



ESCOLA DE DOUTORAMENTO
INTERNACIONAL DA USC

José Ángel
Pulgar Lorenzo

Tese de doutoramento

Modelización da estabilidade
dimensional e da densidade da
madeira de bidueiro procedente
de Galicia

Santiago de Compostela, 2024

TESE DE DOUTORAMENTO

**MODELIZACIÓN DA DENSIDADE E DA
ESTABILIDADE DIMENSIONAL DA
MADEIRA DE BIDUEIRO PROCEDENTE
DE GALICIA**

Autor

José Ángel Pulgar Lorenzo

Director/titor: Guillermo Riesco Muñoz

PROGRAMA DE DOUTORAMENTO EN ENXEÑARÍA PARA O DESENVOLVEMENTO RURAL E CIVIL

Aos meus pais, Isabel e Francisco

A Carmen

Ao meu mestre, Guillermo

ÍNDICE

RESUMO	5
1 INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 O MERCADO DA MADEIRA	11
1.2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DO MONTE GALEGO	14
1.3 O BIDUEIRO	16
1.3.1 Nomenclatura e taxonomía	16
1.3.2 Distribución e existencias	19
1.3.3 Caracterización botánica	20
1.3.4 Silvicultura.....	24
1.4 A MADEIRA DE BIDUEIRO.....	27
2 OBXECTIVOS	31
3 METODOLOXÍAS	33
3.1 CARACTERÍSTICAS DA ZONA DE ESTUDO.....	33
3.1.1 Tipoloxía de usos do territorio	34
3.1.2 Topografía	35
3.1.3 Clima	36
3.1.4 Solos.....	38
3.1.5 Hidroloxía e recursos hídricos	41
3.2 MATERIAL DE ESTUDO.....	42
3.2.1 Medición das probetas.....	45
3.2.2 Análise estatística	49
4 RESULTADOS.....	53
4.1 VARIABLES DE ESTUDO. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	53
4.1.1 Propiedades gravimétricas	53
4.1.1.1 Densidade ao 12 % de humidade.....	54
4.1.1.2 Densidade anhidra.....	56
4.1.1.3 Densidade básica.....	56
4.1.1.4 Densidade da parede celular.....	57
4.1.2 Variables relativas ao contido de humidade.....	58
4.1.2.1 Humidades de ensaio, reais e teóricas.....	60
4.1.2.2 Puntos de saturación da parede celular, volumétrico e lineais.....	60
4.1.3 Propiedades de contracción	61
4.1.3.1 Contraccións, coeficientes de contracción e higroscopicidade.....	63
4.1.3.2 Constantes de Koehler, coeficiente de anisotropía e anisotropía absoluta	66
4.1.4 Variables anatómicas	67
4.1.4.1 Anchura de aneis	68
4.1.4.2 Porosidade.....	69
4.1.4.3 Sustancia extraída tras inmersión prolongada.....	69
4.1.5 Variables cromáticas	70
4.1.6 Outras variables de interese	72
4.1.7 Estudo da distribución das propiedades físicas.....	73
4.1.7.1 Contracción volumétrica	74
4.1.7.2 Coeficiente de anisotropía.....	76
4.1.7.3 Densidade básica.....	78
4.1.7.4 Densidade ao 12 % de humidade.....	79
4.1.7.5 Humidade máxima teórica.....	81
4.1.7.6 Punto de saturación da parede celular calculada a partir da contracción volumétrica.....	82

4.1.7.7 Outras relacións.....	84
4.2 ESTATÍSTICA INFERENCIAL E MODELIZACIÓN.....	85
4.2.1 Análise de regresión.....	85
4.2.1.1 Contracción volumétrica.....	86
4.2.1.2 Densidade básica.....	89
4.2.1.3 Densidade ao 12 % de humidade.....	92
4.2.1.4 Humidade máxima teórica.....	93
4.2.1.5 Punto de saturación da parede celular.....	93
4.2.1.6 Variables cromáticas e densidade.....	94
4.2.2 Comparación entre grupos.....	97
4.2.2.1 Proba de Kruskal-Wallis.....	98
4.2.2.2 Comparacións post-hoc.....	98
4.2.2.3 Representación gráfica das diferenzas entre grupos.....	101
4.2.2.4 Densidade básica.....	104
4.2.2.5 Contracción volumétrica.....	105
4.3 CONSIDERACIÓN FINAIS.....	105
5 CONCLUSIONES.....	107
6 BIBLIOGRAFÍA.....	109

RESUMO

Esta tese de doutoramento investiga a densidade e a estabilidade dimensional da madeira de bidueiro (*Betula celtiberica* Rothm. et Vasc.) procedente de Galicia. As masas de bidueiros ocupan na actualidade unhas 21.000 hectáreas en Galicia, o que supón un importante recurso forestal e ambiental na rexión. O estudo pretende achegar resultados exhaustivos sobre as características da madeira do bidueiro, fundamentalmente para comprender as súas potenciais aplicacións na industria e para un enfoque de xestión forestal sostible.

O bidueiro é unha destacada especie frondosa en Galicia, cunha importancia ecolóxica e económica aínda vixente. A pesar da súa prevalencia, existe unha falta de información detallada sobre as propiedades físicas da madeira de bidueiro galego. A presente investigación aborda este baleiro, realizando unha ampla análise de mostras de madeira de bidueiro recollidas en varias parcelas espalladas por Galicia.

OBXECTIVOS DO ESTUDO

- Determinar as propiedades físicas da madeira de bidueiro procedente de Galicia, incluíndo a súa densidade, as súas contraccións, as propiedades relativas á humidade e as propiedades relacionadas coa cor
- Analizar as variacións da densidade e das contraccións da madeira dentro das árbores, entre árbores e entre os distintos lugares de Galicia
- Investigar as relacións entre as propiedades da madeira e as características dendrométricas das árbores
- Desenvolver modelos para predicir a densidade da madeira e outras propiedades físicas en función das características das árbores e das masas.

O estudo empregou un enfoque múltiple para examinar a densidade e outras propiedades físicas da madeira de bidueiro procedente de Galicia:

- Recollida de mostras: Seleccionáronse e foron abatidas 27 árbores de varias idades e tamaños, procedentes de 8 parcelas instaladas en masas de bidueiro para que a mostra de madeira para o estudo fora representativa da poboación galega de bidueiro. Conseguíronse en total 1.637 probetas de madeira para ensaios, de tamaño normalizado e libres de defectos
- Análise de propiedades anatómicas: anchura de aneis e porosidade nas probetas de ensaio
- Análise das propiedades físicas: utilizáronse procedementos normalizados para calcular varios contidos de humidade característicos da madeira; densidades aparentes da

madeira e densidade da parede celular; as contraccións e os coeficientes de contracción fronte á perda de humidade, en volume e nas tres direccións principais da madeira; e variables relacionadas coa descrición cromática dos tres planos característicos da madeira en *Betula celtiberica* procedente de Galicia. As probas realizáronse en mostras de madeira procedentes de diferentes localizacións do fuste da árbore

- Recollida de datos ambientais: nas parcelas nas que se fixo a mostraxe das árbores rexistráronse tamén os factores ambientais relevantes como a pendente, a elevación, a localización e a orixe da masa (de rexenerado natural ou de repoboación)
- Análise estatística: empregáronse técnicas de estatística descritiva e de estatística inferencial para analizar os datos e desenvolver modelos predictivos.

RESULTADOS

- Densidade da madeira: a densidade básica media da madeira de bidueiro galego foi de 485 kg/m³ de media, nun rango de 345 a 603 kg/m³ e cun coeficiente de variación do 8 %. A densidade anhidra media acadou os 559 kg/m³ e a densidade ao 12 % de humidade 597 kg/m³
- Propiedades de contracción: a contracción volumétrica media foi do 15,30 %, sendo a contracción tanxencial (7,54 %), algo menos do dobre da contracción radial (4,60 %). O coeficiente de anisotropía foi de media 1,67, o que indica unha estabilidade dimensional moderada
- A densidade da parede celular ascendeu a 1.234 kg/m³, para unha porosidade da madeira do 53 %
- As elevadas contraccións, os baixos resultados de densidade (incluída unha baixa densidade da parede celular) e unha relativamente alta porosidade indican que unha porcentaxe significativa da mostra era de madeira xuvenil
- Variabilidade e factores de influencia: a contracción volumétrica e a densidade básica da madeira de bidueiro mostraron variacións significativas tanto dentro como entre as árbores, e entre parcelas de mostraxe
- Modelos predictivos: elaboráronse modelos para estimar a contracción volumétrica e a densidade básica da madeira de bidueiro, baseándose en variables dendrométricas facilmente medibles. O modelo máis preciso para predicir a contracción volumétrica incorporou a idade da árbore, o crecemento medio en altura e a esvelteza da árbore, explicando o 30 % da variabilidade observada
- A madeira de bidueiro procedente de Galicia resultou ser algo máis escura do habitual para outras especies do xénero *Betula*, asemellándose nas súas coordenadas cromáticas a madeira con tratamento térmico leve.

IMPLICACIÓNS DO ESTUDO

Os resultados deste estudo teñen varias implicacións para o sector forestal e a industria da madeira en Galicia:

- Avaliación da calidade da madeira: a caracterización detallada das propiedades da madeira de bidueiro de Galicia proporciona unha base para avaliar a súa calidade e idoneidade para diversos usos finais

- Xestión forestal: o coñecemento de como os factores de estación e as prácticas silvícolas afectan ás propiedades da madeira pode informar na toma de decisións de xestión para optimizar a calidade da madeira.
- Estimación da biomasa: os datos de densidade da madeira poden ser utilizados para mellorar as estimacións de biomasa e stock de carbono nos bosques de bidueiros galegos, contribuíndo aos esforzos de mitigación do cambio climático
- Estudos comparativos: Os resultados permiten realizar comparacións con madeira de bidueiro doutras procedencias, destacando potencialmente características únicas do bidueiro galego.

INVESTIGACIÓNS FUTURAS

Este traballo ofrece unha análise exhaustiva da densidade e doutras propiedades físicas da madeira de *Betula celtiberica* de Galicia. O estudo revela que a madeira de bidueiro galego é semipesada e cunhas propiedades de contracción favorables ao serrado e á obtención de chapa por desenrolo, polo que é apta para unha ampla gama de aplicacións. Os modelos desenvolvidos ofrecen ferramentas prácticas para predicir as propiedades da madeira, que poden ser valiosas para os xestores forestais e a industria da madeira.

As direccións futuras de investigación identificadas nesta tese inclúen:

- Investigar as propiedades mecánicas da madeira de *Betula celtiberica* de Galicia, para complementar os resultados de propiedades físicas
- Ampliar o ensaio para incluír unha mostra máis extensa no espazo e no rango de idades das árbores, abarcando masas máis atlánticas da especie, así como identificar as características da madeira madura de *Betula celtiberica* en Galicia
- Explorar a base xenética das variacións da madeira para contribuír aos programas de mellora desta especie
- Realización de estudos a longo prazo para avaliar o impacto do cambio climático nas propiedades da madeira
- Avaliación do potencial económico da madeira de bidueiro galego en diversos produtos de valor engadido.

En conclusión, esta investigación contribúe significativamente ao coñecemento da madeira de *Betula celtiberica*, proporcionando unha base científica para a xestión e aproveitamento sostible desta especie como fonte de madeira para a industria. Os achados teñen implicacións para o sector forestal, a industria da madeira e a xestión ambiental en Galicia, e potencialmente para outras rexións onde o bidueiro sexa unha especie importante dende o punto de vista económico e ambiental.

1 INTRODUCCIÓN

A palabra “madeira” evoluciona, etimoloxicamente, dende a palabra latina “materia”. A madeira é un tecido vexetal que forma órganos leñosos (truncos, pólas e ramiñas) en especies como árbores e arbustos. O tecido leñoso, chamado xilema, está formado por células que ó chegaren á madurez teñen unha forma semellante a un tubo oco. As paredes do tubo están constituídas por unha estrutura de fibras formadas por macromoléculas de celulosa e lignina, con presenza doutras substancias como resinas, aceites, taninos, hemicelulosas e outros hidratos de carbono (Vignote Peña e Martínez Rojas, 2005).

Pola súa abundancia, accesibilidade, facilidade de manexo e facilidade de transformación, a madeira foi, dende a Prehistoria, un material fundamental para a evolución do ser humano. Primeiro foron os usos brutos das pólas das árbores para a elaboración das primeiras ferramentas, xunto có seu uso como combustible. Veu logo o descubrimento da roda, na que se utilizaba a madeira, e máis o emprego da madeira como material estrutural nas novas edificacións que trae a civilización. A medida que avanza a Historia, o emprego da madeira multiplícase en moitos outros usos: embarcacións, apeiros, armas, envases, mobles, papel, obxectos de decoración, obras de arte ou instrumentos musicais, entre outros, tornándose nun material imprescindible para o desenvolvemento humano (Radkau, 2012).

Son varias as propiedades que fan da madeira un material tan polivalente. A madeira seca é menos densa que a auga e, polo tanto, flota. É un bo illante eléctrico e térmico. É un bo transmisor do son. Tamén é un bo combustible, pero posúe un bo comportamento fronte ao lume pois a capa externa carbonizada retarda a propagación do calor. A madeira é un material higroscópico, dado que ten a capacidade de absorber e expulsar a humidade, sendo polo tanto axeitada como regulador da humidade ambiental. É un material anisotrópico: presenta diferentes propiedades nas tres direccións dimensionais (dirección da fibra ou axial, dirección dos radios leñosos ou radial e dirección dos aneis de crecemento ou tanxencial). Presenta gran resistencia mecánica, sobre todo na dirección da fibra (resistencia mecánica á tracción paralela á fibra, á compresión e á flexión), tendo en conta a súa baixa densidade. É tenaz, entendendo tenacidade como a capacidade para absorber a enerxía dunha forza aplicada instantaneamente. A madeira é relativamente resistente á penetración de obxectos e ao raiado. Esteticamente a madeira é apreciada e conta cun amplo rango cromático e de veteado (Vignote Peña e Martínez Rojas, 2005). É agradable ao tacto e algunhas especies de madeiras son moi aromáticas.

A madeira presenta vantaxes pola súa baixa relación peso/resistencia, que só queda por detrás do aluminio entre os materiais estruturais de construción. Asemade, presenta rapidez e sinxeleza de traballo en obra cando se emprega na construción. Ademais, a crecente sensibilidade ecolóxica obríganos a asumir hoxe como vantaxes algunhas características da madeira non consideradas no pasado: a madeira é o único material de construción renovable, a súa produción

require moito menos aporte de auga e enerxía que outros materiais de construción e a súa reciclaxe ou destrución non presentan dificultades (Nassar Yarur, 1996). A utilización da madeira reduce os impactos nocivos asociados á extracción de materias primas non renovables (como petróleo e derivados, ou ferro e materiais de construción). Ademais, existen varias externalidades positivas asociadas ao coidado dos bosques para á produción de madeira, incluíndo a prevención da erosión, a regulación do ciclo da auga, a modulación do clima, o enriquecemento da paisaxe e da biodiversidade, e a captura de carbono durante a vida da árbore e durante a vida útil dos produtos que se fabrican a partir da madeira. O aproveitamento das plantacións forestais é unha forma de producir un ben renovable con poucas implicacións negativas. A madeira é un produto non agresivo co medio ambiente que se pode utilizar de forma sostida no tempo grazas ao seu carácter de recurso renovable (Cisneros *et al.*, 2003).

Moitos, se non todos, dos usos deste material dependen de que exista información dispoñible sobre as propiedades da madeira. Dada a gran variedade de especies forestais leñosas e as diferenzas intraespecíficas no relativo ás características da madeira, o coñecemento suficientemente detallado das propiedades de cada especie de madeira é fundamental para optimizar o uso desta materia prima. O estudo complicase pola natureza viva da madeira como material anisótropo, no que as propiedades dependen da dirección na que se determinan, e higroscópico, no que variables básicas como o peso e as dimensións varían coa temperatura e humidade do aire (Panshin e de Zeeuw, 1980; Zobel e Van Buijtenen, 2012; Glass e Zelinka, 2021).

Os estudos das propiedades da madeira deben incluír a análise das propiedades gravimétricas (peso específico) e da densidade, xa que informan da lixeireza do material, factor a ter en conta cando a madeira forma parte de obxectos móbiles e cando se calcula o peso propio dunha estrutura. En xeral, peso específico e densidade son indicadores típicos da calidade da madeira, pola súa relación positiva coa cor e coa contracción e inchazón da madeira fronte ós cambios de humidade, e pola súa influencia positiva na dureza e na resistencia mecánica (Zobel e Van Buijtenen, 2012; Glass e Zelinka, 2021). A densidade da madeira tamén está relacionada coas estratexias ecolóxicas das plantas leñosas, ao determinar a cantidade de carbono investida por unidade de volume de talo (Martínez-Cabrera *et al.*, 2009), sendo esta unha característica que é necesario coñecer para avaliar o papel da árbore como sumidoiro de carbono.

A estabilidade dimensional da madeira (fronte aos cambios de humidade ambiente) é moi valorada cando este material se usa en construción, en carpintaría ou en ebanistería. O forte encollemento (contracción) ou o inchazo perante os cambios de humidade no ambiente son factores que reducen a calidade da madeira, porque limitan moito os posibles usos finais da mesma. Por exemplo, as vigas deformadas ou acurtadas, ou o parqué inchado teñen unha utilización moi limitada. Sábese que a contracción volumétrica e, por extensión, a contracción nas tres dimensións principais da madeira (axial, radial e tanxencial) están relacionadas coa densidade da madeira (Simpson, 1998; Schulgasser e Witztum, 2015). Como o método de ensaio para determinar a contracción da madeira é destrutivo (os ciclos de contracción e inchamento non son replicables debido á histérese de sorción na madeira), son moi útiles os métodos indirectos que predín variables de contracción a partir doutras variables facilmente medibles, como é a densidade. Este enfoque utilizouse para unha ampla gama de especies de coníferas (por exemplo, Riesco Muñoz e Barrio Anta, 2010) e de frondosas (por exemplo, Riesco Muñoz e Rodríguez Campos, 2010).

1.1 O MERCADO DA MADEIRA

A madeira sempre tivo un papel relevante ao longo da historia e, no presente, non hai ningún estudo prospectivo que indique que no futuro próximo os produtos baseados na madeira van perder importancia. Ben ao contrario, moitos gobernos e organismos internacionais cren que a industria forestal posúe un gran potencial para promover unha “economía verde” a través do uso da madeira, a bioenerxía e os novos biomateriais (Axencia Galega da Industria Forestal, 2023).

En termos de volumes madeirables, as reservas forestais mundiais diminuíron lixeiramente en trinta anos, pasando de 5.600 millóns de metros cúbicos en 1990 a 5.557 millóns de metros cúbicos en 2020, debido á diminución neta da superficie forestal. Por outra banda, as existencias por unidade de superficie están a aumentar a nivel mundial e en todas as rexións; pasaron de 132 m³/ha en 1990 a 137 m³/ha en 2020 e, actualmente, as extraccións mundiais de madeira en rolo acadaron aproximadamente os 4.000 millóns de metros cúbicos anuais (FAO, 2024). Os maiores valores de existencias por unidade de superficie atópanse nos bosques tropicais de América do Sur e Centroamérica e máis na África Occidental e Central. Os bosques do mundo conteñen unhas 606 xigatoneladas de biomasa viva (por riba e baixo terra) e 59 xigatoneladas de madeira morta. A biomasa total diminuíu lixeiramente dende 1990, pero a biomasa por unidade de superficie aumentou (FAO, 2021).

O sector forestal e da madeira en Europa camiña cara a unha economía circular, destinada a impulsar a competitividade global, fomentar o crecemento económico sustentable e a xeración de novos postos de traballo. A economía circular é un modelo de produción e consumo que busca maximizar o valor dos recursos, materiais e produtos, manténdose na economía o maior tempo posible. As súas principais características son preservar e mellorar o capital natural, optimizar o uso dos recursos e potenciar a eficacia do sistema reducindo as externalidades negativas, e procurar sinerxías entre os distintos axentes económicos (Kirchherr *et al.*, 2017). Este movemento, definido como “bioeconomía”, marca o camiño do sector debido á madureza do mercado actual de produtos forestais e á necesidade crecente de utilizar produtos renovables. Segundo a Axencia Galega da Industria Forestal (2023), a bioeconomía en Europa está valorada en 2 billóns de euros de facturación anual e xera 22 millóns de empregos (o 9 % do emprego en Europa). Neste marco, o bidueiro representaba en 2020 o 6,6 % das existencias europeas entre as principais especies arbóreas (Korhonen e Sthal, 2020) e acadou, en 2022, o 3 % do mercado de madeira para polpa en Europa, superando ao eucalipto e a faia (Confederation of European Paper Industries (Cepi), 2022).

En 2021, dos pouco máis de 28 millóns de hectáreas de superficie forestal en España, sobre 19 millóns eran arboradas e 9 millóns desarboradas. Segundo o *Balance de Flujos de Madera de España*, a cantidade total de madeira extraída foi de case 17,8 millóns de metros cúbicos sen casca, o que supuxo un incremento de 0,9 millóns con respecto ao ano 2020. O principal destino da madeira extraída seguiu sendo a fabricación de pasta de celulosa, cun 28 % do total, seguido do serrado, cun 18 % (Figura 1.1). A cantidade de madeira destinada a celulosa seguiu sendo similar á de 2020, a de taboleiro aumentou lixeiramente ao igual que a da leña, e diminuíu a da chapa un 10 % respecto a 2020 (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023b).

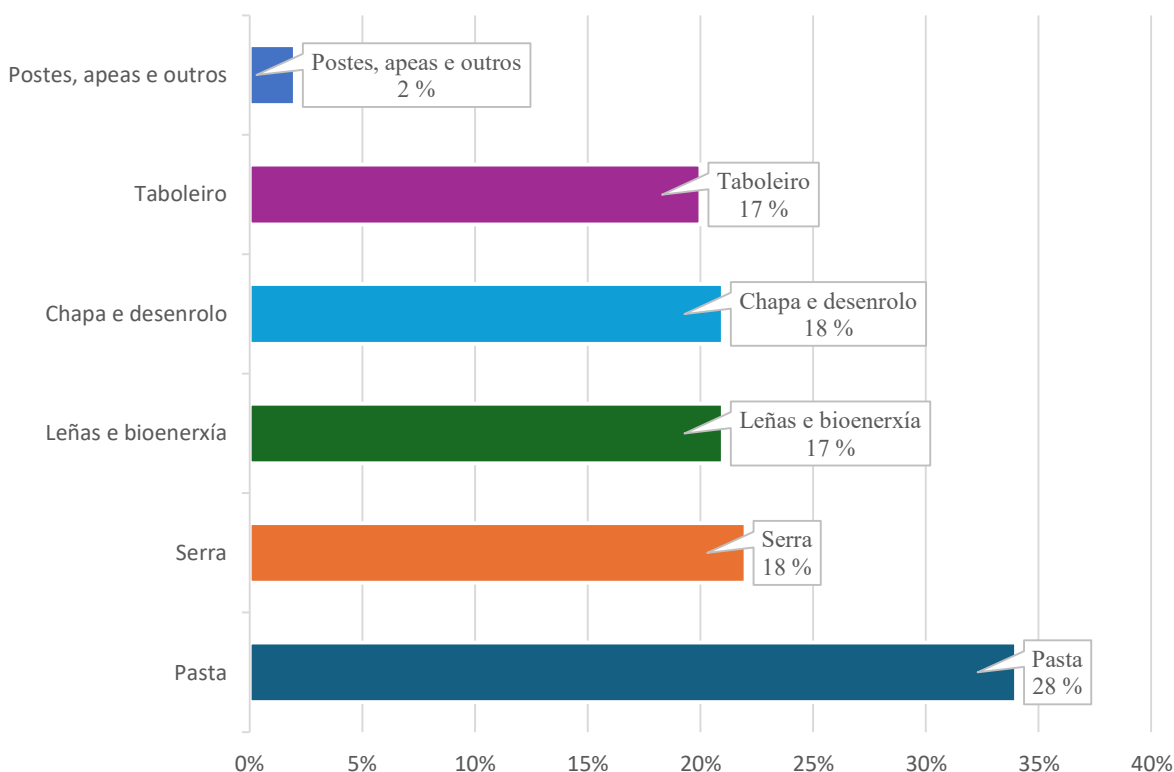


Figura 1.1. Destinos da madeira extraída segundo o Balance de Fluxos de Madeira de España de 2021 (Porcentaxes sobre volume en metros cúbicos sen casca. Elaboración propia con datos do Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023b).

Separando os datos por grupo de especies, o principal destino da madeira de coníferas seguiu a ser a serra cun 33 %. Seguíalle a leña, cun 24 %, e o taboleiro, cun 23 %. No caso da madeira de frondosas, máis da metade, o 57 %, foi destinada a pasta de celulosa, seguida de taboleiro e leña, ambos con cifras moi similares.

Os datos de consumo de madeira apuntan a un total de 27,54 millóns de metros cúbicos sen casca en 2021. Esta cifra supera en máis de 3,3 millóns de metros cúbicos á do ano anterior. Polo tanto, o crecemento do consumo de madeira no período 2020-2021 foi moi superior ó crecemento da produción nacional, polo que se agranda o déficit de madeira no mercado español. As cantidades consumidas no capítulo de bioenerxía e pasta de celulosa aumentaron con respecto a 2020. Por outra banda, a cantidade consumida de madeira para serra diminuíu lixeiramente con respecto ao consumo de 2020, ao igual que o consumo de madeira para chapa. Como se reflicte na Figura 1.2, a bioenerxía seguiu a ser o sector con maior consumo de madeira, acadando un 39 %, seguido do taboleiro, cun 23 %.

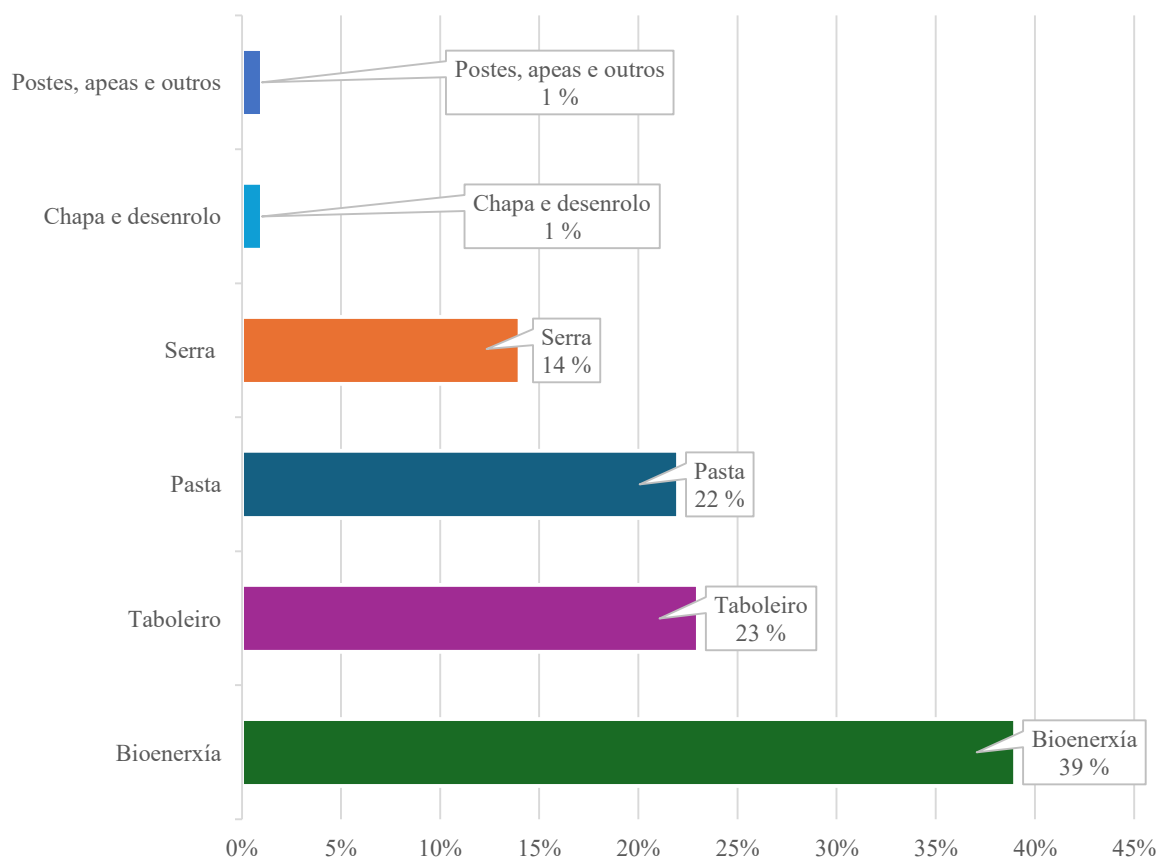


Figura 1.2. Consumo aparente de madeira segundo o Balance de Fluxos de Madeira de España de 2021 (elaboración propia con datos do Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023b).

As exportacións en 2021 diminuíron respecto ao ano anterior, mentres que as importacións aumentaron lixeiramente. As exportacións representaron o 15 % das extraccións de madeira e as importacións supuxeron un 6 % da madeira consumida (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023b).

Dentro da superficie forestal nacional, aquela suxeita a plans de ordenación chegou, no 2021, aos 6,1 millóns de hectáreas, o que supuxo un incremento con respecto ao ano 2020 de 390.000 hectáreas. Os dous principais modelos de certificación forestal, FSC e PEFC, acadaron 441.164 e 2.480.042 hectáreas adscritas, respectivamente (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023b).

As perspectivas da actividade forestal son favorables no que se refire ao aproveitamento da biomasa e ao fomento do aproveitamento da madeira en produtos serrados e pezas estruturais, o que podería dinamizar o mercado da madeira. A sustentabilidade económica da silvicultura esixe un incremento da produtividade por superficie, baseado na mellora xenética e silvícola, sen descoidar as esixencias en canto aos servizos forestais indirectos (Rodríguez Soalleiro, 2010).

A cadea de valor forestal-madeira en Galicia facturou uns 1.996 millóns de euros en 2020, cifras que supoñen un descenso do 7,4 % fronte aos 2.156 millóns de euros facturados en 2019 e fronte aos 2.294 millóns de euros de 2018 (ano dos mellores rexistros dende 2008), cando se

acadaron 24.107 postos de traballo, o que supuxo un 2,1 % do emprego total de Galicia. Non obstante, esta cifra está por riba das expectativas da propia industria, expresadas na Enquisa de Impacto da COVID-19, que prevía un descenso interanual maior (-17 %) en 2019-2020, debido aos efectos da pandemia (Axencia Galega da Industria Forestal, 2023).

A facturación conxunta do sector forestal en 2021 ascendeu a 2.578 millóns de euros. Isto supuxo o máximo histórico da serie dende 2006, superando amplamente aos valores acadados en 2007, xusto antes da crise financeira de 2007-2008. As estimacións sobre os datos dos tres primeiros trimestres de 2022 revelaron que ese ano a facturación puido acadar os 2.800 millóns de euros. En xeral, o sector da madeira aumentou a súa produción, e vendeuse máis e a mellores prezos. Porén, ao aumentar os custes de produción, os balances non semellaron tan diferentes a anos anteriores (Picos, 2022). Para o caso particular do bidueiro, cabe facer notar que a Unión Europea está a importar produtos alternativos a esta especie, e o prezo do contrachapado de bidueiro seguiu manténdose a pesar das importacións dende Xeorxia, Turquía e outras procedencias (Picos, 2023a).

1.2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DO MONTE GALEGO

Logo da última glaciación, hai uns 10.000 anos, as formacións arbóreas en Galicia eran raras. As primeiras árbores en colonizar o noroeste ibérico foron os bidueiros (*Betula* sp.) e os piñeiros silvestres (*Pinus sylvestris* L.). Pasados uns 2.000 anos o clima tornouse máis temperado e húmido, o que favoreceu a proliferación doutras especies: a abeleira (*Corylus avellana* L.), os carballos (*Quercus robur* L., *Quercus pyrenaica* Willd. e *Quercus petraea* (Matts.) Liebl.), o olmo (*Ulmus glabra* Huds.) ou o castiñeiro (*Castanea sativa* Mill.) (Manuel Valdés e Gil Sánchez, 2002).

As características climáticas contribuíron ao desenvolvemento da vexetación arbórea en gran parte do territorio galego. Este fenómeno comezou especialmente durante o denominado “óptimo atlántico” (entre o 5.000 e o 3.000 a.C.), un período abondo longo para permitir a formación dunha cuberta vexetal densa e abundante, destacando especialmente as árbores caducifolias (Manuel Valdés e Gil Sánchez, 2002). Sen embargo, segundo análises palinolóxicas, a deforestación comezou en Galicia hai 7.500 anos por mor da gandería, estendéndose hai 6.000 anos, antes da aparición da agricultura (Gutián Rivera, 2001). En torno ao terceiro milenio antes de Cristo ten lugar a entrada de especies caducifolias máis exixentes, como tileiros (*Tilia* sp.), pradairos (*Acer* sp.) ou freixos (*Fraxinus* sp.). Acádase a máxima expansión da asociación florística *Quercetum mixtum*, formándose ao mesmo tempo masas de amieiro (*Alnus* sp.) en zonas próximas a ríos ou masas de auga, coas zonas máis secas transformándose en pastos e estepas. Ao mesmo tempo diminúen os bosques de piñeiro, bidueiro e abeleira. As características locais do solo impediron que a extensión ocupada polo bosque atlántico fose total, non sendo capaz de desprazar a aquelas especies menos demandantes de calidade do solo (Manuel Valdés e Gil Sánchez, 2002).

A partir do quinto milenio antes de Cristo estendeuse o uso do lume para gañar terras para o pastoreo e a agricultura, en detrimento do monte arborizado, que se utilizaba como subministrador de madeira e leña, moi demandada para a explotación mineira e a metalurxia. Estas actividades adquiren así unha importancia decisiva na modificación da paisaxe, coa acción humana incidindo con máis intensidade nas zonas próximas á costa. O fin do carballo como especie arbórea dominante ten lugar cara o 2.500 a.C., debido ás prácticas deforestadoras

previas ao inicio de la agricultura. Xa entre o 1.000 e 500 a.C. a antropización do medio resulta evidente, observándose un aumento na presenza de pole de cereal (Manuel Valdés e Gil Sánchez, 2002). O período castrexo (dende o século VI a.C.) e a inmediatamente posterior ocupación romana (a partir do século II a.C.) traen consigo a práctica dunha agricultura estable e desenvolvida, en torno aos castros, con rozas periódicas no monte e acompañada de gandería. As zonas onde a densidade de castros foi maior (Rías Baixas, vales dos ríos que desembocan no Atlántico, zona das Mariñas e meseta central de Lugo) coinciden co territorio onde se deu un proceso de romanización máis acusado. A extensión da agricultura e gandería (Guitián Rivera, 2001) e o desenvolvemento dunha importante industria metalúrxica (Manuel Valdés e Gil Sánchez, 2002) levaron a un avance da deforestación no territorio galego.

Na Idade Media, logo da caída do Imperio Romano de Occidente, a chegada dos pobos xermánicos provocou unha crise demográfica e económica que detivo temporalmente a presión sobre o monte. Trala invasión e expulsión dos musulmáns, dende o século VIII, comeza un longo período de contracción do espazo ocupado polo bosque como resultado da ampliación das terras cultivadas e o crecemento demográfico, fenómeno que se producirá ata principios do século XIV. Nestas datas acádase en Galicia a máxima expansión do espazo cultivado. A partir dese momento, e en paralelo á profunda crise social e económica do século XIV, comeza un retroceso na roturación de terreos forestais para a agricultura e de abandono de terras, aínda que moitas destas superficies abandonadas eran sometidas a incendios periódicos e a pastoreo continuado, impedindo así a recuperación espontánea do monte arbóreo. O proceso de diminución da superficie forestal non se deterá ata os anos centrais do século XIX, momento no que as árbores chegarán a ocupar a menor extensión ao longo da historia no territorio galego (Guitián Rivera, 2001).

Posteriormente, parello á chegada da Idade Moderna, prodúcese un aumento poboacional e un gran desenvolvemento tecnolóxico, que provocan que os usos tradicionais do monte teñan un efecto deforestador cada vez máis acusado. De feito, dúas actividades moi dependentes das masas arboradas convértense en axentes fundamentais da economía: a construción naval e a metalurxia. Como xa se apuntou, o proceso de deterioro da cuberta forestal en Galicia que se inicia naquelas datas continúa case ininterrompido ata o século XIX. Entre o 1500 e o 1900 producíronse accións destrutivas tanto sobre as árbores adultas como sobre o rexenerado: transformación de castiñeiros en viñedos, labras para cultivos agrícolas, aproveitamento da madeira para construción naval e civil, uso da leña e carbón para ferrerías, aproveitamento da casca, extracción de estrume para cama do gando e pastoreo extensivo. É nesta época cando o monte pasa a ser unha reserva de terras para a agricultura, coas chamadas rozas ou estivadas, integrándose completamente no sistema produtivo agrario (Correa, 2023). En torno ao século XVIII acádase a época de máxima deforestación, a xulgar polos estudos palinolóxicos, que coinciden co descrito na documentación da época. Na segunda metade dese século as superficies boscosas en Galicia pasan a ser algo excepcional, ou polo menos aquelas de grandes dimensións (Manuel Valdés e Gil Sánchez, 2002). O grao de deforestación chegou a ser moi elevado en tempos non moi afastados (Rigueiro, 1992). Nos séculos XIX e XX Galicia repoboouse dun xeito moi significativo con especies de rápido crecemento como *Pinus pinaster* Ait., *Pinus radiata* D. Don. ou *Eucalyptus* sp. (Molina, 1993), pese a que no *Plan General de Repoblación Forestal de España* de 1939 os enxeñeiros Joaquín Ximénez de Embún e Luis Ceballos recomendasen plantar con especies de madeira de alta calidade, entre as que citaban o bidueiro (Manuel Valdés e Gil Sánchez, 2002). Este escenario presentaba ao monte galego, ata mediados do século pasado, non como actor principal, senón como recurso secundario e

auxiliar do sistema agrario. O monte era poucas veces provedor de materia prima que non fose aquela destinada a ser combustible ou produto de roza ocasional. A madeira, como principal produto do monte, aparece a finais do século XIX a través da repoboación forestal que realizaron propietarios privados e, algo máis tarde, a Administración Pública (Corbelle Rico, 2020).

O uso arborado dos montes (repoboados con piñeiros, e posteriormente eucalipto) toma pulo dende 1950 ata hoxe, ao mesmo tempo que os usos non arborados, relacionados cun sistema agrario progresivamente en abandono (como leñas, estrume, pastos, etc.), entran en declive. Isto trouxo aparellada unha crecente acumulación de biomasa forestal nos montes. No período 1960-2010 a superficie queimada acadou unha cifra equivalente ao total da superficie forestal actual de Galicia (2 millóns de hectáreas), có lume incidindo especialmente nos montes non arborados. Flora, fauna, paisaxe e varios produtos e servizos ambientais víronse afectados. Producíronse erosión e contaminación (de aire e cursos de auga). Os gastos en extinción (medios e persoal) están a ser millónarios e crecentes, sendo asumidos sobre todo pola administración autonómica e, en menor medida, polas administracións locais (Parlamento de Galicia, 2018).

Actualmente, unha das características principais do monte galego é a elevada presenza do bosque mixto de coníferas e frondosas. Neste tipo de bosque dase unha certa tendencia natural a que as frondosas presentes acaben dominando ás coníferas, polo que, co aproveitamento destas últimas, pode ocorrer que o carácter mixto dese bosque acabe desaparecendo, traendo así consigo un aumento dos bosques puros de frondosas no futuro (Rodríguez Cebreiro, 2021). No contexto galego actual, de progresivo abandono rural e desuso do territorio, de lexislacións cada vez máis restritivas en relación ao uso do solo forestal, de incremento da demanda de madeira e polo tanto da necesidade de aproveitamento de terreos de baixa produtividade, o bidueiro acada moitos dos requirimentos (ecolóxicos, económicos, sociais) para ser considerada como especie elixible en repoboación ou de ser beneficiada por unha silvicultura sobre as masas preexistentes. Deste xeito, o bidueiro, especie nativa e colonizadora de terreos non arborizados, contribuiría a longo prazo a mitigar o actual déficit de madeira de frondosas no noso país.

1.3 O BIDUEIRO

1.3.1 Nomenclatura e taxonomía

A definición e a concreción específicas da árbore bidueiro, nas súas formas peninsulares, veñen sendo tema de debate entre botánicos dende, polo menos, a metade do século pasado. O xénero *Betula* presenta complicacións taxonómicas: a gran variabilidade morfolóxica detectada nas especies ibéricas deste xénero deu lugar á aparición dalgunha controversia sobre a categoría onde se deben encadrar. A gran variabilidade dos taxóns provoca que, con frecuencia, características propias e definitorias dunha especie concreta se atopen en pés doutra especie diferente (Pereira-Espinel *et al.*, 2012). Roussillat (1990) considera as especies *Betula pendula* e *Betula verrucosa* como especies diferenciadas que con frecuencia son confundidas e outros autores falan desas dúas denominacións taxonómicas como especies sinónimas (Wagenführ e Wagenführ, 2022). En clave máis local, o bidueiro do cadrante noroeste peninsular considérase en ocasións como especie diferenciada doutros bidueiros (Álvarez *et al.*, 2000).

Rothmaler e Vasconcellos (1940), logo de analizar distintos caracteres botánicos, establecen a presenza na Península Ibérica das seguintes tres especies do xénero *Betula*, repartidas en zonas diferenciadas:

1. *B. pendula* Rothm (*B. verrucosa* Ehrh.), nos Pirineos orientais (Cerdaña, Puigcerdá, Collsacabra, Montseny), Pirineos centrais (Pobla de Segur, Estany de Montcortés, Espot, Valle de Ordesa), e Pirineos occidentais (Montico de Salvatierra, Navarra).

2. *B. carpathica* W. et K., nos Pirineos centrais (Val de Arán, Artiga de Lin, Ares, Soumaoute).

3. *B. celtiberica* Rothm. et Vasc., que definen como nova especie, en Navarra, Biscaia, Cantabria, León, Castela, Galicia e nas rexións portuguesas de Entre-Douro-e-Minho, Trás-os-Montes e Beira.

Na Figura 1.3 Villarino Urtiaga (1983) perfila a extensión das tres especies proposta por Rothmaler e Vasconcellos (1940).

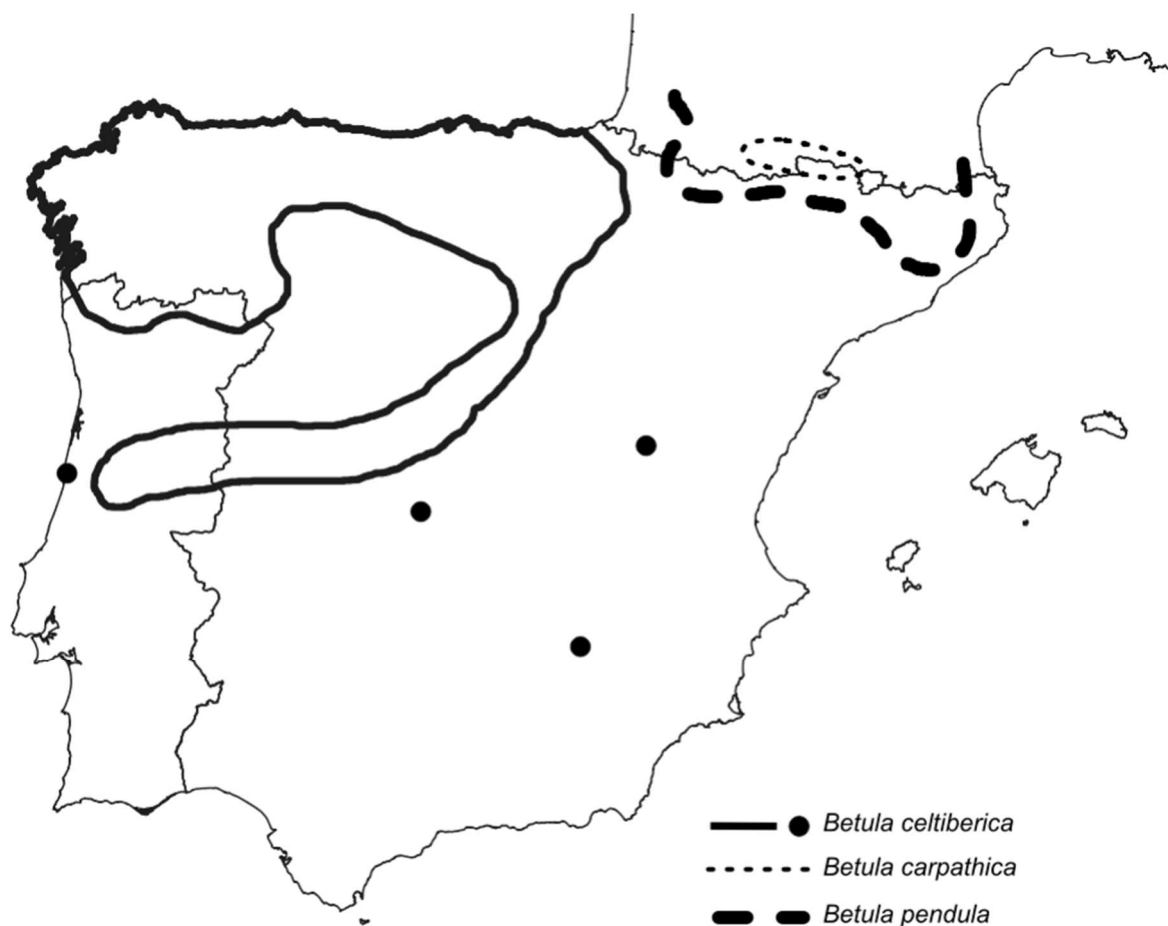


Figura 1.3. Áreas de distribución de *B. pendula*, *B. carpathica* e *B. celtiberica* na Península Ibérica, segundo Rothmaler e Vasconcellos (elaborado con datos de Villarino Urtiaga, 1983).

En Flora Ibérica (Moreno e Peinado, 1990) recoñécense dúas especies: *Betula pendula*, cun número cromosómico $2n = 28$, e *Betula alba* ($2n = 56$). Nesa mesma obra inclúense, como sinónimos, *Betula pubescens* Ehrh., *Betula celtiberica* Rothm. et Carvalho et Vasc. e *Betula pubescens* ssp. *celtiberica* (Rothm. et Vasc.). Actualmente a denominación *Betula alba* non se

emprega para evitar confusións taxonómicas (Fernández López *et al.*, 2012). A especie antes así nomeada pasou a chamarse *Betula pubescens* segundo o *Código Internacional de Nomenclatura para algas, hongos y plantas (ICN)* (Pereira-Espinel *et al.*, 2012). Ceballos e Ruiz de la Torre (2001) establecen a *Betula celtiberica* como subespecie de *Betula pubescens*. Esta última especie, xunto con *Betula pendula*, son as dúas únicas especies de bidueiro citadas na Península Ibérica. Pola contra, Rivas-Martínez *et al.* (2002), citan a presenza na Península Ibérica de tres especies: *B. pendula* (que inclúe as subespecies *pendula* e *fontqueri*), *B. pubescens* e *B. celtiberica*, sendo esta última a maioritaria e claramente definida no territorio peninsular. Amigo Vázquez e Romero Buján (1998) falan da dominancia de *Betula celtiberica* nas formacións densas de bidueiro na Galicia eurosiberiana non litoral. Díaz González e Vázquez (2004), en virtude da escotadura das alas do froito, consideran a existencia de tres especies, outorgándolle a *Betula celtiberica* a categoría propiamente de especie, diferenciada de *Betula pubescens* e *Betula pendula*. A norma europea para a nomenclatura da madeira serrada e en torada (AENOR, 2004) contempla, unicamente, *Betula pubescens* Ehrh. e *Betula pendula* Roth como as especies europeas comerciais de bidueiro.

Por todo o exposto ate o de agora neste epígrafe, unido ao itinerario académico do autor deste estudo, no sucesivo óptase pola denominación *Betula celtiberica* Rothm. et Vasc. para nomear á madeira analizada neste traballo.

