

EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO**



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE EL SALTO

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E
INVESTIGACIÓN**

**Variación de la densidad básica de la madera en
Quercus sideroxyla Humb. & Bonpl. de la región
de El Salto, Durango**

TESIS

**Que como requisito parcial para obtener el grado de
Maestra en Ingeniería Forestal**

Presenta:

BLANCA LIZBETH DELGADO MÁRQUEZ

El Salto, Durango

diciembre de 2025

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE EL SALTO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

La presente tesis titulada:

Variación de la densidad básica de la madera en *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl. de la región de El Salto, Durango

Realizada por:

BLANCA LIZBETH DELGADO MÁRQUEZ

Bajo la dirección del Comité de Tesis indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el Grado de:

MAESTRA EN INGENIERÍA FORESTAL

COMITÉ DE TESIS



Dr. Juan Abel Nájera Luna

DIRECTOR



Dra. Beatriz Díaz Ramírez

ASESORA



M.C. Isaac Rodríguez Reta

ASESOR

El Salto, Durango

diciembre de 2025

DEDICATORIA

A mis padres el Sr. Fernando y la Sra. Blanca, por siempre ser mi más grande apoyo y motivación para poder lograr mis metas. Siempre agradeceré todo lo que hacen por y para mí.

A mis hermanos Carlos y Alexander, por estar en cada paso y logro importante en mi vida, porque a pesar de no siempre estar juntos encuentran la manera de motivarme.

A mi sobrina Fer que, a pesar de no tenerla cerca, ha sido una gran motivación.

A mis amigos Citlalli y Chema por la motivación y el apoyo que recibí de su parte, además de todos los buenos momentos compartidos.

A Emmanuel por haberme ayudado en el proceso de campo, por los buenos momentos y el tiempo que compartimos.

A las personas que directa o indirectamente estuvieron durante el proceso.

A Cloe y Salem por ser mi pequeño rayito de sol en días nublados.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Tecnológico de El Salto por brindarme la oportunidad de cursar mis estudios de maestría.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico brindado para mis estudios de posgrado.

Al ejido El Brillante por la disposición brindada para poder realizar el muestreo para el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Juan Abel Nájera Luna por aceptar ser mi director de tesis, además de su orientación y apoyo brindado para poder concluir este trabajo.

A la Dra. Beatriz Días Ramírez por su disposición para formar parte de mi comité de tesis, por el tiempo requerido para la revisión de este trabajo.

Al M.C. Isaac Rodríguez Reta por aceptar formar parte de mi comité de tesis, y por el tiempo que se tomó para la revisión de este trabajo.

Al Dr. José Villanueva Díaz, por el apoyo brindado para obtener las muestras para la realización de este trabajo.

A todos mis profesores de maestría.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	3
2.1. General.....	3
2.1.1. Específicos	3
2.2. Hipótesis de trabajo.....	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1. Definiciones	4
3.1.1. Madera	4
3.1.2. Propiedades físicas de la madera	4
3.1.2.1. Densidad o peso específico	4
3.1.2.2. Contenido de humedad	5
3.1.2.3. Higroscopicidad	5
3.1.2.4. Estabilidad dimensional.....	5
3.1.3. Gravedad específica y densidad de la madera	6
3.1.3.1. Tipos de densidad	6
3.2. Variabilidad de la densidad	7
3.2.1. Factores intrínsecos que afectan la densidad de la madera.....	9
3.2.2. Factores extrínsecos que afectan la densidad de la madera.....	10
3.2.3. Variación radial y axial de la densidad básica DB en <i>Quercus</i> sp.....	11
3.3. El género <i>Quercus</i> sp.....	12
3.3.1. <i>Quercus sideroxyla</i> Humb. & Bonpl.	13
3.4. Vacíos de investigación sobre variación de la densidad.....	13
4. MATERIALES Y MÉTODOS	15
4.1. Descripción del área de estudio	15
4.1.1. Características físicas y biológicas	16
4.2. Metodología.....	16
4.2.1. Obtención de datos en campo	16
4.2.1.1. Selección de arbolado	16
4.2.1.2. Derribo de arbolado y obtención de muestras	17
4.2.1.3. Trabajo de laboratorio	19
4.2.2. Determinación de la densidad básica de la madera	20
4.3. Procesamiento estadístico	21
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
5.1. Densidad básica de la madera por posición radial	22
5.2. Variación radial de la densidad básica de la madera.....	23
5.3. Densidad básica de la madera por posición axial.....	25
5.3.1. Variación axial de la densidad básica de la madera	27
5.3.2. Densidad básica de la madera de <i>Quercus sideroxyla</i> Humb. & Bonpl por posición radial y axial.....	28
6. CONCLUSIONES.....	33
7. BIBLIOGRAFÍA.....	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características dasométricas de los árboles muestra.	17
Tabla 2. Densidad específica básica radial de <i>Quercus sideroxyla</i> Humb. & Bonpl.	22
Tabla 3. Análisis de varianza para la variación de la densidad de la madera por posición radial.	23
Tabla 4. Variación axial de la densidad de la madera en <i>Quercus sideroxyla</i> Humb. & Bonpl.	25
Tabla 5. Análisis de varianza no paramétrico para la variación axial de la densidad básica en <i>Quercus sideroxyla</i> Humb. & Bonpl.	27
Tabla 6. Densidad básica de <i>Quercus sideroxyla</i> Humb. & Bonpl por posición radial y altura.	30
Tabla 7. Densidad básica de la madera por posición de altura.	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio.	15
Figura 2. Obtención de las muestras en los fustes.	17
Figura 3. Obtención de las muestras de la médula, centro y periferia en la rodaja.	18
Figura 4. Saturación de las muestras en agua hasta peso constante.	19
Figura 5. Proceso vacío aplicado a las muestras.	19
Figura 6. Método de desplazamiento en agua para obtener el volumen de las muestras.	20
Figura 7. Variación de la densidad básica de <i>Quercus sideroxyla</i> Humb. & Bonpl por posición radial y axial.	29

RESUMEN

Con la finalidad de conocer y determinar la variación radial y axial de la densidad básica (DB) en la madera de *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl. y aumentar el conocimiento tecnológico de esta especie, se utilizó una muestra de cinco árboles con diámetro promedio de 33 cm y 16 metros de altura de los cuales se extrajeron 11 rodajas por árbol considerando 11 posiciones en altura por fuste; las rodajas fueron divididas en cuartos de los cuales se utilizó el de mejor calidad para dividirlo en tres secciones en sentido radial (médula, centro y periferia con corteza). La densidad básica se obtuvo mediante la relación del peso seco de las secciones con su volumen en estado saturado. Los resultados mostraron que la densidad básica de la madera de *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl es de 0.67 g cm^{-3} que la posiciona entre las especies de *Quercus* de mayor densidad. En el sentido radial se encontró una ligera disminución en la densidad básica de la médula a la periferia con valores extremos de 0.66 a 0.69 g cm^{-3} ; mientras que el patrón de variación axial de la densidad fue de un incremento de la base hasta el ápice de los fustes con valores extremos de 0.66 a 0.74 g cm^{-3} . Se concluye que es importante considerar la variación radial y axial de la densidad básica para una mayor comprensión ecológica y tecnológica de esta especie.

Palabras clave: Densidad básica, madera, *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl, El Salto, Durango.

ABSTRACT

In order to understand and determine the radial and axial variation in basic density (BD) in the wood of *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl. and to increase the technological knowledge of this species, a sample of five trees with an average diameter of 33 cm and 16 meters in height was used, from which 11 slices were extracted per tree considering 11 positions in height per stem; the slices were divided into quarters, of which the best quality was used to divide it into three sections in a radial direction (pith, center and periphery with bark). The basic density was obtained by relating the dry weight of the sections to their volume in a saturated state. The results showed the basic density of *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl. wood is 0.67 g cm^{-3} , which places it among the *Quercus* species with the highest density. In the radial direction, a slight decrease in basic density was found from the pith to the periphery, with extreme values of 0.66 to 0.69 g cm^{-3} ; while the axial variation pattern in density increased from the base to the top of the stems, with extreme values of 0.66 to 0.74 g cm^{-3} . It is concluded that it is important to consider the radial and axial variation in basic density for a better ecological and technological understanding of this species.

Keywords: *Basic density, wood, Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl, *El Salto, Durango.*

1. INTRODUCCIÓN

La densidad de la madera se define como la masa sobre el volumen y depende del contenido de celulosa, lignina, otros componentes estructurales y de la humedad presente. Para permitir comparaciones intra e interespecíficas, se emplea la densidad básica (DB), que se obtiene al secar la muestra al horno (habitualmente entre 101 y 105 °C) y relacionar esa masa seca con el volumen verde de la muestra (Williamson y Wiemann, 2010; Wiemann y Williamson, 2014).

Por razones prácticas, la DB de la madera suele estudiarse mediante métodos destructivos en discos del fuste inferior o núcleos de incremento, aunque con frecuencia sin considerar su variación radial (desde la médula hacia la corteza) ni axial (a lo largo de la altura del árbol) (Longuetaud et al., 2017) y por lo general se asignan valores promedio específicos a partir de bases de datos independientes de árboles de una categoría taxonómica determinada (Réjou-Méchain et al., 2019) que en ocasiones no representan realmente los valores de la DB en virtud de que se desconoce la temperatura a las que fueron secadas las muestras de madera; de ahí la confusión para determinar si se trata de DB o de la Gravedad Específica (GE). Sin embargo, es importante destacar que la GE no es lo mismo que la densidad de la madera. En el contexto forestal, la GE indica cuánta materia sólida (celulosa, hemicelulosa y lignina) contiene un volumen determinado de madera, lo que refleja la inversión estructural del árbol en soporte mecánico (Williamson y Wiemann, 2010), mientras que la DB refleja la cantidad de materia sólida por unidad de volumen húmedo y depende del contenido de humedad inicial, la proporción de lúmenes y paredes celulares y la composición química de la pared celular (Longuetaud et al., 2017).

La DB se usa ampliamente en biometría forestal y se considera un parámetro puente para las estimaciones de biomasa, porque permite relacionar la masa seca (biomasa) con el volumen comercial medido en campo fundamentales en inventarios, manejo forestal y modelación ecológica, pues la DB explica más del 50% de la variabilidad en

las ecuaciones alométricas que estiman la biomasa aérea de los árboles (Chave et al. 2014).

