1 and 65 DF, p-value: 8.537e-11

MOR VS MICROSECOND TIMER

Análisis de residuales

Normalidad

```
Shapiro-Wilk normality test
data: ri
W = 0.97594, p-value = 0.2622
```

Homocedasticidad

```
> ncvTest(mod)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 2.493822, Df = 1, p = 0.11429
```

Anova

```
Analysis of Variance Table  ANOVA

Response: mor^3
```

	Df	Sum Sq	Mean	F value	Pr(>F)	-
moe_ms	1	1.7002e+17	1.7002e+17	48.659	2.753e-09	***
Residuals	60	2.0965e+17	3.4942e+15	-	-	-

```
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> summary(mod)

Call:
lm(formula = mor^3 ~ moe_ms, data = df)

Residuals:

    Min       1Q   Median       3Q      Max
-115364105 -50499641  3198860  41585039 126278539

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)  --
(Intercept) -3.126e+08  6.788e+07  -4.604  2.20e-05 ***
moe_ms       4.795e+03  6.874e+02   6.976  2.75e-09 ***

Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 59110000 on 60 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4478, Adjusted R-squared:  0.4386
F-statistic: 48.66 on 1 and 60 DF, p-value: 2.753e-09
```

MOR VS ULTRASONIC TIMER

Análisis de residuales

Normalidad

```
Shapiro-Wilk normality test
data: ri
W = 0.9607, p-value = 0.05088
```

Homocedasticidad

```
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 0.4801396, Df = 1, p = 0.48836
```

Anova

```
Analysis of Variance Table ANOVA
Response: mor
_____ Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F) _____
moe_us 1 193274 193274 38.116 7.033e-08 ***
Residuals 58 294099 5071 - - -
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> summary(mod)
Call:
lm(formula = mor ~ moe_us, data = df)
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-157.136 -50.865  9.671  51.881 109.213
Coefficients:
_____ Estimate Std. Error t value Pr(>|t|) _____
(Intercept) 1.149e+02 6.796e+01 1.690 0.0963 .
moe_us 5.380e-03 8.715e-04 6.174 7.03e-08 ***
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 71.21 on 58 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.3966, Adjusted R-squared: 0.3862
F-statistic: 38.12 on 1 and 58 DF, p-value: 7.033e-08
```


ANEXO 11

ANÁLISIS DE REGRESIÓN MOE_d VS MOE Y MOR MÉTODO SECUNDARIO

MOE_e VS MOE MICROSECOND TIMER

Análisis de residuales

Normalidad

```
Shapiro-Wilk normality test
data: ri
W = 0.97, p-value = 0.21
```

Homocedasticidad

```
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 3.06, Df = 1, p = 0.08
```

Anova

```
Analysis of Variance Table
Response: moe^2

```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	--
moes_ms	1	5.5649e+19	5.5649e+19	20.862	2.564e-05	***
Residuals	59	1.5738e+20	2.6674e+18	-	-	-

```
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Coefficients:

```

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	--
(Intercept)	-2.994e+09	1.586e+09	-1.887	0.064	.
moes_ms	8.892e+04	1.947e+04	4.568	2.56e-05	***

```
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 1.633e+09 on 59 degrees of freedom
(1 observation deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.2612,    Adjusted R-squared:  0.2487
```

MOEe VS MOE ULTRASONIC TIMER

Normalidad

Shapiro-Wilk normality test
data: ri
W = 0.97, p-value = 0.16

Homocedasticidad

Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 2.59, Df = 1, p = 0.10

Anova

Analysis of Variance Table

Response: moe^2

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	-
mo_e_us	1	5.9915e+19	5.9915e+19	22.726	1.297e-05	***
Residuals	58	1.5291e+20	2.6365e+18			-

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	-
(Intercept)	-3.972e+09	1.723e+09	-2.305	0.0247	*
mo_e_us	1.436e+05	3.011e+04	4.767	1.3e-05	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.624e+09 on 58 degrees of freedom

(1 observation deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.2815, Adjusted R-squared: 0.2691

F-statistic: 22.73 on 1 and 58 DF, p-value: 1.297e-05

MOR VS MICROSECOND TIMER

Análisis de residuales

Normalidad

```
Shapiro-Wilk normality test
data: ri
W = 0.97526, p-value = 0.3865
```

Homocedasticidad

```
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 0.005027867, Df = 1, p = 0.94347
```

Anova

```
Analysis of Variance Table
Response: mor
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)    --
moe_ms  1  283332   283332   55.405  1.744e-09 ***
Residuals 47  240350     5114         -
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Call:
lm(formula = mor ~ moe_ms, data = df)
Residuals:
      Min       1Q   Median       3Q      Max
-125.263  -56.482   -5.428   54.431  144.992
Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)    -
(Intercept) -1.301e+02  7.688e+01  -1.693  0.0971 .
moe_ms       7.094e-03  9.531e-04   7.443  1.74e-09 ***
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 71.51 on 47 degrees of freedom
(10 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.541,    Adjusted R-squared:  0.5313
F-statistic: 55.41 on 1 and 47 DF,  p-value: 1.744e-09
```

MOR VS ULTRASONIC TIMER

Análisis de residuales

Normalidad

```
Shapiro-Wilk normality test
data: ri
W = 0.98843, p-value = 0.9136
```

Homocedasticidad

```
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 0.2374414, Df = 1, p = 0.62606
```

Anova

Analysis of Variance Table

Response: mor

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
moe_us	1	292006	292006	62.902	3.737e-10	***
Residuals	46	213542	4642			-

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

> summary(mod)

Call:

```
lm(formula = mor ~ moe_us, data = df)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-128.074	-38.592	-0.173	50.884	166.243

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
_(Intercept)	-1.971e+02	8.091e+01	-2.437	0.0188	
* moe_us	1.136e-02	1.433e-03	7.931	3.74e-10	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 68.13 on 46 degrees of freedom
(10 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.5776, Adjusted R-squared: 0.5684

F-statistic: 62.9 on 1 and 46 DF, p-value: 3.737e-10