Segundo Losada *et al.* (1992), os nomes comúns para *Betula celtiberica* en galego son bidueiro, abedoeira, abedoeiro, abedoir, abedugo, abeduzo, abelo, abidueira, abidul, albelo, bedoeira, bedoeiro, bedolo, bedugo, bedul, bedulo, betuxo, bídalo, bideiro, bido, bidouro, bidro, bidueira, biduido, bidul, biduleiro, bidulo, biduo, bodelo, brido, budio, budueira, vídalo, vidoeira e vidueiro. Villarino Urriaga (1983) rexistra tamén as diferentes denominacións galegas do bidueiro: bidueiro, bidueira ou abidueira, bido, bídalo, bidro, bidón, budio, albelo, abedugo, abedul ou bedul, amieiro, amieiro manso ou amieiro branco. O autor (*op. cit.*, 1983) estudou tamén a extensión xeográfica de cada variedade; na Figura 1.4 representase a distribución xeográfica das referidas denominacións.

O nomes para o xénero *Betula* en diferentes idiomas son “abedul” (español), “bedoll” (catalán), “urki” (vasco), “birch” (inglés), “bouleau” (francés), e “Birken” (alemán).

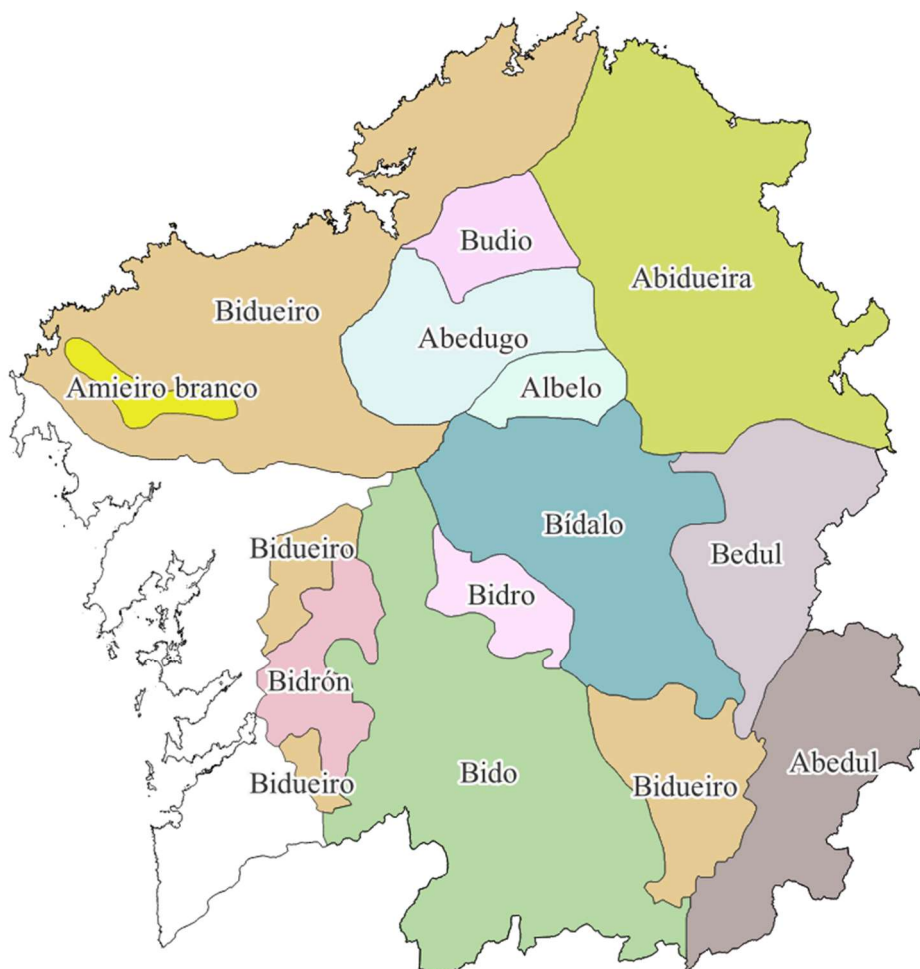


Figura 1.4. Distintas denominacións de *Betula celtiberica* en Galicia. Elaboración propia con información de Villarino Urtiaga (1983).

1.3.2 Distribución e existencias

Se ben o bidueiro non conta coa extensión territorial doutras frondosas autóctonas, si se atopa amplamente distribuído pola xeografía galega, así como en Portugal, Asturias e Castela-León, con preferencia por comarcas de clima continental, zonas de media montaña e o litoral cantábrico (Villarino Urtiaga, 2004), sempre fuxindo da mediterraneidade (Roussillat, 1990). A súa presenza real é moi difícil de estimar, posto que con pouca frecuencia forma masas puras. A Dirección General de Medio Natural y Política Forestal (2011) apuntaba unhas 46.455 ha de masas conxuntas de castiñeiro e bidueiro, dentro dun total de 415.089 ha de masas (puras ou mesturadas) de frondosas en Galicia. Os resultados preliminares do Inventario Forestal Continuo de Galicia (Picos, 2023b) rexistran 607.965 ha ocupadas por frondosas, sen distinguir por especie. Facendo unha extrapolación a partir destas dúas últimas citas, asumindo que non existiron cambios na dinámica estrutural e de aproveitamento dese tipo de monte (debido a restricións legislativas de carácter proteccionista para as masas de frondosas), pódese estimar a superficie actual ocupada por masas de castiñeiro e bidueiro en 68.000 ha. Segundo a cartografía facilitada polo Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2023a), a superficie que ocupan as especies do xénero *Betula* en Galicia supera lixeiramente as 21.000 ha (Figura 1.5). No ano 2011 estimábanse unhas existencias apreciables de bidueiro

no territorio galego: case 3,9 millóns de metros cúbicos de madeira sen cortiza (Dirección General de Medio Natural y Política Forestal, 2011). Outra análise preliminar do Inventario Forestal Continuo de Galicia (Rodríguez Soalleiro, 2023) recolle para o ano 2019 en Galicia unhas cortas totais de 35.631 m³ de *Betula* spp., dos cales 4.141 m³ foron para “uso doméstico” e 31.490 m³ foron “comercializados”.

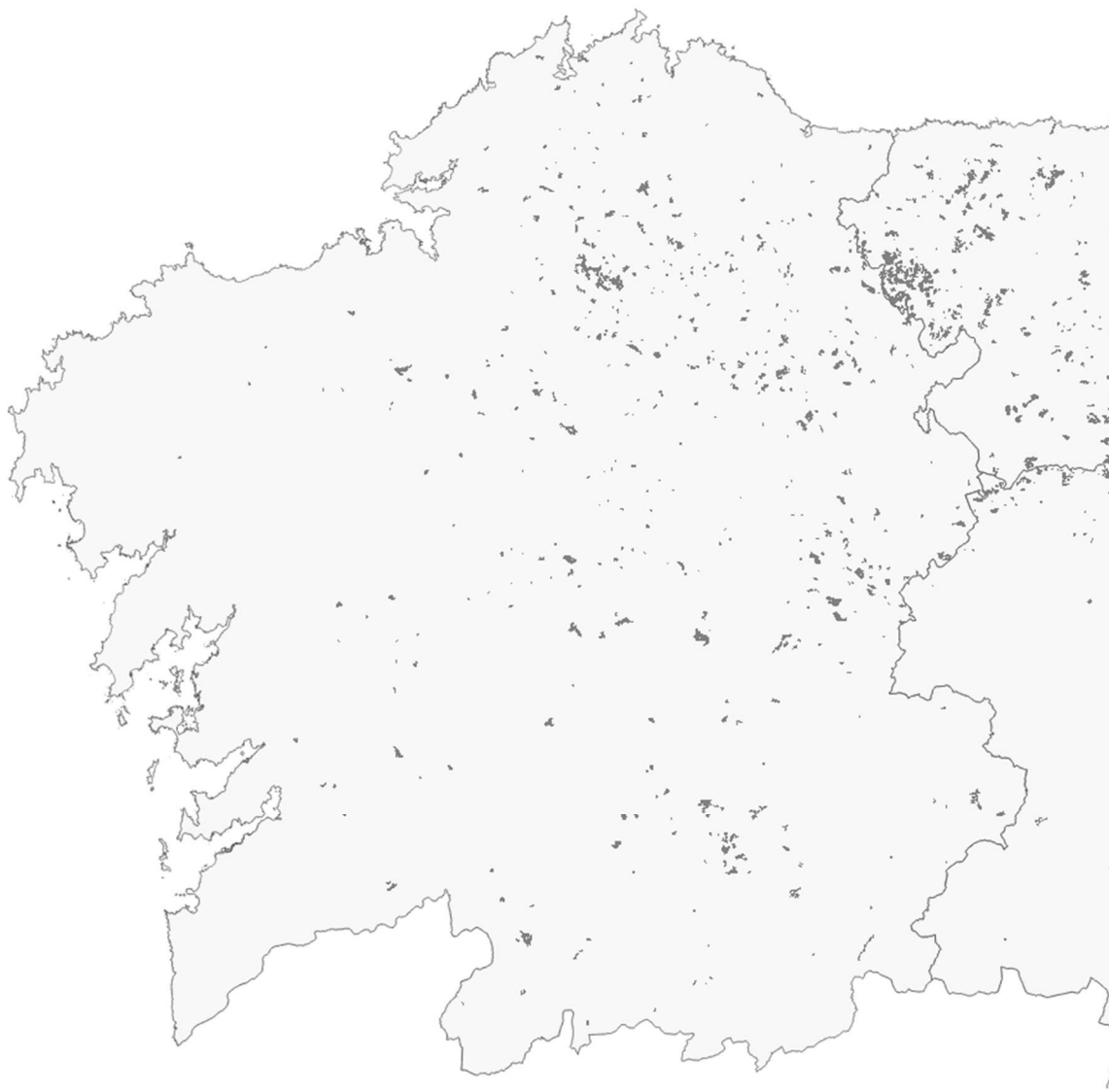


Figura 1.5. Extensión das masas de *Betula* spp. no noroeste peninsular. Elaboración propia a partir de datos do servizo WMS do Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2023a).

1.3.3 Caracterización botánica

O xénero *Betula* é un dos dous xéneros incluídos na subfamilia *Betulaceae* (da familia *Betulaceae*), xunto co xénero *Alnus*. Ambos constitúen un grupo de árbores ou arbustos monoicos, de follas simples e alternas. Contan con flores unisexuais agrupadas en amentos. As de *Betula* teñen os seguintes caracteres distintivos: amentos femias cilíndricos ou incipientemente ovoideos; escamas trilobuladas, caducas; dous estames bífidos por debaixo das anteras. As flores masculinas teñen un diminuto perianto. As flores femininas agrúpanse en tres nas axilas de cada bráctea. Están espidas, formadas por un ovario bilocular e dous estigmas

filiformes persistentes. O froito é un aquenio monospermo, por aborto, con dúas ás laterais (Villarino Urtiaga, 1983). As follas son simples, alternas, caedizas, con limbo de tendencia romboidal, de borde serrado ou dobremente serrado, de cor verde lustroso pola face e verde claro polo envés. Ten casca branca ou branco-amarelenta, de carácter papiráceo, que vai desaparecendo coa idade ata voltarse pardo-negrucza (Pereira-Espinel *et al.*, 2012). Na Figura 1.6 móstrase a árbore tal e como medra en Galicia.



Figura 1.6. Varias fotografías de bidueiros. En sentido horario a partir da foto da esquerda: árbore, detalle de amentos e follas, detalle da casca, repoboación de bidueiros.

Trátase dunha especie de case nula tolerancia á sombra, e con moi baixos requirimentos de nutrientes, o cal a converte nunha boa especie pioneira (Villarino Urtiaga, 1983; Álvarez *et al.*, 2000; Villarino Urtiaga, 2004). Pola boa dispoñibilidade de luz baixo a súa cobertura, os bidueiros favorecen a aparición de hábitats con alta biodiversidade e a presenza, no sotobosque, de especies pouco tolerantes á sombra: *Sorbus aria*, *Sorbus aucuparia*, *Pinus sylvestris*, *Quercus petraea* son especies que aprecian moito o *humus* enriquecido en nutrientes e o leve sombreado baixo o bidueiro. A diversidade de fungos no solo onde medra tamén é moi elevada (Schnitzler e Closset, 2003).

De acordo con Blanco *et al.* (1998) a tipoloxía funcional das masas de bidueiro na Península Ibérica preséntase coas seguintes conformacións:

- Bidueiros que aparecen espallados dentro de bosques dominados por outras especies: o bidueiro compórtase aquí como especie pioneira e medra en áreas degradadas que foron anteriormente poboadas por piñeiros, carballos, faias ou abetos. Despois de recolonizar

estas zonas, outras especies continuarán a secuencia de etapas da serie evolutiva do bosque. Exemplos de vexetación climácica destas series son os bosques de abetos pirenaicos (*Abies* sp.), os piñeirais de *Pinus sylvestris*, os faias acedófilos e as carballeiras de *Quercus robur* e *Quercus petraea*

- Bosques de bidueiros estables: a gran altitude o bidueiro compórtase como especie terminal ou climácica dentro da sucesión arbórea, competindo con vantaxe sobre outras especies e formando o límite altitudinal do bosque. Isto ocorre con maior frecuencia en substratos non carbonatados e polo xeral máis pobres e marxinais, onde faias e abetos non son capaces de prosperar
- Bidueiros nos bosques de ribeira: esta é unha das situacións máis frecuentes para o bidueiro, especialmente na alta e media montaña da rexión eurosiberiana. É común atopalo nas beiras dos ríos xunto con freixos (*Fraxinus* sp.), amieiros (*Alnus glutinosa*), álamos (*Populus* sp.), salgueiros (*Salix* sp.), etc.
- O bidueiro como colonizador de zonas turbosas: naquelas paraxes onde, por fenómenos de hidromorfía, outra vexetación arbórea non pode desenvolverse, o bidueiro é capaz de comezar a recolonización do bosque e dar paso a outras especies en etapas seriais. Esta situación aparece nos sistemas cantábrico, galaico-leonés e central.

Para Álvarez *et al.* (2000), as principais masas de bidueiro son bosques naturais de árbores coetáneas que se orixinan tras un incendio. O bidueiro, logo do lume, coa presenza dun solo mineral nú e con ausencia de vexetación competidora atopa o terreo ideal para a propagación da súa semente (Villarino Urtiaga, 1983), o que reforza a súa caracterización como especie pioneira. A semente desta árbore non se ve afectada ou inhibida tras os calores do incendio, ao contrario que a de especies como *P. sylvestris* ou *E. globulus*. A capa de cinza que cubre o solo tampouco ten un efecto inhibitorio sobre a xerminación do bidueiro. Porén, hai que ter en conta que se trata dunha árbore sensible ao lume, moi combustible debido á abundancia de seiva nos ramiños e á carencia dunha casca espesa e protectora (Rigueiro Rodríguez, 2003). Ademais das masas que medran en terreos calcinados, existen tamén, segundo Álvarez *et al.* (2000), masas que medran en terreos abandonados ou bosquetes procedentes de brotes de cepa tras un aproveitamento. Villarino (1983) observou que coloniza vigorosamente terras agrarias abandonadas na Terra Chá de Lugo.

Trátase dunha árbore heliófila e frugal, colonizadora de terreos pobres e ácidos sempre que conte con suficiente humidade edáfica. Soporta duras condicións meteorolóxicas, como o frío intenso do inverno, os ventos e as nevadas. É moi resistente ás xeadas e alcanza alturas en Galicia non superadas por ningunha outra especie de frondosa, chegando aos 1.700 m na formación de bidueiral umbrófilo orocantábrico (*Luzulo henriquesii-Betuletum celtibericae*). Medra nesas altitudes situándose nos pisos montano alto (supratemplado) e supramediterráneo, entre os 1.200 e 1.700 m de altitude, constituíndo o límite altitudinal da vexetación arbórea nas zonas de umbría dos principais macizos montañosos de Galicia (Os Ancares, O Cebreiro, O Courel, Airibio, Pena Trevinca, Manzaneda, O Xurés) (Rigueiro Rodríguez, 2003). Pode chegar aos 2.300 m no Pirineo (Blanco *et al.*, 1998). Malia que non soporta alagamento continuado, si é capaz de prosperar en terreos con hidromorfía estacional. Evita os solos arxilosos e o seu rango óptimo de acidez corresponde a un pH = 4 – 5, aínda que pode medrar nun intervalo de 3,5 a 7 (Cisneros *et al.*, 2008). Villarino (1983) clasifica o bidueiro dentro das especies con menores requirimentos de nutrientes (algo máis esixente na etapa xove para, progresivamente, reducir a súa demanda) e cun requirimento de auga medio. O mesmo autor expón a frugalidade dos solos onde medra o bidueiro cos valores recollidos na Táboa 1.1. O escenario ideal para

Betula celtiberica son climas continentais con temperatura media entre 8 e 12 °C, con escasa ou nula seca estival, solos con perfil de terra parda húmida, textura franco-limosa e pH en horizontes superficiais entre 4,5 e 5,5. A presenza de gando é un gran perigo para o bidueiro, que pode romper a planta nova ou alimentarse dos ramiños e follas xoves. Aló onde o clima se torna máis mediterráneo, e a sequía provoca sequedade estacional no solo, o bidueiro pode formar parte do bosque de ribeira (Álvarez *et al.*, 2000).

Táboa 1.1. Análise de macronutrintes nas follas de *Betula celtiberica*, e no manto de descomposición sobre o que habita (elaboración propia cos datos de Villarino Urtiaga, 1983).

Elemento	Concentración en manto de descomposición (%)	Concentración en follas (%)
Nitróxeno	1,40 - 1,70	2,20 - 2,50
Fósforo	0,050 - 0,080	0,13 - 0,18
Potasio	0,30 - 0,70	0,60 - 0,90
Calcio	0,15 - 0,30	0,30 - 0,60
Magnesio	0,15 - 0,40	0,20 - 0,40

O bidueiro brota ben do cepo, aínda que non da raíz. A rexeneración do bidueiro é profusa a partir da semente, producindo abundantes colleitas anuais desta despois dos 10 anos (Álvarez *et al.*, 2000). Non obstante, require un terreo despexado para o desenvolvemento da semente, moi pobre en reservas, polo que aqueles substratos con pouco contido en materia orgánica non mineralizada, ou mesmo con solo mineral espido, son óptimos para que a xerminación do froito sexa competitiva con respecto á doutras especies (Cisneros *et al.*, 2008). O seu carácter frugal e o seu temperamento robusto fan que o bidueiro presente poucos fallos nas repoboacións (Villarino Urtiaga, 1983). O rexenerado natural carrega densidades de poboacións extremadamente altas, fenómeno que tamén se atopa noutras especies do mesmo xénero noutros países (Johansson, 1992; Lemaire *et al.*, 2000; Zalitis, 2008). Isto provoca, se a masa non é atendida a tempo, a formación de bosques impenetrables con árbores de forma deficiente e case nulo valor comercial.

A frondosa autóctona caducifolia que mostra un crecemento máis rápido no noroeste español é o bidueiro (Rojo *et al.*, 2005). O crecemento diamétrico comeza na primavera despois do brote das follas, e en condicións favorables pode chegar aos 3 – 4 mm cada ano (Hynynen *et al.*, 2010). Nos países escandinavos promocionouse o seu uso na industria do moble: a súa alta produtividade, xunto coa súa morfoloxía, fan do bidueiro a especie frondosa máis importante na silvicultura nórdica (Cisneros *et al.*, 2008, Hynynen *et al.*, 2010). Porén, apenas se emprega en repoboacións produtivas en Galicia: a planta de bidueiro comercializada por viveiros apenas acadou as 270.000 unidades en 2018 (Dirección Xeral de Planificación e Ordenación Forestal, 2020).

En Galicia, o bidueiro pode acadar os 15-20 m de altura, e chega ao máximo crecemento en altura ao redor dos 8 anos nas mellores calidades, e aos 16 nas peores (Diéguez-Aranda *et al.*, 2006). As súas raíces son pouco profundas e espalladas (Álvarez *et al.*, 2000). Ten unha copa clara que produce pouca sombra, o cal reforza o seu carácter de potencial especie protectora para especies con temperamento máis delicado, portándose como especie edificadora que prepara o camiño para a instalación de especies máis próximas ao óptimo climático (Villarino Urtiaga, 1983). É unha especie pouco lonxeva, que normalmente non supera os 130 anos.

1.3.4 Silvicultura

A silvicultura para esta especie divídese en dúas opcións, dependendo do destino ao que se adiquen os produtos da masa: trituración ou madeira para serra e chapa.

Os bosques orientados a madeira de trituración non precisan de actuacións (Cisneros *et al.*, 2008). É posible deixar evolucionar por si mesma a masa para conseguir un máximo rendemento cunha quenda de corta (a feito) de 25 – 30 anos. Este modelo trae como contrapartida que non se desenvolverán individuos aptos para o procesado dos fustes mediante serra ou coitela (Álvarez *et al.*, 2000).

En canto á segunda opción silvícola, para producir fustes de dimensións tecnolóxicas, Villarino (1983) propón un modelo con amplo marco de plantación (3,5 x 3,5 m), onde considera que pode chegar a non ser necesario facer desmestas ou rareos, para obter uns fustes de 20 – 25 cm de diámetro normal nunha quenda de corta de 25 – 30 anos. En parcelas experimentais o mesmo autor rexistra unhas quendas de máxima renda en especie de 28 e 40 anos, con valores de crecemento medio de 8,75 e 6,8 m³/ha/ano, respectivamente. Así, estas masas acadarán unhas producións de 245 m³/ha aos 28 anos e de 272 m³/ha aos 40 anos.

Outra formulación para conseguir madeira de alto valor comezaría por un marco de plantación de 3 x 3 m (1.100 pés/ha), empregando planta de raíz núa de dúas seivas, duns 60 a 70 cm de alto. Se, pola contra, se parte dun rexenerado natural, convén unha densidade inicial duns 1.100 pés/ha, podendo chegar aos 1.600 pés/ha. O normal para masas espontáneas de bidueiro é a existencia de densidades moi elevadas que requiren intervencións moi intensas e temperás. Se non se actúa a tempo, as masas acabarán despexándose finalmente, pero os individuos carecerán do tamaño e vigor suficientes, debido ás duras condicións de competencia (Álvarez *et al.*, 2000). De todos modos, unha densidade de partida elevada pode supoñer unha defensa fronte animais, neve ou outra vexetación competidora. O crecemento inicial desta especie é rápido, pero será necesario eliminar a vexetación herbácea ou arbustiva que lle poda facer competencia, sobre todo por problemas de asombrado, que o bidueiro tolera mal (Cisneros *et al.*, 2008). É fundamental evitar o acceso de gando á superficie que se pretende aproveitar (Villarino Urtiaga, 1983), posto que o bidueiro pode ser moi prexudicado por roturas e rabucho dos animais.

Aínda que a especie presenta boa poda natural se a densidade é a axeitada, para conseguir madeira de calidade (pouco nudosa) é necesario podar. Ademais, con frecuencia aparecen individuos bifurcados, polo que as talas de formación tamén son aconsellables. Villarino (1983) recomenda podar nos meses de xaneiro ou febreiro, cunha relación de talo podado con respecto ao tronco completo de 1/4 ou 1/3. Como norma xeral, só se podarán en altura aquelas árbores destinadas á corta final, e descártase esta práctica para masas que vaian ser destinadas a madeira de trituración. En Cisneros *et al.* (2008), o Dr. Villarino Urtiaga propón o esquema de podas que se mostra na Táboa 1.2.

Táboa 1.2. Etapas de actuación para podas en *Betula celtiberica*. Elaboración propia segundo a proposta de Villarino Urtiaga en Cisneros *et al.* (2008).

Idade da masa (anos)	Tipo de actuación
3	Talas de formación
7	Talas de formación e poda ata 2 m
11	Poda sobre 500 pés/ha ata 3,5 m
15	Poda sobre 200 pés seleccionados por ha ata 5 m

Álvarez *et al.* (2000) prescriben a obrigatoriedade das talas de formación nos 2 a 6 primeiros anos da árbore, e unha poda baixa naqueles 500 – 600 mellores pés por hectárea cando a altura total sexa de 6 m. Esta selección de árbores de porvir non debe adiarse máis aló dos 20 anos.

As desmestas e rareos deben ser temperáns, aproveitando o vigoroso crecemento inicial do bidueiro para favorecer o aumento de diámetro dos fustes. Villarino (1983) establece desmestas aos 8 – 10 anos para aquelas repoboacións de marco 2,5 x 2,5 m, e considera que para marcos de plantación máis espallados (3,5 x 3,5 m) os rareos poden resultar innecesarios. Álvarez *et al.* (2000) establecen os 15 anos para, partindo dunha densidade inicial entre 1.100 e 1.600 pés/ha, eliminar un terzo da masa, cortando as árbores menos vigorosas e peor conformadas. Os produtos intermedios extraídos serán aptos para combustible, posto que a leña de bidueiro é de gran calidade. O segundo rareo será necesario en torno aos 20 anos, e neste momento será necesaria a selección de árbores de porvir. Esta tarefa non é sinxela, e deben primar os criterios de forma na selección. Prescríbese un terceiro e final rareo aos 25 anos, para chegar posteriormente a unha corta final aos 35 – 40 anos, cunha densidade de 300 pés/ha e unha produción máxima de madeira. Para conseguir maiores diámetros (30 – 35 cm) sería preciso adiar a corta final aos 40 – 45 anos, pero ese retraso pode provocar a aparición de podremias na madeira.

Cisneros *et al.* (2008, citando a varios autores) propoñen unha primeira desmesta entre os 15 e os 25 anos para deixar unha densidade de 700 a 900 pés por hectárea. Cunha quenda de rotación de rareos de entre 5 e 7 anos (ou mesmo de 3 anos, nas mellores calidades), apúntase a chegar a unha densidade de 200 a 300 pés por hectárea, con quendas sempre inferiores a 60 anos para evitar podremia.

A proposta de espazamento semidefinitivo de Villarino (2004) apunta a unha silvicultura para unha quenda de 30 anos cun único rareo. A formulación segue o seguinte esquema:

- Marco de plantación a 3,5 x 4 m (correspondente a unha densidade de 715 pés/ha)
- Un único rareo aos 20 anos, de 350 pés/ha, con volume extraído esperado de 0,129 m³/pé, o que corresponde a uns 45 m³/ha
- Corta final aos 30 anos, cun total de 365 pés/ha, a 0,452 m³/pé, totalizando 165 m³/ha. O volume total producido para toda a quenda situarase en torno aos 210 m³/ha. Un crecemento medio de 210 m³ en 30 anos corresponde a 7 m³/ha/ano.

En canto ás posibilidades de crecementos e produción específicos para o noroeste peninsular, cabe citar os traballos de Villarino (1983), Villarino e Riesco (1997) e Rojo *et al.* (2005).

Villarino (1983) elaborou a seguinte tarifa para calcular o volume madeirable de árbores de bidueiro que medran en Galicia:

$$v = 0,029896 \times d^{1,9426} \times h^{1,1116} \quad (1)$$

onde v representa o volume madeirable con casca, en decímetros cúbicos, d o diámetro normal en centímetros e h é a altura total en metros.

O estudo de Villarino e Riesco (1997) propón unha silvicultura de “árbores illados” en réxime de crecemento libre, por oposición a unha silvicultura “de masa”, onde as árbores medran con competencia entre pés. Trátase de maximizar o espazo para cada árbore individual, por unha banda, e minimiza o número de pés por unidade de superficie, por outra, ofrecendo así unha silvicultura de mínimos: unha referencia de densidade de masa mínima a cada idade. A evolución da masa cunha densidade límite, na que as árbores deixan de sufrir competencia, acadaríase coas magnitudes referidas na Táboa 1.3. Rojo *et al.* (2005) rexistraron para Galicia crecementos como os mostrados na Táboa 1.4.

Táboa 1.3. Pauta de evolución da densidade dunha repoboación de bidueiro no límite entre unha silvicultura de masa e outra de árbores illadas en réxime de crecemento libre (elaborada con datos de Villarino e Riesco, 1997).

Diámetro normal (cm)	Altura (m)	Relación entre diámetro de copa e diámetro normal	Densidade mínima (pés/ha)
15	9	30	490-560
25	15	27	220-250
35	18	24	140-160
45	21	20	120-140

Táboa 1.4. Crecementos medios e quendas de máxima renda en especie para o bidueiro en Galicia (elaborada con datos de Rojo *et al.*, 2005).

Índice de sitio (m) aos 20 anos	Crecedemento medio (m ³ /ha/ano)	Quenda de corta de máxima renda en especie (anos)
8	3,7	59
12	5,7	42
16	8,2	33

Os mesmos autores (Rojo *et al.* 2005), a partir de datos rexistrados tamén en Galicia, elaboraron a seguinte tarifa de cubicación:

$$V_{cc} = 0,0499 \times d^{2.0112} \times h^{0.8288} \quad (2)$$

onde V_{cc} é o volume con casca en decímetros cúbicos, d representa o diámetro normal en centímetros, e h a altura total en metros.

Entre os modelos silvícolas que propón o goberno autonómico de Galicia, a Consellería do Medio Rural e do Mar (2014) establece un instrumento de xestión específico para masas de bidueiro, o denominado “BC1”. O obxectivo deste modelo é obter madeira de calidade para serra e chapa, cunha quenda de 35 – 45 anos para conseguir unha curta final de 250 pés por hectárea. Propón unha densidade inicial de 1.100 – 1.600 plantas, que pode ser de rexenerado natural ou mediante repoboación. A primeira actuación serán talas de formación, seguidas de podas. As talas de formación efectuaranse a partir do segundo ano e ata os seis anos, logo unha poda baixa cando as árbores acaden os 6 metros de altura, e máis adiante unha poda alta sobre os mellores 500-600 pés/ha. Prescribíense tres rareos, seguindo o momento e a intensidade que indica Álvarez *et al.* (2000).

Finalmente, aínda que non se trate dun manexo silvícola onde o bidueiro sexa a especie protagonista, si se cita esta especie (Álvarez *et al.*, 2000; Cisneros *et al.*, 2008) como acompañante en repoboacións de coníferas (onde aporta valores estéticos e funciona de cortalume) ou mesmo doutras frondosas, como o freixo ou a cerdeira (*Prunus* sp.). As

recomendacións prescriben considerar a corta de bidueiro aos 35 – 45 anos coma se dun rareo se tratase, deixando as especies principais para unha corta final anos despois.

1.4 A MADEIRA DE BIDUEIRO

A madeira de bidueiro ten sámago branco ou branco-encarnado. A cerna é de igual cor aínda que escurece co tempo. Presenta vetas lonxitudinais claras e, esporadicamente, en igual sentido, finas liñas de lonxitude variable de cor ocre. Ten certo brillo e gran fino e homoxéneo. Os aneis de crecemento son pouco diferenciados (Figuras 1.7 e 1.8). A madeira é dura, densa, tenaz e elástica. Contráese moderadamente perante os cambios de humidade no ambiente. É boa como madeira estrutural, seca moderadamente ben, sen grandes deformacións, contraccións ou fendas. Trabállase ben e admite tratamentos superficiais, incluíndo o tinguido. A súa densidade, serrada e secada ao aire ata unha humidade do 12 % acada sobre os 673 kg/m³. Non resiste ben a intemperie e é moi vulnerable a ataques fúnxicos e de insectos, polo que debe ser tratada con produtos preservantes para o seu uso en exteriores (Nutsch, 1996; Álvarez *et al.*, 2000). Polas súas propiedades táctiles e visuais a madeira de bidueiro é descrita como de “textura lisa, de vetado ondulado, raiada, flameada, brillante e decorativa” (Wagenführ e Wagenführ, 2022). Os destinos e usos desta madeira son variados en ebanistaría e carpintaría: tanto mobles de gama económica como mobiliario e interiores de luxo, portas e molduras, e frisos de boa calidade, sendo unha madeira ideal para traballos de talladura. O taboleiro de contrachapado de bidueiro é especialmente axeitado para elementos sometidos a alta tensión mecánica (Vignote Peña, 2014). Wagenführ e Wagenführ (2022) consideran madeiras similares a do bidueiro canadense (*sweet* ou *canadian birch*, *Betula lenta* L.), o bidueiro amarelo (tamén americano, de nome científico *Betula lutea* Michx. f.) e a do que os autores denominan bidueiro peludo ou de turbeira (*Betula pubescens* Ehrh.).

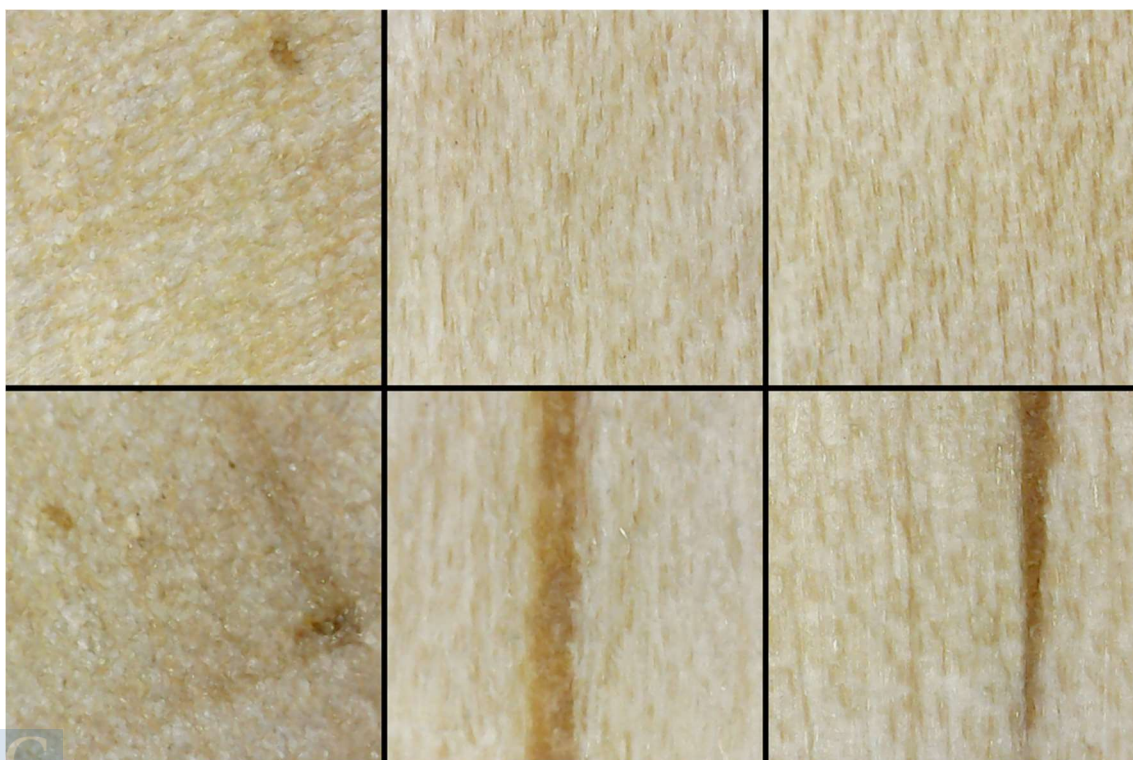


Figura 1.7. Vistas ampliadas de madeira de bidueiro, de cortes en tres sentidos. De esquerda a dereita: corte transversal, corte radial e corte tanxencial.



Figura 1.8. Mostras de madeira de *Betula celtiberica* procedente de Galicia.

Tradicionalmente, en Galicia, a madeira de bidueiro destinouse ás serrarías naquelas zonas onde esta árbore era abundante (Villarino Urutiaga, 1983), fabricándose tablóns para mobles e *cuadrillas* para tornaría. Na *op. cit.* tamén se menciona o uso de madeira de bidueiro para a elaboración de zocas. A escaseza de árbores de boa forma e dimensións limita o uso da súa madeira en aplicacións de alto valor (Villarino Urutiaga *et al.*, 2004), se ben é certo que cunha silvicultura axeitada é posible producir madeira para chapa de desenrolo ou para chapa plana. Outros usos destacables son a fabricación de pezas para mobles, tornaría, artigos deportivos, utensilios de cociña, xoguetes, parqués e entarimados, sendo apta tamén como materia prima para fabricar pasta de celulosa e tableiros de fibras. Dende antigo, a madeira de bidueiro foi utilizada para a fabricación de postes para cercas, alboios e outras construcións, o que provocou unha presión de selección negativa sobre as masas desta especie, ocasionando que os mellores exemplares se atopen en zonas de difícil acceso (Vega Alonso *et al.*, 1993).

Unha inspección microscópica da madeira de bidueiro amosará uns vasos illados e en grupos de dous a cinco, ou máis, con distribución difusa e tabiques finos. As punteaduras son sinxelas, de forma oval e moi finas, situadas nas paredes tanxenciais. As perforacións son escaleriformes con barras finas e apertadas, sen engrosamentos helicoidais. Os radios leñosos teñen un espesor de 1 a 4 células. A traxectoria dos máis grosos é xeralmente rectilínea en contraposición coa dos unicelulares, que é ondulada. As fibras son de sección pentagonal e de luz ancha. O número de *Runkel* (relación entre o dobre do grosor das paredes celulares e o diámetro do lumen) acada un valor de 0,62, o que a fai unha madeira de parede grossa (Wagenführ e Wagenführ, 2022).

En canto ás propiedades da madeira de bidueiro, nas Táboas 1.5 e 1.6 preséntanse, respectivamente, as características físicas e mecánicas desta madeira.

Táboa 1.5. Principais magnitudes físicas da madeira de bidueiro (*Betula verrucosa* Ehrh). Peso seco volumétrico = peso da madeira seca referido ao volume da mesma en estado saturado. Elaboración propia a partir de datos de Gutiérrez Oliva e Plaza Pulgar (1967).

Densidade ao 12 % de humidade (kg/m ³)	Higroscopicidade (kg/m ³)	Peso seco volumétrico (kg/m ³)	Punto de saturación das fibras (%)	Contracción volumétrica (%)	Coefficiente de contracción volumétrica (%)
654	0,0038	536	30	15,5	0,38
Contracción radial (%)	Coefficiente de contracción radial (%)	Contracción tanxencial (%)	Coefficiente de contracción tanxencial (%)		
4,33	0,15	5,29	0,18		

Táboa 1.6. Valores das principais variables das propiedades mecánicas da madeira de bidueiro. Elaboración propia a partir de Wagenführ e Wagenführ (2022).

Variable	Valor medio
Resistencia a la compresión axial (σ_{dB})	51 N/mm ²
Resistencia á flexión estática (σ_{bB})	147 N/mm ²
Resistencia á tracción paralela á fibra ($\sigma_{zB }$)	204 N/mm ²
Resistencia á tracción perpendicular á fibra ($\sigma_{zB\perp}$)	~ 7,0 N/mm ²
Resistencia ao esforzo cortante (τ_{aB})	13,3 N/mm ²
Resistencia ao impacto (a)	10,0 J/cm ²
Dureza Brinell paralela á fibra (HB)	~ 48 N/mm ²
Dureza Janka paralela á fibra (HJ)	59 N/mm ²
Dureza Brinell perpendicular á fibra (HB \perp)	36 N/mm ²
Dureza Janka perpendicular á fibra (HJ \perp)	~ 56 N/mm ²
Módulo de elasticidade paralelo a la fibra ($E_b $)	15.500 N/mm ²
Módulo de elasticidade perpendicular a la fibra ($E_b \perp$)	800 N/mm ²

Tratamentos térmicos poden mellorar as propiedades da madeira de bidueiro (Borůvka *et al.*, 2018), en concreto a dureza e a resistencia a flexión, facéndoa comparable con outras madeiras máis apreciadas, como a de faia. En calquera caso, cando o tratamento supón aplicar unha temperatura elevada (por riba dos 200 °C) obsérvase un decaemento nas propiedades, debido á alteración na composición química da madeira. Unha combinación de tratamentos de compresión e modificación térmica poden levar a cambios positivos nas propiedades mecánicas (módulo de elasticidade e resistencia) nas madeiras de frondosas de porosidade difusa de baixa ou media densidade, como é o caso do bidueiro (Möttönen *et al.*, 2015). O control no contido de humidade da madeira permite exercer un seguemento preciso sobre o proceso de modificación térmica para mellorar as propiedades de mecánicas desta, asegurando ao mesmo tempo que os impactos negativos deste proceso (por exemplo, a tendencia da madeira a volverse quebradiza) se minimizan (Hill *et al.*, 2021).

Os taninos do bidueiro e o seu valor ornamental tamén son citados como utilidades desta especie (Vignote Peña, 2014) e, en países do norte, centro e leste de Europa, o zume da árbore consúmese tanto en fresco como en forma de bebida fermentada, téndose rexistradas as súas propiedades medicinais e cosméticas (Svanberg *et al.*, 2012). A súa casca despréndese en bandas horizontais, é branca, brillante, con fisuras profundas na parte inferior do talo. A árbore ten unha porcentaxe de casca de arredor do 11 – 26 %, dependendo da altura no fuste, e posúe unha densidade en torno aos 562 kg/m³ (Wagenführ e Wagenführ, 2022). Da casca do bidueiro extráese o betulinol ou betulina, un triterpeno con diversos derivados que se estudan polas súas propiedades anticancerixenas e antivíricas (Abyshv *et al.*, 2007).

O estudo das propiedades desta madeira é necesario para poder determinar os usos máis axeitados aos que se pode destinar. Seleccionáronse as tres variables de densidade da madeira porque adoitan utilizarse como índices de calidade do material. No caso da densidade básica, ademais, serve para estimar a cantidade de carbono secuestrado na árbore en pé e nos produtos de madeira en servizo durante a súa vida útil (Castaño-Santamaría *et al.*, 2013). As propiedades de contracción foron seleccionadas para cuantificar a estabilidade dimensional da madeira en volume e nas principais direccións do material, fronte as variacións do contido de humidade da madeira. O coñecemento dos puntos de saturación da fibra é esencial para os procesos de secado, tratamento, estabilidade e uso eficiente da madeira en distintas aplicacións industriais e de construción. Dun xeito semellante, a porosidade e a densidade da parede celular son propiedades clave para comprender como a madeira interactúa coa humidade, como reacciona aos tratamentos superficiais e como se comporta en diferentes aplicacións industriais e estruturais.

Existen publicacións internacionais que recollen algunhas das características da madeira de bidueiro (Möttönen e Luostarinen, 2006; Repola, 2006; Dobrowolska *et al.*, 2020; Wagenführ e Wagenführ, 2022). Así mesmo, existen traballos de referencia a nivel nacional sobre as propiedades físicas e mecánicas de madeira da especie, como os de Gutiérrez Oliva e Plaza Pulgar (1967), Casasús (1997) e Vignote Peña (2014), pero a madeira de bidueiro procedente de Galicia non conta, ate o de agora, con estudos específicos sobre as súas propiedades físicas relativas á densidade e estabilidade dimensional (contraccións), que deben ser mellor coñecidas para asignarlle a esta materia prima os usos que máis se lle adecúen. É o propósito deste traballo contribuír ao coñecemento da madeira de bidueiro (*Betula celtiberica* Rothm. et Vasc.).

2 OBXECTIVOS

Os obxectivos desta tese son os seguintes:

- Determinar as propiedades físicas da madeira de bidueiro galego, incluíndo a densidade, a contracción, as propiedades relacionadas coa humidade e as propiedades cromáticas. Este apartado levarase a cabo coa realización de probas de laboratorio para medir con precisión a densidade da madeira mediante métodos normalizados. Estudaranse os patróns de contracción volumétrica e nas direccións lonxitudinal, radial e tanxencial. As propiedades relacionadas coa humidade incluírán a determinación de varios contidos de humidade, dos puntos de saturación da parede celular, e da higroscopicidade. En canto á cor, utilizaranse técnicas colorimétricas para cuantificar os tons e as variacións cromáticas características do bidueiro galego
- Analizar as variacións de densidade e contracción da madeira dentro das árbores, entre árbores e entre distintos lugares de Galicia. Esta análise implicará unha mostraxe sistemática a diferentes alturas e posicións radiais dentro de cada árbore para estudar a variabilidade intraárbore. Seleccionaranse diferentes árbores en cada lugar de mostraxe para avaliar a variabilidade entre individuos. Ademais, estableceranse parcelas de mostraxe en distintas comarcas de Galicia para captar a variabilidade xeográfica e edafoclimática
- Investigar as relacións entre as propiedades da madeira e as características dendrométricas das árbores. Recolleranse datos sobre características como a idade, o diámetro á altura do peito (diámetro normal), a altura total e a forma do tronco durante o crecemento das árbores, e buscaranse correlacións coas propiedades da madeira. Utilizaranse técnicas estatísticas como a análise de correlación, de regresión e de comparación por grupos para identificar relacións significativas entre estas variables e as propiedades físicas da madeira
- Desenvolver modelos para predicir a densidade da madeira e outras propiedades físicas en función das características das árbores e das masas. A partir dos datos recollidos e das relacións identificadas, construíranse modelos estatísticos predictivos. Estes modelos utilizarán variables facilmente medibles no campo, como o diámetro normal ou a altura das árbores, para estimar propiedades como a densidade básica ou a contracción volumétrica.

3 METODOLOXÍAS

As 27 árbores que compoñen a mostra de estudo deste traballo localizáronse en 8 parcelas situadas na comunidade autónoma de Galicia (noroeste de España), nas provincias de Lugo e Ourense, concretamente nas zonas da montaña e chaira en Lugo, e norte da provincia de Ourense. A extensión de terreo cuberta pola mostra ven cercada por un rectángulo de 7.800 quilómetros cadrados, tal e como se mostra na Figura 2.1.

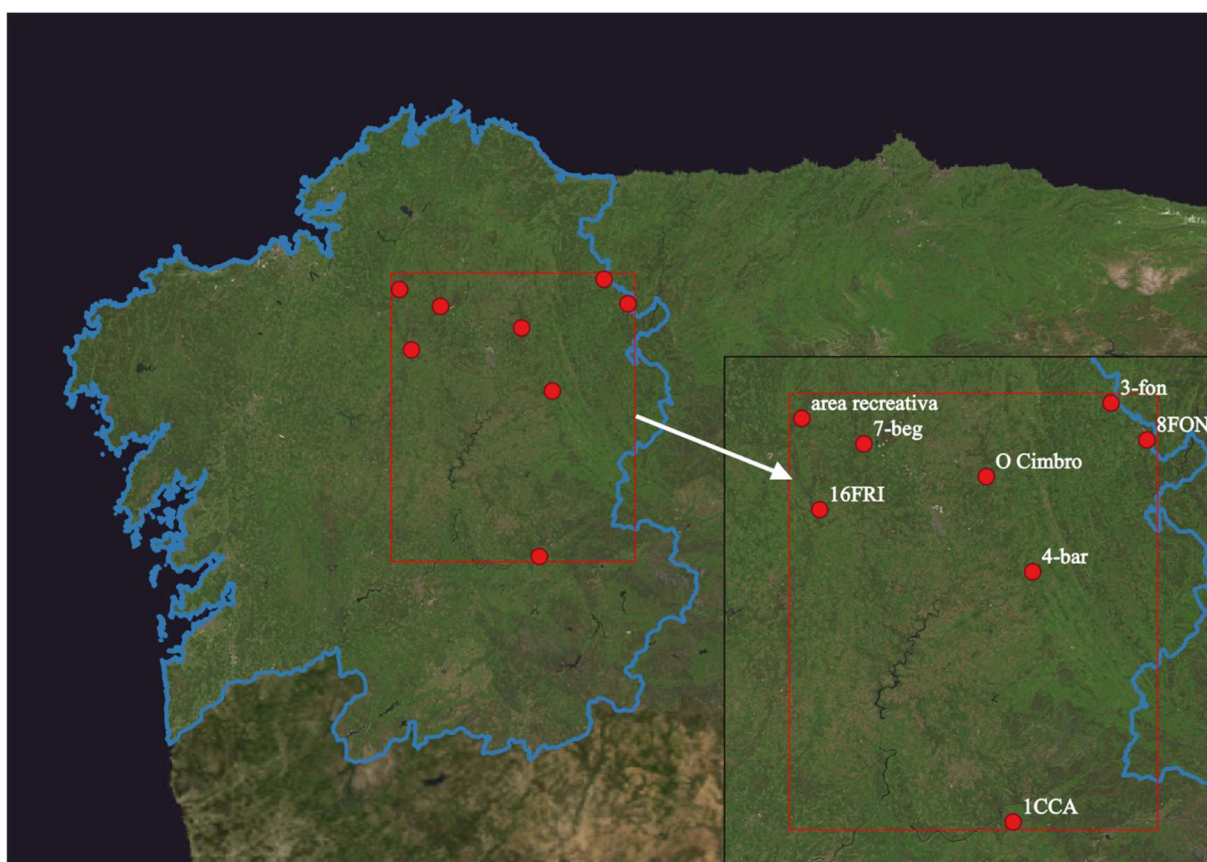


Figura 2.1. Extensión da zona de mostraxe dos pés de bidueiro, no recadro encarnado. Os puntos encarnados representan as localizacións das parcelas onde foron apeadas as árbores. Cada parcela coa súa denominación clave.