Así que al utilizar valores promedio de DB para hacer conversiones a biomasa, se corre el riesgo de que dichas estimaciones pueden tener discrepancias y desajustes con los datos en el terreno debido a que la DB de la madera puede variar desde una escala local hasta regional por inconsistencias en el muestreo (Sæbø et al., 2022), y aunque se ha reconocido repetidamente como una fuente potencial de error al estimar la biomasa de los árboles, dichas variaciones siguen siendo poco estudiadas (Bastin et al., 2015).

Por lo que si se quiere hacer una adecuada estimación de la DB de una especie, no hay forma de caracterizarla en toda la sección transversal del fuste sin un disco de madera o un núcleo completo de la médula a la corteza para considerar su variación radial (Williamson y Wiemann, 2010); además, esta variación también sigue patrones axiales o longitudinales a lo largo del fuste de los árboles que están fuertemente correlacionados con la edad, el tamaño y crecimiento del árbol (Lachenbruch et al., 2011). Es por ello que, para reducir las incertidumbres en las estimaciones de las reservas de carbono mediante la biomasa forestal, es necesario analizar las variaciones de la DB en forma radial y axial (Benítez Romero et al., 2024).

En especies del género *Quercus*, los estudios sobre variación radial y axial de la DB no son comunes, pues existe muy poca información al respecto, en particular para la madera de *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl. quien se encuentra relegada a un aprovechamiento industrial maderable y con fines energéticos a pesar del amplio potencial para ser destinada a los servicios ecosistémicos (Pérez Olvera et al., 2015).

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE TRABAJO

2.1. General

Determinar el patrón de variación radial y vertical de la densidad básica de la madera en el fuste de los árboles de *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl. de la región de El Salto, Pueblo Nuevo, Durango.

2.1.1. Específicos

- Determinar la variación de la densidad básica en la madera de *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl. en el sentido radial considerando tres posiciones: médula, centro y periferia.
- Determinar la variación de la densidad básica en la madera de *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl. en el sentido axial considerando once muestras a distintas alturas del fuste.

2.2. Hipótesis de trabajo

La densidad básica de la madera en *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl. es igual a lo largo y ancho del fuste, por lo que no existe una variación significativa tanto en el sentido radial como en el axial.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Definiciones

3.1.1. Madera

Es un material y producto orgánico renovable de origen natural, proveniente de vegetales leñosos, la cual está constituida por células orientadas en direcciones ortogonales, y tiene excelentes propiedades tecnológicas. Desde el punto de vista tecnológico, industrial y comercial, la madera más importante como materia prima para la elaboración de productos, es la que proviene del tronco del árbol (Chudnoff, 1984).

Desde el punto de vista anatómico, las maderas de especies latifoliadas son más complejas que las de especies de coníferas, ya que están constituidas por un mayor número de células para cumplir funciones fisiológicas específicas (Wiedenhoeft, 2010).

3.1.2. Propiedades físicas de la madera

Estas propiedades son las que determinan su comportamiento ante los factores del ambiente, las cuales se determinan mediante la inspección, el peso, la medición y el secado sin que se modifique química y mecánicamente la estructura de la madera ensayada. Las propiedades físicas más importantes son: densidad básica (DB), contenido de humedad (CH), higroscopicidad y estabilidad dimensional (Tamarit Urias y López Torres, 2007).

3.1.2.1. Densidad o peso específico

El valor de la densidad o peso específico puede ser un indicador de propiedades de resistencia, la densidad de la madera es considerada como una de las propiedades físicas más importantes, esto se debe a la relación que tiene con otras propiedades y con la utilización de madera, por lo que cuando se obtienen valores mayores de

densidad quiere decir que se encuentran asociados a mayores resistencias mecánicas y mayores valores energéticos debido a que la densidad o peso específico están relacionados directamente con el contenido de celulosa (Da Silva et al., 2009).

3.1.2.2. Contenido de humedad

El contenido de humedad es la relación entre la masa de agua presente en la madera y la masa de la madera completamente seca, determinada por el método de secado en estufa a $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante el cual es expresado en porcentaje (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2020).

3.1.2.3. Higroscopicidad

La higroscopicidad de la madera se refiere a su capacidad de absorber y liberar humedad del ambiente, afectando directamente sus propiedades físicas y mecánicas, esta característica es fundamental para entender la trabajabilidad, estabilidad dimensional, resistencia mecánica y durabilidad de la madera (De Castro-Silva y Da Silva-Oliveira, 2003).

El intercambio de humedad se realiza por intercambio de vapor de agua en un proceso denominado adsorción y desorción relacionado directamente con la atmosfera, y tiene como factores la humedad relativa y la temperatura (Glass y Zelinka, 2021).

3.1.2.4. Estabilidad dimensional

Se define como la modificación de las dimensiones de la madera por cambios del contenido de humedad y se puede modificar por diferentes métodos, uno de los más importantes es el engrosado de la pared celular, el cual consiste en depositar sustancias químicas dentro de la madera, remplazando parte del agua. Por lo cual la contracción puede ser total o parcialmente eliminada (Sugiyama y Norimoto, 2003).

3.1.3. Gravedad específica y densidad de la madera

La gravedad específica (GE) es uno de los componentes importantes para conocer la calidad y dureza de la madera, además que es una propiedad de gran importancia comercial, la cual se utiliza para estimar bonos de carbono (C) en ecosistemas forestales (Pérez-Alavez et al., 2023). También se conoce como el cociente de la densidad de un material y la densidad del agua a 4° C, esto se debe a que ambas tienen las mismas unidades a su valor dimensional. En el caso de la madera se le conoce como densidad relativa o densidad básica la cual es expresan en g cm^{-3} , kg m^{-3} dado a que es la relación del peso seco y el volumen en verde de la madera. Su valor es de suma importancia, ya que, a partir de esta se puede inferir en sus propiedades físicas y mecánicas, así como también se puede hacer comparaciones entre especies, clasificación de las mismas y se emplea para estimar la biomasa de los árboles y rodales forestales por medio de ecuaciones físicas y empíricas (Bowyer et al., 2003).

3.1.3.1. Tipos de densidad

Se puede decir que la madera presenta densidades diferentes: densidad básica, densidad aparente y densidad seca.

- Densidad básica (DB): La densidad básica es la relación entre la masa seca y el volumen verde, obteniendo una menor densidad de la madera, pues utiliza una relación entre menor masa en un máximo volumen (Trugilho, 2009). Según Kollmann (1959); la densidad básica es la relación entre la masa y el volumen de la madera sin descontar los espacios vacíos, de esa forma se representa la cantidad de materia leñosa por unidad de volumen.
- La densidad aparente (DA): Es la relación entre la masa y el volumen a un contenido de humedad conocido, por debajo del punto de saturación de las fibras la madera puede ganar o perder humedad, esto depende mucho de la humedad relativa local y a medida que la madera pierde agua, tiene un peso y un volumen reducidos; pero si ocurre lo contrario, es decir, que la madera gane

agua, la madera gana peso y volumen de manera proporcional, por lo tanto, la densidad aparente varía con el contenido de humedad (Forest Products Laboratory, 2010).

- La densidad seca (DS): Es la relación entre masa seca y volumen seco. El mayor obstáculo en la determinación de la densidad de la madera y la determinación de su volumen es la forma no definida de las muestras.

3.2. Variabilidad de la densidad

De acuerdo con Panshin y De Zeeuw (1980), la densidad de la madera muestra variaciones con respecto a los sentidos axial y radial de fuste de los árboles debido a diferencias en las características anatómicas y de la composición química de la madera, por lo que no existe un patrón definido para todas las especies, así que es frecuente encontrar en diferentes especies arbóreas patrones complejos, de tal forma que considerando el sentido radial (médula-corteza) es posible observar tres tipos generales de comportamiento:

- El primer comportamiento es cuando la densidad básica se incrementa de la médula hacia la corteza.
- El segundo es cuando se observa una disminución de la densidad básica de la médula y un incremento cerca de la corteza.
- Mientras que el tercer comportamiento se caracteriza por una densidad básica más alta en la médula la cual disminuye hacia la corteza.

Con respecto a los patrones de variación axial (base-ápice), existen los siguientes modelos de variación de la densidad:

- El primero con un decrecimiento uniforme
- El segundo por valores inferiores en la base, seguido de un incremento regular conforme a la altura.

- El tercero con un aumento de la base a la parte apical del fuste, sin un patrón uniforme.

A este respecto, Zobel y Van Buijtenen (2012), indican que la variación de la densidad con la altura está relacionada con la cantidad de madera juvenil que recorre al árbol axialmente como un cilindro interno desde la base hasta el ápice. Es así que las trozas de madera cerca de la copa, que presentan principalmente madera juvenil son de menor densidad, mientras que, en la base, se tiene madera madura con mayor densidad. Además, otro factor que influye es la tasa de crecimiento que es un factor que puede tener influencia en la variabilidad de la densidad básica y por ende en las propiedades de la madera de acuerdo a la especie. Si se toma en consideración la relación densidad o peso específico con las propiedades de resistencia, esas grandes diferencias de peso específico entre madera temprana y madera tardía también implican grandes diferencias en los valores de las diferentes propiedades mecánicas.

Estas variaciones afectan el comportamiento de la madera y, por lo tanto, su eficiencia y procesamiento en utilización, además de eso, también afecta el comportamiento en secado ya que la tasa de contracción mantiene una relación directa con el peso específico (León Hernández, 2010).

Según Panshin y De Zeeuw (1980), más del 90 % del volumen leñoso de una conífera está representado por traqueidas longitudinales y células parenquimáticas radiales, siendo su principal constituyente las traqueidas. Esta homogeneidad estructural puede ofrecer dificultades desde el punto de vista de identificación en base a características de la madera, pero simplifica la interpretación de la relación anatomía-densidad de la madera por lo tanto cualquier variación en sus características va a producir cambios de peso específico o densidad.

En general, se puede decir que las variaciones de la densidad básica se relacionan con las características anatómicas de la madera como la longitud y la anchura de la célula, espesor de pared celular, el diámetro y la proporción de calor y la distribución de estos efectos (Vicente Sangumbe et al., 2019).

Más madera homogénea, con respecto a su densidad en el interior del tronco, sin duda, pueden comportarse mejor en las operaciones de procesamiento y reflejar una mayor uniformidad en las otras propiedades tecnológicas. Las piezas de madera con poca variación en la densidad son adecuadas para aplicaciones que requieren material homogéneo y menos variabilidad de las propiedades físicas y mecánicas (Da Silva Oliveira et al., 2005).

3.2.1. Factores intrínsecos que afectan la densidad de la madera

La variación de la DB está influenciada por una combinación de factores intrínsecos (genéticos y ontogénicos) y extrínsecos (ambientales y silvícolas).