3.1 CARACTERÍSTICAS DA ZONA DE ESTUDO

A caracterización das parcelas onde foron seleccionadas as árbores do estudo levouse a cabo coa toma de datos en campo e coa consulta de bases de datos de libre acceso.

3.1.1 Tipoloxía de usos do territorio

Os datos sobre a cobertura do solo nas parcelas de estudo recóllense do conxunto de datos da cobertura do solo da *European Space Agency Climate Change Initiative (CCI)* (European Space Agency, 2020). Na Figura 2.2 móstrase o mosaico de tipos de cobertura da zona de mostraxe no ano 2017. A distribución das clases de cobertura terrestre na área de estudo en 2020 móstrase na Táboa 2.1, así como a superficie total e a diferenza porcentual en 2020 en comparación cos datos de 1992.

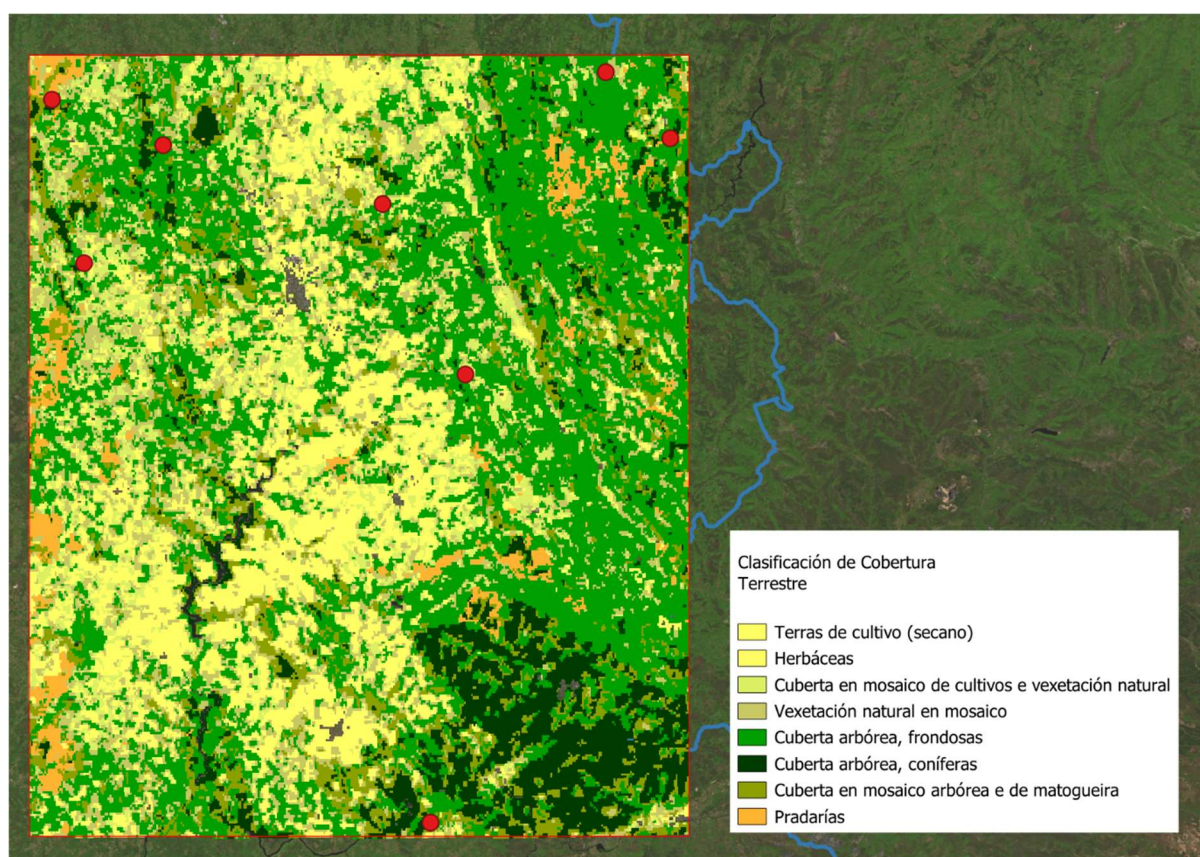


Figura 2.2. Rasterización dos usos do territorio da zona de estudo. Elaboración propia a partir de datos da European Space Agency (2020). A área comprendida ven definida na Figura 2.1.

Táboa 2.1. Tipos de cobertura predominantes na área de estudo en 2020. Elaboración propia a partir de datos da European Space Agency (2020).

Cobertura (%)	Clasificación	Área (km ²)	Variación de superficie entre 1992 e 2020 (%)
36,0	Cuberta arbórea, frondosas	3.734,90	- 7,20
15,7	Vexetación natural en mosaico	1.632,40	+ 0,50
13,3	Terras de cultivo (secano)	1.376,60	+ 2,40
9,5	Cuberta en mosaico arbórea e de matogueira	988,6	+ 1,80
8,6	Cuberta arbórea, coníferas	897,5	- 0,00
7,8	Cuberta en mosaico de cultivos e vexetación natural	804,8	+ 1,60
2,7	Pradarías	280,4	+ 0,10
2,5	Herbáceas	262,3	+ 0,60

Apréciase unha diminución da superficie forestal con respecto a outros tipos de cobertura vexetal, sobre todo no caso das masas de frondosa. A superficie para usos agrícolas incrementouse, parellamente con formacións de tipo matogueira ou herbáceas. O abandono do solo e a falta de ordenación territorial dos usos agroforestais supón importantes problemas ambientais e socioeconómicos, entre os que destaca a vulnerabilidade fronte aos incendios forestais e a baixa eficiencia das actividades agrarias, como se recolle na exposición de motivos da Lei 11/2021, do 14 de maio, de recuperación da terra agraria de Galicia (Xunta de Galicia, 2021). Unha recuperación do terreo abandonado cara a creación de masas forestais ordenadas, na que o bidueiro tería perfecta cabida, sería unha posible opción de cara á solución dos mencionados problemas.

As oito parcelas de procedencia do material de estudo foron levantadas sobre terreo forestal, coa tipoloxía que se mostra na Táboa 2.2. Un exemplo de parcela sobre masa forestal repoboada móstrase na Figura 2.3.

Táboa 2.2. Parcelas de estudo e tipo de terreo sobre o que se asentan.

Código de parcela	Tipo de masa
7-beg	Natural
4-bar	Natural
3-fon	Repoboación
16FRI	Repoboación
1CCA	Repoboación
8FON	Repoboación
O Cembro	Repoboación
Área recreativa	Repoboación



Figura 2.3. Repoboación de bidueiros en “O Cembro”.

3.1.2 Topografía

Os datos de elevación da área de traballo recóllense do conxunto de datos de elevación (*Digital Elevation Model (DEM)* de Copernicus (European Space Agency, 2022) cunha resolución espacial de 30 m. A altitude da zona oscila entre un mínimo de 108 m e un máximo

de 1.636 m, cunha cota media de 618 m. Aínda que o rango entre a elevación mínima e máxima é de 1.528 m, a maior parte desta área (90 %) ten unha cota entre 373 e 1.055 m (Figura 2.4). As cotas sobre as que se atopan as parcelas recompilase na Táboa 2.3.

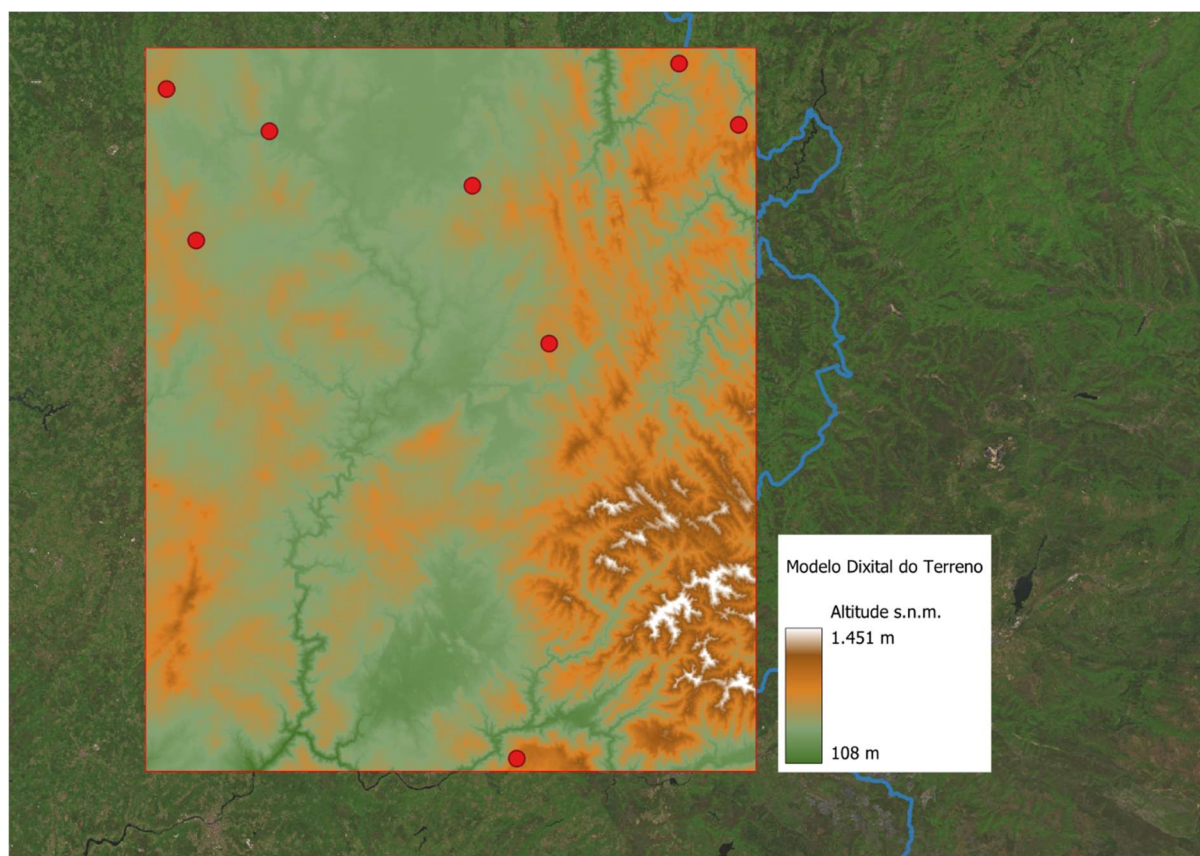


Figura 2.4. Modelo Dixital do Terreno da área de estudo. Elaboración propia a partir de datos da European Space Agency (2022). A área comprendida ven definida na Figura 2.1.

Táboa 2.3. Pendentes e altitudes nas que se asentan as parcelas, xunto co nome dos concellos onde se atopan. Coordenadas en sistema de referencia de coordenadas UTM ETRS89 fuso 29N.

Código da parcela	Concello	COORDENADA X	COORDENADA Y	Pendente (%)	Altitude (m)
7-beg	Begonte	600924	4781120	15	426
4-bar	Baralla	638223	4752844	9	740
3-fon	A Fonsagrada	655542	4790133	20	860
16FRI	Friol	591166	4766570	17	600
1CCA	Castro Caldelas	633912	4697571	0	998
8FON	A Fonsagrada	663492	4781969	55	650
O Cimbro	Pol	627988	4773864	0	560
área recreativa	Guitiriz	587211	4786737	22	687

3.1.3 Clima

Os datos actuais de precipitación e temperatura foron obtidos da base de datos climática *WorldClim* (Fick e Hijmans, 2017). A precipitación media anual na zona é de 1.481 mm, cunha baixa variación ao longo do ano, tendo o mes máis chuvioso unha media de 201 mm e o mes máis seco 38 mm. Na Figura 2.5 móstrase a precipitación total anual para a rexión que abarca as árbores da mostra.

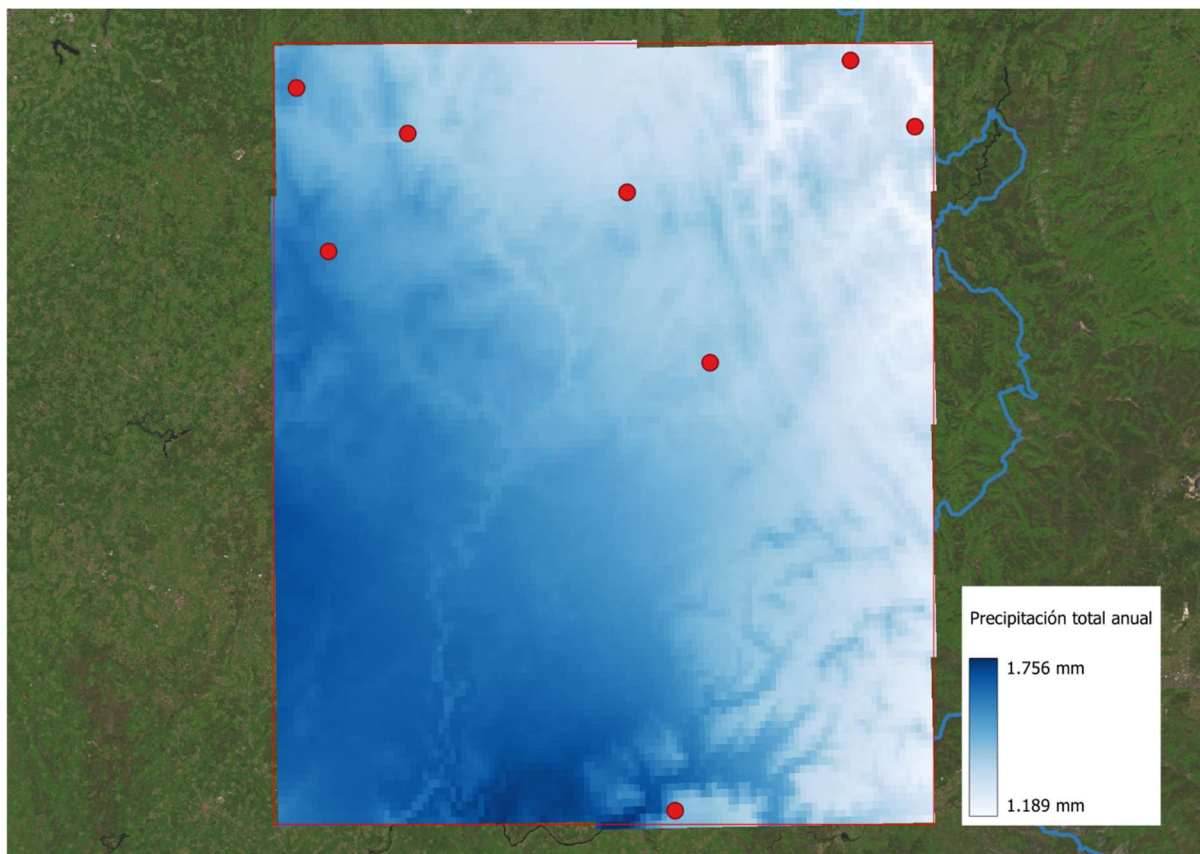


Figura 2.5. Precipitación total anual. Elaboración propia a partir de datos de Fick e Hijmans (2017).

A temperatura media é de 12 °C, cunha baixa variación ao longo do ano. Na Figura 2.6 móstrase unha recapitulación de valores de precipitación e temperaturas no período 2013-2023. A área comprendida na análise de precipitacións e temperaturas é a superficie definida na Figura 2.1.

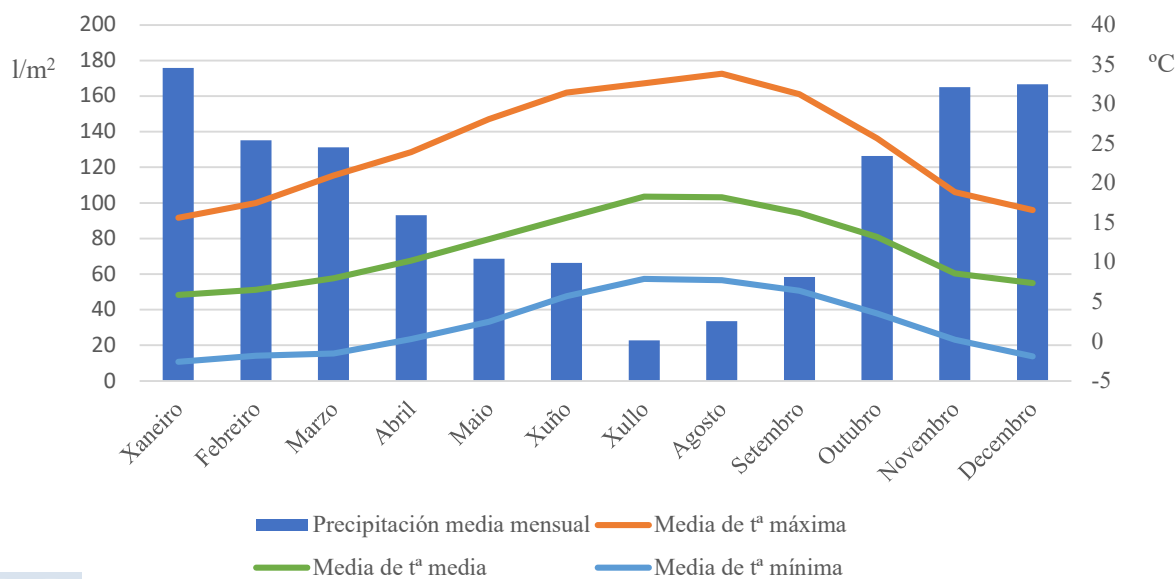


Figura 2.6. Medias dos rexistros de precipitación media mensual, temperaturas mínima, media e máxima, para a área de estudo, no período 2013-2023. Elaboración propia a partir de datos extraídos de Meteogalicia (2023).

3.1.4 Solos

A información deste apartado para a zona de mostraxe extraeuse do conxunto de datos *Soilgrids* de ISRIC - *World Soil Information*, a cal contén predicións globais de varias propiedades físicas e químicas do solo a unha resolución de aproximadamente 300 m (Poggio *et al.*, 2021).

Na zona de interese atópanse texturas do solo francas (72,4 %), e franco areosas (27,4 %), tal e como se aprecia na Figura 2.7. O tipo de solo da zona clasifícase, de acordo coa *World Reference Base for Soil Resources (WRB)* (Deckers *et al.*, 2002), maioritariamente como cambisoles. A densidade aparente do solo varía entre os 700 e os 1.670 kg/m³, tal e como pode verse na Figura 2.8. Na Táboa 2.4 expónse a textura do solo de cada parcela de mostraxe, e na Táboa 2.5 a densidade aparente das parcelas.

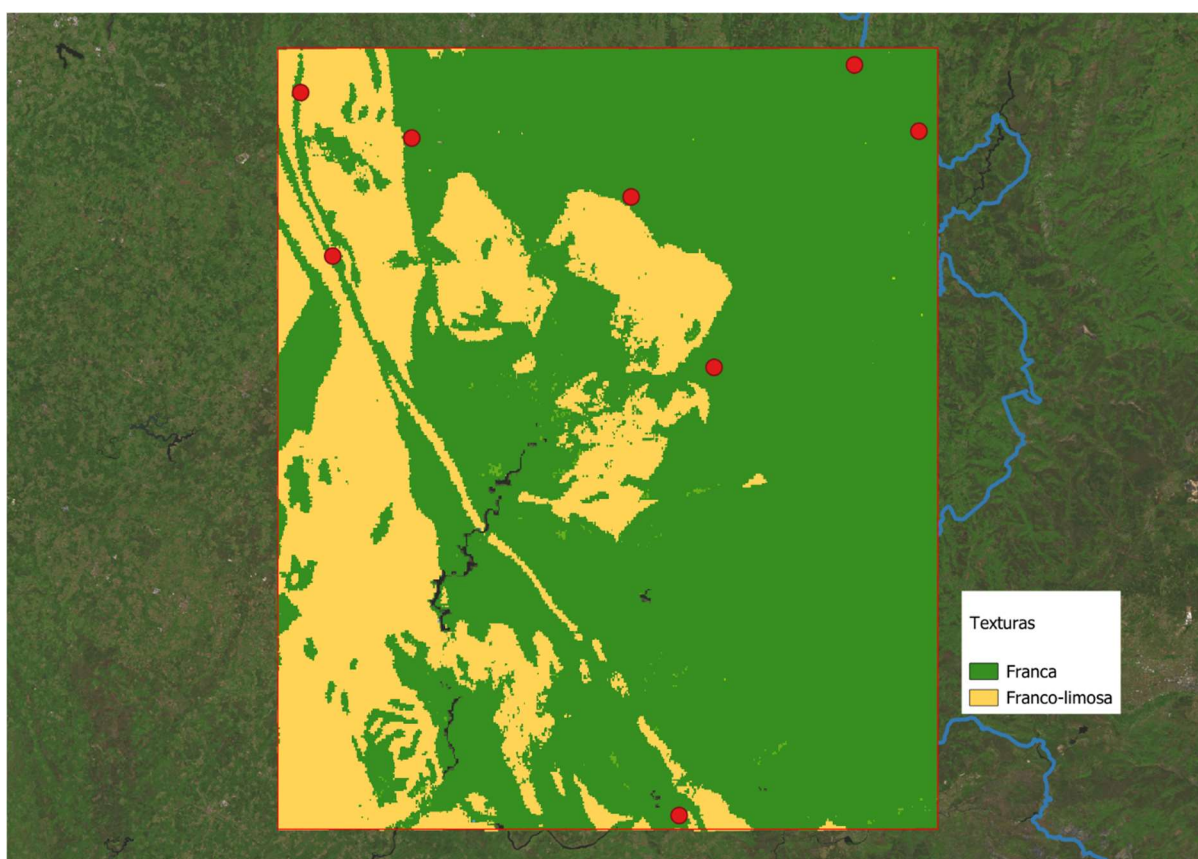


Figura 2.7. Texturas do solo. Elaboración propia a partir de datos de Poggio *et al.* (2021).

Táboa 2.4. Parcelas de mostraxe e textura do solo sobre as que se asentan.

Código de parcela	Textura
7-beg	Franca
4-bar	Franca
3-fon	Franca
16FRI	Franco-limoso
1CCA	Franca
8FON	Franca
O Cimbros	Franca
Área recreativa	Franca

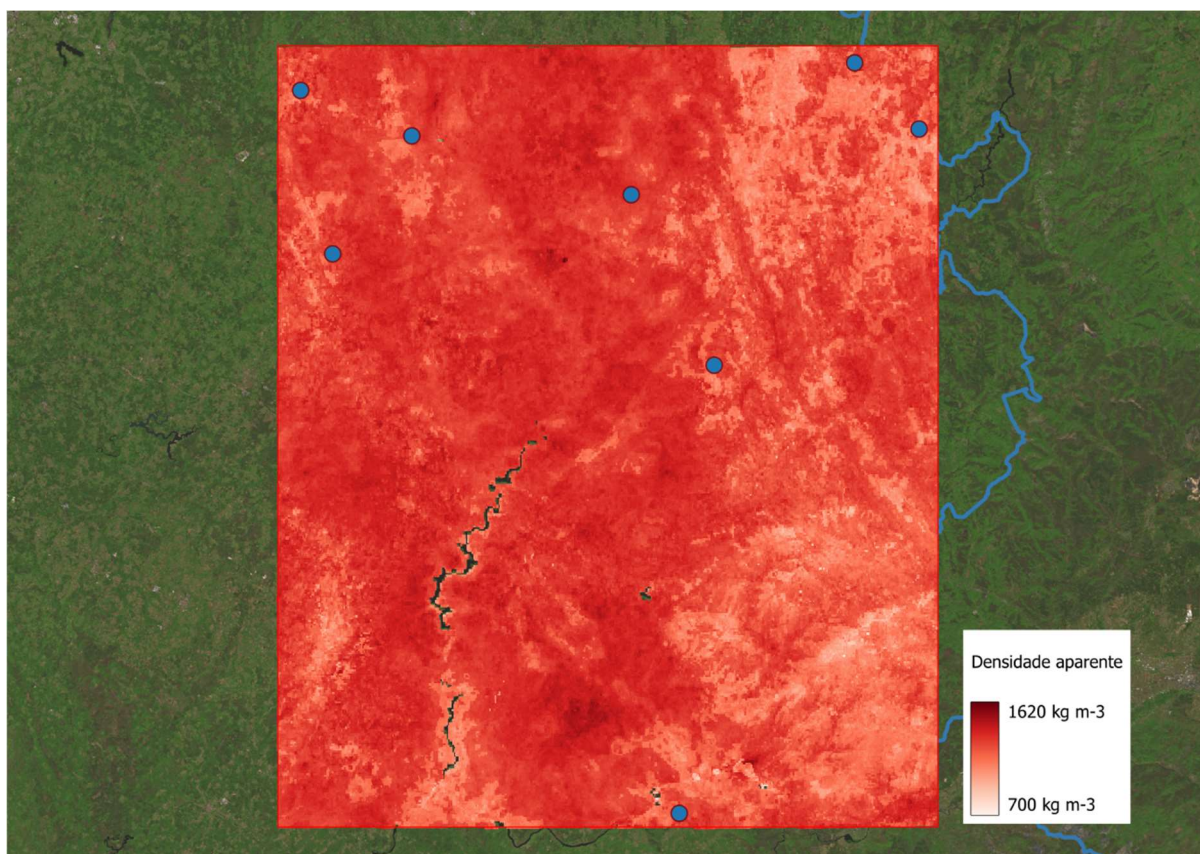


Figura 2.8. Valores de densidade aparente do solo. Elaboración propia a partir de datos de Poggio *et al.* (2021).

Táboa 2.5. Parcelas de mostraxe e densidade aparente do solo sobre as que se asentan.

Código de parcela	Densidade aparente (kg/m ³)
7-beg	1.290
4-bar	1.380
3-fon	1.150
16FRI	1.070
1CCA	1.240
8FON	1.150
O Cimbros	1.340
Área recreativa	1.230

As árbores medraron en solos con contido en materia orgánica relativamente alto, nun rango que variaba entre 84 e 110 toneladas de materia orgánica por hectárea no tramo máis superficial (0-30 cm) do solo. A Figura 2.9 mostra o mapeado de contido de carbono orgánico na área onde se localizaban os bidueiros da mostra. A Táboa 2.6 expón o contido en materia orgánica do solo das parcelas de mostraxe.

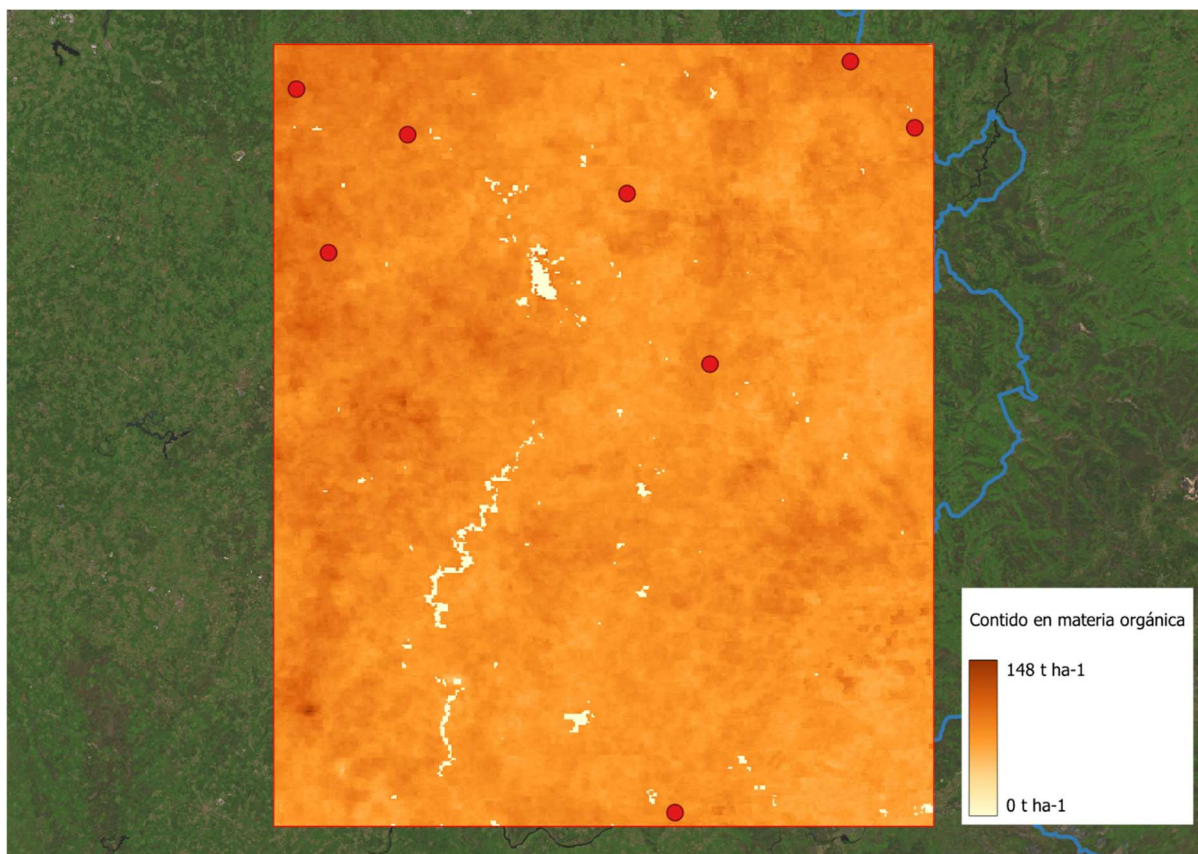


Figura 2.9. Reservas de materia orgánica do solo na área de mostraxe. Elaboración propia a partir de datos de Poggio *et al.* (2021).

Táboa 2.6. Parcelas de mostraxe e reservas de materia orgánica do solo sobre as que se asentan.

Código de parcela	Reservas de materia orgánica (t/ha)
7-beg	100
4-bar	96
3-fon	96
16FRI	109
1CCA	88
8FON	93
O Cembro	83
Área recreativa	110

Como é habitual en Galicia, e de acordo coa querencia da especie, os solos sobre os que medraron as árbores eran maioritariamente acedos, cun rango de pH medido en auga entre 4,8 e 5,2. A Figura 2.10 representa o pH do solo da área de estudo, a Táboa 2.7 mostra o pH do solo de cada parcela de mostraxe.

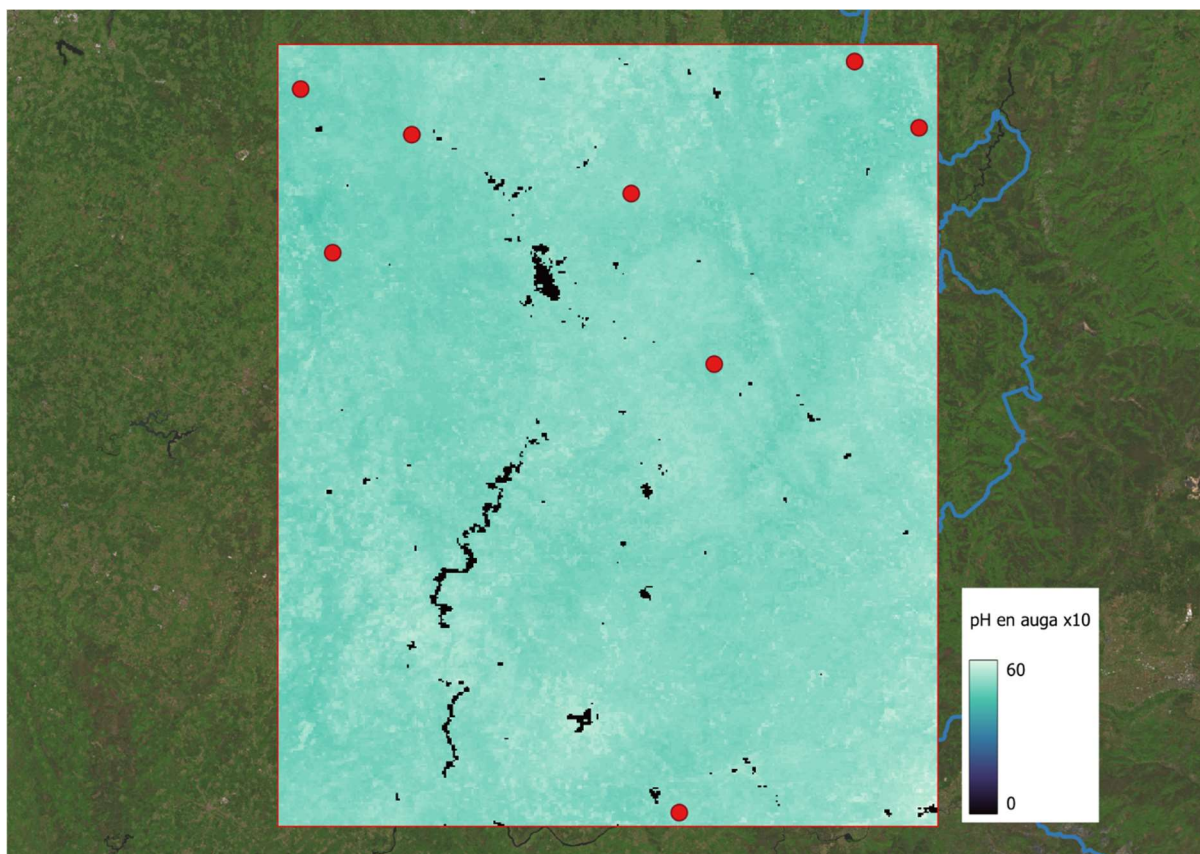


Figura 2.10. Valor do pH medido en auga dos primeiros 5 cm do solo da área de mostraxe. Elaboración propia a partir de datos de Poggio *et al.* (2021).

Táboa 2.7. Parcelas de mostraxe e pH do solo sobre as que se asentan.

Código de parcela	pH
7-beg	5,3
4-bar	5,1
3-fon	5,0
16FRI	4,8
1CCA	5,2
8FON	5,1
O Cembro	5,1
Área recreativa	5,0

3.1.5 Hidroloxía e recursos hídricos

Segundo a clasificación do Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, a zona de estudo comprende maioritariamente a conca hidrográfica do Miño-Sil, e tocando na súa parte leste a conca Galicia Costa Cuencas y Subcuencas Hidrográficas (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023). A distribución espacial de concas móstrase na Figura 2.11.

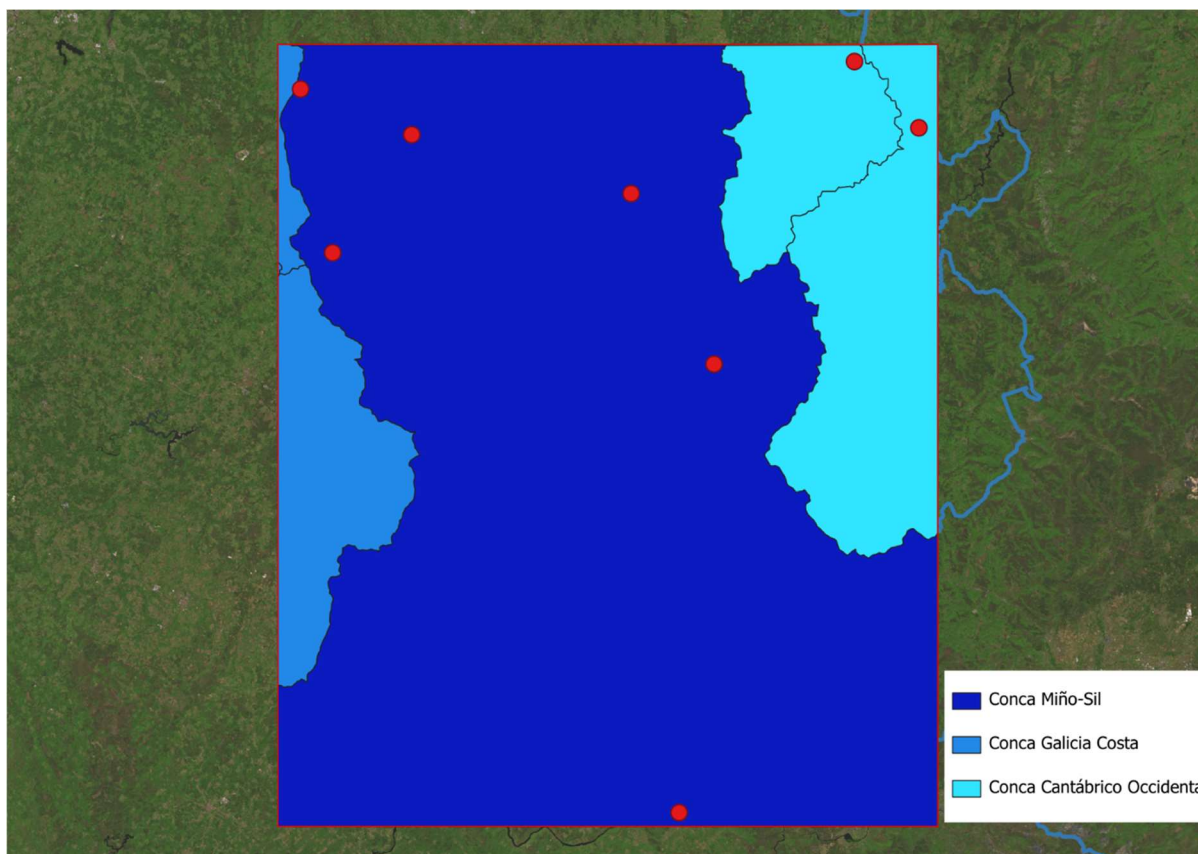


Figura 2.11. Concas hidrográficas abarcadas pola área de estudo. Elaboración propia a partir de información do Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2023). A área comprendida ven definida na Figura 2.1.

Resultan seis das oito parcelas na conca Miño – Sil, e dúas (as máis nororientais) na conca Cantábrico Occidental.

3.2 MATERIAL DE ESTUDO

O material de estudo obtívose mediante o abateamento de 27 exemplares de *Betula celtiberica* en oito masas puras de bidueiro. As masas foron seleccionadas subxectivamente para cubrir unha ampla gama de altitudes e localizacións, e así permitir a avaliación da influencia do factor estación na calidade da madeira. As árbores seleccionadas para a mostraxe foron individuos de forma axeitada para o serrado. En cada árbore, mediuse o diámetro á altura do peito con forcípula, con precisión de 0,1 cm; a altura total mediuse directamente sobre a árbore abatida, con precisión de 0,10 m. A idade determinouse mediante reconto de aneis de crecemento da parte inferior de cada tronza basal.

As árbores da mostra pódense considerar representativas da poboación rexional de bidueiros, xa que as súas características eran similares aos valores medios obtidos nunha rede máis ampla de parcelas na propia rexión (Gorgoso *et al.*, 2007). Na Táboa 2.8 preséntanse as principais variables das árbores do estudo.

Táboa 2.8. Principais características das árbores mostradas. na: número de árbores mostradas. idade: rango de idades (anos). dap: diámetro á altura do peito (cm). ht: rango de alturas (m). cd: diámetro de copa hipotético en crecemento sen competencia (m) empregando o modelo de Villarino Urtiaga e Riesco Muñoz (1997). es: coeficiente de esvelteza (cociente entre ht e dap).

Árbore	Parcela	Idade	dap	ht	cd	es
1	7-beg	11	14,1	13,7	4,45	0,97
2	7-beg	11	8,5	13,4	2,58	1,59
3	7-beg	12	17,5	16,0	5,34	0,92
4	7-beg	12	15,8	14,4	4,92	0,91
5	4-bar	12	11,2	14,7	3,55	1,31
6	4-bar	10	13,7	14,2	4,34	1,04
7	4-bar	12	19,2	17,6	5,75	0,92
8	4-bar	11	8,1	14,6	2,44	1,80
9	3-fon	14	10,2	8,6	3,20	0,85
10	3-fon	17	15,7	10,6	4,88	0,68
11	16FRI	15	18,9	14,5	5,68	0,77
12	1CCA	17	21,5	13,7	6,24	0,64
13	1CCA	17	18,0	12,1	5,47	0,67
14	1CCA	10	7,8	9,5	2,33	1,22
15	1CCA	11	11,5	11,3	3,65	0,98
16	8FON	15	27,2	20,7	7,25	0,76
17	8FON	11	19,0	19,2	5,70	1,01
18	8FON	7	11,5	13,9	3,65	1,21
19	8FON	12	9,0	13,8	2,78	1,53
20	16FRI	4	6,2	8,9	1,70	1,44
21	16FRI	10	6,1	9,0	1,64	1,49
22	3-fon	8	7,5	8,7	2,21	1,16
23	O Cembro	20	17,0	9,3	5,23	0,55
24	Área recreativa	16	16,6	10,5	5,13	0,63
25	Área recreativa	17	13,4	8,5	4,23	0,64
26	Área recreativa	18	15,9	10,8	4,95	0,68
27	Área recreativa	18	18,3	10,5	5,54	0,57

O diámetro normal con casca (13,4 cm de media) indicaba que as árbores estaban nunha fase inicial de crecemento, xa que o diámetro á altura do peito alcanza os 30-50 cm ao final da rotación habitual no bidueiro: 50 anos para os destinos de maior calidade, segundo Cisneros *et al.* (2008). Aínda que as árbores da mostra eran individuos novos, o crecemento en altura foi, de forma inesperada, case completo na mostra, xa que a altura media das árbores abatidas era de 12,3 m, que se aproxima ao máximo da especie (15-20 m segundo Álvarez *et al.*, 2000). Polo tanto, trátase dunha mostrade pés moi esveltos.

Obtívose un disco da sección transversal completa do fuste por cada metro ao longo do fuste de cada árbore abatida (Figura 2.9) para permitir unha descrición precisa da variación das propiedades da madeira ao longo do talo e das propiedades medias da madeira por árbore. Os discos tiñan uns 10 cm de grosor. De cada árbore obtivéronse de tres a quince discos, co

obxectivo de tomar mostras, na medida do posible, de toda a altura do fuste madeirable, pero evitando intencionadamente discos de diámetro menor a 7 cm e partes nodosas do fuste, nas que sería difícil obter unha mostra suficiente de material apto para ensaios. O diámetro mínimo considerado (7 cm) é suficiente para estudar as propiedades da madeira naquela parte do fuste destinada a uso industrial. As alturas mostradas por árbore variaron dende a base ata unha altura de 14 m na árbore máis grossa (que representaba o 68 % da altura total da árbore, pé que vexetaba nunha das parcelas de A Fonsagrada, como se mostra na Táboa 2.8). Os discos obtidos (200 unidades) cortáronse en pequenos exemplares prismáticos (probetas normalizadas) cos bordos, na medida do posible, paralelos ás direccións principais da madeira. Os discos cortáronse cando estaban bastante secos, porque o serrado de madeira de bidueiro húmida produce superficies fibrosas e, nesa situación, a medición de dimensións sobre caras irregulares pode provocar erros. Non obstante, os discos da mostra non se deixaron moito tempo antes de ser serrados, porque a madeira de bidueiro húmida é moi propensa ao ataque de fungos.

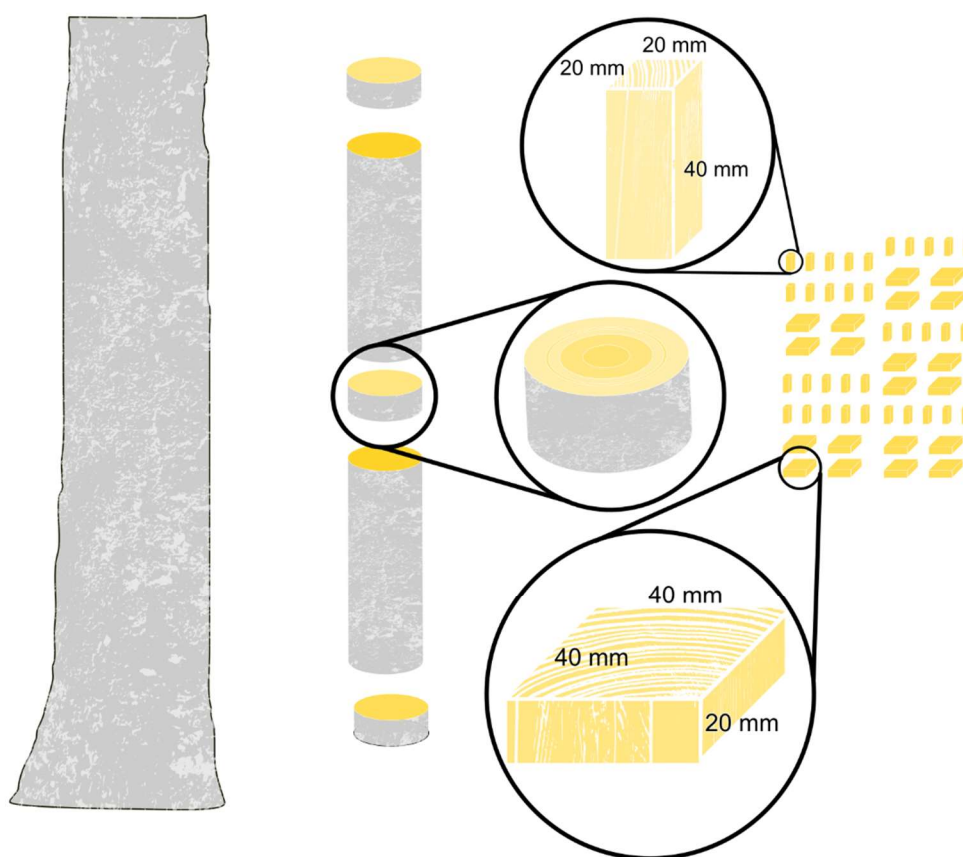


Figura. 2.9. Serrado das árbores para a obtención de probetas.

Só se seleccionaron para ensaios as probetas obtidas dos discos sen defectos, é dicir, pezas prismáticas con gran recto e sen defectos como medula, nós, fendas e casca. Tomáronse, de media, 11 probetas válidas de cada disco. Finalmente, seleccionáronse para a análise un total de 1.637 probetas de madeira sen defectos das seguintes dimensións: 1.451 pezas de 4 cm de lonxitude e 2 x 2 cm de sección transversal, e 186 exemplares de 2 cm de lonxitude e 4 x 4 cm

de sección transversal. As características das probetas axustáronse ao que establece a norma UNE 56528:1978 (IRANOR, 1978a).

3.2.1 Medición das probetas

O listado de variables estudadas sobre as probetas móstrase na Táboa 2.10. Para a súa determinación aplicáronse os métodos normalizados EN e ISO para a avaliación das propiedades físicas da madeira (International Organization for Standardization, 2014; European Committee for Standardization, 2002; 2010a; 2010b; IRANOR, 1977a; 1977b; 1978a; 1978b). Mediuse o peso e as tres dimensións principais de cada exemplar a tres contidos de humidade da madeira: a saturación, aproximadamente a un 12 % de humidade da madeira (madeira secada ao aire en condicións ambientais do laboratorio) e a un 0 % de humidade (madeira secada en estufa). Como parte final do ensaio mediuse tamén o peso da madeira tras un proceso de inmersión prolongada en auga ata que os lumenes celulares se viron completamente ocupados por auga, para seguidamente deixar en estufa esa mesma madeira e anotar un segundo peso anhidro. A masa mediuse cunha aproximación de 0,01 g, e as tres dimensións principais (axial, radial e tanxencial) medíronse entre centros de caras opostas cunha precisión de 0,01 mm.

Cabe puntualizar que, neste traballo, empregárase como termo xeral a denominación “densidade” para designar a relación entre a masa e o volume dun material determinado. E común, na literatura, referirse a “peso específico” para esta variable, o cal, no contexto deste estudo, é algo equivocado (Williamson e Wiemann, 2010), pois o peso específico é o cociente entre a densidade do material e a densidade da auga á mesma temperatura.