- Especie y genética: Las especies del género *Quercus* presentan por naturaleza una densidad de madera de media a alta en comparación con las coníferas. Es factible implementar estrategias de mejoramiento genético enfocadas en la densidad de la madera, ya que diversos estudios han demostrado que existe variabilidad en distintos niveles y cierto grado de control genético sobre este rasgo, por lo que la identificación y aprovechamiento de esta variabilidad genética permiten plantear programas que busquen incrementar o estabilizar la densidad de la madera según las necesidades productivas y tecnológicas de cada especie (Gutiérrez Vázquez et al., 2010).
- Edad del árbol y posición radial (proceso de maduración): Es uno de los factores más determinantes y en especies latifoliadas como los encinos, es común observar un patrón de variación radial donde la densidad es menor en la médula (madera juvenil) y aumenta hacia el cambium (madera adulta). La edad del árbol, por tanto, influye directamente, ya que árboles más viejos presentan un mayor porcentaje de madera adulta de alta densidad (Cobas et al., 2014).
- Altura en el fuste: La densidad también varía verticalmente, generalmente, la mayor densidad se encuentra en la base del fuste y disminuye con la altura. Esto se debe a las demandas mecánicas y a las diferencias en la longitud y el

tamaño de los elementos anatómicos (vasos, fibras) a lo largo del árbol. Para *Q. sideroxylla*, es probable que esta tendencia se mantenga, aunque la magnitud de la variación necesita ser cuantificada con estudios específicos.

3.2.2. Factores extrínsecos que afectan la densidad de la madera

- Condiciones climáticas y edáficas:
 - Precipitación y disponibilidad hídrica: En condiciones de estrés hídrico moderado (como las que pueden ocurrir en laderas expuestas o suelos someros), el crecimiento radial de los árboles se reduce. Sin embargo, la formación de elementos anatómicos como las fibras (que contribuyen mayormente a la densidad) puede verse menos afectada que la formación de vasos de gran diámetro. Esto puede resultar en la producción de anillos de crecimiento más angostos, pero con una proporción mayor de tejido fibroso, incrementando la densidad local (Zobel y van Buijtenen, 2012).
 - Temperatura: Las temperaturas más bajas, comunes en altitudes mayores, suelen ralentizar el crecimiento y favorecer la formación de madera más densa. La relación entre la densidad y la altitud no es siempre lineal y puede interactuar con otros factores.
 - Fertilidad del suelo: Suelos pobres en nutrientes limitan el crecimiento en volumen, lo que a menudo conduce a una madera más densa, similar al efecto del estrés hídrico.
- Manejo forestal (prácticas silvícolas):
 - Espaciamiento y competencia: La densidad del rodal es un factor clave. En rodales muy densos, la competencia por luz, agua y nutrientes es intensa, lo que genera árboles con copas pequeñas y crecimiento radial lento, produciendo madera de alta densidad. Por el contrario, aclareos silvícolas que reducen la competencia pueden estimular un crecimiento

más rápido, potencialmente disminuyendo la DB, al menos temporalmente. El efecto de las prácticas de aprovechamiento forestal en los encinares de El Salto sobre la calidad de la madera de *Q. sideroxylla* es un área que requiere mayor investigación.

3.2.3. Variación radial y axial de la densidad básica DB en *Quercus* sp.

Zhang et al. (1993) analizaron 20 especies de *Quercus* y encontraron que, en todas ellas, la densidad de la madera aumentaba significativamente desde la médula hacia la corteza. El patrón fue consistente a lo largo de la altura del árbol, aunque la magnitud del cambio variaba entre especies.

Knapic et al. (2014), confirmaron un patrón de aumento radial de la densidad básica, en *Quercus suber*, además destacaron que la variación dentro de un mismo árbol era mayor que la variación entre árboles de una misma parcela, subrayando la importancia de muestrear múltiples posiciones radiales para obtener un valor representativo.

Por su parte Castaño-Santamaría y Bravo (2012) determinaron el contenido de carbono (%C) y la densidad básica (DB) entre distintos tejidos leñosos (corteza, albura y duramen) a lo largo del fuste en *Q. petraea* y *Q. pyrenaica*, para mejorar la precisión en la estimación de las reservas de carbono forestales. Encontraron diferencias significativas en %C y la DB entre tejidos el duramen, la albura y corteza. *Q. petraea* tuvo una DB mayor que *Q. pyrenaica*; el duramen es la parte más densa de la madera y hay variación entre especies; la corteza no debe ser pasada por alto en los cálculos de carbono; tanto el %C como la DB variaron significativamente a lo largo del fuste (desde la base hasta el ápice) lo que influye en las propiedades de la madera y que las estimaciones de carbono son más precisas al usar valores específicos para cada tejido y altura, en lugar de un valor promedio único con lo cual se mejora la exactitud de los inventarios de carbono forestal.

Mientras que Knapic et al. (2011), observaron en *Quercus faginea* un aumento radial de densidad hasta el anillo 15-20, seguido de estabilización o leve descenso; este patrón representa la transición de madera juvenil a madura, común en latifoliadas.

Por lo que respecta a la variación axial, Zhang y Jiang (1998), encontraron en la madera de *Quercus robur* y *Quercus petraea* una disminución significativa y casi lineal de la densidad básica desde la base del árbol hacia el ápice y que la densidad en la base del fuste puede ser entre un 5% y un 15% mayor que la densidad a la altura del pecho (DAP), y aún mayor en comparación con las secciones más altas. Esta disminución está correlacionada con la necesidad de proporcionar una mayor resistencia mecánica en la base del árbol para soportar las cargas de viento y el peso de la copa.

Por su parte Bergès et al. (2000), confirman el patrón de la variación de la densidad en el sentido axial de *Quercus petraea* y lo relacionan con la tasa de crecimiento, donde los anillos de crecimiento más anchos (crecimiento rápido), comunes en las partes altas del fuste, suelen estar asociados con una densidad ligeramente menor.

Miles y Smith (2009) recopilaron extensos datos provenientes de 156 árboles y entre ellos 23 especies de encinos que muestran consistentemente que la gravedad específica (íntimamente relacionada con la densidad básica) es más alta en los tocones y disminuye hacia la parte superior del fuste.

3.3. El género *Quercus* sp

El género *Quercus* pertenece a la familia Fagaceae, la cual cuenta con 500 especies a nivel mundial, en México se localizan 161 especies de tal género, lo cual representa el 32.2% del total de las especies de este género, y de tal cantidad 109 son endémicas (Valencia et al., 2004). México es el país que cuenta con la mayor diversidad de especies del género *Quercus*, en los bosques de clima templado-frío del país, representan el recurso maderable más abundante de las angiospermas (Rzedowski, 1978). En el estado de Durango crecen alrededor de 36 especies de encinos, entre las

que se encuentra *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl, la cual es una especie con amplia distribución en el país (Zavala Chávez, 1995).

3.3.1. *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl.

Árbol de 4 a 27 m, o arbusto de 0.5 a 4 m, pecíolos de 3-9 (-13) x 1-1.5 mm, láminas oblongas, oblongeoladas, u obovadas, de 3-8(-10)x(1-)2-4(-5) cm, gruesas y rígidas, planas o ligeramente convexas, patentes o algo colgantes, el margen con 1-5 aristas o dientes triangulares y aristados en cada lado, en general confinados a la mitad distal, rara vez entero; base de la lámina redondeada o cordada, ápice obtuso, por lo común termina con un diente agudo, nervaduras 5-9 en cada lado, en el haz más pálidas que la epidermis, poco elevadas, las más pequeñas poco impresas, en el envés por lo general más o menos del mismo color que la superficie, prominentes, terminan en el diente o ramificadas y anastomosadas cerca del margen en la parte basal de la lámina, márgenes revolutos, cartilagosos, del color de las nervaduras; haz sublustrosa, verde oscuro (sin brillo y verde amarillento o verde muy pálido cuando seca), glabra al madurar excepto por la presencia de tricomas fasciculados persistentes cerca de las nervaduras en la base, rugulosa, envés con un denso tomento, blanco amarillento a café muy pálido, los pelos fasciculados, sésiles, superpuestos, cubriendo por completo la superficie ampulosa y la epidermis papilosa. Bellotas bianuales, de 10-15 mm de largo, en cúpulas de 10-13 mm de ancho, el borde erecto, solitarias o en pares, casi sésiles o con pedúnculos hasta de 8 mm de largo (González Villarreal, 1986).

3.4. Vacíos de investigación sobre variación de la densidad

Si bien existe una amplia literatura sobre la densidad de la madera de pinos en Durango, los estudios específicos sobre *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl son más limitados. La información disponible a menudo se deriva de investigaciones más amplias sobre ecología o manejo de bosques mixtos existiendo vacíos de conocimiento, por lo que faltan estudios que:

1. Cuantifiquen la variación intra-arbórea (radial y vertical) de la DB en *Q. sideroxylla* de manera sistemática.
2. Modelen la influencia de factores ambientales específicos de El Salto (pendiente, exposición, tipo de suelo) sobre la densidad.
3. Evalúen el impacto de diferentes regímenes silvícolas en la densidad y uniformidad de la madera.
4. Relacionen la densidad con otras propiedades anatómicas (como la frecuencia y diámetro de vasos) para entender mejor los determinantes fisiológicos.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio corresponde a la región forestal de El Salto, Durango, específicamente el ejido El Brillante, el cual se encuentra sobre el macizo montañoso denominado Sierra Madre Occidental dentro del municipio de Pueblo Nuevo al suroeste del estado de Durango, (Figura 1).