Táboa 2.10. Propiedades físicas da madeira de bidueiro mostrada no estudo.

Variable	Abreviatura	Unidades
Densidade húmida ao 12% de humidade	d_{12}	(kg/m ³)
Densidade anhidra	d_0	(kg/m ³)
Densidade básica	d_b	(kg/m ³)
Densidade da parede celular	d_{pc}	(kg/m ³)
Contracción volumétrica	C_v	(%)
Coeficiente de contracción volumétrica	v	(%)
Higroscopicidade	h	(kg/m ³)
Punto de saturación da fibra estimada a partir da contracción volumétrica	PSF	(%)
Punto de saturación da fibra estimada a partir da contracción lonxitudinal	$PSFl$	(%)
Punto de saturación da fibra estimada a partir da contracción radial	$PSFr$	(%)
Punto de saturación da fibra estimada a partir da contracción tanxencial	$PSFt$	(%)
Contido de humidade das probetas en equilibrio higroscópico	hum	(%)
Humidade a saturación	$hsat$	(%)
Humidade máxima medida	$hmaxr$	(%)
Humidade máxima teórica	$hmaxt$	(%)
anchura de aneis	ana	mm

Táboa 2.10 (continuación). Propiedades físicas da madeira de bidueiro mostrada no estudo.

Variable	Abreviatura	Unidades
sustancia extraída tras inmersión prolongada, en porcentaxe do peso anhidro inicial	<i>susextr</i>	(%)
Porosidade	<i>P</i>	(%)
Contracción lonxitudinal	<i>C_l</i>	(%)
Coeficiente de contracción lonxitudinal	<i>l</i>	(%)
Contracción radial	<i>C_r</i>	(%)
Coeficiente de contracción radial	<i>r</i>	(%)
Contracción tanxencial	<i>C_t</i>	(%)
Coeficiente de contracción tanxencial	<i>t</i>	(%)
Constante de Koehler volumétrica	<i>K_v</i>	---
Constante de Koehler lonxitudinal	<i>K_l</i>	---
Constante de Koehler radial	<i>K_r</i>	---
Constante de Koehler tanxencial	<i>K_t</i>	---
Coeficiente de contracción tanxencial	<i>t</i>	(%)
Coeficiente de anisotropía	<i>ca</i>	---
Anisotropía absoluta	<i>aa</i>	(%)
Variable cromática L* transversal	<i>L* transv</i>	---
Variable cromática a* transversal	<i>a* transv</i>	---
Variable cromática b* transversal	<i>b* transv</i>	---
Variable cromática L* radial	<i>L* rad</i>	---
Variable cromática a* radial	<i>a* rad</i>	---
Variable cromática b* radial	<i>b* rad</i>	---
Variable cromática L* tanxencial	<i>L* tx</i>	---
Variable cromática a* tanxencial	<i>a* tx</i>	---
Variable cromática b* tanxencial	<i>b* tx</i>	---

Ademais destas variables, consideráronse outros factores a para formación de grupos e o estudo da influencia de variables dendrométricas ou do medio nas propiedades físicas da madeira de bidueiro. As variables factor consideradas foron:

- Árbore de procedencia do material
- Parcela de procedencia do material
- Pendente da parcela de procedencia
- Zona de rexenerado natural ou repoboación
- Altitude da parcela de procedencia
- Localización radial da probeta.

A densidade húmida foi medida na madeira en equilibrio coa humidade relativa do aire no laboratorio. A densidade húmida expresouse ao 12 % de humidade aplicando a seguinte corrección normalizada (1) (IRANOR, 1977a):

$$\rho_{12} = \rho_H [1 - 0,01(1 - v)(H - 12)] \quad (1)$$

onde:

ρ_{12} é a densidade da madeira cun contido de humidade do 12 %,

ρ_H é a densidade da madeira dun contido de humidade do H %,

H é o contido de humidade da madeira en equilibrio coa humidade relativa do aire no laboratorio, expresado en porcentaxe, e

v é o coeficiente de contracción volumétrica, expresado en porcentaxe.

A densidade da parede celular calculouse a partir da fórmula desenvolvida por Riesco Muñoz (Riesco Muñoz e Pulgar Lorenzo, 2022) (ecuación 2):

$$d_{pc} = 1000 \frac{100 + C_v}{1000 \frac{100 + C_v}{d_0} - humaxr + PSF} \quad (2)$$

onde:

d_{pc} é a densidade da parede celular, en kg/m^3 ,

C_v é a contracción volumétrica, en porcentaxe,

d_0 é a densidade anhidra, en kg/m^3 ,

$humaxr$ é a humidade máxima teórica, en porcentaxe, e

PSF é o punto de saturación da parede celular, en porcentaxe.

A porosidade calculouse como a porcentaxe do volume de hocos con respecto ao volume da materia seca da madeira, segundo a ecuación (3):

$$P = 100 - 100 \frac{d_0}{d_{pc}} \quad (3)$$

con:

d_0 é a densidade anhidra, en kg/m^3 ,

d_{pc} é a densidade da parede celular, en kg/m^3 .

As variables contracción volumétrica (C_v) e contracción lineal nas tres direccións principais da madeira: contracción lonxitudinal (C_l) contracción radial (C_r) e contracción tanxencial (C_t), foron calculadas como as diferenzas entre cada dimensión a contido de humidade de saturación menos a dimensión a contido de humidade anhidro, referidos como porcentaxes con respecto á dimensión no estado anhidro (ecuacións da 4 á 7):

$$C_v = \frac{V_S - V_0}{V_0} 100 \quad (4)$$

$$C_l = \frac{L_S - L_0}{L_0} 100 \quad (5)$$

$$C_r = \frac{R_S - R_0}{R_0} 100 \quad (6)$$

$$C_t = \frac{T_S - T_0}{T_0} 100 \quad (7)$$

O coeficiente de contracción volumétrica (v) e os tres coeficientes lineais (l , r e t) calculáronse a partir das diferenzas na dimensión respectiva a aproximadamente o 12 % de contido de humidade e o estado anhidro, cada unha expresada como porcentaxe con respecto ao produto da dimensión no estado anhidro polo grao de humidade (ecuacións da 8 á 11):

$$v = \frac{V_H - V_0}{V_0 H} 100 \quad (8)$$

$$l = \frac{L_H - L_0}{L_0 H} 100 \quad (9)$$

$$r = \frac{R_H - R_0}{R_0 H} 100 \quad (10)$$

$$t = \frac{T_H - T_0}{T_0 H} 100 \quad (11)$$

onde:

v é o coeficiente de contracción volumétrica,

V_H , V_0 son os volumes da mostra secada ao aire e da mostra secada ao forno, respectivamente,

H é o contido de humidade da madeira da mostra secada ao aire,

l é o coeficiente de contracción axial,

L_H , L_0 son as dimensións lonxitudinais da mostra secada ao aire e da mostra secada ao forno, respectivamente,

r é o coeficiente de contracción radial,

R_H , R_0 son as dimensións radiais da mostra secada ao aire e da mostra secada ao forno, respectivamente,

t é o coeficiente de contracción tanxencial e

T_H , T_0 son as dimensións tanxenciais da mostra secada ao aire e da mostra secada ao forno respectivamente.

As variables de estabilidade lonxitudinal (contracción lonxitudinal e coeficiente de contracción lonxitudinal) só se mediron nas probetas de 4 cm de lonxitude, para detectar pequenos cambios na dimensión axial en resposta aos cambios no contido de humidade. Do mesmo xeito, as propiedades de estabilidade radial e tanxencial só se mediron nas probetas de 4×4 cm de sección, para detectar cambios en direccións transversais. Ademais, as propiedades tanxenciais e radiais só se probaron nas probetas de 2×4×4 cm nas que a orientación dos aneis de crecemento era paralela á aresta da peza.

A semellanza entre a contracción tanxencial e a radial avalíouse como coeficiente de anisotropía (relación da contracción tanxencial sobre a radial) (Rijsdijk e Laming, 1994). Tamén se calculou a anisotropía absoluta (contracción tanxencial menos radial) porque proporciona unha mellor indicación do risco de deformación da madeira durante o secado que o propio coeficiente de anisotropía.

As fórmulas de Koehler (Koehler, 1931) establecen unha relación de proporcionalidade entre a contracción (en porcentaxe) e o peso específico anhidro (en g/cm^3) para un rango de humidade entre o 5 e o 25 %. Estas fórmulas pódense calcular para as tres direccións principais da madeira (lonxitudinal, radial e tanxencial) así como para o seu volume, sendo as súas expresións calculadas como o cociente entre a contracción (contracción volumétrica, lonxitudinal, radial e tanxencial) e a densidade anhidra. Para este traballo calculáronse catro constantes de Koehler (ecuacións da 12 á 15):

$$K_v = \frac{C_v}{d_0} 1000 \quad (12)$$

$$K_l = \frac{C_l}{d_0} 1000 \quad (13)$$

$$K_r = \frac{C_r}{d_0} 1000 \quad (14)$$

$$K_t = \frac{C_t}{d_0} 1000 \quad (15)$$

onde:

C_v é a contracción volumétrica, expresada como porcentaxe,
 C_l é a contracción lonxitudinal, expresada como porcentaxe,
 C_r é a contracción radial, expresada como porcentaxe,
 C_t é a contracción tanxencial, expresada en porcentaxe, e
 d_0 é a densidade anhidra, en quilogramos por metro cúbico.

3.2.2 Análise estatística

As características das propiedades da madeira preséntanse mediante a exposición de seis estatísticos descritivos: número de datos, valor mínimo, valor máximo, media, mediana e coeficiente de variación.

As características medias das propiedades da madeira de cada árbore calculáronse como os valores medios de todos os resultados válidos obtidos nas probetas da devandita árbore:

$$\bar{x}_{kz} = \frac{\sum_{j=1}^{n_k} \sum_{i=1}^{n_j} x_{ijkz}}{n_{kz}} \quad (16)$$

onde:

x_{ijkz} é o valor da variable x para a i-ésima probeta do disco j-ésimo da árbore k-ésima na z-ésima parcela,

\bar{x}_{kz} é a media aritmética da variable x para a mostra de exemplares da árbore k-ésimo na parcela z,

n_j é o número de valores obtidos para a variable x no j-ésimo disco mostrado,

n_k é o número de discos obtidos da árbore k-ésima, e

n_{kz} é o número de exemplares obtidos para a variable x na árbore k-ésima.

A media por disco é a media aritmética das probetas válidas para ensaios obtidas do disco. Na ecuación (16), a sección basal dos discos non se utilizou para ponderar o valor medio, xa que se supoñía que a sección transversal do tronco variaba moi pouco ao longo da porción mostrada do fuste (47 % da altura total de media) como consecuencia da elevada esvelteza das árbores da mostra (1,03 de media).

As propiedades da madeira asignadas a unha única parcela calculáronse como os valores medios non ponderados das propiedades medias das árbores mostradas na masa, tendo en conta as árbores como unidades de mostraxe, todas as cales tiñan o mesmo peso na mostra (é dicir, os valores medios para unha parcela non dependían do tamaño da árbore nin do número de exemplares probados) (ecuación 17):

$$\bar{x}_z = \frac{\sum_{k=1}^{n_z} \bar{x}_{kz}}{n_z} \quad (17)$$

onde:

\bar{x}_{kz} é a media aritmética da variable x para a mostra de exemplares da árbore k-ésima na parcela z-ésima,

\bar{x}_z é a media aritmética da variable x para a mostra de árbores da parcela z, e

n_z é o número de árbores mostradas na parcela z.

A mediana calculouse como dato complementario da media, para mostrar un estatístico de tendencia central no caso de que a distribución da variable teña un nesgo moi pronunciado.

A dispersión dos resultados das propiedades físicas cuantificouse mediante o coeficiente de variación (ecuación 18):

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} 100 \quad (18)$$

onde:

\bar{x} é a media aritmética do número total de valores obtidos para a variable x, e

s é a desviación típica dos valores obtidos para a variable x.

Para as variables cromáticas empregouse un colorímetro PCE-CSM 1, sobre 23 probetas previamente preparadas cun lixado con lixa de auga microfina de gran 1000, para eliminar impurezas na superficie da madeira, e evitar problemas de inactivación de superficies. Fixéronse medidas das tres coordenadas do sistema CIEL*a*b* (L^* , a^* , e b^*) nos tres planos característicos da madeira: transversal, radial e tanxencial.

Utilizouse a análise de regresión e a proba non paramétrica de Kruskal-Wallis para identificar as relacións significativas entre as variables cuantitativas (propiedades físicas da madeira) entre si, e as propiedades cuantitativas e as variables cualitativas (variables factor que dividen as variables cuantitativas en grupos). Buscouse atopar relacións significativas e útiles dende un punto de vista práctico, descartándose aquelas relacións evidentes ou de variables relacionadas mediante unha expresión aritmética.

O texto maquetouse con Microsoft Word, e a recompilación e manexo de datos fíxose coa folla de cálculo Excel (Microsoft Corporation, 2020a e 2020b). Os cálculos estatísticos e as representacións gráficas realizáronse en R (R Core Team, 2020) utilizando o entorno RStudio (Rstudio Team, 2020) e varias bibliotecas base, así como a biblioteca *ggplot2* (Wickham, 2016), o paquete *leaps* (Lumley, 2024).

4 RESULTADOS

Neste capítulo preséntase a análise das variables físicas da madeira de *Betula celtiberica* que foron obxecto de estudo, indícanse as relacións entre as distintas magnitudes e móstranse os factores que incidiron significativamente na variación das propiedades da madeira. Finalmente, preséntanse modelos predictivos daquelas variables físicas con maior interese tecnolóxico para as aplicacións da madeira de *Betula celtiberica*.

4.1 VARIABLES DE ESTUDO. ESTATÍSTICA DESCRIPTIVA

4.1.1 Propiedades gravimétricas

Este capítulo da tese comeza coa presentación e análise das propiedades gravimétricas do material experimental, que son aquelas relacionadas coa masa e o volume da madeira de bidueiro estudada. Concretamente, estudáronse as seguintes variables:

- Densidade ao 12 % de humidade (d_{12})
- Densidade anhidra (d_0)
- Densidade básica (d_b)
- Densidade da parede celular (d_{pc}).

A densidade dunha substancia defínese como a relación entre a súa masa e o seu volume. O peso específico, variable con frecuencia citada en bibliografía estadounidense (*specific gravity*) corresponde á relación entre a densidade dunha substancia e a densidade da auga a unha temperatura de referencia, normalmente 20 °C, que resulta ser 997 kg/m³. Para este traballo os valores referidos en bibliografía como *specific gravity* serán transformados empregando a multiplicación da variable por 997 e expresando o resultado en kg/m³.

A densidade da madeira varía significativamente entre especies. E mesmo dentro dunha mesma especie, a densidade varía debido a características anatómicas como a proporción de madeira temperá a madeira tardía e a proporción de cerna a sámago (Glass e Zelinka, 2021).

Os estatísticos descritivos das catro variables referidas móstranse na Táboa 4.1. A distribución e dispersión das variables móstranse na Figura 4.1.

Táboa 4.1. Estatísticos descritivos das propiedades gravimétricas estudadas: densidade ao 12 % de humidade (d_{12}), densidade anhidra (d_0), densidade básica (d_b), densidade da parede celular (d_{pc}). n = número de datos, CV (%) = coeficiente de variación.

Variable	n	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	CV (%)
d_{12} (kg/m ³)	1637	436	852	597	604	9
d_0 (kg/m ³)	1637	392	724	559	567	9
d_b (kg/m ³)	1637	345	603	485	492	8
d_{pc} (kg/m ³)	197	1.035	1.532	1.234	1.226	6

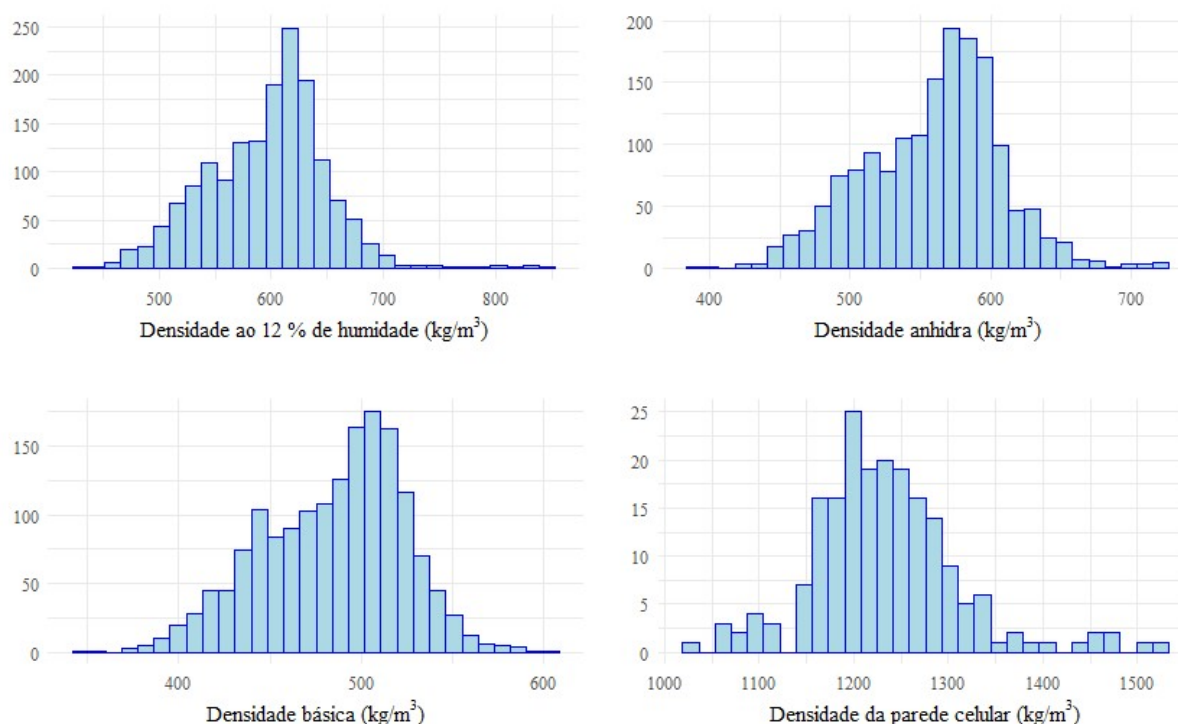


Figura 4.1. Histogramas das catro variables gravimétricas analizadas.

4.1.1.1 Densidade ao 12 % de humidade

A densidade da madeira cun contido de humidade do 12 % úsase habitualmente como referencia estándar na industria da madeira, debido a que representa un nivel medio de humidade bastante aproximado para a madeira en moitos ambientes (Kollmann e Côté, 1968).

O valor medio da densidade ao 12 % de contido de humidade deste ensaio (d_{12}), 597 kg/m³, corresponde a unha madeira semipesada de acordo coa clasificación UNE 56540:1978 (IRANOR, 1978). Trátase dun valor lixeiramente superior aos 586 kg/m³ rexistrados por Riesco Muñoz (2018) para un material de partida semellante (madeira de *B. celtiberica* de exemplares xoves procedentes de Galicia). Outros valores de madeiras consideradas similares a *B. celtiberica* (Wagenführ e Wagenführ, 2022), son os 610 kg/m³ para *B. pendula* de Wagenführ e Wagenführ (2022) e os 680 kg/m³ de Austad (2018) tamén para *B. pendula*. Para a mesma especie, algo inferiores son os resultados de Dobrowolska *et al.* (2020), que apuntan 623 kg/m³

para árbores de 70 a 72 anos de idade, cun coeficiente de variación de 9,3, moi semellante ao coeficiente de variación obtido neste traballo. Collardet e Besset (1992) estudaron *B. pendula* e rexistraron o valor de densidade ao 12 %, dentro dun rango de 550-700 kg/m³, e o de *B. pubescens* con valores en torno a 15 – 20 % máis baixos que a especie anterior. Borůvka *et al.* (2020) acharon un valor medio de 716 kg/m³ para *B. pendula*. Deste mesmo autor, o valor mínimo acadou os 620 kg/m³, superior á media calculada neste traballo para *Betula celtiberica*.

Gutiérrez Oliva e Plaza Pulgar (1967) rexistran, para outra madeira tamén considerada como similar por Wagenführ e Wagenführ (2022), *B. verrucosa*, un valor de densidade ao 12 % de humidade do 653 kg/m³ de media. Baixo o epígrafe “abedul” Vignote Peña e Martínez Rojo (2005) rexistraron unha densidade de 650 kg/m³. Para *B. alba*, Valladares Conde e Hernández Mor (2005) reportan 670 kg/m³.

O promedio do presente estudo resultou ser menor que o resto de valores da revisión bibliográfica, a excepción da densidade rexistrada por Riesco Muñoz (2018), bastante parella, correspondente a madeira xove. Esta mesma coincidencia pode ser un indicio de por que a madeira estudada ten unha densidade tan baixa. Ao igual que no estudo de Riesco Muñoz (2018), o rango de idades das árbores do material de ensaio non sobrepasou os 20 anos. Isto, por unha parte, indica que a madeira tería pouca proporción de cerna, xa que o bidueiro é unha árbore de duraminización tardía (Wagenführ e Wagenführ, 2022). Como a cerna é máis densa ca o sámag (Forest Products Laboratory, 1966), a madeira estudada, con maior proporción de sámag, sería menos densa que outras madeiras procedentes de árbores máis maduras. Bhat (1980) apunta tamén que o *cambium* dos bidueiros produce madeira máis densa canto maior sexa a idade cambial.

Outra posible explicación deste baixo valor de densidade é a presenza de madeira xuvenil. A idade cambial determina a formación de madeira xuvenil, de transición e de madeira madura. Un *cambium* xove formará madeira xuvenil ata certa idade, polo que árbores novas presentarán unha maior proporción de madeira xuvenil que as árbores adultas. O espesor da parede celular na madeira xuvenil é menor, así como a densidade aparente desa madeira, que é tamén menor (Zobel e Sprague, 1998). Stauffer (1892, en Desch, 1932) asocia, para o bidueiro, un incremento da densidade aparente cun incremento na densidade da parede celular. A porcentaxe de superficie ocupada por vasos descende coa idade, polo que madeira procedente de árbores novas será máis porosa e, polo tanto, menos densa (Desch, 1932). Šilinskas *et al.* (2024) rexistraron que a densidade tende a medrar parella á idade da árbore en *B. pendula* de Lituania. Para Bonham e Barnett (2001) a madeira xuvenil, en *B. pendula*, sitúase entre a medula e o décimo ou décimo quinto anel de crecemento, polo que se deduce que árbores de menos de quince anos terán unha gran proporción de madeira xuvenil.

Tanto en frondosas como en coníferas, a madeira temperá ou de primavera é, normalmente, moito menos densa que a madeira tardía ou de verán (Siau, 1995). Dado que, como norma xeral, existe unha conexión entre a madeira temperá e a madeira xuvenil, posto que a madeira temperá adoita ser máis frecuente na madeira xuvenil (formada durante os primeiros anos do crecemento dunha árbore) (Bao *et al.*, 2001; Carteni *et al.*, 2018; Ruano e Hermoso, 2021), a presenza dunha maior proporción de madeira temperá na madeira xuvenil pode engadirse ás causas dos baixos resultados de densidades (non só para a densidade ao 12 %, como se verá en epígrafes seguintes) da madeira de *B. celtiberica* analizada neste estudo.

En canto ás especies americanas do xénero *Betula*, rexistráronse os seguintes resultados de densidade ao 12 % de contido de humidade (Táboa 4.2).

Táboa 4.2. Densidades ao 12 % das madeiras de varias especies americanas do xénero *Betula*.

	<i>B. papyrifera</i>	<i>B. lenta</i>	<i>B. alleghaniensis</i>	<i>B. lutea</i>
Wood Handbook (Green <i>et al.</i> , 2021)	549 kg/m ³	648 kg/m ³	618 kg/m ³	
Collardet e Besset (1992)		650-700 kg/m ³		690 kg/m ³
Panshin e De Zeeuw (1980)	548 kg/m ³		598 kg/m ³	

Salvo no caso do *Betula papyrifera*, os resultados mostran que as madeiras americanas son máis densas que a analizada neste traballo. As especies asiáticas *Betula maximowicziana* e *Betula platyphylla* acadan valores medios de densidade ao 12 % de 600-700 e 650-750 kg/m³, respectivamente (Collardet e Besset, 1992), que son tamén superiores aos resultados achados para *B. celtiberica*.

4.1.1.2 Densidade anhidra

Jakubowski *et al.* (2020) consignaron un valor de 540 kg/m³ para *B. pendula*, cun coeficiente de variación do 11 %. No caso da madeira analizada neste documento, o valor medio de 559 kg/m³ mostrou un coeficiente de variación do 9 %, semellantes ambos aos dos autores antes referidos.

Wagenführ e Wagenführ (2022) anotaron valores medios desta variable algo máis altos, de 610 kg/m³, dentro dun rango de resultados entre 460 de mínimo e 800 kg/m³ de máximo. Jackson *et al.* (1998), para os bidueiros americanos *B. alleghaniensis* e *B. papyrifera* dan os datos de 710 e 640 kg/m³, respectivamente. Niemz *et al.* (2023) sitúan ao bidueiro (definido como *birch*, sen concretar especie) e a outras frondosas europeas como a faia ou o carballo, nun rango de densidade anhidra de entre 610 e 700 kg/m³.

Neste apartado tamén se constata o baixo valor medio de densidade visto no epígrafe da densidade ao 12 %, agora referido á densidade anhidra. O dato máis semellante da revisión, o de Jakubowski *et al.* (2020) cun valor medio de 540 kg/m³, corresponde tamén a exemplares xoves de 23 anos de idade.

4.1.1.3 Densidade básica

Esta variable ten gran utilidade práctica, resultando fundamental para cálculos como a estimación da produción de materia seca en masas forestais, o cálculo do peso das cargas de madeira ou a conversión de volume en verde en biomasa para estimacións de stock de carbono. A densidade básica é o principal determinante do contido máximo de humidade dunha madeira. A medida que aumenta, o volume do lumen celular debe diminuír porque a densidade da parede celular das madeiras é, aproximadamente, unha constante entre as especies. Isto provoca a diminución do máximo contido posible de humidade, porque hai menos espazo dispoñible para a auga libre (Glass e Zelinka, 2021). Neste traballo, a densidade básica da madeira de *Betula celtiberica* procedente de Galicia acadou unha media de 485 kg/m³.

Hakkila (1966) mediu a densidade básica do *B. pendula* en Finlandia en 497 kg/m³. O mesmo autor analizou a madeira de bidueiros (*B. pendula*) con idades inferiores a 25 anos e mediu unha densidade básica de 450 kg/m³ (Hakkila, 1979). Brzeziecki e Kienast (1994) atoparon valores medios para *B. pendula* e *B. pubescens* de 525 kg/m³. Heräjärvi (2004) da os resultados, tamén para *B. pendula* e *B. pubescens*, de 512 e 478 kg/m³, respectivamente. Möttönen e Luostarinen (2006), diferenciando masas naturais de masas procedentes de repoboación, de *B. pendula* en Finlandia, rexistraron, respectivamente, 507 e 455 kg/m³ como valores medios de densidade básica. Para material procedente de *B. pubescens* e *B. alba*, Desch (1932) apuntou unha media de densidade básica de 510 kg/m³. Na República Checa, para *B. pendula*, Giagli *et al.* (2019) aportan un rango de densidade básica na madeira das súas parcelas de 472 a 495 kg/m³. Outro dato de baixa densidade básica é o anotado por Liepiņš e Rieksts-Riekstiņš (2013) en árbores xoves de *B. pendula* de Lituania: 455 kg/m³ cun coeficiente de variación de 5,7. Nun ensaio comparativo entre árbores xoves (de 6 a 8 anos) de *B. pendula* fertilizadas fronte a non fertilizadas en Suecia, Nilsson *et al.* (2021) mediron densidades básicas de 460 e 420 kg/m³, respectivamente.

Na liña das variables de densidade revisadas anteriormente, o resultado de densidade básica deste estudo resulta inferior a varios dos valores recollidos na bibliografía, exceptuando os datos Hakkila (1979) para árbores de menos de 25 anos, os de Liepiņš e Rieksts-Riekstiņš (2013) e Nilsson *et al.* (2021), ambos estudos para madeiras de árbores xoves, o de Möttönen e Luostarinen (2006) para madeiras procedentes de repoboación, e o de Heräjärvi (2004), para *B. pubescens*. Nesta liña compre engadir que Hakkila (1966) xa observara que a idade das árbores era a variable máis importante para explicar o aumento na densidade básica da madeira de bidueiro, e Lachowicz *et al.* (2019a) determinaron que a densidade básica de *B. pendula* aumenta coa idade da árbore. A baixa densidade básica nas árbores novas de bidueiro tamén foi apuntado por Hakkila (1979) e por Velling (1979). Todas estas referencias parecen apuntar a unha densidade básica menor cando se trata de masas xoves.

Os resultados da densidade básica media deste traballo coinciden, polo tanto, cos valores atopados na revisión bibliográfica, tendo en conta factores silvícolas como o tipo de masa ou a idade da árbore. Sen embargo, o resultado rexistrado para *B. celtiberica* non parece encaixar na hipótese formulada por Lachowicz *et al.* (2019a), que fala dunha tendencia descendente do valor da densidade básica do sur ao norte de Europa, posto que a madeira do presente estudo é menos densa que as súas correspondencias en latitudes máis setentrionais.

4.1.1.4 Densidade da parede celular

A densidade da madeira depende da proporción de fibras e vasos, e do grosor da parede celular en relación ao lumen (Bhat, 1983). A substancia da que está composta a madeira é máis pesada ca auga; a súa densidade é de aproximadamente 1.500 kg/m³, con independencia da especie. As variacións no tamaño dos poros e no grosor das paredes celulares fan que algunhas especies teñan máis substancia leñosa por unidade de volume que outras e, polo tanto, maior densidade aparente (Green *et al.*, 2021). Gutiérrez Oliva e Plaza Pulgar (1967) falan de 1.540 kg/m³ de densidade real (por oposición a densidade aparente, que sería a densidade do material composto polas sustancias celulósicas, a lignina e máis os poros) da madeira a *humedad normal* (sic) para todas as madeiras, con pequenísimas variacións dunha especie a outra. Glass e Zelinka (2021) dan o mesmo valor, expresado como peso específico: 1.54.

O resultado obtido neste traballo acada os 1.234 kg/m³ de media. É unha densidade da parede celular baixa considerando os rangos de 1.440 a 1.600 kg/m³ de Knigge e Schulz (1966), de 1.440 a 1.460 kg/m³ de varios autores en Siau (2012), e de 1.436 (valor determinado mediante porosimetría de intrusión de mercurio) a 1.525 kg/m³ (determinada por inmersión en auga) reportados por Niemz *et al.* (2023). A diversidade de resultados débese ao método de medición empregado (Siau, 1995) ou á diferente proporción de lignina e celulosa das paredes celulares de cada especie (Niemz *et al.*, 2023).

Este baixo resultado na densidade da parede celular da madeira de *B. celtiberica* en Galicia pode deberse a tres factores:

- O xa mencionado, na discusión doutras variables de densidade, referente á existencia de madeira xuvenil na mostra. Zobel e Sprague (1998), Barnett e Jeronimidis (2003) e Fernández-Golfín *et al.* (2020), observaron que o ancho da parede celular é menor neste tipo de madeira e, polo tanto, a súa densidade é menor
- Ausencia de madeira de cerna, dado que as árbores que conformaron a mostra non comezaran o proceso de duraminización.
- O método de medición da densidade da parede celular consistente, neste traballo, na inmersión prolongada das probetas de madeira para conseguir a saturación da parede celular e para colmar de auga os lúmenes celulares. Siau (1995) describe como as hemicelulosas da madeira poden eliminarse do material orixinal mediante dilución en álcali acuoso ou auga. O lavado de hemicelulosas influiría polo tanto na cantidade de sustancia sólida do material experimental, reducindo a súa densidade. A mesma cita de Siau (1995) fala dunha porcentaxe de hemicelulosas do 25 ao 40 % do peso da parede celular para as frondosas. Lachowicz *et al.* (2019b) afinan este dato para *B. pendula* e *B. pubescens*, ata o 28,9 %.

4.1.2 Variables relativas ao contido de humidade

Preséntanse a continuación os resultados para aquelas variables relacionadas co contido de humidade da madeira de estudo. Moitas propiedades físicas e mecánicas da madeira dependen destas variables (Glass e Zelinka, 2021). As variables analizadas foron:

- Contido de humidade das probetas en equilibrio higroscópico (hum)
- Humidade a saturación (hsat)
- Humidade máxima medida (hmaxr)
- Humidade máxima teórica (hmaxt)
- Punto de saturación da parede celular estimado a partir da contracción volumétrica (PSF)
 - Punto de saturación da parede celular estimado a partir da contracción lonxitudinal (PSFL)
 - Punto de saturación da parede celular estimado a partir da contracción radial (PSFR)
 - Punto de saturación da parede celular estimado a partir da contracción tanxencial (PSFT).
- Os estatísticos descritivos das variables enumeradas móstranse na Táboa 4.3. A representación gráfica das variables móstrase nas Figuras 4.2 e 4.3.

Táboa 4.3. Estatísticos descritivos das variables relativas ao contido de humidade. Contido de humidade das probetas en equilibrio higroscópico (*hum*), humidade a saturación (*hsat*), humidade máxima medida (*hmaxr*), humidade máxima teórica (*hmaxt*), punto de saturación da parede celular estimado a partir da contracción volumétrica (*PSF*), punto de saturación da parede celular estimado a partir da contracción lonxitudinal (*PSFL*), punto de saturación da parede celular estimado a partir da contracción radial (*PSFR*), punto de saturación da parede celular estimado a partir da contracción tanxencial (*PSFT*). n = número de datos, CV (%) = coeficiente de variación.

Variable	n	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	CV (%)
hum (%)	1637	7	41	13	12	30
hsat (%)	1637	38	176	92	86	25
hmaxr (%)	197	117	182	133	131	8
hmaxt (%)	1597	126	260	170	168	12
PSF (%)	1597	12	123	36	33	37
PSFL (%)	1451	9	80	25	24	38
PSFR (%)	69	13	45	30	29	16
PSFT (%)	69	14	53	31	31	19

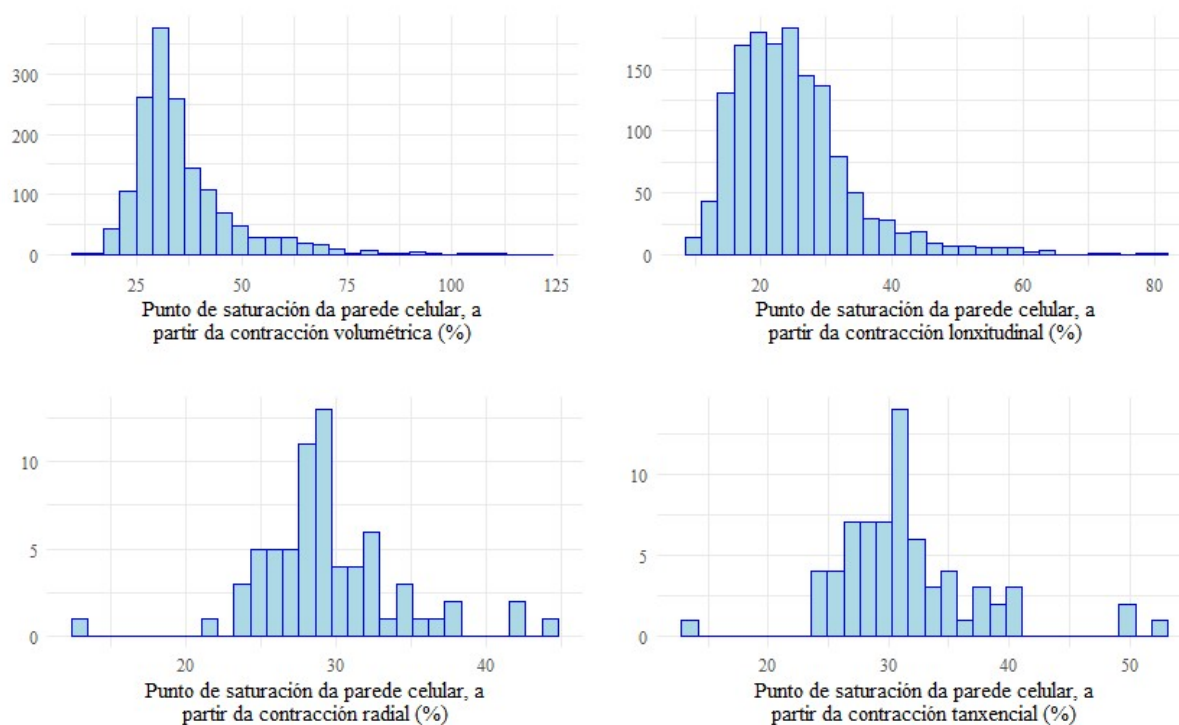


Figura 4.2. Histogramas de catro variables de contido en humidade analizadas: punto de saturación da parede celular calculado a partir da contracción volumétrica, punto de saturación da parede celular calculado a partir da contracción lonxitudinal, punto de saturación da parede celular estimado a partir da contracción radial, e punto de saturación da parede celular estimado a partir da contracción tanxencial.

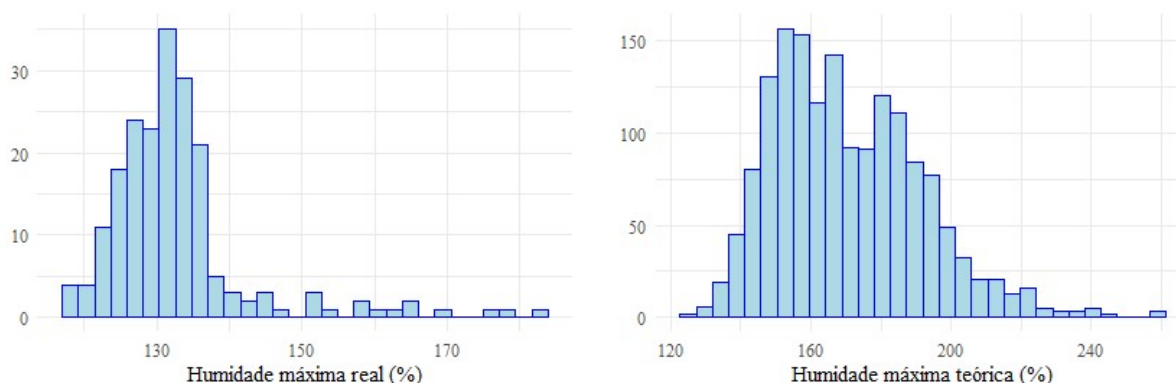


Figura 4.3. Histogramas de dúas variables de contido en humidade analizadas: humidade máxima medida e humidade máxima teórica.

4.1.2.1 Humidades de ensaio, reais e teóricas

A humidade en equilibrio higroscópico do presente ensaio acadou unha media do 13 % para as condicións do laboratorio (20 °C e 65 % de humidade ambiental). O valor normalizado de humidade de ensaios, necesario para comparar madeiras, é o 12 %, segundo a norma UNE 56528:1978 (IRANOR, 1978). O contido de humidade a equilibrio higroscópico deste traballo corresponde a unha madeira secada ao aire, segundo a norma UNE 56540:1978 (IRANOR, 1978).

Os resultados mostran unha humidade a saturación do 92 % de media.

A humidade máxima da madeira pode varía entre o 30 % ata o 200 % (Glass e Zelinka, 2021). O contido en humidade máxima real, valor de humidade raramente acadado en árbores en pé (Glass e Zelinka, 2021), chegou neste traballo ata o 133 % de media, cun máximo de 182 %. O resultado calculado de humidade máxima que teoricamente podería acadar a madeira foi do 170 % de media, con máximo de 260 %.

Os elevados resultados de contido en humidade poden ser debidos á presenza de madeira xuvenil, posto que o contido en humidade neste tipo de madeira é superior ao da madeira adulta, polo menos ata que se inicia o proceso de duraminización (Zobel e Sprague, 1998). As altas porcentaxes de humidades máxima real e teórica poden ser tamén un indicio dunha alta porosidade da madeira.

4.1.2.2 Puntos de saturación da parede celular, volumétrico e lineais

A máxima humidade que pode acadar unha madeira sen que exista auga libre no lumen (auga non ligada á parede celular) denomínase punto de saturación da fibra ou punto de saturación da parede celular. Oscila arredor do 30 %, con algunhas especies acadando un 18-20 %, o cal é moi baixo, e outras chegan ata un 34 – 40 % de contido en humidade, considerándose elevado (Gutiérrez Oliva e Plaza Pulgar, 1967). A madeira é dimensionalmente estable cando o contido de humidade é maior que o punto de saturación da parede celular. Por debaixo deste contido en humidade, a madeira cambia de dimensión a medida que gaña

humidade (incha) ou perde humidade (contrae), dado que o volume da parede celular depende da cantidade de auga ligada á parede celular (Glass e Zelinka, 2021).

Para o presente traballo calculouse, mediante o cociente entre a contracción volumétrica e o coeficiente de contracción volumétrico, un valor medio do 36 % de contido en humidade para o punto de saturación da parede celular volumétrico, que para Gutiérrez Oliva e Plaza Pulgar (1967) tería a consideración de elevado. Nájera y Angulo e López Fraile (1969) refiren o valor normal do punto de saturación da parede celular como 30 %. Para *B. celtiberica*, o rango de humidades polas que a madeira estudada sufriría inestabilidade dimensional sería polo tanto máis amplo do normal.

Os resultados deste traballo concordan coas experiencias de Kollmann e Côte (1968), para quenes o punto de saturación da parede celular do bidueiro (sen especificar a especie) sitúase próximo ao 40 % do contido de humidade na madeira.

4.1.3 Propiedades de contracción

Con respecto á súa estabilidade dimensional, a madeira é un material anisótropo: ten diferentes comportamentos en función da dimensión espacial considerada. Como norma xeral, a madeira contrae (ou incha) máis na dirección dos aneis de crecemento anuais (dirección tanxencial), aproximadamente a metade a través dos aneis (radialmente, na dirección dos radios leñosos) e só lixeiramente ao longo da fibra (lonxitudinal ou axialmente) (Glass e Zelinka, 2021).

Para a caracterización da estabilidade dimensional do *B. celtiberica* que medra en Galicia consideráronse as seguintes variables:

- Contraccións:
 - Volumétrica (C_v)
 - Lonxitudinal (C_l)
 - Radial (C_r)
 - Tanxencial (C_t)
- Coeficientes de contracción:
 - Volumétrica (v)
 - Lonxitudinal (l)
 - Radial (r)
 - Tanxencial (t)
- Higrscopicidade (h)
- Constantes de Koehler:
 - Volumétrica (K_v)
 - Lonxitudinal (K_l)
 - Radial (K_r)
 - Tanxencial (K_t)
- Coeficiente de anisotropía (ca) e anisotropía absoluta (aa).

Na Táboa 4.4 preséntanse os estatísticos descritivos das variables de contracción. Os diagramas de caixas das variables móstranse nas Figuras 4.4 e 4.5.

Táboa 4.4. Estatísticos descritivos das variables de contracción. n = número de datos, CV (%) = coeficiente de variación.

Variable	n	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	CV (%)
C _v (%)	1637	7,00	30,20	15,30	14,73	18
v (%)	1597	0,11	0,98	0,46	0,46	30
K _v	1597	11,63	48,16	27,41	27,22	16
C _l (%)	1451	0,02	3,24	0,81	0,63	75
l (%)	1451	0,00	0,19	0,03	0,03	75
K _l	1413	0,04	5,91	1,43	1,13	71
C _r (%)	69	3,40	6,61	4,60	4,45	17
r (%)	69	0,09	0,29	0,16	0,16	24
K _r	68	6,21	13,19	8,56	8,63	17
C _t (%)	69	5,22	12,08	7,54	7,35	15
t (%)	69	0,14	0,51	0,25	0,24	23
K _t	68	9,84	18,49	13,97	14,22	12
h (kg/m ³)	1597	0,13	5,75	3,21	3,16	28
ca	69	1,02	2,41	1,67	1,66	17
aa (%)	69	0,09	6,27	2,94	2,98	38

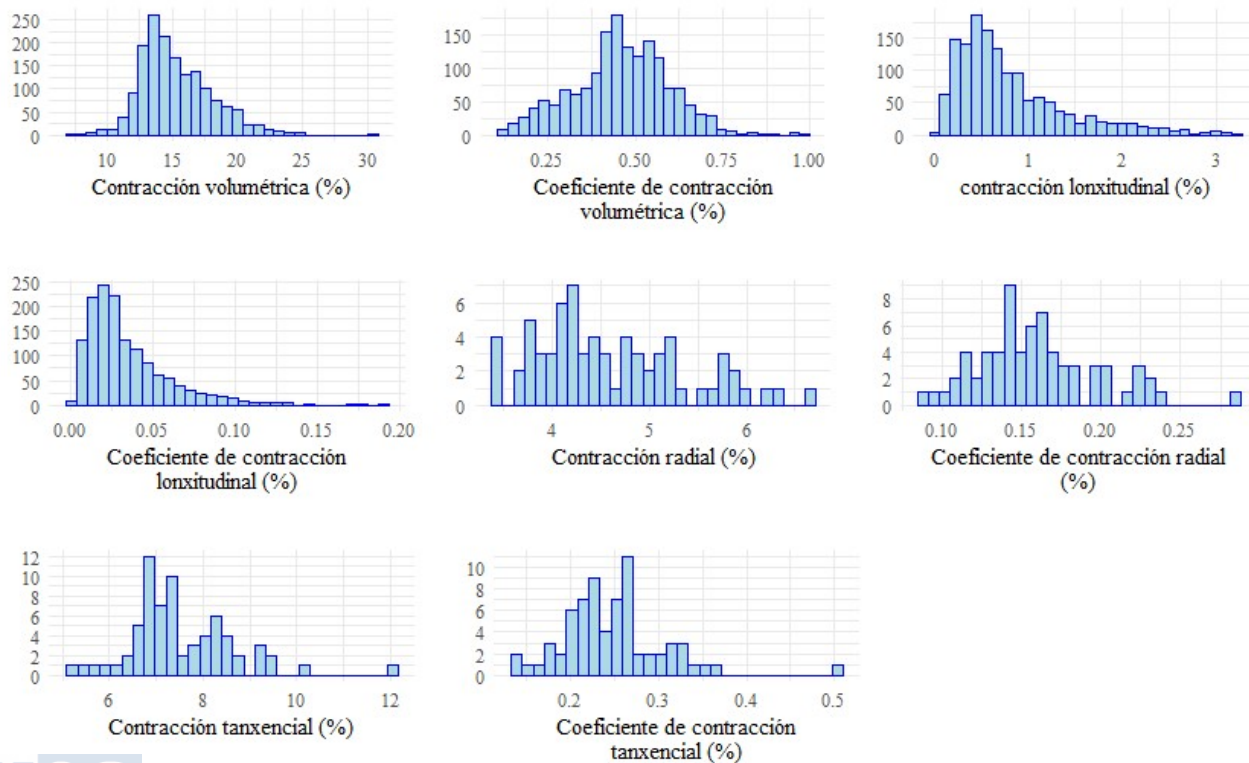


Figura 4.4. Histogramas das variables de contracción, e coeficientes de contracción, volumétricas e lineais.

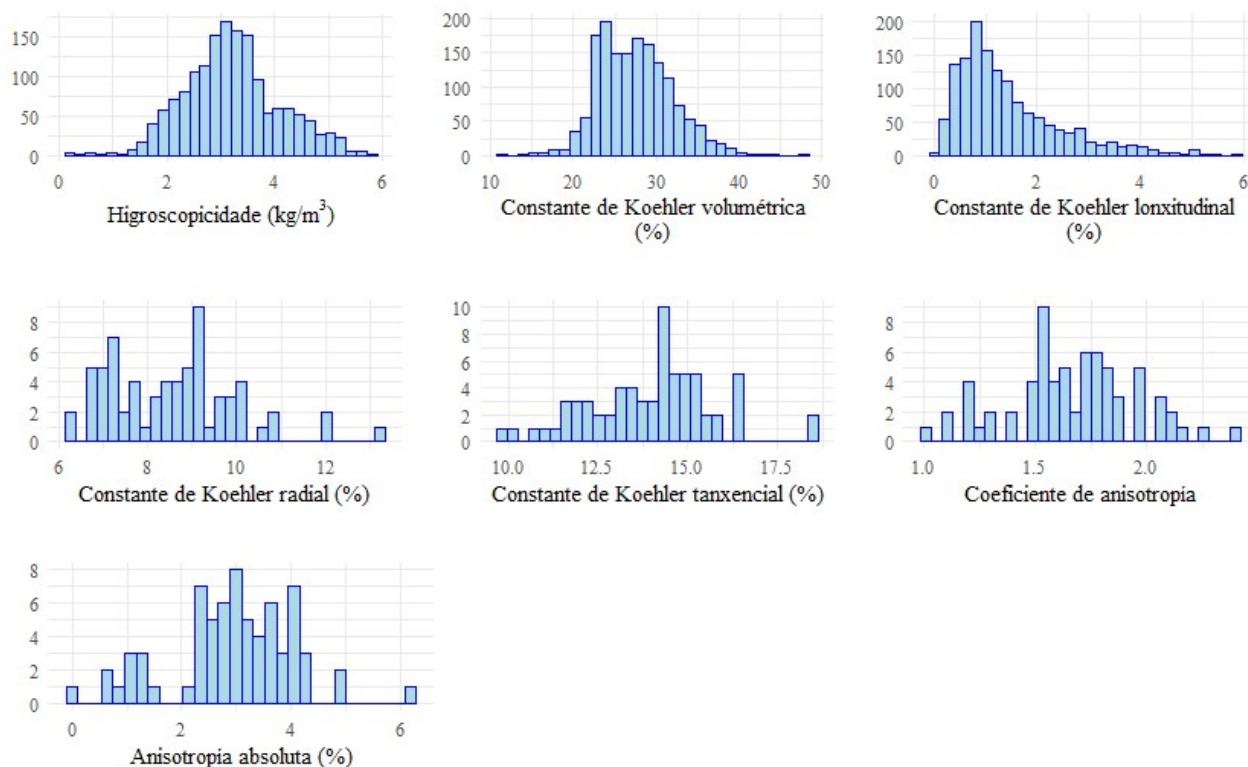


Figura 4.5. Histogramas das variables de Koehler, higroscopicidade, coeficiente de anisotropía e anisotropía absoluta.

4.1.3.1 Contraccións, coeficientes de contracción e higroscopicidade

A madeira contrae máis na dirección dos aneis de crecemento anuais (dirección tanxencial), aproximadamente a metade perpendicularmente aos aneis (dirección radial) e nunha mínima fracción ao longo da veta (dirección lonxitudinal) (Glass e Zelinka, 2021). Para Desch e Dinwoodie (2016) o valor da contracción tanxencial adoita ser aproximadamente o dobre que o da dirección radial; porén, nalgúns madeiras, a contracción tanxencial é só lixeiramente maior que a radial, mentres que noutras pode ser ata seis veces máis grande.

A contracción da madeira prodúcese debido á perda de contido de humidade por debaixo do punto de saturación da parede celular. Este fenómeno é causado principalmente pola natureza higroscópica da madeira, que lle permite absorber e liberar humidade en resposta aos cambios na humidade ambiental (Eckelman, 1998). A porcentaxe de variación do volume entre dous estados de humidade mide a contracción volumétrica da madeira entre os dous estados. As boas madeiras de ebanistería son aquelas cuxa contracción tanxencial e radial son case iguais (polo que se deforman pouco); de aí a interese en coñecer estas variables (Gutiérrez Oliva e Plaza Pulgar, 1967).

Os resultados para *B. celtiberica* corroboran aproximadamente estas afirmacións xenéricas das madeiras, cunha contracción tanxencial do 7,54 %, unha contracción radial do 4,60 % e unha contracción na dirección lonxitudinal do 0,81 %. A contracción volumétrica acadou un valor do 15,30 % de media, o que fai da madeira de *B. celtiberica*, segundo Gutiérrez

Oliva e Plaza Pulgar (1967), unha madeira de gran contracción, que debe serrarse antes do seu secado. Na norma UNE 56540:1978 (IRANOR, 1978) a contracción volumétrica do ensaio clasifícase como de gran contracción. Aínda que a contracción lonxitudinal adoita ser tan baixa que xeralmente toma valores inferiores ao 0,1 %, pode chegar ata o 0,8 % se as pezas de madeira conteñen madeira xuvenil (Desch e Dinwoodie, 2016). Este último resultado aseméllase ao exposto por Glass e Zelinka (2021) que afirman que a madeira próxima ao centro das árbores (madeira xuvenil) dalgunhas especies tamén se contrae excesivamente na dirección lonxitudinal. A madeira xuvenil ten un maior ángulo de microfibras (ángulo entre o eixe lonxitudinal da célula e as fibrillas de celulosa), o que provoca unha contracción lonxitudinal que pode ser máis de 10 veces o da madeira madura (Green *et al.*, 2021).

Gutiérrez Oliva e Plaza Pulgar (1967) dan os seguintes datos para *B. verrucosa* en España: 4,33 % de contracción radial, 5,29 % de contracción tanxencial, e 15,53 % de media para a contracción volumétrica; valores bastante semellantes aos resultados deste traballo, salvo o dato da contracción tanxencial, máis acusada no caso de *B. celtiberica*.

Wagenführ e Wagenführ (2022) falan de valores de “taxa de contracción” (*Schwindsatz*) para presentar os seguintes datos de contracción en *Betula* spp.: radial, arredor do 5,3 %; tanxencial, arredor do 7,8 %; lonxitudinal, 0,6 %; e contracción volumétrica, do 13,7 ao 14,2 %. Os resultados de *B. celtiberica* neste estudo son lixeiramente inferiores para as contraccións radial e tanxencial, e superiores para as contraccións lonxitudinal e volumétrica.

Outros datos que se apuntan na revisión bibliográfica son os valores de contracción volumétrica do 12,5 % para *B. pendula*, en Finlandia oriental, para pés procedentes de repoboación; e do 13,1 % para pés de parcelas de rexenerado natural (Möttönen e Luostarinen, 2006). Panshin e De Zeeuw (1980) diferencian, para *B. pubescens* e *B. verrucosa*, entre madeira normal e madeira de tracción, proporcionando os seguintes resultados:

- C_r: madeira normal: 0,31; madeira de tensión: 0,64
- C_t: madeira normal: 4,30; madeira de tensión: 4,45
- C_v: madeira normal: 6,30; madeira de tensión: 6,82

O valor comparado de contracción lonxitudinal de *B. celtiberica* é especialmente elevado, o que pode indicar, novamente, a presenza de madeira xuvenil na mostra. Zobel e Sprague (1998) constataron que a madeira xuvenil presenta problemas coa contracción lonxitudinal. A madeira de *B. celtiberica* de árbores xoves estudada por Riesco Muñoz (2018) acadou o 15 % de contracción volumétrica, un valor moi semellante.

Para as especies de bidueiro americanas, Panshin e De Zeeuw (1980), Eckelman (1998) e Glass e Zelinka, (2021) reportan os valores expostos na Táboa 4.5.

Táboa 4.5. Valores de contraccións volumétrica, radial e tanxencial de varias especies americanas.

Panshin e De Zeeuw (1980)			
	C _v	C _t	C _r
<i>B. papyrifera</i>	16,2	8,6	6,3
<i>B. alleghaniensis</i>	16,7	9,2	7,2
Eckelman (1998)			
		C _t	C _r
<i>B. papyrifera</i>		8,6	6,3
<i>B. alleghaniensis</i>		9,2	7,2
<i>B. lenta</i>		8,5	6,5
Glass e Zelinka (2021)			
	C _v	C _t	C _r
<i>B. papyrifera</i>	16,2	8,6	6,3
<i>B. alleghaniensis</i>	16,8	9,5	7,3
<i>B. lenta</i>	15,6	9	6,5
<i>B. neoalaskana</i>	16,7	9,9	6,5
<i>B. populifolia</i>	14,7	-	5,2
<i>B. nigra</i>	13,5	9,2	4,7

Os resultados de *B. celtiberica* sitúanse nun lugar intermedio, en canto á contracción volumétrica, con respecto ás especies americanas; e o bidueiro galego mostra valores inferiores de contracción tanxencial e radial comparada con bidueiros do hemisferio occidental.

En canto aos coeficientes de contracción, as probetas de madeira de *B. celtiberica* acadaron os valores medios de 0,25 % tanxencial, 0,16 % radial, 0,03 % lonxitudinal e 0,46 % volumétrico. Gutiérrez Oliva e Plaza Pulgar (1967) para *B. verrucosa* mostran uns coeficientes de contracción tanxencial e radial do 0,18 e 0,15 %, e un coeficiente de contracción volumétrica do 0,38 %. Os datos do presente traballo son superiores para as tres variables. Segundo a clasificación UNE 56540:1978 (IRANOR, 1978) o coeficiente de contracción volumétrico fai que a madeira sexa “medianamente nerviosa”, e apta para construción.

Vignote Peña (2014) menciona como desvantaxe da madeira de bidueiro a elevada contracción volumétrica e o seu moderado carácter nervioso. Ambos problemas están relativamente compensados, segundo este autor, por unha relación entre os coeficientes de contracción tanxencial e radial moi próxima á unidade. No caso de *B. celtiberica*, o cociente entre o coeficiente de contracción tanxencial e o radial resultou ser 1,52, bastante máis alonxado da unidade. A cualificación de “estable” que Vignote Peña e Martínez Rojo (2005) dan á madeira de *B. pendula*, por ter un coeficiente de contracción volumétrica de 0,38 %, tampouco se cumpre para *B. celtiberica*, que presenta un valor sensiblemente máis alto. Wagenführ e Wagenführ (2022) aportan un dato aínda menor para o coeficiente de contracción volumétrica en *Betula* spp.: 0,23 %; sen embargo, Peraza Sánchez *et al.*, (2004) informan de rangos de valores do coeficiente de contracción tanxencial de 0,26 a 0,31, e do coeficiente de contracción radial de 0,18 a 0,24, que quedarían por riba dos valores do presente traballo.

A higroscopicidade do *B. celtiberica* procedente de Galicia sitúase nun valor medio de 3,21 kg/m³, que corresponde a unha higroscopicidade normal segundo o criterio da norma UNE 56540:1978 (IRANOR, 1978). Valores baixos desta variable indican estabilidade ante os cambios de humidade (Desch e Dinwoodie, 1996). O resultado desta investigación foi

lixeramente menor comparado co dato de Gutiérrez Oliva e Plaza Pulgar (1967) para *B. verrucosa*, de 3,75 kg/m³ de media.

4.1.3.2 Constantes de Koehler, coeficiente de anisotropía e anisotropía absoluta

As fórmulas de Koehler (1931) establecen unha relación de proporcionalidade entre a contracción (en porcentaxe) e densidade anhidra (en g/cm³) para un rango de humidade entre 5 e 25%. Segundo Koehler estas relacións son xerais para todas as especies de madeira e adoptan os valores teóricos que aparecen como constantes nas ecuacións seguintes:

$$C_v = 28d_0; C_t = 17d_0; C_r = 9,5d_0; C_l = 1,5d_0 \quad (19)$$

onde:

d_0 é a densidade anhidra (en g/cm³)

C_v é a contracción volumétrica (%)

C_t é a contracción tanxencial (%)

C_r é a contracción radial (%)

e C_l é a contracción lonxitudinal (%).

De igual xeito, segundo Koehler, a contracción volumétrica debe ser aproximadamente igual á suma das tres contraccións lineais:

$$C_v = C_t + C_r + C_l \quad (20)$$

Para comprobar o cumprimento das relacións de proporcionalidade entre a densidade anhidra e a contracción do volume ou da dimensión correspondente, considéranse os intervalos de confianza do 95 % para as constantes de Koehler calculadas no presente estudo (Táboa 4.6).

Táboa 4.6. Intervalos de confianza ao 95 % para os valores das constantes de Koehler deste traballo.

	K _v	K _t	K _r	K _l
Media	27,41	13,97	8,56	1,43
Limite inferior do intervalo de confianza ao 95 %	27,20	13,88	8,49	1,38
Limite superior do intervalo de confianza ao 95 %	27,63	14,05	8,63	1,47
Constante de Koehler	28	17	9,5	1,5

Todas as constantes das ecuacións (1) quedan fóra do intervalo de confianza do 95 % correspondente, logo a madeira de *B. celtiberica* de Galicia non cumpren as relacións de proporcionalidade de Koehler. As constantes de Koehler do estudo son inferiores aos valores xenéricos proporcionados por Koehler para todas as madeiras. Isto quere dicir que a madeira de bidueiro ten unha boa estabilidade tendo en conta o valor da súa densidade anhidra ou, o que é o mesmo, para o valor de densidade anhidra achado caberían esperar unhas contraccións maiores.

De acordo co exposto na ecuación (20), a suma das contraccións lineais tampouco resulta na contracción volumétrica:

$$C_v = C_t + C_r + C_l; 7,54 + 4,60 + 0,81 = 12,95 \neq 15,30$$

As constantes de proporcionalidade nesta madeira son máis baixas que as dadas por Koehler, o que significa que a madeira de bidueiro procedente de Galicia é axeitada para o seu uso en carpintaría, tendo en conta as contraccións na madeira sen defectos.

O resultado do coeficiente de anisotropía do presente estudo, 1,67, é alto comparado co valor de 1,22 da madeira de *B. verrucosa*, calculado a partires das contraccións tanxencial e radial que proporciona Gutiérrez Oliva e Plaza Pulgar (1967), e máis semellante ao dato de 1,4 proporcionado por Vignote Peña e Martínez Rojo (2005), que estes autores cualifican como “dunha madeira moi estable”. Para especies americanas do xénero *Betula* Pashin e De Zeeuw (1980) dan os datos de 1,4 e 1,3 para *B. papyrifera* e *B. alleghaniensis*, respectivamente. O resultado da madeira de *B. celtiberica* é bastante superior a todos os valores da revisión bibliográfica, o que a convirte nunha nota discordante na familia dos bidueiros, que soen ter un comportamento bastante compensado entre as contraccións tanxenciais e radiais. De todos modos, considérase aceptable un coeficiente de anisotropía inferior a 2 (Rijsdijk e Laming, 1994). A diferenza entre a contracción tanxencial e radial (anisotropía absoluta) dá unha indicación moito mellor do risco de deformación da madeira que o coeficiente de anisotropía; se a diferenza é superior ao 2,5%, hai que ter presente o risco de deformación. Diferencias superiores ao 3 % considéranse elevadas (Rijsdijk e Laming, 1994), situándose a madeira de *B. celtiberica* xusto por baixo deste límite (2,94 %).

4.1.4 Variables anatómicas

A continuación preséntanse tres variables que, non tendo cabida, pola súa natureza, dentro dos grupos anteriores, si son relevantes de cara ao estudo das propiedades físicas da madeira:

- anchura de aneis
- sustancia extraída tras inmersión prolongada, en porcentaxe do peso anhidro inicial
- porosidade.

Expóñense, estas variables, na Táboa 4.7 e na Figura 4.6.

Táboa 4.7. Estatísticos descritivos das variables de anchura de aneis e sustancia extraída tras inmersión prolongada. n = número de datos, CV (%) = coeficiente de variación.

Variable	n	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	CV (%)
Anchura de aneis (mm)	475	1,77	8,05	4,34	4,46	27
Sustancia extraída (%)	197	0,52	3,92	2,23	2,20	22
Porosidade (%)	197	47	64	53	52	5

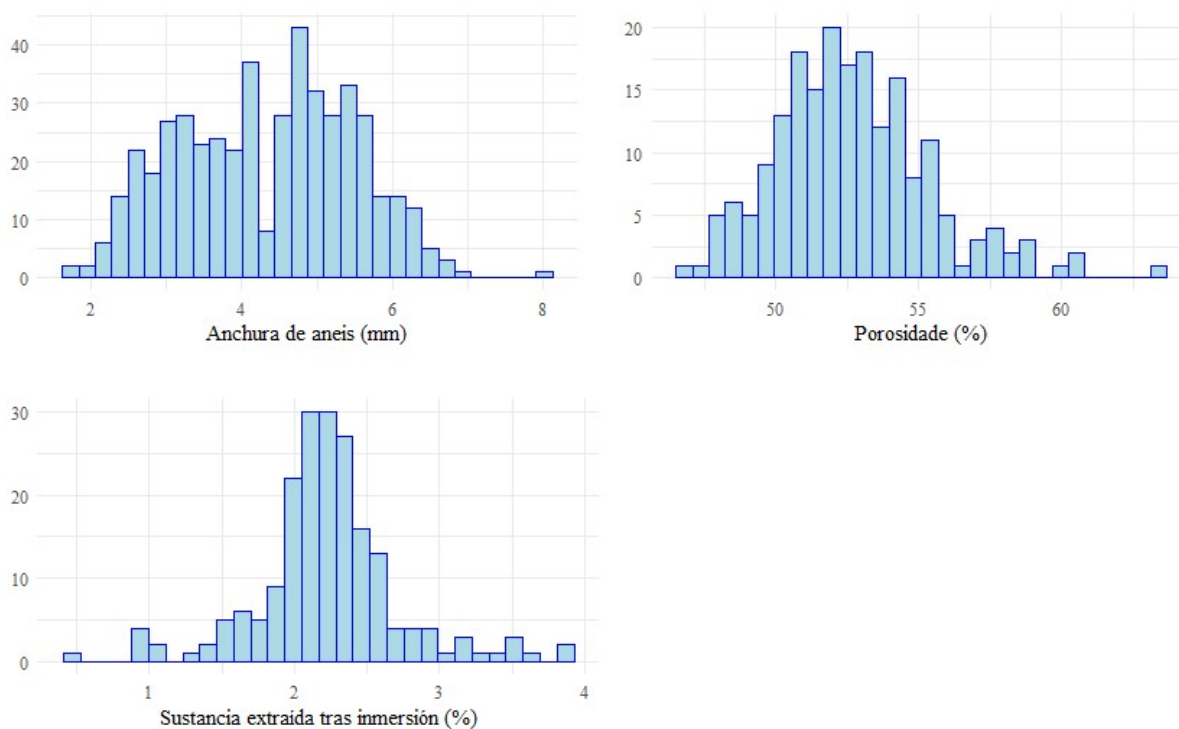


Figura 4.6. Histogramas das variables de anchura de aneis, porosidade e sustancia extraída tras inmersión prolongada.

4.1.4.1 Anchura de aneis

A madeira de bidueiro ten pouco marcados os aneis de crecemento anual, sendo difíciles de observar. A última zona de madeira tardía dos aneis aparece en faixas concéntricas de cor máis escuro que o resto da masa (Wagenführ e Wagenführ, 2022). Os vasos son numerosos e de pequeno diámetro (Nájera y Angulo e López Fraile, 1969), podendo acadar densidades superiores a 20 vasos por milímetro cadrado (Wagenführ e Wagenführ, 2022). A madeira de bidueiro posúe unha porosidade homoxénea ou difusa (anel difuso), isto é, non existe unha distinción clara entre a madeira temperá e a madeira tardía, como ocorre nas especies de anel poroso: os vasos presentan un tamaño uniforme ao longo de todo o anel (Fernández-Golfín *et al.*, 2020).

O valor medio do ancho dos aneis neste estudo foi de 4,34 mm, cun coeficiente de variación do 27 %. Como valores de referencia da madeira de bidueiro doutros países atopáronse a anchura de aneis indicada por Borůvka *et al.* (2020) para *B. pendula* na República Checa, que acadou os 2,4 mm de media cun coeficiente de variación do 21 %; e para árbores de *B. pendula* de idades entre 70 e 72 anos, no nordeste de Polonia, Dobrowolska *et al.* (2020) apuntaron valores medios de anchura de aneis de 2,6 mm, cun coeficiente de variación do 47 %. Hynynen *et al.* (2010) dan datos do crecemento diamétrico de *B. pendula* e *B. pubescens* no norte de Europa, que comeza na primavera despois do brote das follas, e en condicións favorables pode chegar aos 3 – 4 mm cada ano.

Aínda que para Desch (1932) a anchura de aneis non mostra ter unha relación coa densidade, si observou que flutuacións na anchura de aneis coinciden con cambios destacables na densidade. No presente traballo atopouse unha relación significativa entre a densidade básica, aínda que non moi forte: o seu coeficiente de correlación de Pearson foi $r = 0.29$.

4.1.4.2 Porosidade

Nas madeiras de anel difuso, os vasos ocupan unha porcentaxe en volume elevado, do 20 % ao 60 %. Pola contra, e pese ao maior tamaño unitario, nas madeiras de anel poroso os vasos só ocupan do 5 % ao 25 % do volume total da madeira. Por iso, as frondosas máis permeables ao paso dos líquidos pertencen ao grupo das madeiras de porosidade difusa (Fernández-Golfín *et al.*, 2020), entre as que se conta a de bidueiro.

Pola súa variabilidade estrutural, as frondosas presentan moita máis variabilidade nos fenómenos de permeabilidade e capilaridade (Siau, 1995). A porosidade e a distribución do tamaño dos poros son importantes para a impregnabilidade, o acabado superficial e o secado da madeira, calidades estas moi dependentes da especie (Niemz *et al.*, 2023).

A madeira de *Betula celtiberica* analizada neste traballo acadou un resultado de porosidade do 53 % de media, con moi pouca variabilidade, como mostra un coeficiente de variación do 5 %. Niemz *et al.* (2023) sitúan ao bidueiro (definido como *birch*, sen concretar especie) e a outras frondosas europeas como a faia ou o carballo, nun rango de densidade anhidra de entre 610 e 700 kg/m³, correspondéndolle unha porosidade de entre o 40 e o 50 %. O resultado de porosidade neste documento é lixeiramente superior, posiblemente debido á presenza de madeira xuvenil, que é máis porosa ao ter unha parede celular das fibras menos densa (Zobel e Sprague, 1998). Wagenführ e Wagenführ (2022) reportan unha porosidade de *Betula* spp. máis alta: 59 %.

Esta alta porosidade facilita o tinxido e o barnizado da madeira de bidueiro (Vignote Peña, 2014).

4.1.4.3 Sustancia extraída tras inmersión prolongada

A madeira contén tres compoñentes principais: a celulosa, que proporciona a maior parte da resistencia mecánica, as hemicelulosas, que se comportan como unha matriz, e a lignina, que une as células. As proporcións dos mencionados compoñentes, en peso, son aproximadamente o 40-50 % de celulosa, e a lignina representa o 15-35 %. O resto dos compoñentes son cantidades variables de hemicelulosas (20-35 %) e de diversos compostos químicos secundarios (extractivos, materiais inorgánicos, etc.). Os constituíntes inorgánicos ou cinza raramente superan o 0,1% ao 0,5 % (Siau, 1995). Como dato concreto para madeiras do xénero *Betula*, Lachowicz *et al.* (2019b) acharon para *B. pendula* e *B. pubescens* a seguinte composición:

- Celulosa: 43,9 %
- Hemicelulosas: 28,9 %
- Lignina: 20,2 %
- Extractivos: 2,5-3 %

De media, o 2,23 % da materia leñosa na madeira analizada correspondeu a substancias de impregnación hidrosolubles, é dicir, substancias que se poden extraer por difusión en auga trala inmersión prolongada dunha submostra de probetas, sen que se producira extracción por convección, posto que non houbo axitación da submostra somerxida en auga. Xa que, en xeral, o 10 % ou menos da masa da madeira anhidra son substancias de impregnación (Wiemann, 2021) pódese afirmar que polo menos unha cuarta parte das substancias de impregnación da madeira de bidueiro anhidra corresponde a substancias hidrosolubles.

Como se apuntou no apartado adicado á variable da densidade da parede celular, o método de inmersión prolongada das probetas puido provocar a disolución de parte das hemicelulosas da madeira, e facilitar a súa eliminación mediante dilución en auga. O lavado de hemicelulosas influiría, polo tanto, na diminución da cantidade de substancia sólida do material experimental, e aumentaría a substancia extraída.

4.1.5 Variables cromáticas

A cor da madeira determina, en moitas ocasións, o valor do produto, xogando un papel importante no seu atractivo estético. No presente traballo recompiláronse as variables cromáticas (expostas na Táboa 4.8), a partir da análise de 23 probetas, con tres medicións (correspondentes aos tres planos principais da madeira) por cada probeta. Empregouse para a determinación da cor da madeira de *B. celtiberica* o espazo de cor $L^*a^*b^*$, tamén coñecido como CIELAB ou $CIEL^*a^*b^*$. Trátase dun sistema moi utilizado para medir, cuantificar e clasificar a cor. Consta de tres variables cromáticas:

- L^* (luminosidade): representa o brillo ou a escuridade dunha cor, con valores próximos a cero os máis escuros e aqueles próximos a cen os máis luminosos
- a^* (eixo vermello-verde): indica a posición da cor entre o vermello e o verde. Os valores positivos ($+a^*$) representan un cambio cara ao vermello e os negativos ($-a^*$) un cambio cara ao verde
- b^* (eixo azul-amarelo): indica a posición da cor entre o azul e o amarelo, co valores positivos ($+b^*$) representando un cambio cara ao amarelo e os valores negativos ($-b^*$) un cambio cara ao azul.

Cada probeta foi medida nas tres caras principais da madeira: plano transversal (perpendicular ao eixo lonxitudinal da árbore), plano radial (seguindo a dirección do centro do tronco cara a casca, en sentido radial) e plano tanxencial (plano tanxencial aos aneis de crecemento).

Táboa 4.8. Estatísticos descritivos das variables cromáticas. n = número de datos, CV (%) = coeficiente de variación. * transversal = cara transversal, * radial = cara radial, * tanxencial= cara tanxencial.

Variable	n	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	CV (%)
L* transversal	23	65,68	72,48	69,34	69,47	3
a* transversal	23	9,42	12,88	11,22	11,40	8
b* transversal	23	13,09	19,74	16,52	16,35	11
L* radial	23	74,33	78,89	76,79	76,97	2
a* radial	23	10,42	12,77	11,52	11,45	5
b* radial	23	16,62	22,48	18,56	18,30	7
L* tanxencial	23	73,55	78,91	75,79	75,59	2
a* tanxencial	23	10,29	12,46	11,34	11,30	5
b* tanxencial	23	16,03	20,38	18,13	18,25	6

Mononen *et al.* (2005) rexistraron os seguintes valores medios para o plano tanxencial da madeira de *B. pendula* de repoboación en Finlandia:

- Madeira sen tratar:
 - L* = 83,21
 - a* = 3,74
 - b* = 17,62
- Madeira tratada con peróxido de hidróxeno:
 - L* = 84,37 (branqueado de superficie) ou 90,73 (branqueado por inmersión)
 - a* = 3,02 (superficie) ou 1,05 (inmersión)
 - b* = 19,16 (superficie) ou 19,22 (inmersión).

Os valores medios descubertos neste traballo son dunha madeira máis escura (L* = 75,79) e máis encarnada (a* = 11,34) que as mostras de Mononen *et al.* (2005), tanto para as mostras naturais como para as mostras tratadas con peróxido. É tamén máis amarela (b* = 18,13) que as mostras de madeira sen tratar e tratada con branqueado de superficie, pero menos amarela que a mostra tratada mediante inmersión en peróxido. Os resultados do presente estudo aseméllanse máis á madeira sen tratar que á tratada con peróxido de hidróxeno, como cabería esperar.

Para un total de cen pezas de madeira de *B. pendula* en Eslovaquia, de diferentes partes ao longo do fuste, e repartidas en 4 estados de tratamento de térmico, Hřčková *et al.* (2020) atoparon os valores medios de coordenadas cromáticas CIEL*a*b* expostos na Táboa 4.9.

Táboa 4.9. Coordenadas cromáticas CIEL*a*b* da madeira de *Betula pendula*. Elaboración propia cos datos de Hřčková *et al.* (2020)

Madeira ao natural			Tratamento I			Tratamento II			Tratamento III		
L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
87,0	1,4	19,7	79,6	4,0	20,1	70,4	7,9	22,7	61,3	10,0	22,3

Na Táboa 4.9, os tratamentos I, II e III corresponden a diferentes niveis de calor crecente mediante vapor de auga. Para poder comparar as mostras de Hřčková *et al.* (2020) coas mostras do presente traballo calculáronse as medias de todos os planos de medición das medias das tres coordenadas cromáticas, resultando L* = 73,97; a* = 11,36; e b* = 17,74. Buscando a menor

diferencia, resulta que a mostra de madeira de *B. celtiberica* é máis semellante á madeira de Hrčková *et al.* (2020) que foi sometida ao tratamento térmico I, consistente en quecemento por aire saturado de vapor a temperaturas entre 100 e 107,5 °C durante 7,5 horas.

4.1.6 Outras variables de interese

Como grupo final, recompílanse neste apartado unha serie de variables dendrométricas. Se ben non son propiedades físicas da madeira, si é importante o seu estudo, pois en moitas ocasións poden comportarse como variables explicativas de magnitudes de interese como densidades ou contraccións (Gao *et al.*, 2017; Rocha *et al.*, 2019).

Para este traballo consideráronse as seguintes magnitudes:

- Altura no fuste, en centímetros, reflexa en que altura do fuste foi tomada a probeta rexistrada
- Diámetro normal da árbore de onde foi tomada a probeta, en centímetros
- Altura total da árbore de onde procede a probeta, en metros
- Idade da árbore, en anos
- Crecemento medio en altura, resultado do cociente entre a altura total e a idade, en metros por ano
- Crecemento medio en diámetro, calculado como cociente do diámetro entre a idade, en centímetros por ano
- Diámetro de copa medio da árbore de procedencia da probeta, en metros
- Esvelteza, ou o cociente entre a altura total da árbore e o diámetro normal, en metros por centímetro.

As variables preséntanse na Táboa 4.10, e a súa representación gráfica móstrase na Figura 4.8. Pola natureza, máis discretizada, destas variables, optouse por representalas mediante diagrama de caixas.

Táboa 4.10. Estatísticos descritivos das variables dendrométricas. n = número de datos, CV (%) = coeficiente de variación.

Variable	n	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	CV (%)
Altura no fuste (cm)	1625	16	1.400	298	200	-
Diámetro normal con casca (cm)	1637	6	27	17	18	29
Altura total (m)	1637	9	21	14	14	22
Idade (anos)	1637	4	20	14	15	21
Crecemento medio en altura (m/ano)	1637	0,5	2,2	1,1	1,1	33
Crecemento medio en diámetro normal con casca (cm/ano)	1637	0,6	1,8	1,2	1,1	25
Diámetro de copa medio da árbore (m)	1637	2	7	5	5	25
Esvelteza da árbore (m/cm)	1637	0,5	1,8	0,9	0,8	30

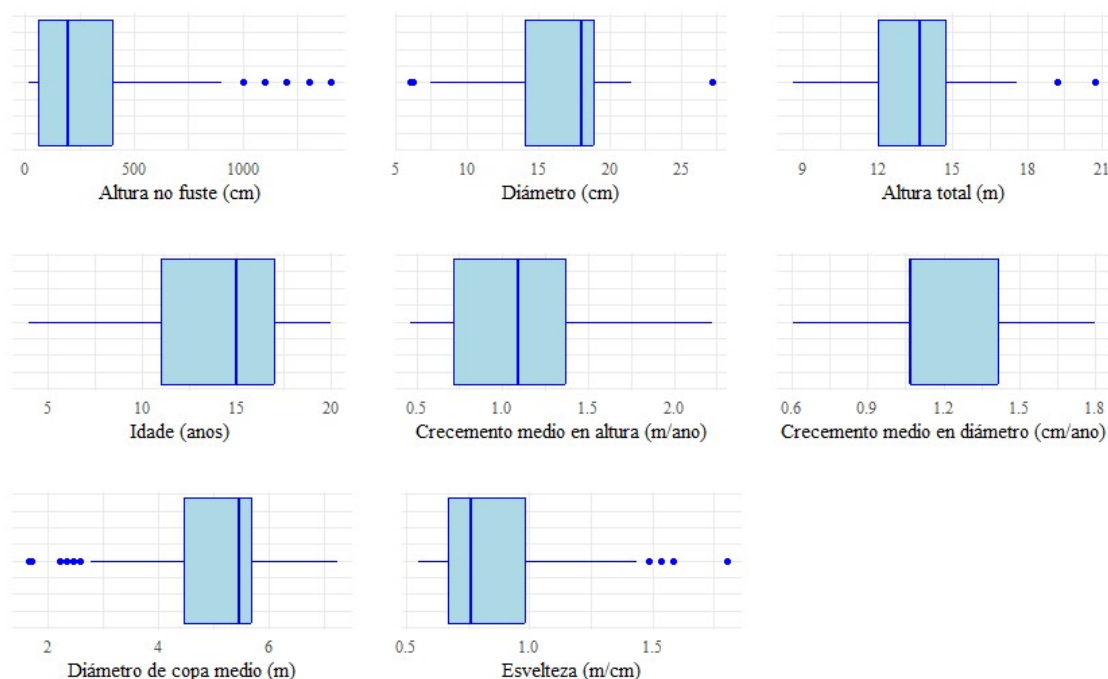


Figura 4.6. Diagrama de caixas das variables dendrométricas.

4.1.7 Estudo da distribución das propiedades físicas

Neste apartado comeza o estudo da relación entre as variables físicas da madeira e aquelas outras magnitudes do medio ou da árbore. Preténdese atopar vínculos entre as variables de interese e outras variables, para poder determinar valores de densidade ou contraccións sen empregar métodos destrutivos. O escenario ideal é derivar unha variable a partir de información sobre a árbore en pé, como pode ser o seu diámetro, a súa altura, etc., ou da árbore apeada pero aínda sen procesar, como o punto ao longo do fuste de onde procede o material a caracterizar. Estas variables explicativas, para este traballo, foron as seguintes:

- Altura no fuste en que foi tomada a probeta rexistrada (en metros)
- Diámetro normal con casca da árbore de onde procede a probeta (en centímetros)
- Altura total da árbore (en metros)
- Idade da árbore (en anos)
- Crecemento medio en altura (en metros por ano)
- Crecemento medio en diámetro normal con casca (en centímetros por ano)
- Diámetro de copa medio da árbore (en metros)
- Esvelteza da árbore (en metros de altura por centímetros de diámetro)
- Anchura de aneis de crecemento anual (en milímetros)
- Coordenadas cromáticas.

Ao seleccionar as variables resposta para a análise de regresión, é importante escoller propiedades que sexan relevantes para os obxectivos da investigación e que mellor definan as características clave da madeira. Baseándose en prácticas comúns na ciencia da madeira, adoitan considerarse as seguintes variables:

- As densidades da madeira (por exemplo, a densidade básica ou a densidade con 12 % de contido en humidade) son propiedades fundamentais con relación con moitas outras características da madeira
- A taxa de contracción volumétrica e o coeficiente de anisotropía (que captura información sobre a contracción radial e tanxencial) proporcionan información sobre a estabilidade da madeira
- Variables sobre contido de humidade, dado que afectan a moitas propiedades da madeira e adoitan incluírse nas análises. Neste traballo seleccionáronse a humidade máxima teórica e o punto de saturación da parede celular volumétrico, estimado a partir da contracción e coeficiente de contracción volumétricos.

4.1.7.1 Contracción volumétrica

Unha forma rápida e visual de achar relacións entre propiedades e outras magnitudes é a representación gráfica e interpretación da nube de puntos por pares de variables, para observar a liña de regresión asociada. Aínda que unha pendente distinta de cero indica algunha forma de relación, non garante que a relación sexa puramente lineal ou que represente unha dependencia directa. Outros factores, como valores atípicos ou relacións non lineais, poden afectar tanto á pendente como á interpretación da dependencia lineal (Montgomery *et al.*, 2021). Nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 represéntase o valor da contracción volumétrica, obtida a partir da medición e pesado das probetas, en relación coas variables potencialmente explicativas ou independentes.

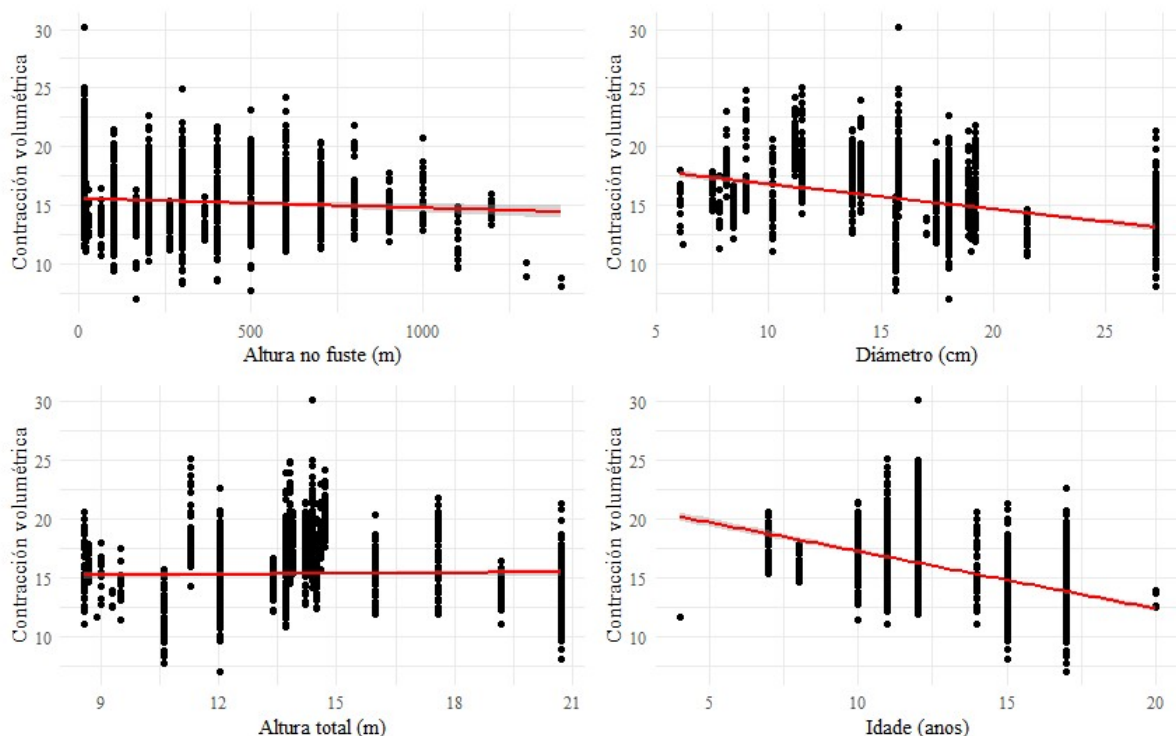


Figura 4.7. Nubes de puntos coa variable resposta contracción volumétrica, fronte a variables explicativas altura no fuste, diámetro normal, altura total e idade. A liña vermella marca a tendencia da regresión lineal entre os pares de variables.

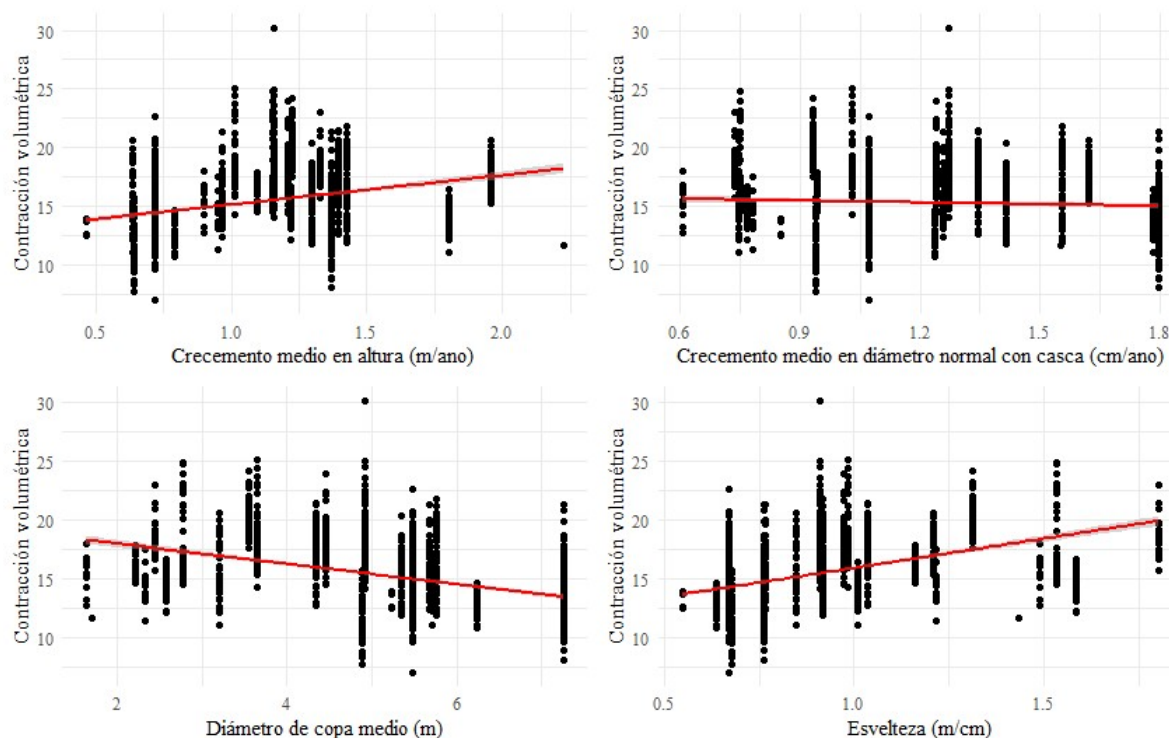


Figura 4.8. Nubes de puntos coa variable resposta contracción volumétrica, fronte a variables explicativas crecemento medio en altura, crecemento medio en diámetro normal con casca, diámetro de copa medio e esvelteza. A liña vermella marca a tendencia da regresión lineal entre os pares de variables.

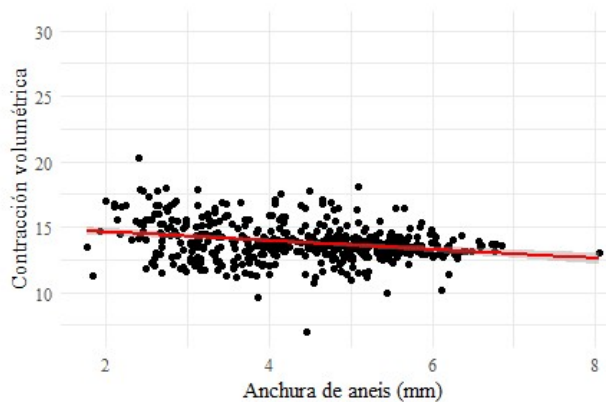


Figura 4.9. Nube de puntos coa variable resposta contracción volumétrica, fronte a anchura de aneis. A liña vermella marca a tendencia da regresión lineal entre os pares de variables.

Segundo se pode apreciar nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9, aquelas variables que poden ter unha relación coa contracción volumétrica, dentro dos rangos de datos analizados, son aquelas cuxa liña de tendencia ten unha pendente distinta de cero: diámetro, idade, crecemento en altura, diámetro de copa medio e esvelteza. No resto de variables explicativas, cunha pendente moi próxima a cero, o incremento da variable explicativa non se traduce nun incremento ou diminución da variable resposta, non existindo, polo tanto, vínculo lineal entre eses pares de variables.

4.1.7.2 Coeficiente de anisotropía

Outra variable de interese para determinar mediante métodos non destrutivos é o coeficiente de anisotropía. Canto máis pequeno sexa, máis estable será a madeira, e menos propensa á deformación e á perda de escuadría cadrada ou rectangular en pezas serradas. (Gutiérrez Oliva e Plaza Pulgar, 1967; Vignote Peña e Martínez Rojo, 2005). Nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 móstrase o valor do coeficiente de anisotropía fronte ás variables explicativas.

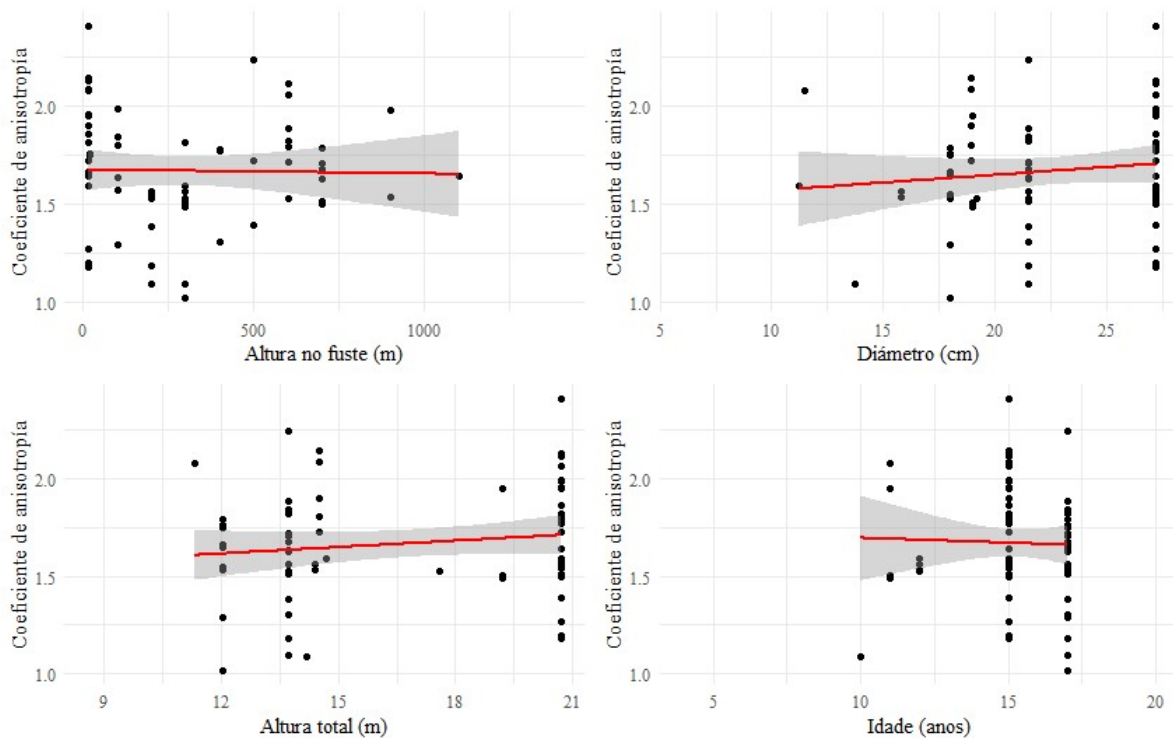


Figura 4.10. Nubes de puntos coa variable resposta coeficiente de anisotropía, fronte a variables explicativas altura no fuste, diámetro, altura total e idade. A liña vermella marca a tendencia da regresión lineal entre os pares de variables.