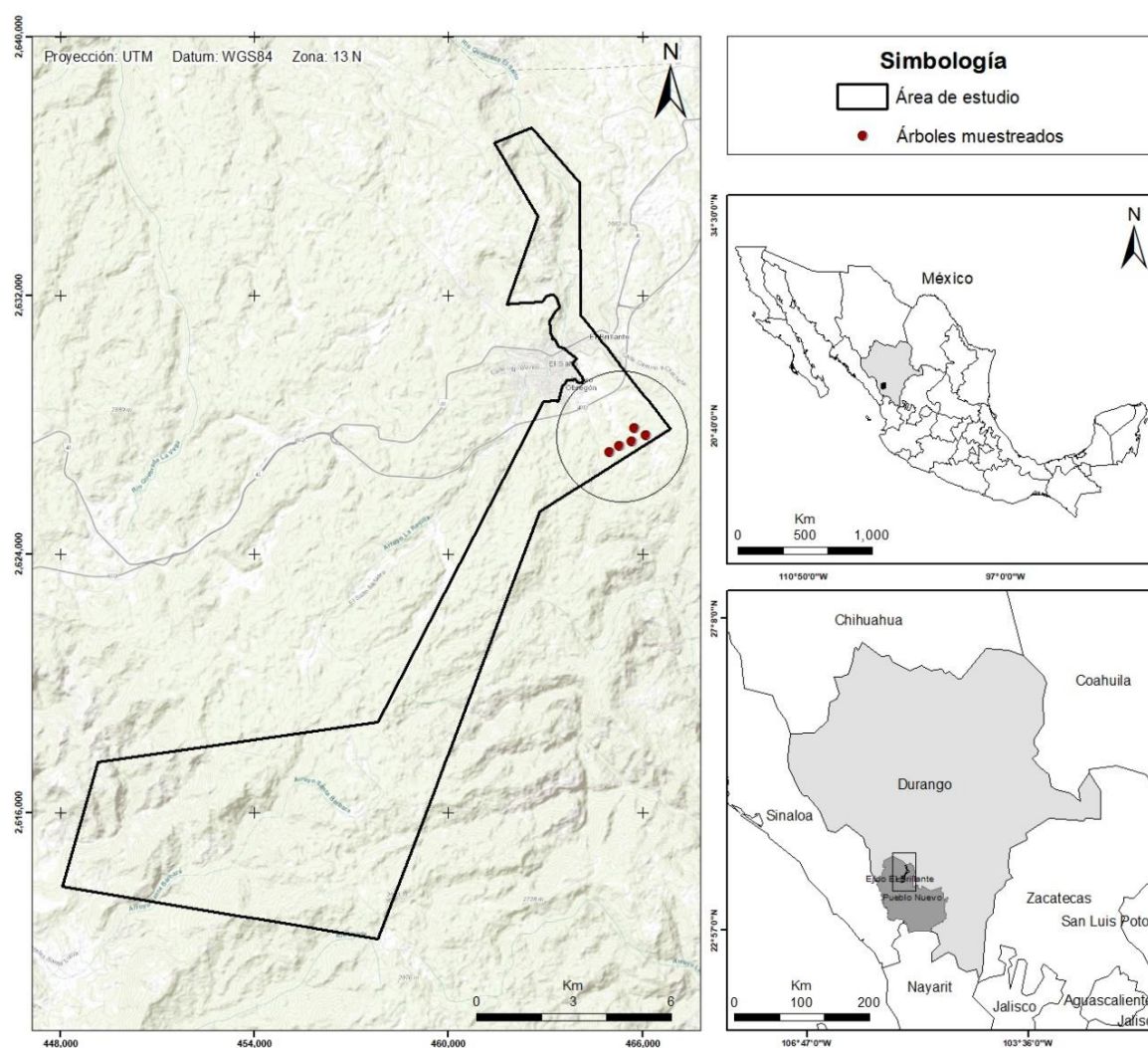


Figura 1. Área de estudio.

4.1.1. Características físicas y biológicas

Se reconocen para el área de estudio las condiciones climáticas siguientes: Semifrío húmedo con lluvias en verano C (E) (m) y templado subhúmedo con lluvias en verano C (w) (INEGI, 2015); presenta una temperatura media anual entre 10 a 18 °C; una precipitación promedio entre 700 y 1 300 mm (González-Elizondo et al., 2007).

Los tipos de suelos que se encuentran con más frecuencia en el área de estudio según las unidades de suelo presentados en los mapas para el estado de Durango son: Luvisol y Regosol (INEGI, 2015); en la mayoría de los casos presentan textura media o fina en menor escala.

El tipo de vegetación corresponde a bosque de coníferas, mezclado algunas veces con latifoliadas, las especies de mayor importancia son: *Pinus cooperi* Blanco, *P. durangensis* Martínez, *P. teocote* Schlecht. y Cham. y *Quercus* spp. (Galarza, 2008).

4.2. Metodología

4.2.1. Obtención de datos en campo

4.2.1.1. Selección de arbolado

La madera utilizada provino de cinco árboles que se colectaron en áreas de corta del ejido El Brillante, Pueblo Nuevo, Durango. El muestreo fue selectivo con la finalidad de tener arbolado con buenas características, preferentemente fuste recto, bien conformados, sin pudriciones internas o externas y sin presencia de enfermedades o plaga.

El registro de los árboles seleccionados incluyó datos geográficos de ubicación, de asociación de especies, ecológicos, de sitio y dasométricos cuyas variables principales fueron diámetros y alturas en diferentes secciones (Tabla 1).

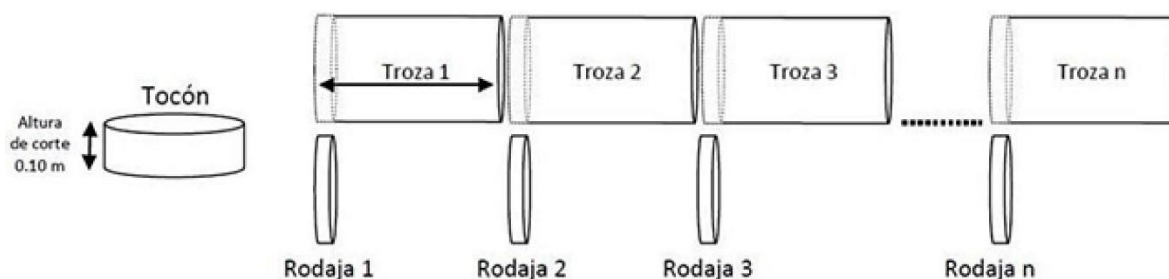
Tabla 1. Características dasométricas de los árboles muestra.

Árbol (n)	Diámetro (cm)	Altura (m)	Muestras (n)
1	34.8	15.2	11
2	25.4	16.2	11
3	39.2	18	11
4	43.5	16.9	11
5	22.1	11.6	11

4.2.1.2. Derribo de arbolado y obtención de muestras

Las muestras a partir de rodajas se obtuvieron por el método destructivo. Antes del derribo de cada árbol seleccionado se midieron tanto el diámetro normal, altura total, diámetro de copa en las direcciones norte-sur y este-oeste, así como las coordenadas UTM.

Posteriormente se procedió al derribo del árbol para desramarlo y hacer las mediciones correspondientes a lo largo del fuste para obtener las rodajas en las diferentes secciones del fuste principal. La primera rodaja se obtuvo después del corte del derribo, la segunda a los 30 cm y la tercera a los 130 cm de altura; después, las siguientes rodajas se extrajeron cada 132 a 254 cm hasta llegar a la punta del árbol (Figura 2).

**Figura 2.** Obtención de las muestras en los fustes.

Cuando se obtuvieron las muestras de cada árbol se marcaron asignándoles una clave a cada muestra, por ejemplo: A1-R1, A1-R2... An-Rn, esto se realizó con la finalidad de identificar cada sección de cada árbol, manteniendo el orden desde el tocón hasta la punta.

La selección de las rodajas se hizo en base a que de cada una se pudiera extraer una tercera parte, para posteriormente dividirla en Médula, centro y periferia. Por lo tanto, solo se seleccionaron 11 rodajas de cada árbol, ya que, si se contemplaba el total de rodajas obtenidas de cada árbol, de las ultimas no se podrían extraer las submuestras para su análisis, debido a que el tamaño de las ultimas rodajas fue muy pequeño. En función de las diferentes alturas representan los porcentajes de (4%, 7%, 9%, 12%, 25%, 38%, 50%, 63%, 76%, 86%, 100%).

Cada rodaja se marcó del centro a la periferia para obtener una figura triangular la cual fue dividida en tres partes: Médula, centro y periferia, con la siguiente clave de identificación: A1-R1M, A1-R1C, A1-R1 P, cabe mencionar que en la parte de periferia se consideró la corteza (Figura 3).



Figura 3. Obtención de las muestras de la médula, centro y periferia en la rodaja.

Posteriormente cada muestra de madera obtenida de la sección triangular (médula, centro y periferia) se sumergieron en agua durante un periodo de 25 días para facilitar la saturación (Figura 4).



Figura 4. Saturación de las muestras en agua hasta peso constante.

4.2.1.3. Trabajo de laboratorio

Adicionalmente al periodo de saturación de la madera, se utilizó una bomba de vacío para someter las muestras a 20 milibares de presión durante 15 minutos con el fin de remover el aire remanente de las cavidades celulares y asegurar una completa saturación de agua (Figura 5).



Figura 5. Proceso vacío aplicado a las muestras.

El volumen saturado de cada muestra (médula, centro y periferia) se obtuvo mediante el método de desplazamiento de agua, este método consiste en colocar un recipiente con agua sobre una balanza (con precisión de 0.0001 g); enseguida se introduce cada muestra de madera sin que toque las paredes ni el fondo del recipiente, de este modo se obtiene el peso del agua desplazada misma que corresponde al volumen saturado de la muestra (V_v), considerando que la densidad de 1 gramo de agua es igual a 1 g cm^3 a 4°C (Valencia Manzo y Vargas Hernández, 1997) (Figura 6).

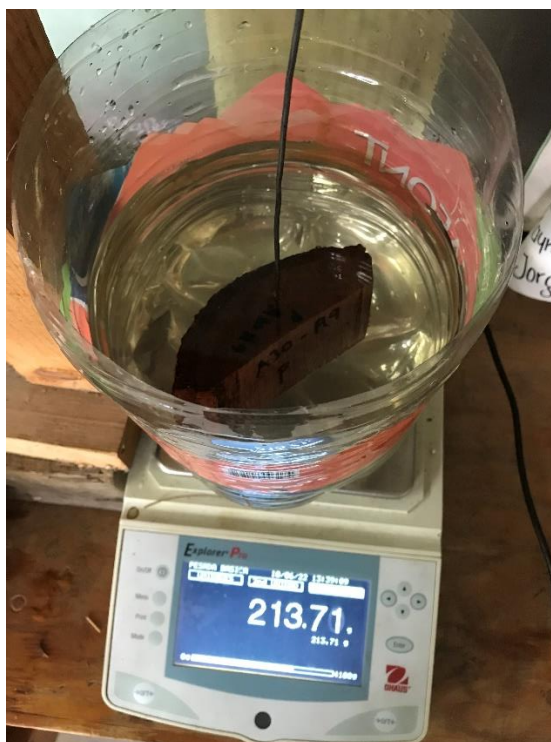


Figura 6. Método de desplazamiento en agua para obtener el volumen de las muestras.

Después de haber obtenido el volumen de cada muestra, se sometieron a un proceso de secado en una estufa de circulación forzada de aire a una temperatura de 103 $\pm$ 2°C hasta conseguir un peso constante.

4.2.2. Determinación de la densidad básica de la madera

La densidad básica de la madera se determinó empleando la fórmula propuesta por Smith (1954); este método se basa en el principio de que cuando la madera está

saturada de agua (punto de saturación de la fibra), los espacios vacíos (lúmenes) están llenos de agua, mientras que la pared celular está en su máxima capacidad de retención hídrica. La densidad de la sustancia de la pared celular es constante para todas las especies (aproximadamente 1.53 g cm^{-3}) (Valencia Manzo y Vargas Hernández, 1997). Conociendo el peso anhidro de la madera y la cantidad máxima de agua que puede contener, se puede calcular su densidad básica con la siguiente estructura:

$$Dm = \frac{1}{\frac{Ps - Pa}{Pa} + \frac{1}{1.53}}$$

Donde:

Dm = densidad básica de la madera (g cm^{-3}).

Ps = peso saturado (g).

Pa = peso anhidro (g).

1.53 = constante de la densidad (peso específico).

4.3. Procesamiento estadístico

Con los datos de la DB por cada árbol y posición radial y axial, se probaron hipótesis de normalidad utilizando la prueba de Shapiro-Wilks modificada, la cual demostró que esta variables no provienen de una población con distribución normal; por tanto, para detectar diferencias estadísticas en la DB de los árboles entre las posiciones radiales (centro, media y periferia) y la posición en altura (4, 7, 9, 12, 25, 38, 50, 63, 76, 86 y 100%), se realizaron análisis de varianza no paramétrica y pruebas de comparación de rangos de la mediana de Kruskal-Wallis con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$. Estos análisis estadísticos fueron realizados con el programa InfoStat versión 2018 (Di Rienzo et al., 2018).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Densidad básica de la madera por posición radial

Los valores de densidad básica (DB) de 0.69 g cm^{-3} (médula), 0.67 g cm^{-3} (centro) y 0.66 g cm^{-3} (periferia) para *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl presentan un patrón de variación radial atípico, puesto que en la mayoría de las especies de maderas duras templadas y tropicales, se observa un incremento en la densidad de la madera desde la médula (madera juvenil) hacia la corteza (madera madura); sin embargo, en *Q. sideroxyla* se observa lo contrario: una ligera disminución en la densidad hacia la periferia tal vez motivado porque en esta zona se incluyó la corteza externa cuya composición comprende el felema como componente principal formada por células muertas compactas pero llenas de aire y paredes impregnadas de suberina, un biopolímero lipídico complejo que es excelente para la impermeabilización, pero químicamente menos rígida y densa que la lignina; además, la presencia de aire en el lumen celular reduce drásticamente la densidad aparente (Graça, 2015) (Tabla 2).

Tabla 2. Densidad específica básica radial de *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl.

Posición radial	Repeticiones (n)	Media (g cm^{-3})	Desviación estándar (g cm^{-3})	Mínimo (g cm^{-3})	Máximo (g cm^{-3})	Mediana (g cm^{-3})
Médula	55	0.69	0.07	0.66	1.04	0.67
Centro		0.67	0.02	0.66	0.72	0.66
Periferia		0.66	0.01	0.65	0.70	0.66
Promedio		0.67	0.04	0.65	1.04	0.66

Este patrón de variación radial en la densidad se atribuye además a características anatómicas específicas, como la duraminización, un proceso metabólico y genético que incrementa la densidad de la médula en especies leñosas de angiospermas que reduce la permeabilidad del duramen y aumenta la densidad al agregar material celular en las cavidades (Taylor et al., 2002; De Micco et al., 2016) y durante la formación del duramen, las células del parénquima de los radios medulares producen y liberan grandes cantidades de taninos condensados y otros polifenoles en el interior de fibras,

traqueidas y vasos que tienen mayor densidad que los componentes principales de la pared celular como la celulosa y hemicelulosas (Magel et al., 1994).

Por otra parte, la pequeña diferencia entre los valores encontrados (0.03 g cm^{-3}) sugiere una notable homogeneidad radial en la densidad que puede ser una ventaja tecnológica, ya que implica una menor variabilidad y mayor estabilidad dimensional de las propiedades mecánicas y de secado a lo ancho de las piezas de madera (Moya y Muñoz, 2010).

Con un valor promedio 0.67 g cm^{-3} , *Q. sideroxyla* cae en la categoría de madera pesada, rozando a la clasificación de muy pesada (Echenique y Plumptre, 1994). Esto la posiciona entre las especies de *Quercus* de mayor densidad junto a *Quercus rubra* quien presenta una $DB \approx 0.56\text{-}0.63 \text{ g cm}^{-3}$ (Panshin y de Zeeuw, 1980); *Quercus alba* con una $DB \approx 0.60\text{-}0.68 \text{ g cm}^{-3}$ (Wiemann, 2010) y *Quercus petraea* ($DB \approx 0.64\text{-}0.72 \text{ g cm}^{-3}$) (Bergès et al., 2008).

Para *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl, se han documentado valores de densidad básica que varían desde 0.61 g cm^{-3} (Ruiz-Aquino et al., 2016; Ordoñez Díaz et al., 2015), 0.66 g cm^{-3} (Pérez Olvera et al., 2015), hasta 0.77 g cm^{-3} (Silva-Arredondo y Návar-Cháidez, 2012). El promedio de estos valores (0.68 g cm^{-3}) es consistente y sensiblemente similar con el promedio obtenido en el presente estudio para la misma especie.

5.2. Variación radial de la densidad básica de la madera

El análisis de varianza no paramétrica permitió observar la existencia de diferencias significativas ($p < 0.0001$) entre la densidad de las tres posiciones radiales (Tabla 3).

Tabla 3. Análisis de varianza para la variación de la densidad de la madera por posición radial.

Variable	Posición	Repeticiones (n)	Media (g cm^{-3})	Medianas (g cm^{-3})	Promedio de rangos*	Gl	H	p
DB	Periferia	55	0.66	0.65	51.93 a	2	46.90	<0.0001
	Centro		0.67	0.66	82.75 b			
	Médula		0.69	0.67	114.32 c			

*Rangos con la misma letra en común no son significativamente diferente, Kruskal Wallis $\alpha=0.05$.

Gl: grados de libertad; H: estadístico de la prueba no corregido por empates; p: significativo ($p < 0.05$); ns: no significativo.

La inclusión de la corteza en las muestras periféricas dentro del análisis estadístico de la variación radial de la densidad de la madera puede considerarse discutible, ya que el patrón interno de densidad podría alterarse debido a que se trata de materiales con diferente composición; sin embargo, este hallazgo es relevante desde un punto de vista biológico y ecológico, pues al calcular la biomasa forestal y el carbono, la corteza debe ser considerada como parte funcional de la densidad, dado que su inclusión o exclusión afecta de manera significativa las estimaciones (Parresol, 1999); por lo que la corteza no debe ser pasada por alto en los cálculos de carbono forestal (Castaño-Santamaría y Bravo (2012).

Así que la inclusión de la corteza externa en el análisis de la densidad radial de *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl no solo confirma las diferencias ontogénicas dentro de la madera, sino que revela la existencia de un sistema compuesto de materiales con funciones especializadas diferentes donde la corteza, como un tejido de baja densidad, y la periferia del leño, como un tejido de mayor densidad, representan los dos extremos funcionales del tronco, uno para protección y el otro de soporte. Reconocer esta dualidad es crucial para una comprensión ecológica completa y para el desarrollo de estrategias de aprovechamiento integral de la especie.

Los valores de densidad básica reportados para *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl ($\sim 0.65\text{-}0.68 \text{ g cm}^{-3}$) no solo la confirman como una de las especies de encino mexicano de mayor densidad, sino que también revelan un patrón radial atípico de homogeneidad o ligera disminución hacia la periferia. Esta combinación de alta densidad y homogeneidad la sitúa a la par de los robles templados de mayor calidad a nivel mundial como *Q. petraea*. Su densidad es una respuesta adaptativa a condiciones ambientales y determina un perfil tecnológico de alta resistencia, pero con desafíos en su transformación. Este conocimiento es vital para una correcta selección de especies en programas de reforestación y para el desarrollo de estrategias de procesamiento industrial que maximicen el valor de esta valiosa especie.

5.3. Densidad básica de la madera por posición axial

El análisis de la densidad básica a lo largo del fuste de *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl reveló un patrón axial que desafía las tendencias comúnmente reportadas en la literatura, ya que se observó que la densidad se mantiene constante (0.66 g cm^{-3}) desde la base hasta el 60% de la altura, para luego incrementarse significativamente (0.74 g cm^{-3}) en el ápice de los fustes (100% de la altura). La inclusión de la corteza externa en el análisis añade una capa de complejidad crucial para interpretar estos resultados ante posibles causas biomecánicas y fisiológicas detrás de este patrón inusual, pues el hallazgo principal de este trabajo contradice el gradiente axial típico descrito para la mayoría de las especies maderables, incluidos muchos encinos, pues se esperaría encontrar un gradiente negativo de densidad con la altura; es decir, la densidad máxima en la base del fuste y una disminución progresivamente hacia el ápice para compensar la necesidad de una mayor resistencia mecánica en la base para soportar las cargas de flexión (Zobel y van Buijtenen, 2012).

Sin embargo, el patrón observado de variación axial con una estabilidad de la densidad de 0.66 g cm^{-3} en los primeros dos tercios del fuste, seguida de un aumento del 12% en el ápice hasta llegar a 0.74 g cm^{-3} , sugiere un cambio dramático en la estrategia de inversión en biomasa o en la influencia de la corteza (Tabla 4).

Tabla 4. Variación axial de la densidad de la madera en *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl.

Altura (%)	Repeticiones (n)	Media (g cm^{-3})	Desviación estándar (g cm^{-3})	Mínimo (g cm^{-3})	Máximo (g cm^{-3})	Mediana (g cm^{-3})
4	11	0.66	0.003	0.65	0.67	0.66
7		0.66	0.003	0.65	0.67	0.66
9		0.66	0.003	0.65	0.67	0.66
12		0.66	0.004	0.65	0.67	0.66
25		0.66	0.005	0.65	0.67	0.66
38		0.66	0.01	0.66	0.69	0.66
50		0.66	0.01	0.66	0.68	0.66
63		0.66	0.01	0.66	0.69	0.66
76		0.68	0.02	0.66	0.72	0.67
86		0.69	0.03	0.66	0.79	0.68
100		0.74	0.11	0.66	1.04	0.69

Tal vez la inclusión de la corteza es la variable más crítica para explicar este patrón donde la corteza, al ser un tejido de muy baja densidad, puede "enmascarar" la densidad real de la madera cuando se mide en el fuste completo ya que es conocido que la proporción de corteza (en volumen o peso) aumenta con la altura del fuste y el diámetro del leño disminuye más rápidamente que el grosor de la corteza hacia la copa (Larson, 1963). El aumento de la densidad en el ápice puede ser una adaptación biomecánica crítica ya que las porciones superiores del árbol (ramas y ápice del fuste) están sujetas a mayores tensiones dinámicas por el viento y una madera apical de mayor densidad proporciona una mayor rigidez y resistencia a la flexión local, evitando el pandeo y el quiebre del fuste principal (Niklas, 1992).