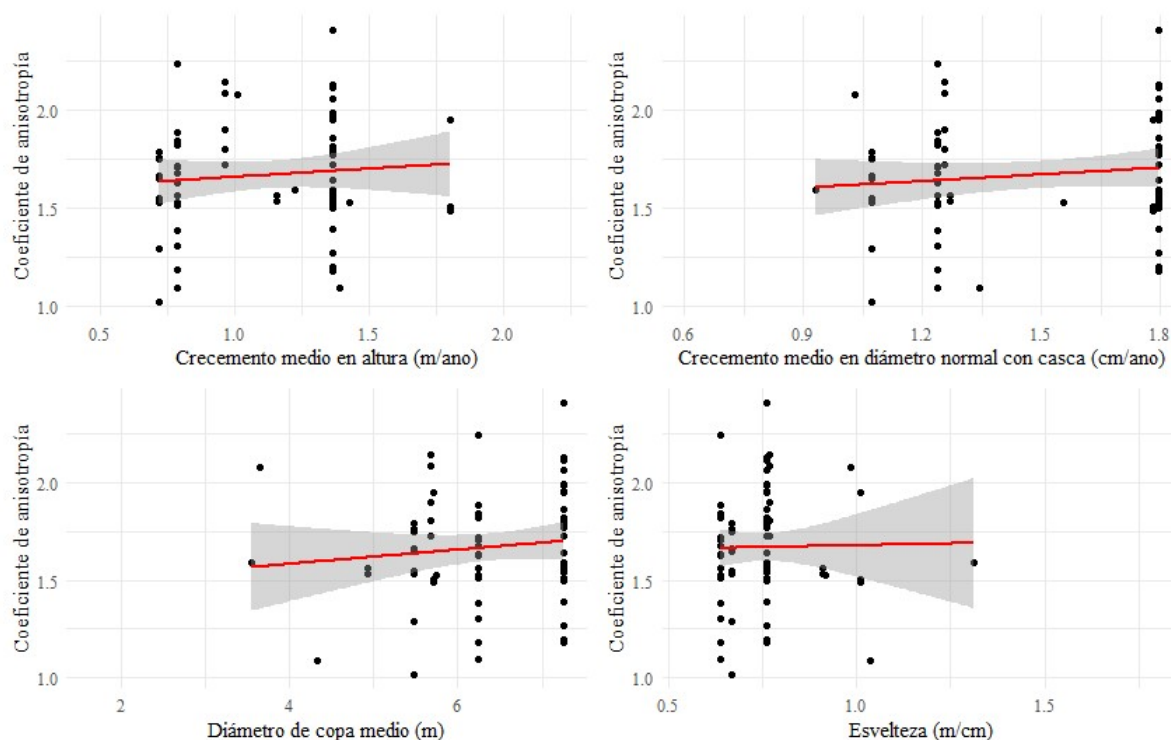


Figura 4.11. Nubes de puntos coa variable resposta coeficiente de anisotropía, fronte a variables explicativas crecemento medio en altura, crecemento medio en diámetro normal con casca, diámetro de copa medio e esvelteza. A liña vermella marca a tendencia da regresión lineal entre os pares de variables.

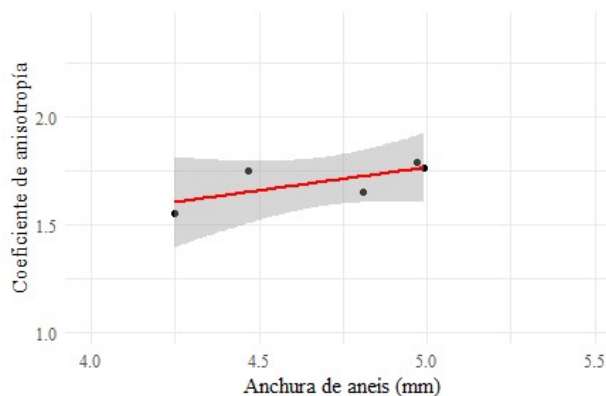


Figura 4.12. Nube de puntos coa variable resposta coeficiente de anisotropía, fronte a anchura de aneis. A liña vermella marca a tendencia da regresión lineal entre os pares de variables.

Nesta ocasión, debido á pouca cantidade de datos da variable (o coeficiente de anisotropía foi caracterizado por só 69 probetas), a información que se pode extraer das Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 non é suficiente. Nas Figuras apréciase uns amplos intervalos de confianza en torno á liña de regresión e, ademais, esta última apenas presenta pendente na maioría dos casos, o cal indica pouca influencia da variable correspondente no coeficiente de anisotropía. O caso da Figura 4.12, que representa o coeficiente de anisotropía fronte á anchura de aneis, é o máis evidente da pouca información dispoñible: apenas 5 pares de valores relacionan ambas variables. Por estes motivos non se buscará ningunha relación de regresión para o coeficiente de anisotropía.

4.1.7.3 Densidade básica

A densidade básica proporciona unha medida estandarizada da densidade da madeira, que permite comparacións precisas entre diferentes mostras e mesmo diferentes especies, e está intimamente ligada a procesos ecolóxicos e a moitas propiedades importantes da madeira (Mo *et al.*, 2024). Nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 móstrase como se comporta esta variable coas variables explicativas.

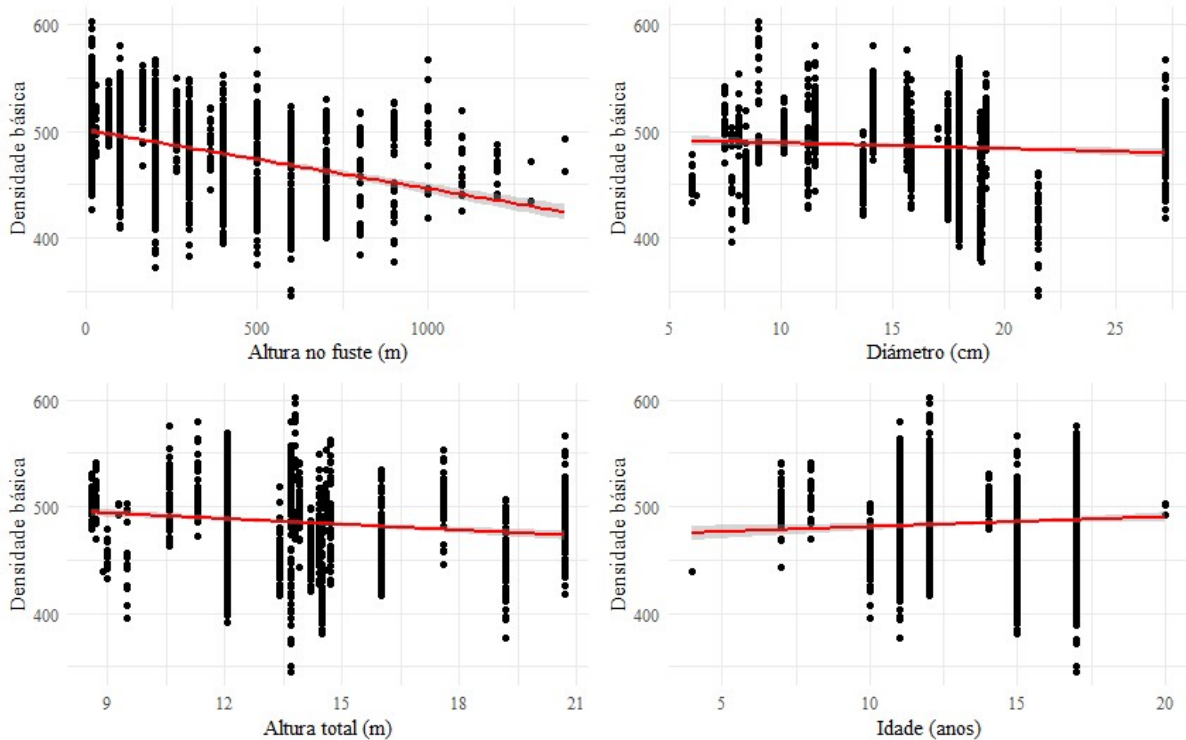


Figura 4.13. Nubes de puntos coa variable resposta densidade básica, fronte a variables explicativas altura no fuste, diámetro, altura total e idade. A liña vermella marca a tendencia da regresión lineal entre os pares de variables.

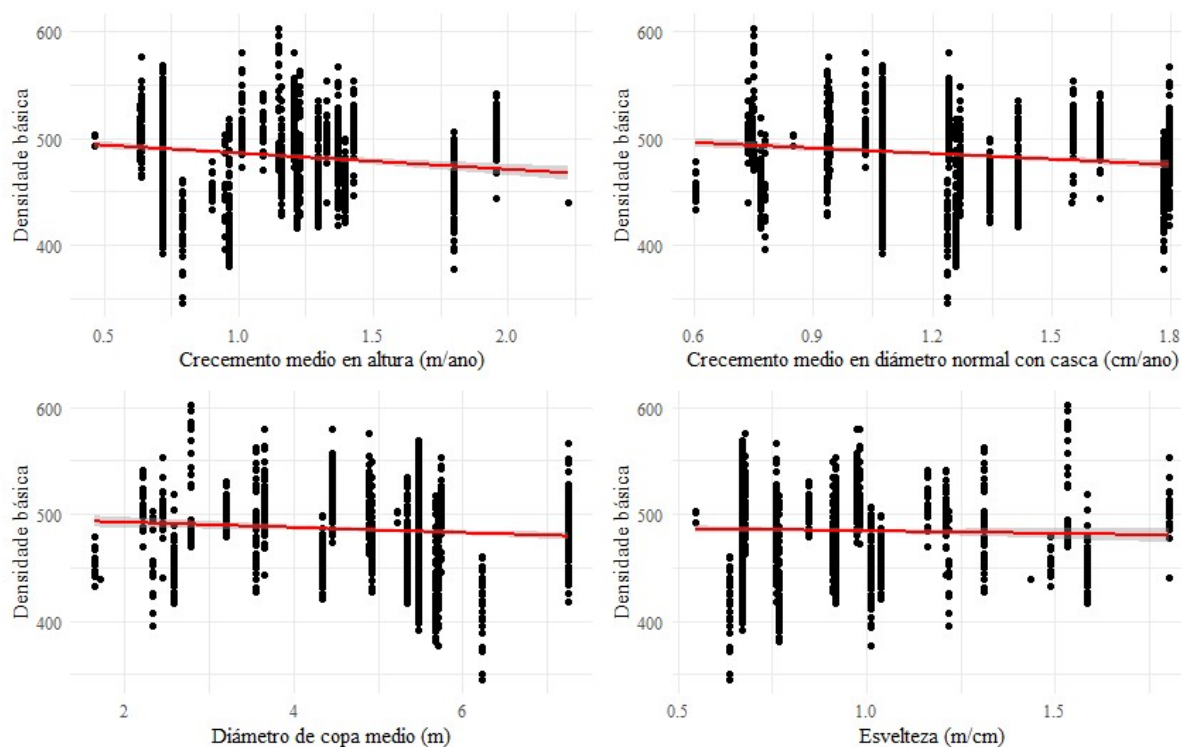


Figura 4.14. Nubes de puntos coa variable resposta densidade básica, fronte a variables explicativas crecemento medio en altura, crecemento medio en diámetro normal con casca, diámetro de copa medio e esvelteza. A liña vermella marca a tendencia da regresión lineal entre os pares de variables

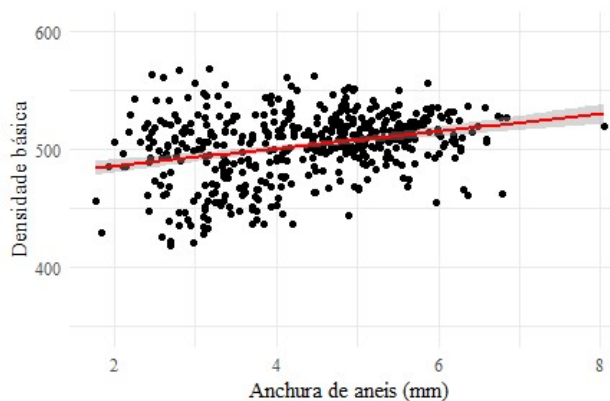


Figura 4.15. Nube de puntos coa variable resposta densidade básica, fronte a anchura de aneis. A liña vermella marca a tendencia da regresión lineal entre os pares de variables.

Nesta ocasión obsérvase que as variables independentes que teñen un maior impacto na densidade básica son a altura no fuste e a anchura de aneis, e en menor medida a idade da árbore.

4.1.7.4 Densidade ao 12 % de humidade

A densidade a contido de humidade en equilibrio higroscópico é tamén unha variable interesante, profusamente citada na bibliografía pola súa fácil obtención e gran utilidade á hora de comparar diferentes mostras. Nas Figuras 4.19, 4.20, 4.21 expónse o comportamento desta variable en relación ás variables explicativas.

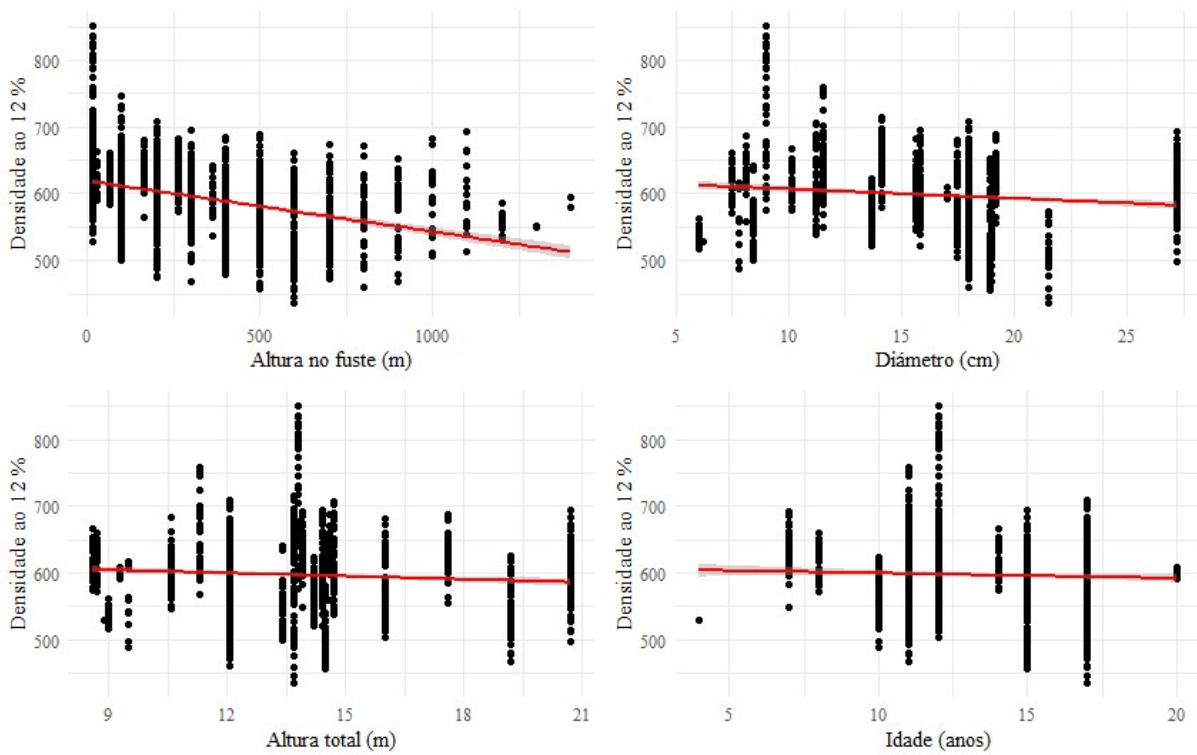


Figura 4.19. Nubes de puntos coa variable resposta densidade ao 12 % de contido en humidade, fronte a variables explicativas altura no fuste, diámetro, altura total e idade. A liña vermella marca a tendencia da regresión lineal entre os pares de variables.

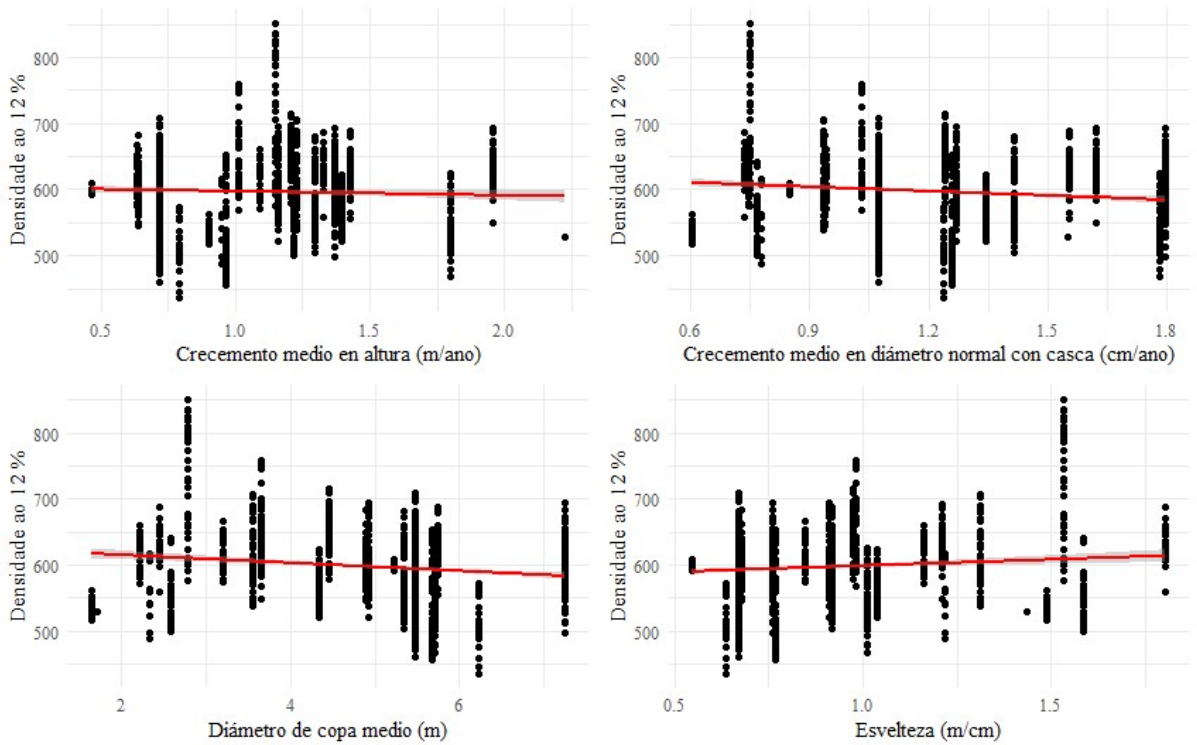


Figura 4.20. Nubes de puntos coa variable resposta densidade ao 12 % de contido en humidade, fronte a variables explicativas crecemento medio en altura, crecemento medio en diámetro con casca, diámetro de copa medio e esvelteza. A liña vermella marca a tendencia da regresión lineal entre os pares de variables.

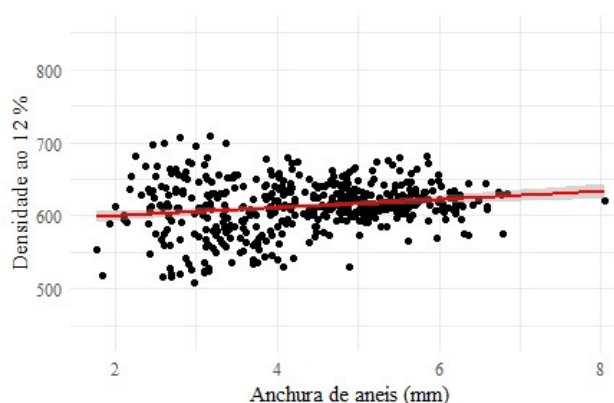


Figura 4.21. Nube de puntos coa variable resposta densidade ao 12 % de contido en humidade, fronte a anchura de aneis. A liña vermella marca a tendencia da regresión lineal entre os pares de variables.

Como era de esperar, a densidade ao 12 % compórtase dun xeito moi similar á densidade básica. Altura no fuste e anchura de aneis parecen ter influencia, e diámetro de copa medio e esvelteza, en menor medida.

4.1.7.5 Humidade máxima teórica

Para o grupo de variables das humidades, revisárase primeiramente o caso da humidade máxima teórica, posto que se trata dunha propiedade importante, única para cada especie, de canta humidade pode admitir a súa madeira. As nubes de puntos e liñas de axuste expóñense nas Figuras 4.22, 4.23 e 4.24.

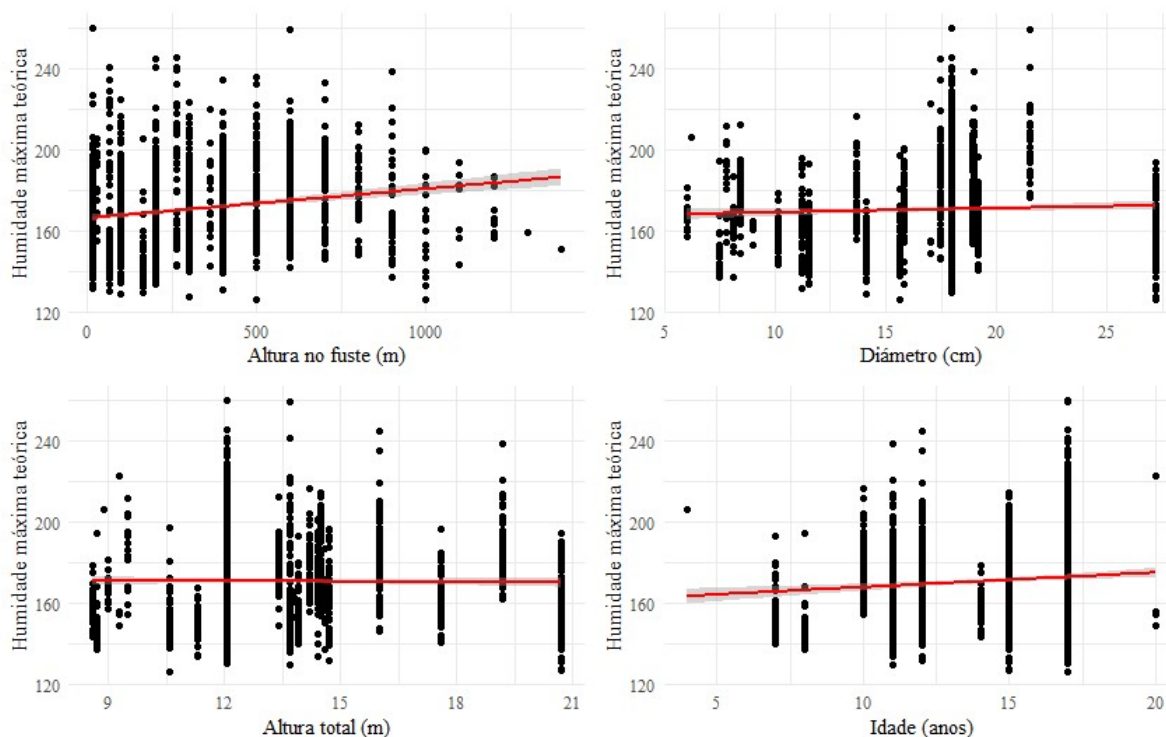


Figura 4.22. Nubes de puntos coa variable resposta humidade máxima teórica, fronte a variables explicativas altura no fuste, diámetro, altura total e idade. A liña vermella marca a tendencia da regresión lineal entre os pares de variables.

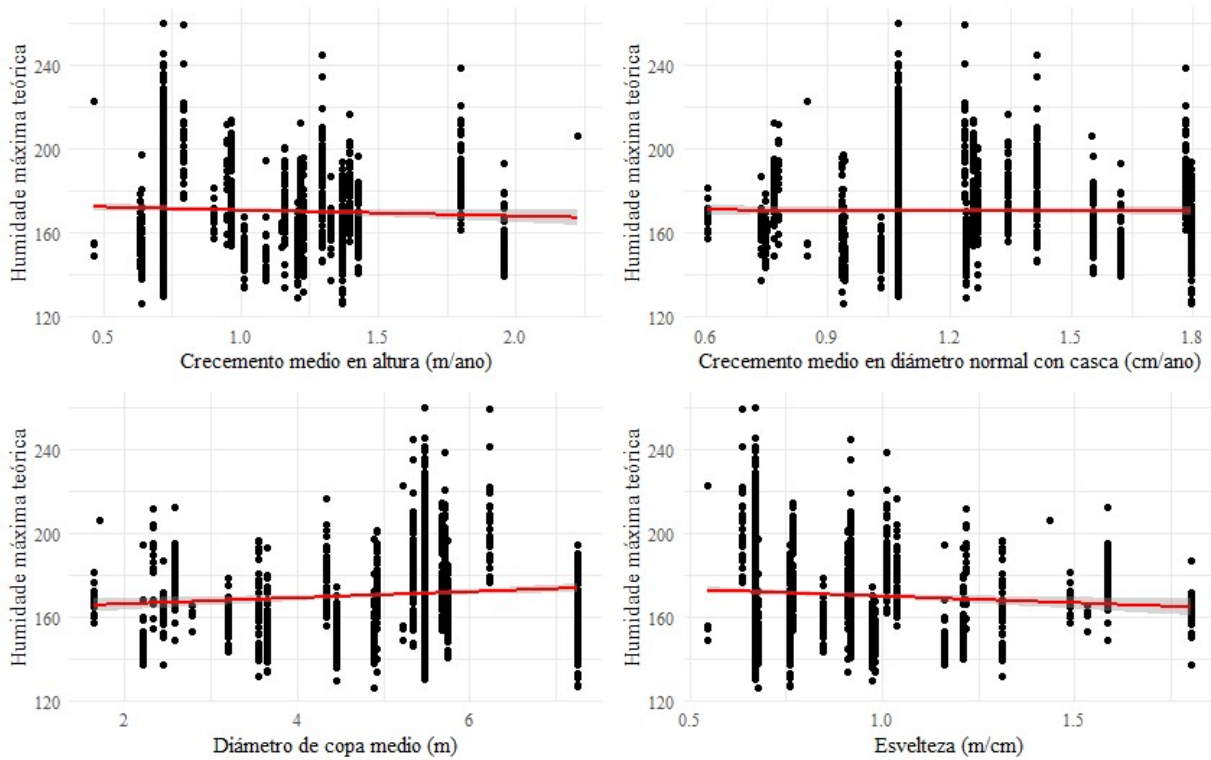


Figura 4.23. Nubes de puntos coa variable resposta humidade máxima teórica, fronte a variables explicativas crecemento medio en altura, crecemento medio en diámetro normal con casca, diámetro de copa medio e esvelteza. A liña vermella marca a tendencia da regresión lineal entre os pares de variables.

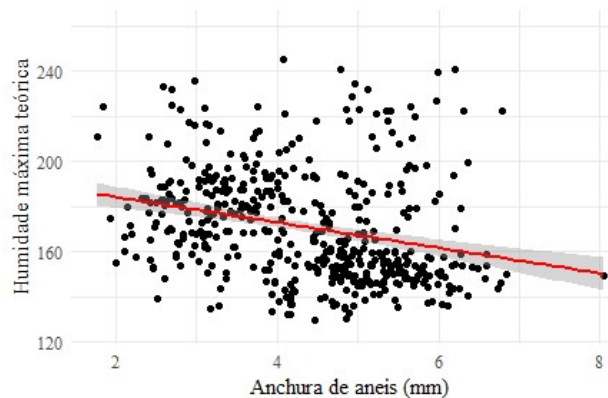


Figura 4.24. Nube de puntos coa variable resposta humidade máxima teórica, fronte a anchura de aneis. A liña vermella marca a tendencia da regresión lineal entre os pares de variables.

Altura no fuste, anchura de aneis e, en menor medida, idade, parecen ter influencia na humidade máxima teórica.

4.1.7.6 Punto de saturación da parede celular calculada a partir da contracción volumétrica

O punto de saturación da parede celular (PSF) considérase como aquel contido de humidade por encima do cal as propiedades físicas e mecánicas da madeira non cambian en

función do contido de humidade (Glass e Zelinka, 2021). É polo tanto unha característica importante, específica para cada especie, e interesante de cara a poder determinala por métodos indirectos.

Como para as variables anteriores, previo á análise de regresión presentaranse unha serie de gráficas de dispersión do PSF fronte ás variables explicativas seleccionadas (Figuras 4.25, 4.26 e 4.27).

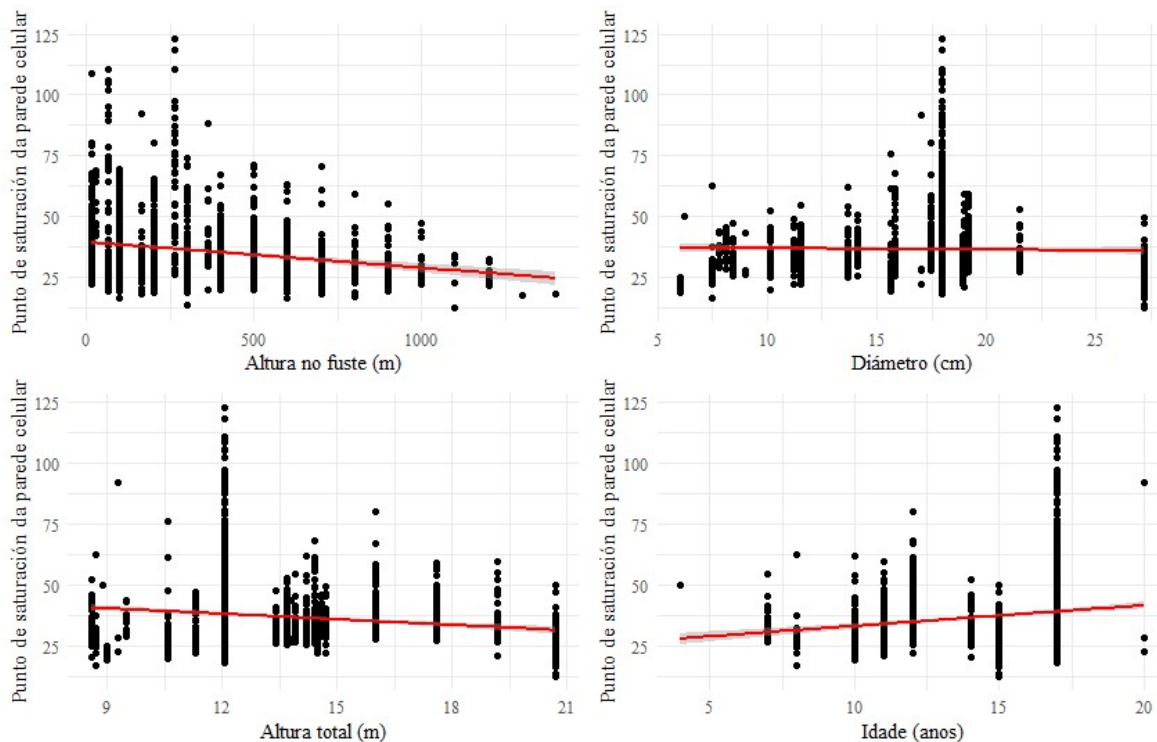


Figura 4.25. Nubes de puntos coa variable resposta punto de saturación da parede celular, fronte a variables explicativas altura no fuste, diámetro, altura total e idade. A liña vermella marca a tendencia da regresión lineal entre os pares de variables.

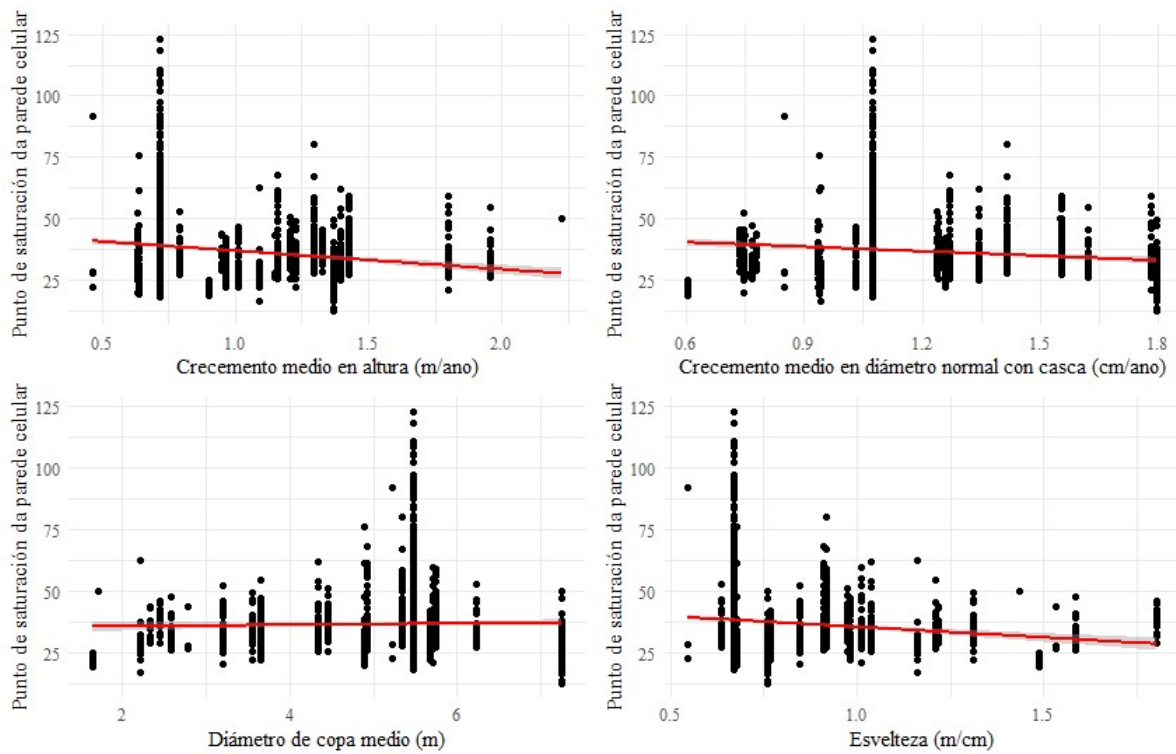


Figura 4.26. Nubes de puntos coa variable resposta punto de saturación da parede celular, fronte a variables explicativas crecemento en altura, crecemento en diámetro, diámetro de copa medio e esvelteza. A liña vermella marca a tendencia da regresión lineal entre os pares de variables.

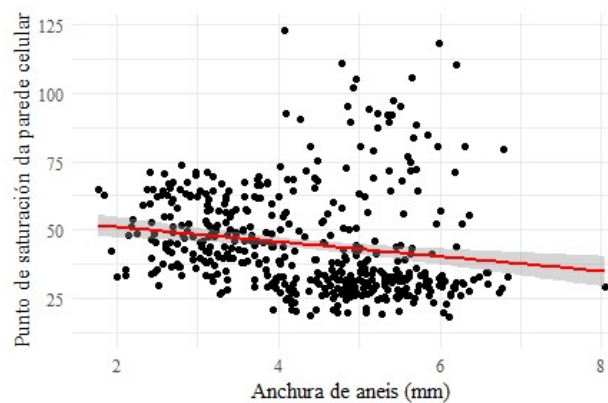


Figura 4.27. Nube de puntos coa variable resposta punto de saturación da parede celular, fronte a anchura de aneis. A liña vermella marca a tendencia da regresión lineal entre os pares de variables.

Atendendo á inspección visual da pendente da liña de tendencia das gráficas expostas (Figuras 4.25 á 4.27), as variables máis vinculadas co PSF son a altura no fuste, a idade, o crecemento medio en diámetro, o crecemento medio en altura e a anchura de aneis.

4.1.7.7 Outras relacións

As seguintes relacións entre propiedades físicas foron descartadas para análises posteriores, debido ao baixo R^2 que mostraron as súas regresións lineais simples (das variables

orixinais ou das súas transformacións mediante logaritmo, raíz cadrada, elevación ao cadrado e función inversa) ou porque o baixo número de datos non creou relacións significativas:

- contracción volumétrica fronte a densidade básica, densidade ao 12 % de contido en humidade, anchura de aneis
- coeficiente de anisotropía fronte a densidade básica, densidade ao 12 % de contido en humidade, anchura de aneis
- densidade básica e densidade ao 12 % de contido en humidade fronte a anchura de aneis
- punto de saturación da parede celular fronte a anchura de aneis
- porosidade fronte a densidade básica, densidade ao 12 % de contido en humidade, anchura de aneis, contracción volumétrica e coeficiente de anisotropía.

4.2 ESTATÍSTICA INFERENCIAL E MODELIZACIÓN

4.2.1 Análise de regresión

Para mostrar os vínculos entre as variables cuantitativas estudadas tomouse como punto de partida a inspección visual da distribución por pares de variables do apartado 4.1.6. Seguidamente, probaranse diferentes modelos de regresión lineal e, en función da interpretación dos estatísticos de axuste, elixírase aquel modelo que aporte maior información. De cara á elaboración de modelos para a inferencia estatística, elíxense as variables explicativas para a análise, emparelladas coa súa correspondente variable resposta presentadas na Táboa 4.11. Finalmente, optouse por descartar o coeficiente de anisotropía na análise de regresión debido á escaseza de datos.

Táboa 4.11. Variables dependentes e independentes elixidas para a análise de regresión.

Variables dependentes	Variables independentes
Contracción volumétrica	Diámetro normal con casca da árbore de onde procede a
	Idade da árbore
	Crecemento medio en altura
	Diámetro de copa medio da árbore
	Esvelteza da árbore
Densidade básica	Altura no fuste en que foi tomada a probeta rexistrada
	Idade da árbore
	Anchura de aneis de crecemento
Densidade ao 12 % de contido de humidade	Altura no fuste en que foi tomada a probeta rexistrada
	Anchura de aneis de crecemento
	Esvelteza da árbore
	Diámetro de copa medio da árbore
Humidade máxima teórica	Altura no fuste en que foi tomada a probeta rexistrada
	Anchura de aneis de crecemento
	Idade da árbore
Punto de saturación da parede celular calculado a partir da contracción volumétrica	Altura no fuste en que foi tomada a probeta rexistrada
	Idade da árbore
	Crecemento medio en altura
	Crecemento medio en diámetro
	Anchura de aneis de crecemento

4.2.1.1 Contracción volumétrica

As mellores combinacións de variables explicativas coa variable resposta contracción volumétrica, de acordo co paquete *leaps* de R (Lumley, 2024) móstranse na Táboa 4.12.

Táboa 4.12. Os 5 modelos de regresión lineal a probar para a estimación da contracción volumétrica. Ademais desta variable, as variables incluídas en cada modelo veñen marcadas cunha “X”. Crec. altura = crecemento en altura, Diam. copa = diámetro de copa.

Modelo	Diámetro normal	Idade	Crec. altura	Diam. copa	Esvelteza
Modelo 1	---	X	---	---	---
Modelo 2	---	X	X	---	---
Modelo 3	---	X	X	---	X
Modelo 4	---	X	X	X	X
Modelo 5	X	X	X	X	X

A interpretación da Táboa 4.12 proporciona 5 modelos de dependencia lineal para a contracción volumétrica:

- Modelo 1, dunha variable explicativa:
 $C_v = f(\text{Idade})$
- Modelo 2, de dúas variables explicativas:
 $C_v = f(\text{Idade}, \text{Crec. altura})$
- Modelo 3, con tres variables explicativas:
 $C_v = f(\text{Idade}, \text{Crec. altura}, \text{Esvelteza})$
- Modelo 4, catro variables explicativas:
 $C_v = f(\text{Idade}, \text{Crec. altura}, \text{Diam. copa}, \text{Esvelteza})$
- Modelo 5, cinco variables:
 $C_v = f(\text{Diámetro}, \text{Idade}, \text{Crec. altura}, \text{Diam. copa}, \text{Esvelteza})$

Os estatísticos de axuste de cada un dos 5 modelos probados preséntase na Táboa 4.13. Concretamente, calculáronse os seguintes estatísticos:

- R^2 axustado: proporciona un valor de axuste do modelo similar ao R^2 , pero que ten en conta o número de variables independentes do modelo, penalizando a inclusión de variables innecesarias (Ozili, 2023). A súa interpretación é igual á do estatístico R^2
- Estatístico C_p de Mallows: criterio para avaliar os axustes cando se comparan modelos con diferente número de parámetros. Valores pequenos indican modelos mellores con menor erro non explicado (Irizarry, 2024)
- BIC , ou criterio de información bayesiano: mide a bondade de axuste do modelo tendo en conta o número de parámetros. Entre varios modelos elixírase aquel con BIC máis baixo (Dalpiaz, 2021).

Táboa 4.13. Estatísticos de axuste para os 5 modelos de regresión probados. Adj_R2 = R cadrado axustado, Cp = estatístico Cp de Mallows, BIC = Criterio de Información Bayesiano.

Modelo	Adj_R2	Cp	BIC
Modelo 1	0,27477809	184,563226	-512,131087
Modelo 2	0,29612158	131,992871	-554,632542
Modelo 3	0,30184889	118,577607	-561,608473
Modelo 4	0,32215402	68,7117596	-603,527445
Modelo 5	0,34762224	6,0000000	-659,82126

Segundo se desprende da Táboa 4.13, o axuste dos modelos aumenta a medida que se engaden variables independentes. O modelo 5 ofrece o mellor axuste na estima da contracción volumétrica a partir do diámetro normal, idade, crecemento medio en altura, diámetro de copa e esvelteza da árbore. Sen embargo, xuntar demasiadas variables explicativas no modelo pode levar á aparición de multicolinealidade (correlación, dentro do modelo, entre as variables explicativas).

Para determinar posibles problemas de multicolinealidade calculouse o *VIF* (Factor de Inflación da Varianza, das súas siglas en inglés), cos resultados que aparecen na Táboa 4.16. A presenza de multicolinealidade nos modelos pode levar a graves erros na interpretación e no valor do erro estándar dos coeficientes de regresión (Shrestha, 2020).

Táboa 4.14. Estatístico VIF para as variables explicativas nos 5 modelos de regresión probados. Crec. altura = crecemento en altura, Diam. copa = diámetro de copa. O Modelo 1 non presenta problemas de multicolinealidade, ao ter só unha variable explicativa.

Modelo	Variables				
	Diámetro	Idade	Crec. altura	Diam. copa	Esvelteza
Modelo 5	54,91029	18,99886	21,08221	97,08516	11,64261
Modelo 4	Idade	Crec. altura	Diam. copa	Esvelteza	
	18,615410	20,073822	16,748133	8,483927	
Modelo 3	Idade	Crec. altura	Esvelteza		
	4,877317	2,686064	2,665719		
Modelo 2	Idade	Crec. altura			
	2,598527	2,598527			
Modelo 1	---				

Valores do *VIF* maiores de 5 indican problemas de multicolinealidade (Shrestha, 2020), polo que só os modelos 1, 2 e 3 están libres de correlación entre as súas variables independentes ou, polo menos, a correlación que os vincula é leve.

Polo tanto, atendendo aos valores dos estatísticos de bondade de axuste presentados na Táboa 4.13, e os valores do VIF da Táboa 4.14, o modelo que mellor define a contracción volumétrica será o modelo 3: ten o R^2 axustado máis alto, e os *Cp* e *BIC* máis baixos, sen presentar problemas de multicolinealidade. As variables explicativas da contracción volumétrica, para este modelo, son a idade, o crecemento en altura, e a esvelteza. Na Táboa 4.15 preséntase o modelo cos seus parámetros e estatísticos asociados.

Táboa 4.15. Parámetros do modelo 3, con erros estándar, p-valores e estatístico R² axustado. Crec. altura = crecemento medio en altura.

Termo	Parámetro	Erro estándar do parámetro	p-valor do parámetro
Termo independente	23,6665246	1,024683	< 0,0001
Idade	-0,55439957	0,04266891	< 0,0001
Crec. altura	-1,67081392	0,26360076	< 0,0001
Esvelteza	1,34110541	0,35335608	0,0002
Erro estándar residual: 2,297 con 1633 graos de liberdade			
R ² axustado: 0,3018			
Estatístico-F: 236,8 con 3 e 1633 graos de liberdade, p-valor: < 0,0001			

Todos os parámetros do modelo son significativos, polo que se constata que as tres variables consideradas teñen influencia na contracción volumétrica, cun alto nivel de confianza (> 99,999 %). Idade e crecemento en altura teñen unha relación inversa coa contracción volumétrica posto que a medida que aumentan, diminúe esta. Árbores adultas e que medren en condicións de estación favorables terán unha madeira con menos contracción e, polo tanto, máis estable. O caso contrario ocorre coa esvelteza, o que indica que a madeira de árbores que vexeten en condicións de alta competencia sufrirá unha maior contracción, ou que a madeira de árbores xoves, que son máis esveltas (Rust, 2013), sufrirá unha maior contracción.

O modelo 3 resulta, segundo os parámetros das variables explicativas mostrados na Táboa 4.15, como segue:

$$C_v = 22,67 - 0,55 \times Idade - 1,67 \times Crecemento\ medio\ en\ altura + 1,34 \times Esvelteza$$

con contracción volumétrica en porcentaxe, idade en anos, crecemento medio en altura en centímetros por ano e esvelteza en metros de altura por centímetro de diámetro normal.

As gráficas de diagnóstico móstranse na Figura 4.28. Apréciase que o modelo funciona aceptablemente ben no rango de 14 a 17 % de contracción volumétrica. Obsérvase tamén a presenza de varios valores atípicos, e unha dispersión máis ou menos homoxénea dos residuos, o cal indica que a heterocedasticidade do modelo non é moi acusada. A liña de tendencia lixeiramente curvada suxire que a relación entre as variables non é de todo lineal, pero esta tendencia é leve. O gráfico QQ mostra que os residuos non seguen unha distribución normal, o que pode levar a estimacións nesgadas do modelo.

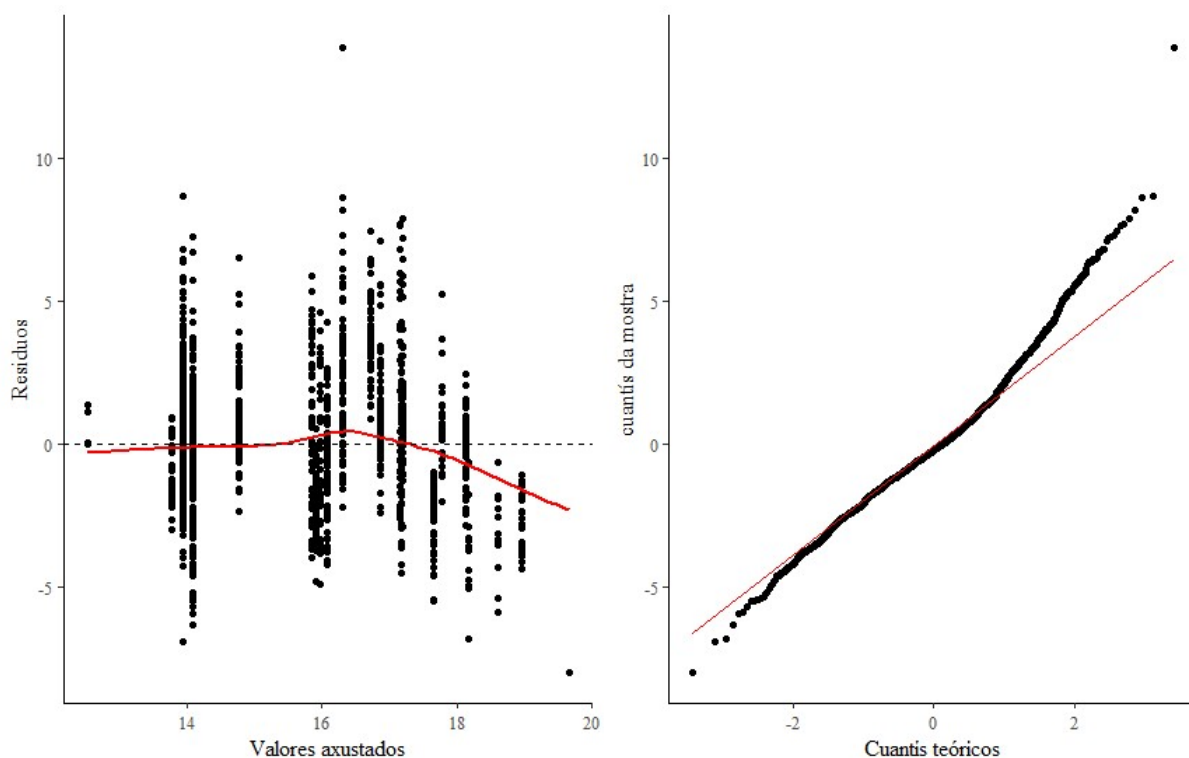


Figura 4.28. Gráficas de diagnóstico do modelo 3. Esquerda: gráfico de valores axustados fronte a residuos, e dereita: gráfico QQ do modelo 3.

Segundo Desch e Dinwoodie (2016), a contracción aumenta co aumento da densidade, e aqueles factores que afectan á densidade, como a taxa de crecemento, afectarán tamén ao nivel de contracción. Para a madeira analizada de *B. celtiberica* non se atopou esa relación, con valores moi baixos do coeficiente de correlación r entre a contracción volumétrica e as densidades básica e ao 12 % de contido en humidade.

4.2.1.2 Densidade básica

As mellores combinacións de variables independentes coa variable dependente densidade básica móstranse na Táboa 4.16.

Táboa 4.16. Os 3 modelos de regresión lineal a probar. Ademais da variable resposta densidade básica, as variables incluídas en cada modelo veñen marcadas cunha "X".

Modelo	Altura no fuste	Idade	Anchura de aneis
Modelo 6	X	---	---
Modelo 7	X	---	X
Modelo 8	X	X	X

Táboa 4.17. Estatísticos de axuste para os 3 modelos de regresión analizados. Adj_R2 = R cadrado axustado, Cp = estatístico Cp de Mallows, BIC = Criterio de Información Bayesiano.

Modelo	Adj_R2	Cp	BIC
Modelo 6	0,18607487	13,3731773	-84,0534304
Modelo 7	0,20638434	2,58718325	-90,6207216
Modelo 8	0,20567149	4,00000000	-85,0749164

Neste caso, o modelo que mellor funciona é o que inclúe as variables altura no fuste e anchura de aneis como variables explicativas (modelo 7). Ten o maior valor de R^2 axustado, e os menores Cp e BIC .

As variables independentes dos modelos non teñen problemas de multicolinealidade, como pode verse nos estatísticos VIF da Táboa 4.18.

Táboa 4.18. Estatístico VIF para as variables explicativas nos 3 modelos de regresión probados para a densidade básica. O Modelo 6 non presenta problemas de multicolinealidade, ao ter só unha variable explicativa.

Modelo	Variables		
Modelo 8	Altura no fuste	Idade	Anchura de aneis
	1,166834	1,003402	1,168968
Modelo 7	Altura no fuste	Anchura de aneis	
	1,166527	1,166527	
Modelo 6	---		

De acordo ao exposto Táboas 4.17 e 4.18, o modelo que mellor define a densidade básica é o modelo 7. As variables explicativas, para este modelo, son a altura no fuste e a anchura de aneis. Na Táboa 4.19 preséntase o modelo cos seus parámetros e estatísticos asociados.

Táboa 4.19. Parámetros do modelo 7, con erros estándar, p-valores e estatístico R^2 axustado.

Termo	Parámetro	Erro estándar do parámetro	p-valor do parámetro
Termo independente	498,617105	5,73228266	< 0,0001
Altura no fuste	-0,08040904	0,00965268	< 0,0001
Anchura de aneis	3,96163171	1,10741879	0,0004
Erro estándar residual: 25,5 con 460 graos de liberdade			
R^2 axustado: 0,2064			
Estatístico-F: 61,07 con 2 e 460 graos de liberdade, p-valor: < 0,0001			

Exponse a continuación o modelo 7, segundo os parámetros das variables explicativas recollidos na Táboa 4.19:

$$d_b = 498,62 - 0,08 \times \text{Altura no fuste} + 3,96 \times \text{Anchura de aneis}$$

con densidade básica en quilogramos por metro cúbico, altura no fuste en centímetros e anchura de aneis en milímetros.

O valor do R^2 axustado é bastante baixo, pero os coeficientes das variables explicativas son todos altamente significativos, polo que o modelo segue sendo válido para a súa interpretación (Rencher e Schaalje, 2008; Ozili, 2023). Os parámetros de altura no fuste e anchura de aneis son significativos, confirmándose, cun alto nivel de confianza (> 99,999 %), que as dúas variables consideradas teñen influencia na densidade básica. A altura no tronco de onde proceda a madeira terá unha relación inversa coa densidade básica, isto é, a medida que se ascende polo fuste diminúe a densidade. Isto é debido a que a proporción de vasos e parénquima aumenta dende a base cara a copa da árbore (Bhat e Karkkainen, 1981). No caso da anchura de aneis, segundo o modelo 7, canto máis amplos sexan os aneis de crecemento, maior será a densidade básica desa madeira.

Na revisión bibliográfica atopouse o resultado de Möttönen e Luostarinen (2006), que acharon unha relación inversa entre a taxa de crecemento (*growth rate*, sen especificar se en altura ou diámetro) e a densidade básica da madeira que analizaron. Repola (2006) rexistrou tamén unha correlación negativa entre crecemento medio en diámetro e densidade básica. No presente estudo non se achou esa relación, de acordo con Zhang (1995), que indica que o efecto do crecemento en diámetro co peso específico da madeira de *B. platyphylla* e *B. utilis* non é significativo. Ao igual que no caso do modelo 7, Velling (1979) e Repola (2006) atoparon unha relación significativa pouco acentuada entre densidade básica e altura no fuste, de signo negativo tamén. Ademais, ao igual que no presente traballo, Viherä-Aarnio e Velling (2017) acharon que a altura total da árbore non ten unha relación significativa coa densidade básica. Liepiņš e Rieksts-Riekstiņš (2013) atoparon correlacións positivas entre a densidade básica e a altura total, a idade e a esvelteza; e negativas entre a densidade básica e a anchura de aneis. Lachowicz *et al.* (2019a) tamén atoparon correlación entre densidade básica e idade en *B. pendula*. Ao contrario que no modelo 7, Hakkila (1966) descartou a relación entre densidade básica con anchura de aneis en *B. verrucosa* e *B. pubescens*. Por último indicar que na República Checa, para árbores novas de *B. pendula*, Giagli *et al.* (2019) atoparon relacións con idade, diámetro normal (positivas) e esvelteza (negativa) coa densidade básica, vínculos que non foron atopados na madeira de *B. celtiberica* de Galicia.

Nas gráficas de diagnóstico (Figura 4.29) obsérvase a presenza de varios valores atípicos, e unha dispersión non homoxénea dos residuos, o cal indica que pode haber problemas de heterocedasticidade no modelo. A liña de tendencia algo curvada suxire que a relación entre as variables non é exactamente lineal. O gráfico QQ mostra que a distribución dos residuos apartase lixeiramente da distribución normal.

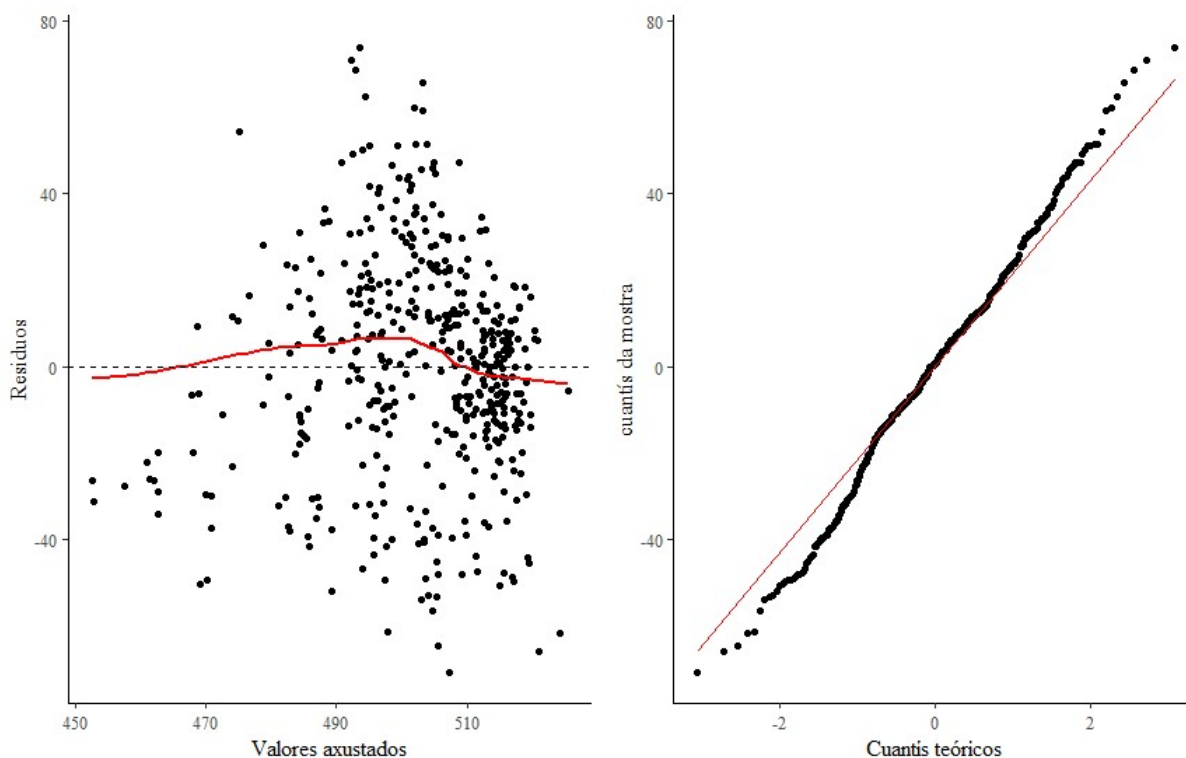


Figura 4.29. Gráficas de diagnóstico do modelo 7. Esquerda: gráfico de valores axustados fronte a residuos, e dereita: gráfico QQ do modelo 7.

4.2.1.3 Densidade ao 12 % de humidade

Para a densidade ao 12 %, as mellores combinacións das súas variables explicativas son as mostradas na Táboa 4.20.

Táboa 4.20. Os 3 modelos de regresión lineal a probar. Ademais da variable resposta densidade ao 12 % de humidade, as variables incluídas en cada modelo veñen marcadas cunha “X”. Diam. copa = diámetro medio de copa.

Modelo	Altura no fuste	Diam. copa	Esvelteza	Anchura de aneis
Modelo 9	X	---	---	---
Modelo 10	X	X	---	---
Modelo 11	X	X	---	X

Na Táboa 4.20 obsérvase que só hai 3 modelos para 4 variables. Isto é debido a que o comando *regsubsets()* do paquete *leaps* de R detecta unha forte dependencia lineal entre a variable esvelteza e o resto de variables explicativas, polo que a descarta no cálculo de regresións. Quedan, polo tanto, só os modelos 9, 10 e 11 para análises posteriores.

A Táboa 4.21 recolle os estatísticos de bondade de axuste de cada un dos 3 modelos probados.

Táboa 4.21. Estatísticos de axuste para os 3 modelos de regresión analizados. Adj_R2 = R cadrado axustado, Cp = estatístico Cp de Mallows, BIC = Criterio de Información Bayesiano.

Modelo	Adj_R2	Cp	BIC
Modelo 9	0,17716084	0,88274395	-79,0102632
Modelo 10	0,17772063	1,57297843	-74,1930611
Modelo 11	0,17695884	3,00000000	-68,6342056

Os modelos presentan un R^2 axustado moi baixo, sempre inferior a 0,2, indicando que o modelo correspondente non é capaz de explicar minimamente a variación na variable resposta. O pobre rendemento de todos os modelos considerados leva a descartar calquera análise de regresión adicional para a variable densidade ao 12 % de contido en humidade. Destacar que, para esta variable, Dobrowolska *et al.* (2020) si atoparon unha relación entre densidade ao 12 % e a altura no fuste onde foron tomadas as mostras de madeira.

4.2.1.4 Humidade máxima teórica

As mellores combinacións, nos modelos de regresión, para as variables explicativas da humidade máxima teórica expóñense na Táboa 4.22.

Táboa 4.22. Os 3 modelos de regresión lineal a probar. Ademais da variable resposta humidade máxima teórica, as variables incluídas en cada modelo veñen marcadas cunha “X”.

Modelo	Altura no fuste	Anchura de aneis	Idade
Modelo 12	X	---	---
Modelo 13	X	---	X
Modelo 14	X	X	X

A Táboa 4.23 presenta os estatísticos de bondade de axuste de cada un dos 3 modelos probados para a variable dependente humidade máxima teórica.

Táboa 4.23. Estatísticos de axuste para os 3 modelos de regresión analizados. Adj_R2 = R cadrado axustado, Cp = estatístico Cp de Mallows, BIC = Criterio de Información Bayesiano.

Modelo	Adj_R2	Cp	BIC
Modelo 12	0,11047181	12,0433241	-42,928464
Modelo 13	0,13108642	2,12889761	-48,6523709
Modelo 14	0,12943783	4,00000000	-42,6446465

Como para o caso da densidade ao 12 %, os baixos valores de R^2 axustado, tamén inferiores a 0,2, desaconsellan seguir coa definición de modelos lineais explicativos da humidade máxima teórica.

4.2.1.5 Punto de saturación da parede celular

De acordo coa saída do comando *regsubsets()*, as mellores combinacións para as regresións co punto de saturación da parede celular (PSF) como variable resposta son as mostradas na Táboa 4.24.

Táboa 4.24. Os 3 modelos de regresión lineal a probar. Ademais da variable resposta punto de saturación da parede celular, as variables incluídas en cada modelo veñen marcadas cunha “X”. Crec. altura = crecemento medio en altura, Crec. diámetro = crecemento medio en diámetro.

Modelo	Altura no fuste	Idade	Crec. altura	Crec. diámetro	Anchura de aneis
Modelo 15	---	---	---	---	X
Modelo 16	X	---	---	---	X
Modelo 17	X	X	---	---	X

Ao igual que ocorría para o caso da densidade ao 12 %, o programa estatístico detecta que existe dependencia lineal entre os crecementos en altura e diámetro co resto de variables explicativas, polo que descártaos na formación de modelos. Quedan, polo tanto, tres modelos explicativos para o PSF. Na Táboa 4.25 inclúense os estatísticos de bondade de axuste de cada un dos 3 modelos restantes para a variable dependente punto de saturación da parede celular.

Táboa 4.25. Estatísticos de axuste para os 3 modelos de regresión analizados. Adj_R2 = R cadrado axustado, Cp = estatístico Cp de Mallows, BIC = Criterio de Información Bayesiano.

Modelo	Adj_R2	Cp	BIC
Modelo 15	0,02428035	2,46834316	-0,10832813
Modelo 16	0,03162504	0,00117972	1,52557396
Modelo 17	0,02951780	2,00000000	7,66210581

Novamente aparecen baixos valores do estatístico R^2 axustado, indicio de que os modelos non son capaces de explicar nin unha mínima fracción da variable punto de saturación da parede celular. Polo tanto, non se seguirá coa modelización da variable punto de saturación da parede celular.

4.2.1.6 Variables cromáticas e densidade

Dentro deste apartado de análise de regresión merece a pena o estudo da relación da densidade da madeira coa súa cor. Nos climas máis cálidos adoitan medrar as árbores con densidades de madeira máis altas, que normalmente se asocian con madeiras máis escuras. É frecuente observar densidades máis altas nas rexións tropicais cálidas en comparación coas rexións boreais frías (Mo *et al.*, 2024).

Como variable resposta probarase, pola súa utilidade práctica, a densidade básica, fronte a todas as variables de coordenadas cromáticas CIEL*a*b* que se rexistraron neste traballo: L*, a*, e b* nos planos transversal, radial e tanxencial da madeira. Na Táboa 4.26 preséntase o resultado do comando *regsubsets()* do paquete *leaps* de R, mostrando as mellores combinacións de variables para explicar a densidade básica.

Táboa 4.26. Os 9 modelos de regresión lineal a probar. Ademais da variable resposta densidade básica, as variables incluídas en cada modelo veñen marcadas cunha “X”.

Modelo	Plano transversal			Plano radial				Plano tanxencial		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	
Modelo 18	---	---	---	---	X	---	---	---	---	
Modelo 19	---	---	---	X	X	---	---	---	---	
Modelo 20	---	---	---	X	X	---	X	---	---	
Modelo 21	---	X	X	X	X	---	---	---	---	
Modelo 22	X	---	X	X	X	---	X	---	---	
Modelo 23	X	X	X	X	X	---	X	---	---	
Modelo 24	X	X	X	X	X	X	X	---	---	
Modelo 25	X	X	X	X	X	X	X	X	---	
Modelo 26	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

A continuación, na Táboa 4.27, inclúense os estatísticos de bondade de axuste de cada un dos 9 modelos candidatos para estimar a variable dependente densidade básica.

Táboa 4.27. Estatísticos de axuste para os 9 modelos de regresión analizados. Adj_R2 = R cadrado axustado, Cp = estatístico Cp de Mallows, BIC = Criterio de Información Bayesiano.

Modelo	Adj_R2	Cp	BIC
Modelo 18	0,43682145	40,4203463	-8,00461894
Modelo 19	0,56947261	26,2613989	-12,1687714
Modelo 20	0,64502492	18,8860731	-14,6511801
Modelo 21	0,70809636	13,3986547	-17,2585802
Modelo 22	0,77849875	7,91885646	-21,7856264
Modelo 23	0,83815549	4,01031302	-27,2617178
Modelo 24	0,82741612	6,00652473	-24,1329216
Modelo 25	0,81511759	8,00449235	-21,0010217
Modelo 26	0,80096465	10,00000000	-17,8734741

O mellor modelo, tendo en conta o máis alto R^2 axustado e os menores Cp e BIC, é o modelo 23. Para ese modelo, e para os catro seguintes con mellor axuste, é calculado o estatístico VIF, co resultado que se mostra na Táboa 4.28.

Táboa 4.28. Estatístico VIF para as variables explicativas nos 5 modelos de regresión elixidos. transv = plano transversal, tg = plano tanxencial.

Modelo	Variables									
	L* transv	a* transv	b* transv	L* radial	a* radial	L* tg				
Modelo 23	4,6102	10,7522	9,8293	1,9078	2,0283	1,1302				
Modelo 24	4,7869	11,9182	10,4762	1,9347	4,4850	3,0911	1,1315			
Modelo 22	4,1076	4,1207	1,8706	1,8127	1,0846					
Modelo 25	4,8260	11,9559	10,4763	1,9405	4,6183	3,1018	2,2848	2,7490		
Modelo 26	5,6450	12,2725	10,7606	2,0303	5,4695	3,6268	2,3062	5,1152	4,4844	

O que, *a priori*, parecía o mellor modelo (o 23) presenta problemas de multicolinealidade en dúas variables: a^* transversal e b^* transversal, e mesmo L^* transversal podería ser descartada nunha interpretación conservadora. O seguinte modelo, en orde de axuste e sen problemas de VIF alto é o modelo 22.

Os parámetros do modelo 22, xunto cos estatísticos asociados ao modelo de regresión lineal simple, móstranse na Táboa 4.29.

Táboa 4.29. Parámetros do modelo 22, con erros estándar, p-valores e estatístico R^2 axustado.

Termo	Parámetro	Erro estándar do parámetro	p-valor do parámetro
Termo independente	1.798,790	271,554	< 0,0001
L^* transversal	-8,336	2,406	0,0030
b^* transversal	-9,093	2,527	0,0022
L^* radial	-7,366	2,337	0,0058
a^* radial	-30,730	4,651	< 0,0001
L^* tanxencial	4,683	1,463	0,0052
Erro estándar residual: 10,22 con 17 graos de liberdade			
R^2 axustado: 0,7785			
Estatístico-F: 16,46 con 5 e 17 graos de liberdade, p-valor: < 0,0001			

Os parámetros do modelo son altamente significativos (p -valor < 0,01), polo que se constata que as cinco variables consideradas teñen influencia na densidade básica. A partir destas variables sería posible estimar, cun alto grao de confianza, a densidade básica dunha mostra de madeira. O suposto de partida que xustificou esta análise (comprobar se realmente madeiras máis escuras son máis densas) parece que se cumpre neste modelo, posto que, a variable cromática que mide o rango de escuridade a luminosidade (L^*), diminúe en dous dos tres planos principais da madeira a medida que aumenta a densidade, isto é, os lotes de madeira máis densos terán a cor máis escura nos planos transversal e radial.

O modelo 22 resulta, segundo os parámetros das variables explicativas mostrados na Táboa 4.29, como segue:

$$d_b = 1.798,79 - 8,37 \times L^* \text{ transversal} - 9,09 \times b^* \text{ transversal} - 7,37 \times L^* \text{ radial} - 30,73 \times a^* \text{ radial} + 4,68 \times L^* \text{ tanxencial}$$

con contracción volumétrica en porcentaxe, idade en anos, crecemento medio en altura en centímetros por ano e esvelteza en metros de altura por centímetro de diámetro normal.

As gráficas de diagnóstico móstranse na Figura 4.30. Obsérvase que o modelo funciona aceptablemente ben, sen valores atípicos e cunha dispersión máis ou menos homoxénea dos residuos, o que se traduce nun comportamento homocedástico do modelo. A liña de tendencia non é demasiado curvada. O gráfico QQ mostra que os residuos seguen dun xeito bastante aproximado unha distribución normal.

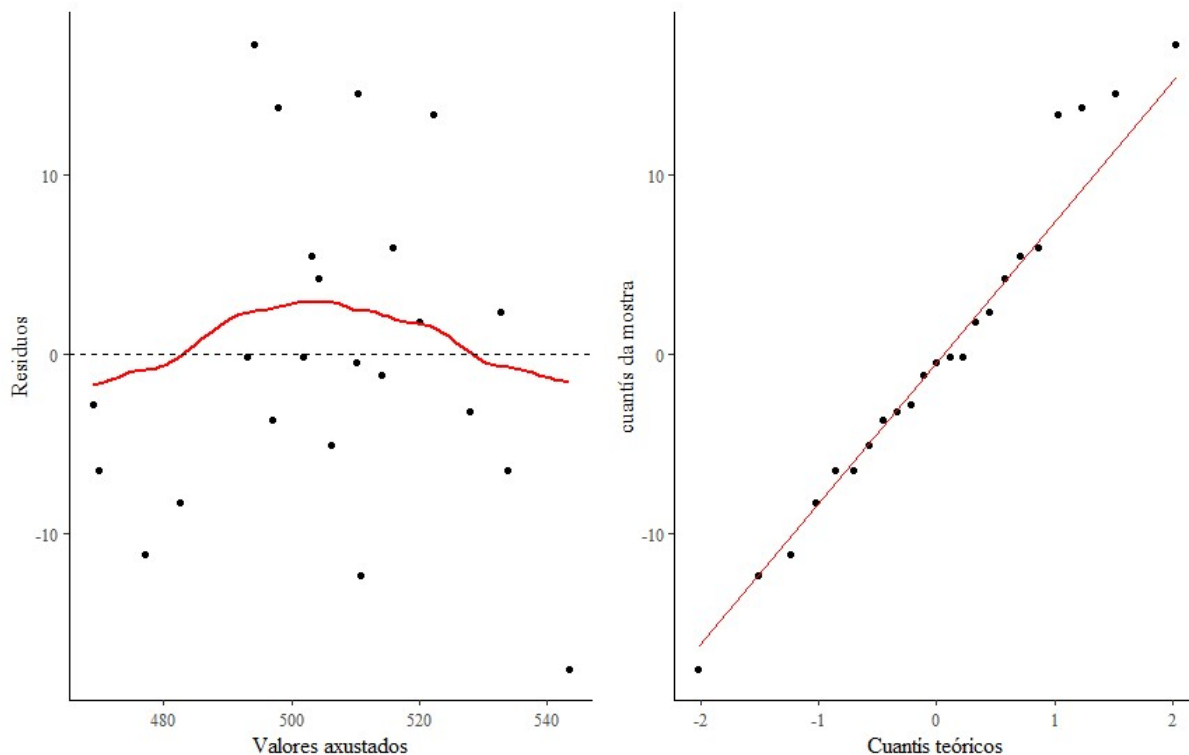


Figura 4.30. Gráficas de diagnóstico do modelo 22. Esquerda: gráfico de valores axustados fronte a residuos, e dereita: gráfico QQ do modelo 22.

4.2.2 Comparación entre grupos

Unha vez feita a análise comparativa entre variables cuantitativas, onde se estableceron relacións entre elas, neste apartado estudarase o vínculo entre variables cuantitativas e cualitativas rexistradas, coa fin de poder extraer información relevante.

As variables cualitativas ou factores considerados neste traballo foron propiedades apuntadas en campo ou características da madeira procesada. A lista de factores é a que segue:

- Árbore de procedencia do material, 27 niveis en total
- Parcela de procedencia do material, 8 niveis en total
- Pendente da parcela de procedencia, 7 niveis en total
- Altitude da parcela de procedencia, 8 niveis en total
- Localización radial da probeta, 3 niveis en total
- Zona de rexenerado natural ou repoboación, 2 niveis en total.

Outras variables de sitio, como a precipitación, o pH ou contido en materia orgánica do solo non foron consideradas por ter un rango de variación moi reducido entre parcelas.

En canto ás variables cuantitativas consideradas, foron elixidas para a comparación de grupos, novamente, e pola súa relevancia, a contracción volumétrica e a densidade básica. Ademais, estas dúas variables contan con datos suficientes repartidos entre os grupos para facer as comparacións.

O método empregado para a comparación entre grupos foi o test de Kruskal-Wallis, pola natureza dos datos de estudo: os grupos formados polos factores eran desiguais en número, polo que a análise de varianza mediante ANOVA quedaba descartada. A proba de Kruskal-Wallis defínese como unha alternativa non paramétrica ao ANOVA unidireccional, e emprégase cando non se cumpren os criterios de ANOVA, como a normalidade e a homoxeneidade da varianza. Trátase dun método estatístico apropiado para usar cando se trata de deseños experimentais que involucren máis de dous grupos para determinar se existen diferenzas significativas entre eles (Knapp, 2017).

O test de Kruskal-Wallis compara medianas por grupos segundo o factor. A hipótese nula do test afirma que as medianas de poboación de todos os grupos son iguais, mentres que a hipótese alternativa é que polo menos a mediana de poboación dun grupo difire dos outros.

4.2.2.1 Proba de Kruskal-Wallis

O resultado das probas de Kruskal-Wallis móstrase na Táboa 4.30.

Táboa 4.30. Resultados do test de Kruskal-Wallis sobre as variables densidade básica (d_b) e contracción volumétrica (C_v).

Variable cuantitativa	Factor	Estatístico χ^2	p-valor	Graos de liberdade
d_b	Árbore de procedencia	890,2333	< 0,00001	26
d_b	Parcela de procedencia	449,5118	< 0,00001	7
d_b	Pendente da parcela	187,9441	< 0,00001	6
d_b	Tipo de masa	19,8195	< 0,00001	1
d_b	Altitude	449,5118	< 0,00001	7
d_b	Localización radial	40,2308	< 0,00001	2
C_v	Árbore de procedencia	927,5672	< 0,00001	26
C_v	Parcela de procedencia	485,001	< 0,00001	7
C_v	Pendente da parcela	457,6485	< 0,00001	6
C_v	Tipo de masa	367,9693	< 0,00001	1
C_v	Altitude	485,001	< 0,00001	7
C_v	Localización radial	21,3176	< 0,00001	2

4.2.2.2 Comparacións post-hoc

Todas as comparacións por grupos son significativas, logo, para poder estimar cuantitativamente as diferenzas, é posible executar o test de Dunn. Esta proba é moi utilizada para identificar diferenzas *post-hoc* logo dunha proba significativa de Kruskal-Wallis debido a que opera igualmente con datos baseados en rangos. Isto garante que as comparacións feitas na proba de Dunn sexan consistentes cos resultados xerais da proba de Kruskal-Wallis. Ademais, ambos tests (Kruskal-Wallis e Dunn) son non paramétricos, polo que son axeitados para datos que non asumen os requisitos da estatística paramétrica (Dinno, 2015).

A Táboa 4.31 mostra os resultados da proba de Dunn para a variable resposta densidade básica, con aquelas diferenzas significativas a un nivel de $p < 0,01$. Por claridade expositiva, dado que a combinación de 27 árbores daría lugar a engadir 150 datos significativos máis á Táboa, o factor Árbore está excluído do listado.

Táboa 4.31. Resultado do test de Dunn para as variables parcela, pendente, altitude, localización radial da probeta (localización radial), e tipo de masa sobre a variable resposta densidade básica (d_b). Todas as comparacións teñen un nivel de significación de $p < 0,01$.

Factor	Grupo 1	Grupo 2	Estadístico Z	Mediana da d_b do grupo 1	Mediana da d_b do grupo 2
Parcela	16FRI	3-fon	-12,155	429	510
Parcela	1CCA	3-fon	-11,722	444	510
Parcela	16FRI	4-bar	-7,158	429	484
Parcela	1CCA	4-bar	-5,876	444	484
Parcela	3-fon	4-bar	6,984	510	484
Parcela	16FRI	7-beg	-6,974	429	476
Parcela	1CCA	7-beg	-5,651	444	476
Parcela	3-fon	7-beg	7,863	510	476
Parcela	1CCA	8FON	-7,602	444	490
Parcela	16FRI	8FON	-8,507	429	490
Parcela	3-fon	8FON	6,535	510	490
Parcela	3-fon	área recreativa	5,586	510	491
Parcela	1CCA	área recreativa	-7,537	444	491
Parcela	16FRI	área recreativa	-8,509	429	491
Parcela	16FRI	O Cembro	-15,350	429	515
Parcela	4-bar	O Cembro	-10,424	484	515
Parcela	1CCA	O Cembro	-16,173	444	515
Parcela	7-beg	O Cembro	-12,050	476	515
Parcela	área recreativa	O Cembro	-8,642	491	515
Parcela	8FON	O Cembro	-10,500	490	515
Pendente	0	15	5,575	505	476
Pendente	0	17	10,979	505	429
Pendente	15	17	6,974	476	429
Pendente	15	20	-7,863	476	510
Pendente	0	20	-4,355	505	510
Pendente	17	20	-12,155	429	510
Pendente	20	22	5,586	510	491
Pendente	17	22	-8,509	429	491
Pendente	0	55	3,561	505	490
Pendente	20	55	6,535	510	490
Pendente	17	55	-8,507	429	490
Pendente	17	9	-7,158	429	484
Pendente	20	9	6,984	510	484
Pendente	0	9	4,322	505	484
Altitude	426	560	-12,050	476	515
Altitude	426	600	6,974	476	429
Altitude	560	600	15,350	515	429
Altitude	560	650	10,500	515	490
Altitude	600	650	-8,507	429	490
Altitude	560	687	8,642	515	491
Altitude	600	687	-8,509	429	491
Altitude	560	740	10,424	515	484
Altitude	600	740	-7,158	429	484
Altitude	600	860	-12,155	429	510
Altitude	650	860	-6,535	490	510
Altitude	740	860	-6,984	484	510
Altitude	426	860	-7,863	476	510
Altitude	687	860	-5,586	491	510
Altitude	426	998	5,651	476	444
Altitude	650	998	7,602	490	444
Altitude	560	998	16,173	515	444
Altitude	687	998	7,537	491	444
Altitude	860	998	11,722	510	444
Altitude	740	998	5,876	484	444

Táboa 4.31 (continuación). Resultado do test de Dunn para as variables parcela, pendente, altitude, localización radial da probeta (localización radial), e tipo de masa sobre a variable resposta densidade básica (d_b). Todas as comparacións teñen un nivel de significación de $p < 0,01$.

Factor	Grupo 1	Grupo 2	Estatístico Z	Mediana da d_b do grupo 1	Mediana da d_b do grupo 2
Localización radial	Zona casca	Zona medula	5,209	516	458
Localización radial	Zona casca	Zona central	3,215	516	493
Localización radial	Zona medula	Zona central	-5,413	458	493
Tipo de masa	Natural	Reboación	-4,452	478	496

Na Táboa 4.32 expóñense os resultados da proba de Dunn para a variable resposta contracción volumétrica, con aquelas diferenzas significativas a un nivel de $p < 0,01$. Por claridade expositiva, dado que a combinación de 27 árbores daría lugar a engadir 147 datos significativos máis á Táboa, o factor Árbore está excluído do listado.

Táboa 4.32. Resultado do test de Dunn para as variables parcela, pendente, altitude, localización radial da probeta (localización radial), e tipo de masa sobre a variable resposta contracción volumétrica (C_v). Todas as comparacións teñen un nivel de significación de $p < 0,01$.

Factor	Grupo 1	Grupo 2	Estatístico Z	Mediana da C_v do grupo 1	Mediana da C_v do grupo 2
Parcela	16FRI	1CCA	4,137	15,58	13,83
Parcela	16FRI	3-fon	4,692	15,58	14,05
Parcela	16FRI	4-bar	-4,840	15,58	18,26
Parcela	1CCA	4-bar	-11,162	13,83	18,26
Parcela	3-fon	4-bar	-10,824	14,05	18,26
Parcela	1CCA	7-beg	-8,869	13,83	16,67
Parcela	3-fon	7-beg	-8,755	14,05	16,67
Parcela	4-bar	8FON	11,085	18,26	14,55
Parcela	7-beg	8FON	8,502	16,67	14,55
Parcela	4-bar	área recreativa	12,058	18,26	14,35
Parcela	16FRI	área recreativa	4,516	15,58	14,35
Parcela	7-beg	área recreativa	9,741	16,67	14,35
Parcela	16FRI	O Cembro	8,606	15,58	13,46
Parcela	4-bar	O Cembro	18,080	18,26	13,46
Parcela	1CCA	O Cembro	5,230	13,83	13,46
Parcela	7-beg	O Cembro	16,174	16,67	13,46
Parcela	área recreativa	O Cembro	5,198	14,35	13,46
Parcela	8FON	O Cembro	8,335	14,55	13,46
Pendente	0	15	-15,435	13,50	16,67
Pendente	0	17	-7,371	13,50	15,58
Pendente	15	20	8,755	16,67	14,05
Pendente	17	20	4,692	15,58	14,05
Pendente	15	22	9,741	16,67	14,35
Pendente	17	22	4,516	15,58	14,35
Pendente	0	55	-6,692	13,50	14,55
Pendente	15	55	8,502	16,67	14,55
Pendente	17	9	-4,840	15,58	18,26
Pendente	20	9	-10,824	14,05	18,26
Pendente	0	9	-17,444	13,50	18,26
Pendente	22	9	-12,058	14,35	18,26
Pendente	55	9	-11,085	14,55	18,26

Táboa 4.32 (continuación). Resultado do test de Dunn para as variables parcela, pendente, altitude, localización radial da probeta (localización radial), e tipo de masa sobre a variable resposta contracción volumétrica (C_v). Todas as comparacións teñen un nivel de significación de $p < 0,01$.

Factor	Grupo 1	Grupo 2	Estatístico Z	Mediana da C_v do grupo 1	Mediana da C_v do grupo 2
Altitude	426	560	16,174	16,67	13,46
Altitude	560	600	-8,606	13,46	15,58
Altitude	426	650	8,502	16,67	14,55
Altitude	560	650	-8,335	13,46	14,55
Altitude	426	687	9,741	16,67	14,35
Altitude	560	687	-5,198	13,46	14,35
Altitude	600	687	4,516	15,58	14,35
Altitude	560	740	-18,080	13,46	18,26
Altitude	600	740	-4,840	15,58	18,26
Altitude	650	740	-11,085	14,55	18,26
Altitude	687	740	-12,058	14,35	18,26
Altitude	600	860	4,692	15,58	14,05
Altitude	740	860	10,824	18,26	14,05
Altitude	426	860	8,755	16,67	14,05
Altitude	426	998	8,869	16,67	13,83
Altitude	560	998	-5,230	13,46	13,83
Altitude	600	998	4,137	15,58	13,83
Altitude	740	998	11,162	18,26	13,83
Localización radial	Zona casca	Zona medula	-4,413	12,11	15,18
Localización radial	Zona casca	Zona central	-4,576	12,11	14,74
Tipo de masa	Natural	Repoboación	19,183	17,10	14,03

4.2.2.3 Representación gráfica das diferenzas entre grupos

Para visualizar as diferenzas mostradas no apartado anterior, nas Figuras 4.31 á 4.36 preséntanse os diagramas de caixas das variables resposta densidade básica e contracción volumétrica, repartidas entre grupos formados polas variables factor.

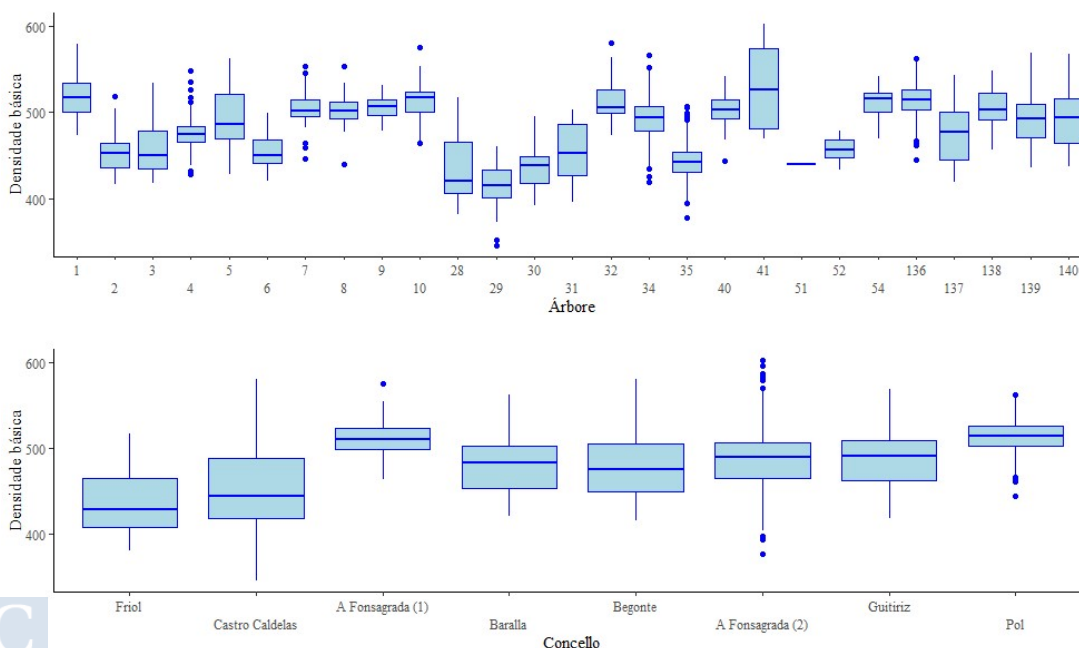


Figura 4.31. Gráficos de caixas da variable resposta densidade básica, dividida por grupos segundo os factores árbore e parcela.

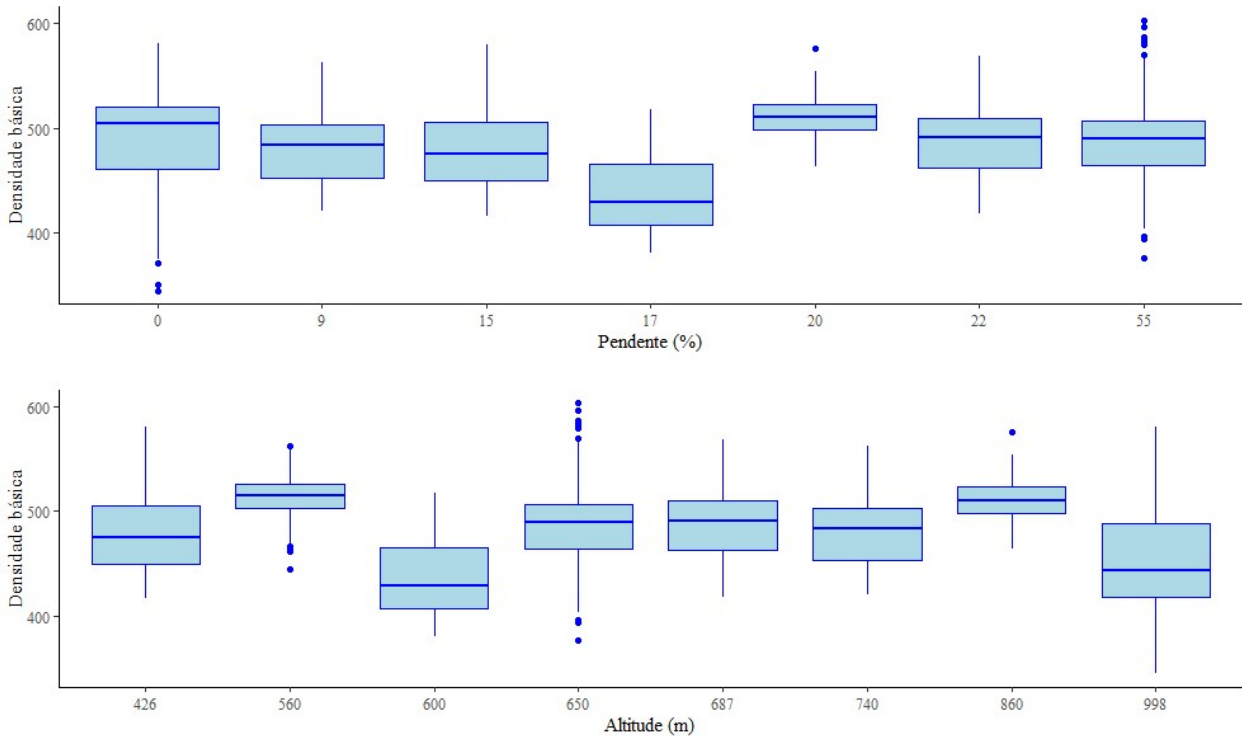


Figura 4.32. Gráficos de caixas da variable resposta densidade básica, dividida por grupos segundo os factores pendente e altitude.

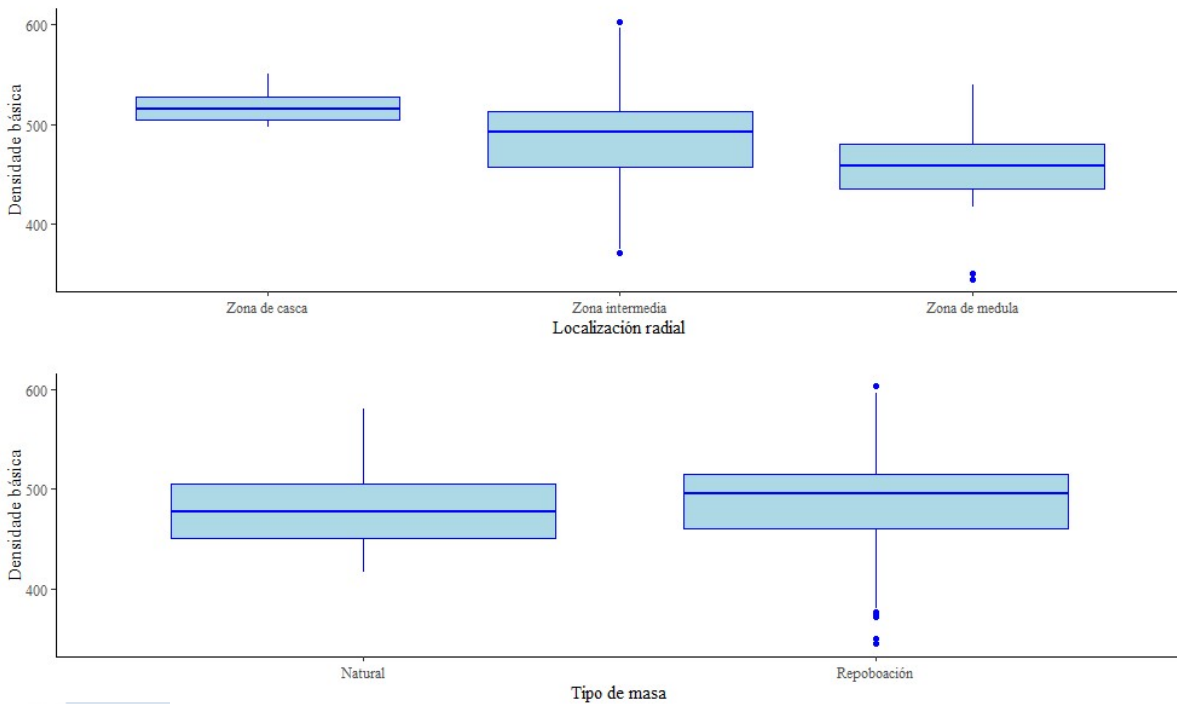


Figura 4.33. Gráficos de caixas da variable resposta densidade básica, dividida por grupos segundo os factores localización radial no fuste (localización radial) e tipo de masa.

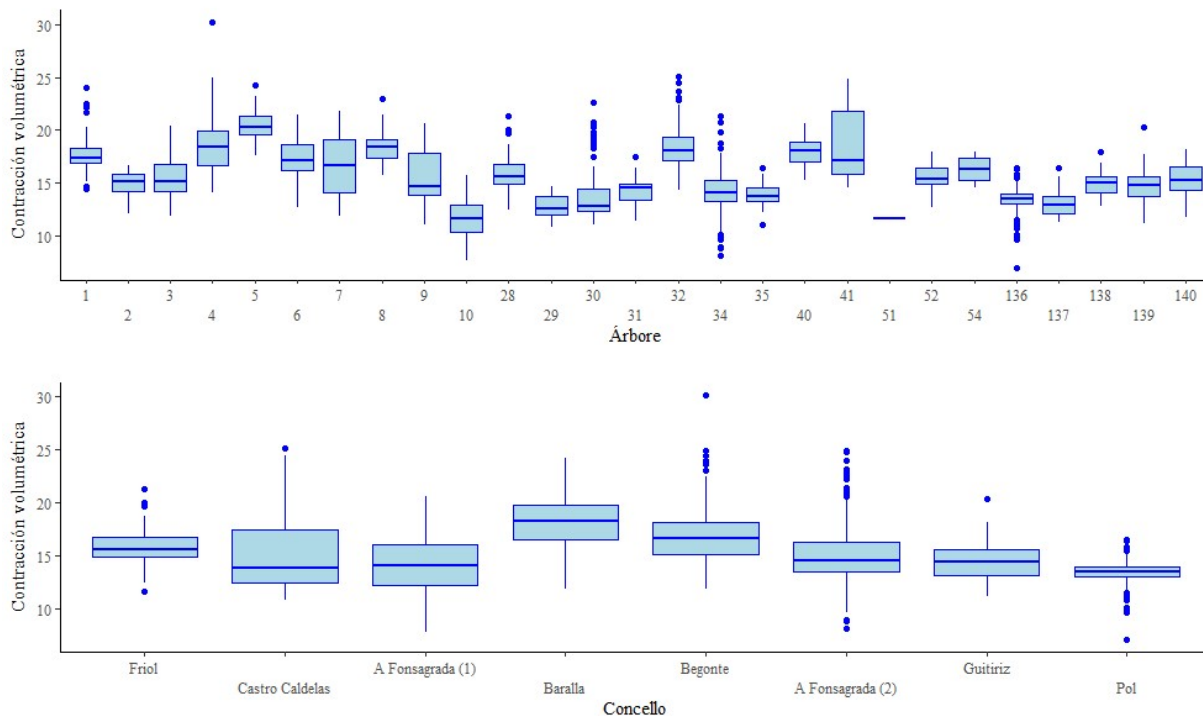


Figura 4.34. Gráficos de caixas da variable resposta contracción volumétrica, dividida por grupos segundo os factores árbore e parcela.

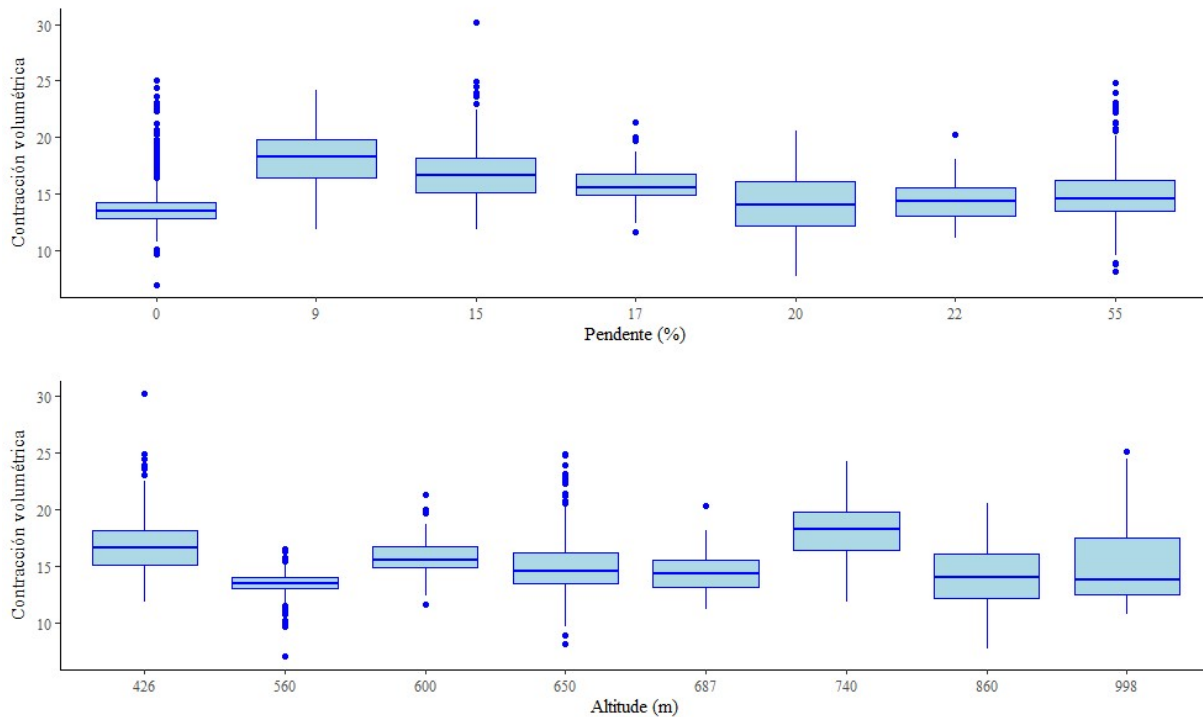


Figura 4.35. Gráficos de caixas da variable resposta contracción volumétrica, dividida por grupos segundo os factores pendente e altitude.