Otra posibilidad es el desarrollo del efecto "mástil de bandera" donde la copa actúa como una palanca que amplifica las fuerzas del viento y para contrarrestar este efecto, el árbol puede reforzar estructuralmente su ápice. Así que el valor de 0.74 g cm^{-3} sugiere una producción de madera con una mayor proporción de fibras de pared gruesa y una menor frecuencia de vasos de gran diámetro en esta sección, una adaptación priorizando la resistencia sobre la conducción (Chave et al., 2009).

Por otra parte, no hay que descartar los factores ontogénicos y de tensión, puesto que el ápice no es simplemente una extensión del fuste principal; es el punto de origen de las ramas y tiene un patrón de crecimiento tensionado, donde la madera en estas zonas a menudo es de reacción o muestra influencias de la tensión mecánica continua, lo que puede inducir una lignificación más intensa y, por tanto, una mayor densidad (Timell, 1986).

Por lo que, lejos de ser una anomalía, el patrón de variabilidad axial encontrado en *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl. revela una sofisticada estrategia de asignación de recursos estructurales, donde la necesidad crítica de estabilidad mecánica en la copa impulsa la producción de una madera de alta densidad, un efecto que se hace visible y cuantificable a pesar del efecto de enmascaramiento de la corteza.

5.3.1. Variación axial de la densidad básica de la madera

El análisis de varianza no paramétrica indicó la presencia de diferencias significativas ($p < 0.0001$) en la densidad básica de la madera de *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl. en función de la altura del fuste. Donde la densidad registrada de la base y la parte media del árbol fue de 0.66 g cm^{-3} ; sin embargo, en la posición correspondiente del 80 al 100% de la altura, se observó un incremento significativo, alcanzando valores de 0.74 g cm^{-3} . Esto sugiere un gradiente vertical diferenciado en la densidad de la madera, con una notable compactación en las regiones apicales (Tabla 5).

Tabla 5. Análisis de varianza no paramétrico para la variación axial de la densidad básica en *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl.

Altura (%)	Media (g cm^{-3})	Medianas (g cm^{-3})	Promedio de rangos*	Gl	H	p
4	0.66	0.66	46.80 a			
9	0.66	0.66	51.03 a			
7	0.66	0.66	52.63 a			
12	0.66	0.66	54.90 a			
25	0.66	0.66	68.80 ab			
50	0.66	0.66	77.83 ab	10	74.90	<0.0001
38	0.66	0.66	79.40 ab			
63	0.66	0.66	90.83 bc			
76	0.68	0.67	116.90 cd			
86	0.69	0.68	130.43 d			
100	0.74	0.69	143.43 d			

*Rangos con la misma letra en común no son significativamente diferente, Kruskal Wallis $\alpha = 0.05$.

Gl: grados de libertad; H: estadístico de la prueba no corregido por empates; p: significativo ($p < 0.05$); ns: no significativo.

La ausencia de diferencias significativas en la densidad de la madera entre la base y la parte media en la altura de los árboles (0.66 g cm^{-3}) sugiere una uniformidad en las condiciones de desarrollo y la función estructural en esta porción del árbol. Este resultado es consistente con lo reportado por Sprengel et al. (2020), quienes, estudiando *Quercus mongolica*, encontraron que la densidad de la madera en la base y el 50% de la altura eran estadísticamente similares. Los autores atribuyen esta homogeneidad a la función mecánica primaria de estas secciones, que actúan como

el pilar principal de soporte del árbol, requiriendo una madera con propiedades consistentes para resistir las tensiones de flexión y compresión.

Por otra parte, las ramas y el ápice del árbol están sujetos a mayores tensiones dinámicas causadas por el viento (efecto palanca), que para contrarrestar estas fuerzas y evitar la ruptura mecánica, el árbol produce madera con características estructurales mejoradas. demostraron en especies de frondosas que la madera de las zonas más altas y las ramas presenta fibras más cortas y una mayor proporción de tejido de pared gruesa, lo que se traduce directamente en una mayor densidad. Este refuerzo estructural asegura la integridad de la copa, la parte más expuesta a agentes externos Savva et al. (2010).

Este gradiente vertical en la densidad tiene implicaciones prácticas directas, donde la madera del ápice, al ser más densa y probablemente con una microestructura diferente, que podría presentar propiedades mecánicas superiores en relación a su volumen, pero también una mayor dificultad para el secado y la impregnación con preservantes. Por lo tanto, para usos donde se requiera una homogeneidad absoluta del material, como en la fabricación de chapas de alta calidad, sería crucial segregar la madera procedente de diferentes alturas del fuste (Gaitán Álvarez et al., 2019).

Así que el patrón de densidad observado no es un hecho aislado y puede interpretarse como una adaptación del árbol para optimizar dos funciones críticas: el soporte estructural en las partes inferiores y la estabilidad mecánica en las partes superiores, más expuestas.

5.3.2. Densidad básica de la madera de *Quercus sideroxylla* Humb.

& Bonpl por posición radial y axial

En cuanto a la variación de la densidad básica de *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl por posición radial y axial combinadas, mostró una variación total de 19.7% desde la base (0.66 g cm^{-3}) hasta el ápice (0.79 g cm^{-3}) con una zona de estabilidad extendida (4-63% de altura) en un rango de densidad entre los $0.66\text{-}0.67 \text{ g cm}^{-3}$ y una variación de 1.4%. Esta homogeneidad inusual sugiere procesos de formación de madera

altamente consistentes en la mayor parte del fuste; otra zona de transición (76% de altura) con valores de densidad registrada en los 0.69 g cm^{-3} con un incremento respecto a zona estable del 3.0%, lo que indica un punto de inflexión crítico que marca el inicio del gradiente positivo hacia el ápice, y una zona apical de alta densidad (86-100% de altura) con valores registrados entre los $0.71\text{-}0.79 \text{ g cm}^{-3}$ un incremento progresivo de 7.6% para la altura de 86% hasta 19.7% al 100% de altura que permite la identificación de tres grupos: 1: Alturas 4-63% (densidades homogéneas); 2: Altura 76% (zona de transición) y 3: Alturas 86-100% (zona apical diferenciada) (Figura 7).

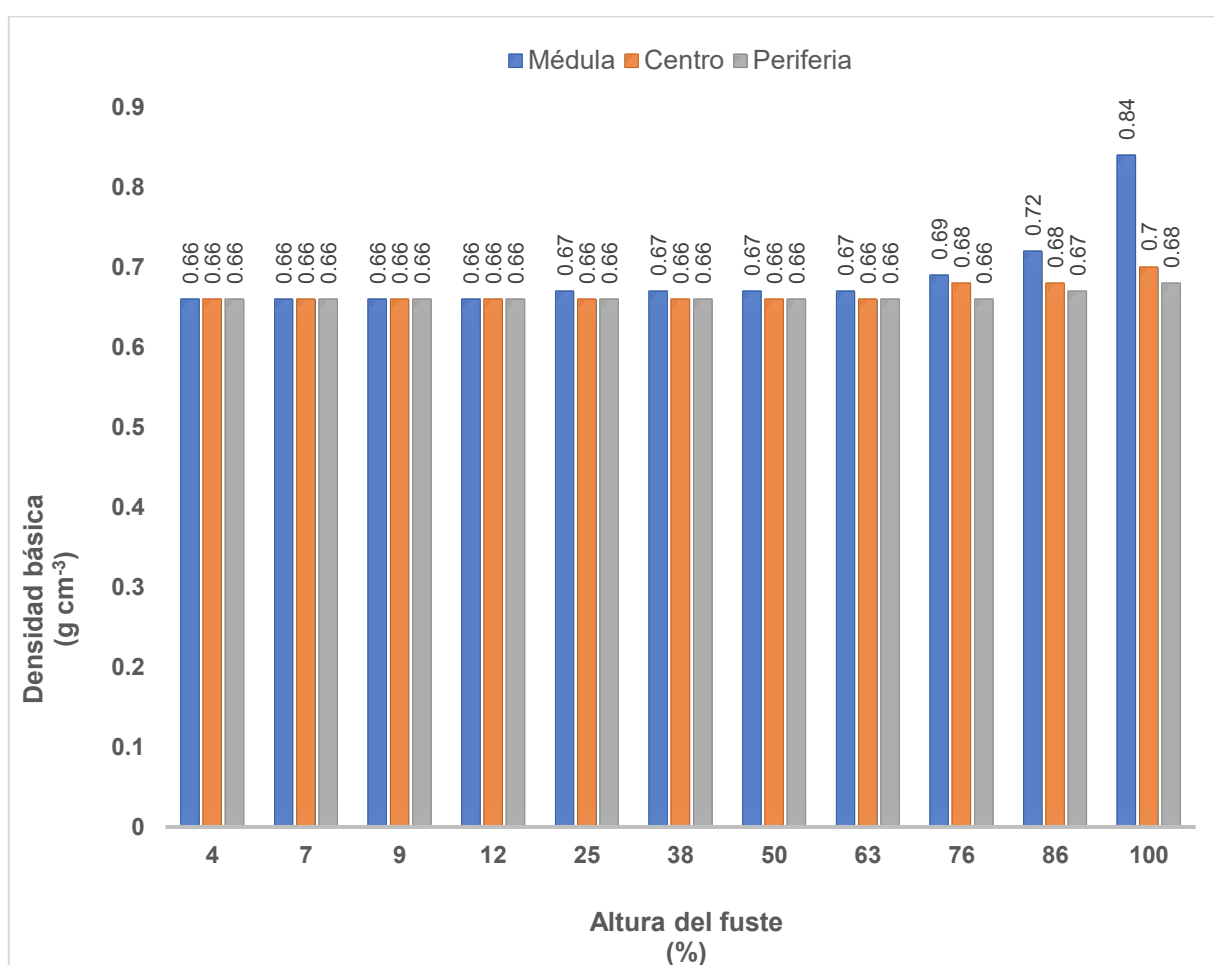


Figura 7. Variación de la densidad básica de *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl por posición radial y axial.

El análisis de varianza no paramétrica para la variación radial por altura de la densidad básica de la madera que *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl mostraron diferencias significativas ($p < 0.0001$) tanto en la médula, el centro y la periferia (Tabla 6).

Tabla 6. Densidad básica de *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl por posición radial y altura.

Posición	Altura %	Media (g cm ⁻³)	Medianas (g cm ⁻³)	Promedio de rangos*	Gl	H	p
Médula	4	0.66	0.66	11.7 a	10	34.23	0.0002
	9	0.66	0.66	14.6 ab			
	7	0.66	0.66	15.2 ab			
	12	0.66	0.66	16.3 ab			
	25	0.67	0.66	23.2 abc			
	50	0.67	0.67	27.4 abcd			
	38	0.67	0.67	29.2 abcd			
	63	0.67	0.67	34.4 bcde			
	86	0.72	0.71	41.6 cde			
	76	0.69	0.69	43.8 de			
	100	0.84	0.79	50.6 e			
Centro	4	0.66	0.66	12.7 a	10	34.75	0.0001
	9	0.66	0.66	13.4 a			
	7	0.66	0.66	15.5 a			
	12	0.66	0.66	18.9 a			
	25	0.66	0.66	23.6 ab			
	50	0.66	0.66	26.1 ab			
	38	0.66	0.66	27.4 abc			
	63	0.66	0.66	30.8 abcd			
	76	0.68	0.67	42 bcd			
	86	0.68	0.68	47.2 cd			
	100	0.70	0.69	50.4 d			
Periferia	7	0.66	0.66	14.1 a	10	34.13	0.0002
	4	0.66	0.66	15.6 a			
	12	0.66	0.66	16 a			
	9	0.66	0.66	16.6 a			
	25	0.66	0.66	20.9 a			
	38	0.66	0.66	26.5 ab			
	50	0.66	0.66	27 abc			
	63	0.66	0.66	32.3 bc			
	76	0.66	0.66	40.8 bc			
	86	0.67	0.67	47.6 c			
	100	0.68	0.67	50.6 c			

*Rangos con la misma letra en común no son significativamente diferente, Kruskal Wallis $\alpha = 0.05$.

Gl: grados de libertad; H: estadístico de la prueba no corregido por empates; p: significativo ($p < 0.05$); ns: no significativo.

En cuanto a la variación radial por cada altura estudiada, el análisis de varianza no mostró la existencia de diferencias significativas ($p > 0.0001$) para la densidad básica de la médula, centro y periferia en las alturas del 4 y 86%; mientras que en las restantes alturas si se presentaron (Tabla 7).

Tabla 7. Densidad básica de la madera por posición de altura.

Posición	Altura (%)	Media (g cm^{-3})	Medianas (g cm^{-3})	Promedio de rangos*	Gl	H	p
Periferia	4	0.66	0.66	4.90	2	5.71	0.0571 ^{ns}
Centro		0.66	0.66	7.50			
Médula		0.66	0.66	11.60			
Periferia	7	0.66	0.66	3.60 a	2	10.14	0.0062
Centro		0.66	0.66	7.80 a b			
Médula		0.66	0.66	12.60 b			
Periferia	9	0.66	0.66	4.20 a	2	7.62	0.0220
Centro		0.66	0.66	7.80 ab			
Médula		0.66	0.66	12.00 b			
Periferia	12	0.66	0.66	4.20 a	2	6.14	0.0458
Centro		0.66	0.66	8.70 a b			
Médula		0.66	0.66	11.10 b			
Periferia	25	0.66	0.66	4.00 a	2	8.88	0.0117
Centro		0.66	0.66	7.60 a b			
Médula		0.67	0.66	12.40 b			
Periferia	38	0.66	0.66	4.00 a	2	9.38	0.0091
Centro		0.66	0.66	7.40 a b			
Médula		0.67	0.67	12.60 b			
Periferia	50	0.66	0.66	3.80 a	2	9.74	0.0077
Centro		0.66	0.66	7.60 a b			
Médula		0.67	0.67	12.60 b			
Periferia	63	0.66	0.66	3.80 a	2	10.26	0.0059
Centro		0.66	0.66	7.40 a b			
Médula		0.67	0.67	12.80 b			
Periferia	76	0.66	0.66	3.80 a	2	8.82	0.0121
Centro		0.68	0.67	8.00 a b			
Médula		0.69	0.69	12.20 b			
Periferia	86	0.67	0.67	5.00	2	4.22	0.1212 ^{ns}
Centro		0.68	0.68	8.20			
Médula		0.72	0.71	10.80			
Periferia	100	0.68	0.67	4.60 a	2	8.82	0.0121
Centro		0.70	0.69	7.60 a b			
Médula		0.84	0.79	11.80 b			

*Rangos con la misma letra en común no son significativamente diferente, Kruskal Wallis $\alpha=0.05$.

Gl: grados de libertad; H: estadístico de la prueba no corregido por empates; p: significativo ($p < 0.05$); ns: no significativo.

El patrón de variación axial de la densidad básica según la posición radial en la madera contradice el modelo clásico de gradiente de crecimiento en coníferas, pero está documentado en diversas frondosas como el género *Quercus* (Panshin y de Zeeuw, 1980). Por ejemplo, Zhang (1995), en un estudio sobre *Quercus rubra*, encontró que la densidad básica tendía a aumentar desde el DAP (diámetro a la altura del pecho) hacia la base y desde el DAP hacia el ápice, mostrando el punto de menor densidad en la zona media-baja del fuste. Los valores reportados en este estudio (0.66 base-0.67-centro-0.71 g cm⁻³ ápice) encajan perfectamente en este modelo, donde la densidad mínima no está en el ápice, sino en una posición más baja tanto en la médula, el centro y la periferia de la zona radial.

Zobel y van Buijtenen (2012) explican que, en frondosas, la variación axial es menos predecible y está fuertemente influenciada por la proporción de madera juvenil. La madera formada en la parte inferior del árbol cuando es joven (albura juvenil) suele ser menos densa. A medida que el árbol crece en altura, el meristemo apical produce madera que, desde el momento de su formación, es estructuralmente más madura (con fibras más largas y paredes más gruesas), lo que resulta en una mayor densidad en las secciones superiores.

El patrón axial de su *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl es consistente con la literatura para el género y sugiere que la madera apical es estructuralmente más densa, posiblemente como una adaptación para soportar las fuerzas de flexión en la copa.

Con lo anteriormente expuesto se tiene evidencia suficiente para rechazar la hipótesis de trabajo planteada en el presente estudio referente a que la densidad básica de la madera de *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl es igual a lo largo y ancho del fuste, ya que se encontró una variación significativa tanto en el sentido radial como en el axial en los fustes.

6. CONCLUSIONES

- El valor promedio encontrado en la densidad básica de *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl fue de 0.67 considerándose como una madera pesada a altamente pesada.
- *Q. sideroxyla* Humb. & Bonpl presenta un patrón de variación radial atípico caracterizado por una disminución ligera de la densidad básica de la médula a la periferia con valores de 0.69 g cm⁻³ (médula), 0.67 g cm⁻³ (centro) y 0.66 g cm⁻³ (periferia).
- *Q. sideroxyla* Humb. & Bonpl reveló un patrón de variación axial de un aumento de la densidad básica conforme se incrementa la altura que desafía las tendencias reportadas en la literatura, con tres zonas bien diferenciadas a lo largo del fuste, pues en alturas del 4 al 63% se encontraron densidades homogéneas (0.66 g cm⁻³); en la altura del 76% una zona de transición y en alturas de 86 a 100% una zona apical diferenciada con mayor densidad (0.74 g cm⁻³).

7. BIBLIOGRAFÍA

- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2020). *ASTM D4442-20: Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-based materials*.
- Bastin, J. F., Barbier, N., Réjou-Méchain, M., Fayolle, A., Gourlet-Fleury, S., Maniatis, D., ... & Bogaert, J. (2015). Seeing central african forests through their largest trees. *Scientific reports*, 5(1), 13156.
- Benitez Romero, F. M., Thais de Nazaré Oliveira Novais, T.N., Gonçalves Jacovine, L.A., Braga Bezerra, E., Barbosa de Castro Lopes, R., Sousa de Holanda, J., Flores Reyna, E., & Fearnside, P.M. (2024). Wood basic density in large trees: Impacts on biomass estimates in the Southwestern Brazilian Amazon. *Forests*, 15(5), 734.
- Bergès, L., Dupouey, J. L., & Franc, A. (2000). Long-term changes in wood density and radial growth of *Quercus petraea* Liebl. in northern France since the middle of the nineteenth century. *Trees*, 14(7), 398-408.
- Bergès, L., Nepveu, G., & Franc, A. (2008). Effects of ecological factors on radial growth and wood density components of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) in Northern France. *Forest Ecology and Management*, 255(3-4), 567-579.
- Browyer, J. L., Shmulsky, R., & Haygreen, J.G. (2003). Forest products and wood science: an introduction. *Australian Forestry*, 70(3):209–212.
- Castaño-Santamaría, J., & Bravo, F. (2012). Variation in carbon concentration and basic density along stems of sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) and Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) in the Cantabrian Range (NW Spain). *Annals of Forest Science*, 69(6), 663-672.
- Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S. L., Swenson, N. G., & Zanne, A. E. (2009). Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters*, 12(4), 351–366.

- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., ... & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, 20(10), 3177-3190.
- Chávez Chávez, F. (1995). *Encinos y robles: notas fitogeográficas*. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Chudnoff, M. (1984). *Tropical timbers of the world* (No. 607). US Department of Agriculture, Forest Service.
- Cobas, A. C., Area, M. C., y 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.
- Da Silva Oliveira, J. T., Hellmeister, J. C., & Tomazello Filho, M. (2005). Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. *Revista Árvore*, 29, 115-127.
- Da Silva, L., F. Ribeiro, P. Gasson y D. Cutler. (2009). Anatomía en densidade básica da madeira de *Caesalpinia pyramidalis* Tul. (Fabaceae), espécie endêmica da caatinga do Nordeste do Brasil. *Acta Bot. Bras.* 23: 436-445.
- De Castro-Silva, J., & Da Silva-Oliveira, J. T. (2003). Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm., em diferentes condições de umidade relativa do ar. *Revista Árvore*, 27, 233-239.
- De Micco, V., Balzano, A., Wheeler, E. A., & Baas, P. (2016). Tyloses and gums: a review of structure, function and occurrence in vessel elements. *IAWA Journal*, 37(2), 186-205.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., González, L., Tablada, M y Robledo, C.W. (2018). *InfoStat versión 2018*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Echenique-Manrique. R. y R. Plumptre. (1994). *Guía para el uso de maderas de México y Belice*. Universidad de Guadalajara. Consejo Británico. Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la Madera. Universidad de Oxford.

- Forest Products Laboratory. (2010). *Wood handbook-wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190*. Madison, WI: U.S.Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Gaitan-Alvarez, J., Moya, R., & Berrocal, A. (2019). The use of X-ray densitometry to evaluate the wood density profile of *Tectona grandis* trees growing in fast-growth plantations. *Dendrochronologia*, 55, 71-79.
- Galarza, G.J.A. (2008). *Modelo de crecimiento para Pinus cooperi Blanco en el ejido "El Brillante" municipio de P.N. Durango* [tesis de maestría]. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Juárez del Estado de Durango. Durango.
- Glass, S., & Zelinka, S. (2021). Moisture relations and physical properties of wood. Chapter 4 in FPL-GTR-282, 4-1.
- González Elizondo, M. S., González Elizondo, M., y Márquez Linares, M. A. (2007). *Vegetación y ecorregiones de Durango*. CIIDIR IPN-Gobierno del Estado. Durango, México.
- González Villarreal, L. M. (1986). *Contribución al conocimiento del género Quercus (Fagaceae) en el estado de Jalisco*. Colección Flora de Jalisco. Instituto de Botánica. Universidad de Guadalajara. México.
- Graça, J. (2015). Suberin: The Biopolyester at the Frontier of Plants and Environment. *Frontiers in Chemistry*, 3, 62.
- Gutiérrez Vázquez, B.N., Gómez Cárdenas, M., Valencia Manzo, S., Cornejo Oviedo, E. H., Prieto Ruiz, J.A., y Gutiérrez Vázquez, M. H. (2010). Variación de la densidad de la madera en poblaciones naturales de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. del estado de Chiapas, México. *Revista fitotecnica mexicana*, 33(SPE4), 75-78.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2015). *Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250, 000: serie V*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- Knapic, S., Louzada, J. L., & Pereira, H. (2011). Variation in wood density components within and between *Quercus faginea* trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(5), 1212-1219.

- Knapic, S., Louzada, J. L., Leal, S., & Pereira, H. (2008). Within-tree and between-tree variation of wood density components in cork oak trees in two sites in Portugal. *Forestry*, 81(4), 465-473.
- Kollmann, F. (1959). *Tecnología de la madera y sus aplicaciones (Tomo I)*. Instituto Forestal de Investigación y Experiencias y Servicio de la Madera. Madrid, España.
- Lachenbruch, B., Moore, J. R., & Evans, R. (2011). Radial variation in wood structure and function in woody plants, and hypotheses for its occurrence. In *Size-and age-related changes in tree structure and function* (pp. 121-164). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Larson, P. R. (1963). Stem form development of forest trees. *Forest science*, 9(suppl_2), a0001-42.
- León Hernández, Williams, J. (2010). Anatomía y densidad o peso específico de la madera. *Revista Forestal Venezolana*, 54(1), 67-76.
- Longuetaud, F., Mothe, F., Santenoise, P., Diop, N., Dlouha, J., Fournier, M., & Deleuze, C. (2017). Patterns of within-stem variations in wood specific gravity and water content for five temperate tree species. *Annals of Forest Science*, 74, 1-19.
- Magel, E., Jay-Allemand, C., & Ziegler, H. (1994). Formation of heartwood substances in the stemwood of *Robinia pseudoacacia* L. II. Distribution of nonstructural carbohydrates and wood extractives across the trunk. *Trees*, 8(4), 165-171.
- Miles, P. D., & Smith, W. B. (2009). *Specific gravity and other properties of wood and bark for 156 tree species found in North America* (Research Note NRS-38). US Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station.
- Moya, R., & Muñoz, F. (2010). Physical and mechanical properties of eight fast-growing plantation species in Costa Rica. *Journal of Tropical forest science*, 317-328.
- Moya, R., Tenorio, C., Villalobos-Barquero, V., & Meza-Montoya, A. (2025). Variation of physical wood properties and effect of dasometric variables in *Ochroma pyramidale* trees growing in plantation. *Heliyon*, 11(1). e41210.
- Niklas, K. J. (1992). *Plant Biomechanics: An Engineering Approach to Plant Form and Function*. University of Chicago Press.

- Ordóñez Díaz, J. A. B., Galicia Naranjo, A., Venegas Mancera, N. J., Hernández Tejeda, T., Ordóñez Díaz, M. D. J., y Dávalos-Sotelo, R. (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y bosques*, 21(SPE), 77-216.
- Panshin, A. J., & De Zeeuw, C. (1980). *Textbook of wood technology* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Parresol, B. R. (1999). Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest science*, 45(4), 573-593.
- Pérez Olvera, C.P., Dávalos-Sotelo, R., Limón Godina, R., y Quintanar Isaías, P. A. (2015). Características tecnológicas de la madera de dos especies de *Quercus* de Durango, México. *Madera y bosques*, 21(3), 19-46.
- Pérez-Alavez, J., Rodríguez-Ortiz, G., Santiago-García, W., Campos-Angeles, G.V., Martín, M.P., y Lozano-Trejo, S. (2023). Gravedad específica de la madera en especies arbóreas para proyectos de carbono: Gravedad específica de árboles. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 10(2):118-140.
- Pinilla Suárez, J. C., Navarrete, F., Luengo Vergara, K., Navarrete, T., García Inostroza, J., & Casanova del Río, K. (2023). Caracterización del pellet elaborado en base a mezcla de biomasa de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* en la región del Biobío. Instituto Forestal, Chile. Informe Técnico N° 265. 34 p. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/32706>
- Réjou-Méchain, M., Barbier, N., Couteron, P., Ploton, P., Vincent, G., Herold, M., ... & Pélissier, R. (2019). Upscaling forest biomass from field to satellite measurements: sources of errors and ways to reduce them. *Surveys in Geophysics*, 40, 881-911.
- Ruiz-Aquino, F., González-Peña, M. M., Valdez-Hernández, J. I., Romero-Manzanares, A., & Fuentes-Salinas, M. (2018). Mechanical properties of wood of two Mexican oaks: relationship to selected physical properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(1), 69-77.
- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. Limusa. México, D. F.

- Sæbø, J. S., Socolar, J. B., Sánchez, E. P., Woodcock, P., Bousfield, C. G., Uribe, C. A., ... & Haugaasen, T. (2022). Ignoring variation in wood density drives substantial bias in biomass estimates across spatial scales. *Environmental Research Letters*, 17(5), 054002.
- Savva, Y., Koubaa, A., Tremblay, F., & Bergeron, Y. (2010). Effects of radial growth, tree age, climate, and seed origin on wood density of diverse jack pine populations. *Trees*, 24(1), 53-65.
- Silva-Arredondo, F. M., y Návar-Cháidez, J. D. J. (2012). Estimación de la densidad de madera en árboles de comunidades forestales templadas del norte del estado de Durango, México. *Madera y bosques*, 18(1), 77-88.
- Smith, D. M. (1954). *Maximum moisture content method for determining specific gravity of small wood samples*. Forest Products Laboratory. Forest Service U.S. Department of Agriculture.
- Sprengel, L., Cheng, Z., Hipler, S. M., Wu, S., & Spiecker, H. (2020). Mean annual wood density variations of *Larix gmelinii* (Rupr.), *Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb., and *Pinus tabulaeformis* Carr. at two different heights. *Forests*, 11(4), 394.
- Sugiyama, M., & Norimoto, M. (2003). Dielectric properties of chemically treated wood. *Journal of materials science*, 38(22), 4551-4556.
- Tamarit Urias, J. C., y López Torres, J. L. (2007). *Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México. Libro técnico No. 3*. INIFAP-CIR Golfo Centro, Campo Experimental San Martinito. Tlhuapan, Puebla, México.
- Taylor, A. M., Gartner, B. L., & Morrell, J. J. (2002). Heartwood formation and natural durability-a review. *Wood and Fiber Science*, 34(4), 587-611.
- Timell, T. E. (1986). *Compression wood in gymnosperms*. Springer-Verlag.
- Trugilho, P. F. (2009). Densidade básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. *Ciência e Agrotecnologia*, 33, 1228-1239.
- Valencia Manzo, S., y Vargas Hernández, J. (1997). Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y Bosques*, 3(1), 81-87.

- Valencia, A., S., M. Gómez-Cárdenas y F. Becerra-Luna. (2002). *Catálogo de encinos del Estado de Guerrero, México. Libro técnico No. 1*. División Forestal. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) e Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Cuernavaca, Mor., México.
- Vicente Sangumbe, L. M., Epalanga Pires, L. M., y de Ascensão, J. A. (2019). Densidad básica y características anatómicas de la madera de nueve especies del bosque del Maiombe, provincia de Cabinda, Angola. *Ojeando la Agenda*, (57), 1-15.
- Wiedenhoeft, A. (2010). Wood Handbook, Chapter 03: Structure and Function of Wood. Review Process: Informally Refereed (Peer-Reviewed).
- Wiemann, M. (2021). *Characteristics and availability of commercially important woods*. Chapter 2 in FPL-GTR-282.
- Wiemann, M. C., & Williamson, G. B. (2014). *Wood specific gravity variation with height and its implications for biomass estimation*. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Research Paper, FPL-RP-677, 2014; 12 p., 677, 1-12.
- Williamson, G. B., & Wiemann, M. C. (2010). Age-dependent radial increases in wood specific gravity of tropical pioneers in Costa Rica. *Biotropica*, 42(5), 590-597.
- Zavala Chávez, F. (1995). *Encinos y robles, notas fitogeográficas*. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 44p.
- Zhang, S. Y. (1995). Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories. *Wood Science and Technology*, 29(6), 451-465.
- Zhang, S. Y., & Jiang, Z. H. (1998). *Variation in wood density and its relationship to growth and yield in poplar and oak*. En: "Proceedings of the Conference on Hardwood Research and Utilisation".
- Zhang, S. Y., Owoundi, R. E., Nepveu, G., Mothe, F., & Dhôte, J. F. (1993). Longitudinal and radial variation in the wood specific gravity of 20 *Quercus* species. *Wood and Fiber Science*, 25(2), 189-197.
- Zobel, B. J., & Van Buijtenen, J. P. (2012). *Wood variation: its causes and control*. Springer Science & Business Media.