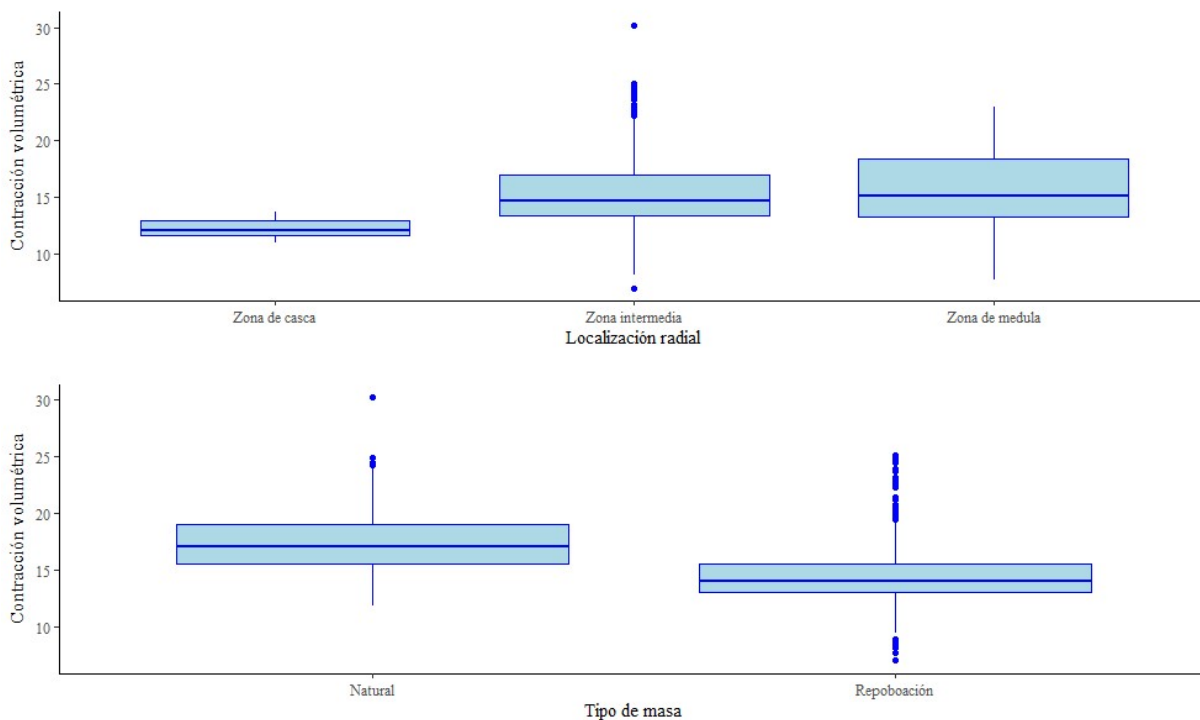


Figura 4.36. Gráficos de caixas da variable resposta contracción volumétrica, dividida por grupos segundo os factores localización radial no fuste (localización radial) e tipo de masa.

4.2.2.4 Densidade básica

Como norma xeral, para diferentes especies de madeira, pódese consultar a seguinte regra indicada en Green *et al.* (2021), sobre propiedades da madeira que aumentan ou diminúen de valor segundo a distancia percorrida dende a medula á casca:

- aumentan: densidade, lonxitude de célula, resistencia da madeira, grosor da parede celular, contraccións radial e tanxencial, porcentaxe de madeira tardía
- diminúen: ángulo de microfibras, contracción lonxitudinal, contido en humidade, fibra revirada.

No caso do bidueiro galego, pendente, parcela e altitude presentan diferenzas entre grupos, pero sen seguir un patrón recoñecible, o que suxire que pode haber outras variables involucradas neses cambios. A distribución de diferenzas do factor árbore mostra a grande heteroxeneidade da madeira analizada; e as variables de localización transversal e tipo de masa mostran as maiores densidades básicas na nos grupos de madeira de preto da casca e en masas procedente de repoboación, respectivamente.

A localización, a idade das árbores e o tipo de hábitat forestal (masa natural ou repoboación), así como as interaccións entre eses factores, teñen un impacto estatisticamente significativo na densidade básica da madeira de *B. pendula* en Polonia (Lachowicz *et al.*, 2019a). Nos ensaios de Möttönen e Luostarinen (2006), a densidade básica de *B. pendula* procedente de repoboación foi significativamente menor que a procedente de bosques de

rexenerado natural. Pola contra, neste estudo, as diferentes parcelas e o tipo de masa tamén dividiron a variable densidade básica en grupos con medianas significativamente diferentes, pero a madeira do grupo das masas repoboadas (Figura 4.31) é lixeiramente superior.

En referencia a *B. pendula* e *B. pubescens* procedentes de Finlandia, Heräjärvi (2001) achou que a materia leñosa da zona medular das árbores era claramente menos densa que a madeira cara a superficie do fuste, o que concorda cos resultados do presente estudo, que establecen un gradiente decrecente de densidade dende a casca ata a medula. Hakkila (1966), Möttönen e Luostarinen (2006) e Viherä-Aarnio e Velling (2017) atoparon tamén que a densidade básica aumenta dende a medula ao *cambium* en *B. pendula* de Finlandia. Este fenómeno é debido á presenza de madeira xuvenil na zona central do fuste (Repola, 2006) e, ademais, a que na dirección radial a proporción de fibras por unidade de superficie aumenta dende a medula cara o exterior da árbore (Bhat e Karkkainen, 1981).

4.2.2.5 Contracción volumétrica

Ao igual que para o caso da densidade básica, outro tanto se pode dicir da interpretación das probas de comparación entre grupos de contracción volumétrica: pendente, parcela e altitude presentan diferenzas pero sen seguir un patrón recoñecible. A pesar de que pendente e altitude si provocan diferenzas na contracción volumétrica, na Figura 4.32 non se aprecia un patrón lineal como se puidera esperar duns factores distribuídos en gradiente. O mesmo se pode dicir da localización da parcela, que non permite situar incrementos ou diminucións da contracción volumétrica con respecto á latitude ou a lonxitude xeográficas; incrementos e diminucións aparecen aleatoriamente. Que o factor árbore presente tantas diferenzas é unha mostra clara da heteroxeneidade da madeira estudada e da gran importancia que ten a mellora xenética para obter produtos máis uniformizados en canto ás propiedades físicas da madeira. Localización dentro do plano transversal do fuste e tipo de masa si parecen ter unha interpretación máis clara: diminución de contraccións a medida que a madeira se separa da medula, e contraccións menores na madeira procedente de masas de repoboación.

Para Möttönen e Luostarinen (2006), a madeira de masas de rexeneración natural sofre de maior contracción volumétrica que a procedente de repoboacións, o que concorda cos resultados do presente estudo: 17,10 % de contracción volumétrica para a madeira de árbores procedentes de formacións de rexenerado natural fronte a 14,03 % en madeira de masas de repoboación (Táboa 4.32). Os mesmos autores (*op. cit.*) non atopan diferenzas significativas na contracción volumétrica en función da localización no plano transversal da madeira, variación que si foi detectada no presente estudo.

4.3 CONSIDERACIÓNS FINAIS

Unha vez feita a análise do material experimental, este traballo pode servir de punto de partida para unha serie de futuras liñas de investigación:

- Investigar as propiedades mecánicas da madeira de *Betula celtiberica* de Galicia, para completar os resultados das propiedades físicas. O coñecemento completo das propiedades da madeira é necesario para o seu aproveitamento e transformación nos diferentes produtos e aplicacións

- Ampliar o ensaio para incluír unha mostra máis extensa no espazo e no rango de idades das árbores, abarcando masas máis atlánticas da especie, así como identificar as características da madeira madura de *Betula celtiberica* en Galicia
- Explorar a base xenética das variacións da madeira para contribuír aos programas de mellora desta especie, para logo aplicar unha silvicultura produtiva ou de conservación a novas masas de bidueiro
- Realización de estudos a longo prazo para avaliar o impacto do cambio climático nas propiedades da madeira: as alteracións nos patróns de temperatura e precipitación poderían modificar a taxa de crecemento e a estrutura celular dos bidueiros, o que á súa vez afectaría ás propiedades físicas e mecánicas da madeira; e os cambios ambientais tamén poden alterar a composición química da madeira, afectando á súa durabilidade, resistencia e outras propiedades importantes para o seu uso industrial
- Avaliación do potencial económico da madeira de bidueiro galego en diversos produtos de gran valor engadido: materiais ecolóxicos con selo de certificación forestal sustentable, compostos biodegradables para diferentes destinos, aproveitamento de compoñentes e extractivos da madeira de bidueiro, madeiras modificadas, etc.

5 CONCLUSIÓNS

A madeira de *Betula celtiberica* procedente de Galicia é semipesada, con valores de densidade algo por baixo das doutras especies europeas do xénero *Betula*. As tres variables de densidade analizadas (densidade ao 12 % de contido en humidade, densidade anhidra e densidade básica) acadaron resultados semellantes aos valores bibliográficos de referencia correspondentes a madeira de árbores xoves. Estes resultados, xunto cunha tamén baixa densidade da parede celular (1.234 kg/m^3) parecen indicar unha presenza notable de madeira xuvenil na mostra de ensaio. Tendo en conta, ademais, que os bidueiros son árbores de duraminización tardía, e que a madeira adulta comeza a aparecer, nas especies do xénero *Betula*, a partires do décimo ou décimo quinto ano cambial, a hipótese da gran porcentaxe de madeira xuvenil vese reforzada. A extracción de parte das substancias de impregnación da madeira trala inmersión prolongada en auga pode ser outra das causas dos baixos valores de densidade da parede celular achados. A dilución e perda de parte da fracción de hemicelulosa da madeira no proceso de sobresaturación puido facer perder materia ás paredes celulares do material.

Os elevados contidos de humidade a saturación que presentou a madeira volven apuntar á presenza de madeira xuvenil, capaz de reter maior humidade. Os altos valores de humidade máxima anticipan un resultado de porosidade alta. As catro estimacións dos puntos de saturación da parede celular (a estimación baseada na variación do volume acada o 36 %), son bastante elevadas pero en liña con referencias bibliográficas para o xénero *Betula*. O amplo rango do punto de saturación das fibras indica un intervalo de inestabilidade dimensional considerable con respecto á humidade da madeira.

A contracción volumétrica acadou un valor do 15,30 % de media, o que corresponde a unha madeira de gran contracción, que debe serrarse antes do seu secado. As contraccións tanxencial e radial tamén foron altas (7,54 % e 4,60 %, respectivamente), pero a súa comparación relativa da como resultado un coeficiente de anisotropía e unha anisotropía absoluta que, sen ser tan bos como os doutras especies de bidueiros, corresponden aos dunha madeira estable e sen problemas graves de deformación. A contracción lonxitudinal si foi moi elevada (0,81 %), o cal tamén é un comportamento característico da madeira xuvenil. O coeficiente de contracción volumétrica correspondeu a unha madeira medianamente nerviosa e apta para construción. A higroscopicidade sitúase no rango da normalidade. Os resultados das constantes de Koehler apuntan a que a madeira de bidueiro ten unha boa estabilidade dimensional tendo en conta a súa densidade anhidra.

A anchura dos aneis de crecemento anual resultou ser algo maior que os valores bibliográficos consultados, aínda que dentro do que se espera para esta especie dentro dun crecemento en boas condicións de estación. A anchura de aneis non mostrou ter relación con ningunha das principais variables de densidade ou de estabilidade dimensional, salvo coa densidade básica: ao aumentar a anchura de aneis aumenta levemente a densidade básica. A porosidade da

madeira de *Betula celtiberica* foi do 53 %, en consonancia con outras madeiras do mesmo xénero. Isto convirte á madeira de bidueiro en apta para tinxido e barnizado.

A análise comparativa das variables de cor mostra á madeira de *Betula celtiberica* de Galicia como algo máis escura que a madeira de procedencias europeas de *Betula pendula*.

Na análise de regresión non se atoparon relacións fortes, aínda que si significativas, entre propiedades físicas da madeira e variables dendrométricas das árbores mostradas. Considerando as propiedades dendrométricas como variables predictoras, ningún dos modelos probados superou o 30 % de variabilidade explicada. A contracción volumétrica está relacionada con idade, crecemento medio en altura e esvelteza da árbore; e a densidade básica tivo como variables explicativas a altura no fuste e anchura de aneis. As variables de cor si mostraron ter unha relación bastante forte coa densidade básica, dentro dun modelo lineal con $R^2 = 0,78$. Este modelo resulta práctico pola súa capacidade para estimar a densidade dunha mostra de madeira de xeito rápido, sen necesidade de levar as madeiras a distintos estados de humidade e facer medicións e pesadas no laboratorio.

A comparación por grupos revelou que os factores árbore, parcela de procedencia da árbore, pendente do terreo de procedencia, cota do terreo sobre o cal medran as árbores, tipo de masa de procedencia e localización radial no fuste da madeira, dividen as variables densidade básica e contracción volumétrica en grupos con diferencias significativas entre eles. As árbores procedentes de repoboación teñen a madeira lixeiramente máis densa que as árbores procedentes de rexenerado natural, e sofren de menor contracción volumétrica. Para o resto de factores, a pesar de atoparse diferenzas entre grupos, non se percibiu un patrón na variable resposta paralelo ao gradiente das variables cualitativas. A densidade aumenta dende a medula cara a casca da árbore, e a contracción volumétrica diminúe no mesmo percorrido.

Como conclusión final, os achados desta tese doutoral contribúen significativamente ao coñecemento da madeira de *Betula celtiberica*, proporcionando unha base científica para a xestión e aproveitamento sostible desta especie como fonte de madeira para a industria, dado que se aportan algúns modelos predictivos de calidade da madeira para árbores en pé. Os resultados desta investigación teñen implicacións para o sector forestal, a industria da madeira e a xestión ambiental en Galicia, e potencialmente para outras rexións onde o bidueiro sexa unha especie importante. O presente traballo serve de punto de partida cara a futuras liñas de investigación: determinación das propiedades mecánicas da madeira de *Betula celtiberica* de Galicia procedente de pés adultos, ampliación do ensaio para incluír as comarcas máis atlánticas da especie, exploración da base xenética das variacións atopadas, realización de estudos a longo prazo para avaliar o impacto do cambio climático nas propiedades desta madeira, e avaliación do potencial económico da madeira de bidueiro galego.

6 BIBLIOGRAFÍA

ABYSHEV, A.Z., AGAEV, E.M. e GUSEINOV, A.B., 2007. Studies of the chemical composition of birch bark extracts (Cortex betula) from the Betulaceae family. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, vol. 41, no. 8

AENOR, 1977. *UNE 56531:1977. Determinación del peso específico*. 1977. Madrid: s.n.

AENOR, 2004. *UNE-EN 13556. Madera aserrada y madera en rollo. Nomenclatura de las maderas utilizadas en Europa*. 2004. Madrid: s.n.

ÁLVAREZ, P., BARRIO, M., DÍAZ, R., HIGUERAS, J., RIESCO, G., RIGUEIRO, A., RODRÍGUEZ, R. e VILLARINO, J., 2000. *Manual de selvicultura de frondosas caducifolias*. S.l.: Escuela politécnica Superior de Lugo (USC). ISBN 84-923583-4-3.

AMIGO VÁZQUEZ, J. e ROMERO BUJÁN, M.I., 1998. Abedulares de origen antrópico en Galicia: caracterización fitosociológica. *Birchwoods of anthropogenic origin in Galicia: phytosociological characterization*, no. 17, ISSN 0211-9714.

AUSTAD, M., 2018. *Parental and individual variation of growth traits and wood density in a progeny trial after a complete diallel crossing of 9 Silver birch (Betula pendula) trees in south-eastern Norway*. S.l.: Norwegian University of Life Sciences, Ås.

AXENCIA GALEGA DA INDUSTRIA FORESTAL, 2023. *Axenda de Impulso da Industria Forestal-Madeira. Revisión 2022*. . Santiago de Compostela: Consellería do Medio Rural.

BAO, F., JIANG, Z., JIANG, X., LU, X., LUO, X. e ZHANG, S., 2001. Differences in wood properties between juvenile wood and mature wood in 10 species grown in China. *Wood Science and Technology*, vol. 35, DOI [10.1007/s002260100099](https://doi.org/10.1007/s002260100099).

BARNETT, J.R. e JERONIMIDIS, G., 2003. *Wood Quality and Its Biological Basis*. S.l.: Blackwell. ISBN 978-0-8493-2819-0.

BHAT, K.M., 1980. Variation in structure and selected properties of Finnish birch wood: I. Interrelationships of some structural features, basic density and shrinkage. *Silva Fennica*, vol. 14, no. 4

BHAT, K.M., 1983. A review of wood anatomy and selected properties of stems, branches and roots of birch species. *IAWA Bulletin*, vol. 4, no. 2-3

BHAT, K.M. e KARKKAINEN, M., 1981. Variation in structure and selected properties of Finnish birch wood: III. Proportion of wood elements in stems and branches in *Betula pendula* Roth. *Silva Fennica*, vol. 15, no. 1

BLANCO, E., CASADO, M.A., COSTA, M., ESCRIBANO, R., GARCÍA, M., GÉNOVA, M., GÓMEZ, A., GÓMEZ, F., MORENO, J.C., MORLA, C., REGATO, P. e SAINZ, H., 1998. *Los bosques ibéricos. Una interpretación geobotánica*. Barcelona: Planeta. ISBN 978-84-08-05820-5

BONHAM, V.A. e BARNETT, J.R., 2001. Fibre Length and Microfibril Angle in Silver Birch (*Betula pendula* Roth). , vol. 55, no. 2, DOI [10.1515/HF.2001.026](https://doi.org/10.1515/HF.2001.026).

BORŮVKA, V., NOVÁK, D. e ŠEDIVKA, P., 2020. Comparison and analysis of radial and tangential bending of softwood and hardwood at static and dynamic loading. *Forests*, vol. 11, no. 8

BORŮVKA, V., ZEIDLER, A., HOLEČEK, T. e DUDÍK, R., 2018. Elastic and strength properties of heat-treated beech and birch wood. *Forests*, vol. 9, no. 4

BRZEZIECKI, B. e KIENAST, F., 1994. Classifying the life-history strategies of trees on the basis of the Grimian model. *Forest Ecology and management*, vol. 69, no. 1-3

CARTENÌ, F., DESLAURIERS, A., ROSSI, S., MORIN, H., DE MICCO, V., MAZZOLENI, S. e GIANNINO, F., 2018. The Physiological Mechanisms Behind the Earlywood-To-Latewood Transition: A Process-Based Modeling Approach. *Frontiers in plant science*, vol. 9, ISSN 1664-462X. DOI [10.3389/fpls.2018.01053](https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01053).

CASTAÑO-SANTAMARÍA, J., BARRIO-ANTA, M. e ÁLVAREZ-ÁLVAREZ, P., 2013. Potential above ground biomass production and total tree carbon sequestration in the major forest species in NW Spain. *The International Forestry Review*, vol. 15, no. 3, ISSN 14655489, 20537778. JSTOR

CEBALLOS, L. e RUIZ DE LA TORRE, J., 2001. *Árboles y arbustos*. Madrid: Mudi Prensa. ISBN 978-84-7114-968-8.

CISNEROS, O., CAÑELLAS, I., MONTERO, G., HERNÁNDEZ, A., FRIAS, M. e VALLEJO, R., 2003. *Manual de selvicultura para plantaciones de especies productoras de madera de calidad*. Madrid: INIA. ISBN 84-7498-492-0.

CISNEROS, O., VILLARINO, J., SÁNCHEZ, F., MONTERO, G. e ROJO, A., 2008. Selvicultura de *Betula* spp. En: R. SERRADA, G. MONTERO e J. JEQUE (eds.), *Compendio de selvicultura aplicada en España*. S.l.: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Fundación Conde del Valle de Salazar, pp. 63-82. ISBN 978-84-7498-521-4.

COLLARDET, J. e BESSET, J., 1992. *Les Bois commerciaux et leurs utilisations. T. II, Bois feuillus (des régions tempérées et froides)*. France: H. Vial a Dourdan. ISBN 2-85101-027-1.

CONFEDERATION OF EUROPEAN PAPER INDUSTRIES (CEPI), 2022. Key Statistics 2022. European Pulp & Paper Industry. . S.l.

CONSELLERÍA DO MEDIO RURAL E DO MAR, 2014. *ORDE do 19 de maio de 2014 pola que se establecen os modelos silvícolas ou de xestión forestal orientativos e referentes de boas prácticas forestais para os distritos forestais de Galicia* [en liña]. 5 junio 2014. S.l.: s.n. [consulta: 1 setembro 2023]. Dispoñible en: https://www.xunta.gal/dog/Publicados/2014/20140605/AnuncioG0165-280514-0001_gl.pdf.

CORBELLE RICO, E., 2020. O monte como espazo produtor de madeira: modelos produtivos, diversificación e ordenación de especies forestais. En: E. LÓPEZ IGLESIAS e A. PRADA (eds.), *O monte galego do século XXI*. S.l.: Foro Económico de Galicia, pp. 76. Documento 31

CORREA, H.S., 2023. Rozas, estivadas y pan de vedro: El cultivo temporal del monte en la Galicia de la Edad Moderna. *Historia agraria: Revista de agricultura e historia rural*, no. 89, ISSN 1139-1472.

DALPIAZ, D., 2021. *Applied statistics with R*. S.l.: Github.

DECKERS, J.A., DRIESSEN, P.M., NACHTERGAELE, F.O. e SPAARGAREN, O.C., 2002. World Reference Base for Soil Resources. *Encyclopedia of Soil Science*. United States: Marcel Dekker, pp. 1446-1451. ISBN 978-0-8247-0518-3.

DESCH, H.E., 1932. Anatomical Variation in the Wood of Some Dicotyledonous Trees. *The New Phytologist*, vol. 31, no. 2, ISSN 0028646X, 14698137. JSTOR

DESCH, H.E. e DINWOODIE, J.M., 2016. *Timber: structure, properties, conversion and use*. S.l.: Bloomsbury Publishing. ISBN 1-349-13427-9.

DÍAZ GONZÁLEZ, T.E. e VÁZQUEZ, A., 2004. *Guía de los bosques de Asturias*. Asturias, España: Trea. ISBN 978-84-9704-146-1.

DIÉGUEZ ARANDA, U., GRANDAS ARIAS, J.A., ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J.G. e VON GADOW, K., 2006. Site quality curves for birch stands in north-western Spain. *Silva Fennica*, vol. 40, no. 4

DINNO, A., 2015. Nonparametric pairwise multiple comparisons in independent groups using Dunn's test. *Stata Journal*, vol. 15, no. 1

DIRECCIÓN GENERAL DE MEDIO NATURAL Y POLÍTICA FORESTAL, 2011. *Cuarto Inventario Forestal Nacional. Galicia*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. ISBN 978-84-8014-813-9.

DIRECCIÓN XERAL DE PLANIFICACIÓN E ORDENACIÓN FORESTAL, 2020. *Anuario de Estadística Forestal de Galicia 2019*. Xunta de Galicia. Consellería do Medio Rural. Santiago de Compostela: s.n.

DOBROWOLSKA, E., WRONISZEWSKA, P. e JANKOWSKA, A., 2020. Density distribution in wood of European birch (*Betula pendula* Roth.). *Forests*, vol. 11, no. 4

ECKELMAN, C.A., 1998. *The shrinking and swelling of wood and its effect on furniture*. S.l.: Purdue University Cooperative Extension Service.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2002. *EN 13183-1:2002. Moisture content of a piece of sawn timber - Part 1: Determination by oven dry method*. 2002. Brussels: s.n.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2010a. *EN 384:2010. Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density*. 2010a. Brussels: s.n.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2010b. *EN 408:2010. Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties*. 2010b. Brussels: s.n.

EUROPEAN SPACE AGENCY, 2020. *Land Cover CCI Product User Guide Version 2. Tech. Rep.* [en liña]. [carte]. S.l.: s.n. Disponible en: maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-Ph2-PUGv2_2.0.pdf.

EUROPEAN SPACE AGENCY, 2022. *Copernicus DEM, GLO-90 dataset* [en liña]. [carte]. S.l.: s.n. Disponible en: <https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65>.

FAO, 2021. *Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2020*. United Nations Food and Agriculture Organization. Roma, Italia: s.n. ISBN 978-92-5-134117-9.

FAO, 2024. *Global forest products facts and figures 2023*. [en liña]. Roma, Italia: Disponible en: <https://doi.org/10.4060/cd3650en>.

FERNÁNDEZ LÓPEZ, M.J., ÁLVAREZ ÁLVAREZ, P., BARRIO ANTA, M., CÁMARA OBREGÓN, A. e VILLARINO URTIAGA, J.J., 2012. *Betula* spp. *Producción y manejo de semillas y plantas forestales*. Madrid: Organismo Autónomo Parques Naturales - Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, pp. 238-260. ISBN 978-84-8014-837-5.

FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.I., CONDE-GARCÍA, M., CABEZAS MARTÍNEZ, J.A., SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M., FERNÁNDEZ DE SIMÓN, M.B., VÉLEZ, M.D. e CERVERA, M.T., 2020. *La madera: conceptos clave para su identificación botánica*. S.l.: Ministerio para la Transición Ecológica. ISBN 84-18508-68-X.

FICK, S.E. e HIJMANS, R.J., 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, vol. 37, no. 12,

FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1966. *Differences between heartwood and sapwood. Informe Técnico*. Madison, Wisconsin, Estados Unidos: Forest Service U.S. - Department of Agriculture. FPL-0147.

GAO, S., WANG, X., WIEMANN, M.C., BRASHAW, B.K., ROSS, R.J. e WANG, L., 2017. A critical analysis of methods for rapid and nondestructive determination of wood density in standing trees. *Annals of Forest Science*, vol. 74

GHASEMI, A. e ZAHEDIASL, S., 2012. Normality tests for statistical analysis: a guide for non-statisticians. *International journal of endocrinology and metabolism*, vol. 10, no. 2, ISSN 1726-913X 1726-9148. DOI [10.5812/ijem.3505](https://doi.org/10.5812/ijem.3505).

GIAGLI, K., VAVRČÍK, H., FAJSTAVR, M., ČERNÝ, J., NOVOSADOVÁ, K. e MARTINÍK, A., 2019. Stand factors affecting the wood density of naturally regenerated young silver birch growing at the lower altitude of the Czech Republic region. *Wood Research*

GLASS, S. e ZELINKA, S., 2021. Moisture Relations and Physical Properties of Wood. En: General Technical Report FPL-GTR-282, *Wood Handbook Wood as an Engineering Material*. Madison, Wisconsin, Estados Unidos: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, pp. 24. ISBN 979-8-8463-2324-7.

GÓMEZ, Á.A., 2008. La selvicultura y la ordenación ante las actuales prestaciones de los montes. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, no. 27

GORGOSO, J.J., GONZÁLEZ, J.Á., ROJO, A. e GRANDAS-ARIAS, J.A., 2007. Modelling diameter distributions of *Betula alba* L. stands in northwest Spain with the two-parameter Weibull function. *Forest Systems*, vol. 16, no. 2

GREEN, D.W., WINANDY, J.E. e KRETSCHMANN, D.E., 2021. Mechanical properties of wood. En: General Technical Report FPL-GTR-282, *Wood handbook: Wood as an Engineering Material*. Madison, Wisconsin, Estados Unidos: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, pp. 48. vol. 113. ISBN 979-8-8463-2324-7

GUINDEO CASASÚS, A., GARCÍA ESTEBAN, L., PERAZA SÁNCHEZ, F. e ARRIAGA MARTITEGUI, F., 1997. *Especies de madera para carpintería, construcción y mobiliario*. S.l.: AITIM. ISBN 84-87381-11-1.

GUITIÁN RIVERA, L., 2001. La destrucción histórica del bosque en Galicia. *SÉMATA, Ciencias Sociais e Humanidades*, no. 13, ISSN 1137-9669.

GUTIÉRREZ OLIVA, A. e PLAZA PULGAR, F., 1967. *Características físico-mecánicas de las maderas españolas*. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicio de la Madera. S.l.: s.n.

HAKKILA, P., 1966. Investigations on the basic density of Finnish Pine, Spruce and Birch wood. *Metsätieteellisen tutkimuslaitoksen julkaisuja*, vol. 61, no. 5

HAKKILA, P., 1979. *Wood density survey and dry weight tables for pine, spruce and birch stems in Finland*. S.l.: s.n. vol. 96. ISBN 951-40-0421-3.

HERÄJÄRVI, H., 2002. *Properties of birch (Betula pendula, B. pubescens) for sawmilling and further processing in Finland*. S.l.: Metsäntutkimuslaitos. 871, ISBN 951-40-1856-7.

HERÄJÄRVI, H., 2004. Variation of basic density and Brinell hardness within mature Finnish *Betula pendula* and *B. pubescens* stems. *Wood and Fiber Science*

HILL, C., ALTGEN, M. e RAUTKARI, L., 2021. Thermal modification of wood—A review: Chemical changes and hygroscopicity. *Journal of Materials Science*, vol. 56

HOPKINS, S., DETTORI, J.R. e CHAPMAN, J.R., 2018. Parametric and Nonparametric Tests in Spine Research: Why Do They Matter? *Global spine journal*, vol. 8, no. 6, ISSN 2192-5682 2192-5690. DOI [10.1177/2192568218782679](https://doi.org/10.1177/2192568218782679).

HRČKOVÁ, M., KOLEDA, Pavol e KOLEDA, Peter, 2020. Measuring and analysis colour of birch wood in digital picture. *Management Systems in Production Engineering*, vol. 28, no. 3

HYNYNEN, J., NIEMISTÖ, P., VIHERRÄ-AARNIO, A., BRUNNER, A., HEIN, S. e VELLING, P., 2010. Silviculture of birch (*Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh.) in northern Europe. *Forestry*, vol. 83, no. 1

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2014. *ISO 13061-2:2014 Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests*. 2014. Geneva: s.n.

IRANOR, 1977a. *UNE 56531:1977. Características físico-mecánicas de la madera. Determinación del peso específico*. 1977. Madrid: Instituto Nacional de Racionalización y Normalización.

IRANOR, 1977b. *UNE 56533:1977. Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de las contracciones lineal y volumétrica*. 1977. Madrid: Instituto Nacional de Racionalización y Normalización.

IRANOR, 1978a. *UNE 56528:1978. Características físico-mecánicas de la madera. Preparación de probetas para ensayos*. 1978. Madrid: Instituto Nacional de Racionalización y Normalización.

IRANOR, 1978b. *UNE 56540:1978. Características físico-mecánicas de la madera. Interpretación de los resultados de los ensayos*. 1978. Madrid: Instituto Nacional de Racionalización y Normalización.

IRIZARRY, R., 2024. Rafael A. Irizarry's Home Page. *Applied Nonparametric and Modern Statistics* [en línea]. [consulta: 8 outubro 2024]. Disponible en: <https://rafalab.dfc.harvard.edu/pages/754/>.

JACKSON, A., DAY, D. e ROS, C., 1998. *Guías ceac de la Madera: clases de Madera*. S.l.: Ediciones CEAC. ISBN 978-84-329-7562-2.

JAKUBOWSKI, M., TOMCZAK, A., JELONEK, T. e GRZYWIŃSKI, W., 2020. Variations of wood properties of birch (*Betula pendula* Roth) from a 23-year old seed orchard. *Wood Res*, vol. 65, no. 1

JOHANSSON, T., 1992. Sprouting of 2-to 5-year-old birches (*Betula pubescens* Ehrh. and *Betula pendula* Roth) in relation to stump height and felling time. *Forest Ecology and Management*, vol. 53, no. 1-4

KIRCHHERR, J., REIKE, D. e HEKKERT, M., 2017. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, conservation and recycling*, vol. 127

KNAPP, H., 2017. *Intermediate statistics using SPSS*. S.l.: Sage Publications. ISBN 1-5063-7744-0.

KNIGGE, W. e SCHULZ, H., 1966. *Grundriss der Forstbenutzung: Entstehung, Eigenschaften, Verwertung und Verwendung des Holzes und anderer Forstprodukte*. S.l.: s.n.

KOEHLER, A., 1931. Longitudinal shrinkage of wood. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, vol. 53, no. 12

KOLLMANN, F.F.P. e CÔTÉ, W.A., 1968. *Principles of Wood Science and Technology : I Solid Wood* [en liña]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-87928-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87928-9>. WorldCat

KORHONEN, K. e STHAL, G., 2020. Criterion 1: Maintenance and Appropriate Enhancement of Forest Resources and their Contribution to Global Carbon Cycles. *FOREST EUROPE, 2020: State of Europe's Forests 2020*. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe. S.l.: s.n., pp. 30-50.

LACHOWICZ, H., BIENIASZ, A. e WOJTAN, R., 2019a. Variability in the basic density of silver birch wood in Poland. *Silva Fennica*, vol. 53, no. 1, DOI [10.14214/sf.9968](https://doi.org/10.14214/sf.9968).

LACHOWICZ, H., WRÓBLEWSKA, H., SAJDAK, M., KOMOROWICZ, M. e WOJTAN, R., 2019b. The chemical composition of silver birch (*Betula pendula* Roth.) wood in Poland depending on forest stand location and forest habitat type. *Cellulose*, vol. 26

LEMAIRE, J., ANDRÉ, P. e BALLEUX, P., 2000. Le bouleau: feuillu "précieux" inconnu! *Forêt-entreprise*, no. 136

LIEPIŅŠ, K. e RIEKSTS-RIEKSTIŅŠ, J., 2013. Stemwood density of juvenile silver birch trees (*Betula pendula* Roth) from plantations on former farmlands. *Baltic Forestry*, vol. 19, no. 2,

LOSADA, E., CASTRO, J. e NIÑO, E., 1992. *Nomenclatura vernácula da flora vascular galega*. Xunta de Galicia. S.l.: s.n. ISBN 84-453-0594-8.

LUMLEY, T., 2024. *leaps: Regression Subset Selection* [en liña]. 2024. S.l.: s.n. Disponible en: <https://CRAN.R-project.org/package=leaps>.

MANUEL VALDÉS, C. e GIL SÁNCHEZ, L., 2002. *La transformación histórica del paisaje forestal de Galicia*. 2ª Edición. Madrid: Subdirección General de Montes, Ministerio de Medio Ambiente. ISBN 84-8014-371-1.

MARTÍNEZ-CABRERA, H.I., JONES, C.S., ESPINO, S. e SCHENK, H.J., 2009. Wood anatomy and wood density in shrubs: responses to varying aridity along transcontinental transects. *American Journal of Botany*, vol. 96, no. 8

MICROSOFT CORPORATION, 2020a. *Microsoft Excel*. version: Microsoft 365. 2020. Redmond: Microsoft Corporation.

MICROSOFT CORPORATION, 2020b. *Microsoft Word*. version: Microsoft 365. 2020. Redmond: Microsoft Corporation.

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO, 2023a. *Abedulares (Betula spp.)* [en liña]. Servicio WMS. 2023a. S.l.: s.n. [consulta: 5 febreiro 2023]. Disponible en: <https://wms.mapama.gob.es/sig/Biodiversidad/MFE8/wms.aspx?>

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO, 2023b. *Anuario de Estadística Forestal 2021*. Madrid: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). ISBN 978-84-18778-23-0.

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO, [sin fecha]. Cuencas y subcuencas hidrográficas. *Cuencas y subcuencas hidrográficas* [en liña]. [consulta: 8 setembro 2024]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/cuencas-y-subcuencas.html>.

MO, L., CROWTHER, T.W., MAYNARD, D.S., VAN DEN HOOGEN, J., MA, H., BIALIC-MURPHY, L., LIANG, J., DE-MIGUEL, S., NABUURS, G.-J. e REICH, P.B., 2024. The global distribution and drivers of wood density and their impact on forest carbon stocks. *Nature Ecology & Evolution*

MOLINA, F., 1993. El selvicultor privado y la política forestal. *Actas del I Congreso Forestal Español*. S.l.: s.n., pp. 15-23. vol. 5.

MOMBÄCHER, R., 2008. *Holz – Lexikon*. Leinfelden-Echterdingen, Alemania: DRW-Verlag. ISBN 3-87181-355-9.

MONONEN, K., ALVILA, L. e PAKKANEN, T.T., 2005. Changes in color and structure of birch wood (*Betula pendula*) caused by bleaching with hydrogen peroxide solution.

MONTGOMERY, D.C., PECK, E.A. e VINING, G.G., 2021. *Introduction to linear regression analysis*. S.l.: John Wiley & Sons. ISBN 1-119-57875-2.

MORENO, G. e PEINADO, M., 1990. Betulaceae. En: S. CASTROVIEJO, C. AEDO, M. LAÍNZ, F. MUÑOZ GARMENDIA, G. NIETO FELINER, J. PAIVA y C. BENEDÍ (eds.), *Flora Ibérica*. Real Jardín Botánico, Madrid: s.n., pp. 38-43. II-Platanaceae-Plumbaginaceae

MÖTTÖNEN, V., BÜTÜN, Y., HERÄJÄRVI, H., MARTTILA, J. e KAKSONEN, H., 2015. Effect of combined compression and thermal modification on mechanical performance of aspen and birch wood.

MÖTTÖNEN, V., HERÄJÄRVI, H., KOIVUNEN, H. e LINDBLAD, J., 2004. Influence of felling season, drying method and within-tree location on the brinell hardness and equilibrium moisture content of wood from 27–35-year-old *Betula pendula*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 19, no. 3, ISSN 0282-7581. DOI [10.1080/02827580410029327](https://doi.org/10.1080/02827580410029327).

MÖTTÖNEN, V. e LUOSTARINEN, K., 2006. Variation in density and shrinkage of birch (*Betula pendula* Roth) timber from plantations and naturally regenerated forests. *Forest products journal*, vol. 56, no. 1

NÁJERA Y ANGULO, F. e LÓPEZ FRAILE, V., 1969. *Estudio de las principales maderas comerciales de frondosas peninsulares*. S.l.: Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicio de la Madera.

NASSAR YARUR, D., 1996. La construcción de madera en España. *El campo: boletín de información agraria*, no. 134,

NIEMZ, P., TEISCHINGER, A. e SANDBERG, D., 2023. *Springer handbook of wood science and technology*. S.l.: Springer. ISBN 3-030-81314-2.

NILSSON, J.A., JONES, G., HÅKANSSON, C., BLOM, Å. e BERGH, J., 2021. Effects of fertilization on wood formation in naturally regenerated juvenile silver birch in a norway spruce stand in south sweden. *Forests*, vol. 12, no. 4

NUTSCH, W., 1996. *Tecnología de la madera y del mueble*. S.l.: Reverté. ISBN 84-291-1435-1.

OZILI, P.K., 2023. The acceptable R-square in empirical modelling for social science research. *Social research methodology and publishing results: A guide to non-native english speakers*. S.l.: IGI global, pp. 134-143.

PANSHIN, A.J. e DE ZEEUW, C., 1980. *Textbook of Wood Technology: Structure, Identification, Properties, and Uses of the Commercial Woods of the United States and Canada*. S.l.: McGraw-Hill. ISBN 978-0-07-048441-2.

PARLAMENTO DE GALICIA, 2018. *Proxecto de Ditame da Ponencia da Comisión Especial non Permanente de Estudo e Análise das Reformas da Política Forestal, de Prevención e Extinción de Incendios Forestais e do Plan Forestal de Galicia, avaliando a experiencia acumulada dende 2006 e, especificamente, a extraordinaria vaga de lumes que ven de sufrir Galicia en outubro de 2017*. 2018. S.l.: s.n.

PERAZA SÁNCHEZ, F., ARRIAGA MARTITEGUI, F., GUINDEO CASASÚS, A., GARCIA ESTEBAN, L., KASNER CAMACHO, C., MEDINA GALLEGO, G., PALACIOS, P. e VÁSQUEZ, T., 2004. *Especies de maderas para carpintería, construcción y mobiliario*. S.l.: Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho. ISBN 84-87381-30-8.

PEREIRA-ESPINEL, J., RODRÍGUEZ GUITIÁN, M.A., IGLESIAS DÍAZ, M.I. e RIGUEIRO RODRÍGUEZ, A., 2012. *Ruta botánica por el campus de Lugo*. Santiago de Compostela: Versátil Servizos Editoriais, S. L. ISBN 978-84-939328-7-9.

PICOS, J., 2022. *A cadea forestal-madeira de Galicia*. S.l.: Axencia Galega da Industria Forestal. Consellería do Medio Rural. Universidade de Vigo.

PICOS, J., 2023a. *A Cadea Forestal - Madeira de Galicia 2022-2023**. S.l.: Axencia Galega da Industria Forestal. Consellería do Medio Rural. Universidade de Vigo.

PICOS, J., 2023b. Primeiros resultados do Inventario Forestal Continuo de Galicia. [en liña]. Santiago de Compostela. [consulta: 1 setembro 2023]. Disponible en: https://invega.xunta.gal/invega/appdata/documents/noticia7/PPT_UVIGO_3_Primeiros%20resultados%20IFCG%20Juan%20Picos.pdf.

POGGIO, L., DE SOUSA, L.M., BATJES, N.H., HEUVELINK, G.B.M., KEMPEN, B., RIBEIRO, E. e ROSSITER, D., 2021. SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *SOIL*, vol. 7, no. 1, DOI [10.5194/soil-7-217-2021](https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021).

R CORE TEAM, 2020. *R: A Language and Environment for Statistical Computing* [en liña]. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Disponible en: <https://www.R-project.org/>.

RADKAU, J., 2012. *Wood: A History*. S.l.: Polity Press. ISBN 978-0-7456-4688-6.

RENCHER, A.C. e SCHAALJE, G.B., 2008. *Linear models in statistics*. S.l.: John Wiley & Sons. ISBN 0-470-19260-7.

REPOLA, J., 2006. Models for vertical wood density of Scots pine, Norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density. *Silva Fennica*, ISSN 0037-5330.

RIESCO MUÑOZ, G., 2018. Variation in density and dimensional stability of wood from young birch trees (*Betula celtiberica*) in northwestern Spain. *Inédito*.

RIESCO MUÑOZ, G. e BARRIO ANTA, M., 2010. Physical properties of thinning wood in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.): case study. *EUR J FOR RES*, vol. 129, no. 6

RIESCO MUÑOZ, G. e PULGAR LORENZO, J.A., 2022. Intra-species variation in maximum moisture content, cell-wall density and porosity of hardwoods. *Holzforschung*, vol. 76, no. 11-12

RIESCO MUÑOZ, G. e RODRÍGUEZ CAMPOS, A.M., 2010. Propiedades físicas de la madera de ejemplares jóvenes de *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. *Recursos Rurais*, no. 6, ISSN 1885-5547.



RIGUEIRO, A., 1992. Las frondosas: su importancia forestal en Galicia. *Especies frondosas en la repoblación de Galicia*. Lugo: Deputación Provincial de Lugo, pp. 125. ISBN 978-84-86824-12-9.

RIGUEIRO RODRÍGUEZ, A., 2003. Bosques y masas arboladas. *Reflexiones sobre el medio ambiente en Galicia*. Santiago de Compostela: Consellería de Medio Ambiente. Centro de Desenvolvemento Sostible, pp. 325-359. ISBN 84-453-3652-5.

RIJSDIJK, J.F. e LAMING, P.B., 1994. *Physical and related properties of 145 timbers: information for practice*. S.l.: Springer Science & Business Media. ISBN 978-90-481-4411-2.

RIVAS-MARTÍNEZ, S., DÍAZ GONZÁLEZ, T.E., FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, F., IZCO SEVILLANO, J., LOIDI ARREGUI, J.J., FERNANDES LOUSÃ, M. e PENAS MERINO, Á., 2002. Vascular plant communities of Spain and Portugal (addenda to the syntaxonomical checklist of 2001, part II). *Itin Geobot*, vol. 15, ISSN 0213-8530.

ROCHA, M.F.V., VEIGA, T.R.L.A., SOARES, B.C.D., ARAÚJO, A.C.C. de, CARVALHO, A.M.M. e HEIN, P.R.G., 2019. Do the growing conditions of trees influence the wood properties? *Floresta e Ambiente*, vol. 26

RODRÍGUEZ CEBREIRO, D., 2021. Propuestas para potenciar la sostenibilidad económica de las explotaciones forestales en Galicia. . Santiago de Compostela: Dirección Xeral de Planificación e Ordenación Forestal.

RODRÍGUEZ SOALLEIRO, R., 2010. Estado actual y perspectivas de la selvicultura en España. *Conferencias y Ponencias*. Madrid: Sociedad Española de Ciencias Forestales, pp. 83-101. vol. 31. ISBN 1575-2410.

RODRÍGUEZ SOALLEIRO, R., 2023. Diagnóstico da situación actual das masas de frondosas caducifolias no IFCG. [en liña]. Santiago de Compostela. [consulta: 1 setembro 2023]. Disponible en:
https://invega.xunta.gal/invega/appdata/documents/noticia7/PPT_USC_6_FRONDOSAS_Roque%20Rodriguez.pdf.

ROJO, A., ÁLVAREZ GONZALEZ, J.G., GRANDAS ARIAS, J.A. e DIÉGUEZ ARANDA, U., 2005. Tablas de Producción de Selvicultura media para el abedul (*Betula alba* L.) en Galicia. *IV Congreso Forestal Nacional*. Zaragoza: Sociedad Española de Ciencias Forestales

ROSS, R., 2021. *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison, Wisconsin, Estados Unidos: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. ISBN 979-8846323247.

ROTHMALER, W. e VASCONCELLOS, J. de C., 1940. *Betula celtiberica* Rothm. and Vasc. A contribution to the taxonomy of the western European Birches. *Boletim da Sociedade Broteriana*, vol. 14, ISSN 0081-0657.

ROUSSILLAT, M., 1990. *El abedul*. S.l.: Akal. ISBN 978-84-460-0860-6.

RSTUDIO TEAM, 2020. *RStudio: Integrated Development Environment for R* [en liña]. Boston, MA: RStudio, PBC. Disponible en: <http://www.rstudio.com/>.

RUANO, A. e HERMOSO, E., 2021. Juvenile-mature wood evaluation along the bole considering the influence of silvicultural treatments. *Maderas. Ciencia y tecnología* [en liña], vol. 23, Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2021000100421&nrm=iso.

RUST, S., 2013. Tree Slenderness Risk Assessment. En: August 6, 2013, *Proceedings of the 89th Annual Conference of the International Society of Arboriculture*. S.l.: International Society of Arboriculture

SCHNITZLER, A. e CLOSSET, D., 2003. Forest dynamics in unexploited birch (*Betula pendula*) stands in the Vosges (France): structure, architecture and light patterns. *Forest Ecology and Management*, vol. 183, no. 1-3

SCHULGASSER, K. e WITZTUM, A., 2015. How the relationship between density and shrinkage of wood depends on its microstructure. *Wood Science and Technology*, vol. 49, no. 2, ISSN 1432-5225. DOI [10.1007/s00226-015-0699-7](https://doi.org/10.1007/s00226-015-0699-7).

SHRESTHA, N., 2020. Detecting Multicollinearity in Regression Analysis. *American Journal of Applied Mathematics and Statistics*, vol. 8, no. 2, ISSN 2328-7292. DOI [10.12691/ajams-8-2-1](https://doi.org/10.12691/ajams-8-2-1).

SIAU, J.F., 1995. *Wood: influence of moisture on physical properties*. Blacksburg, Va: Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University. ISBN 0-9622181-0-3.

SIAU, J.F., 2012. *Transport processes in wood*. S.l.: Springer Science & Business Media. vol. 2. ISBN 3-642-69213-3.

ŠILINSKAS, B., VARNAGIRYTĖ-KABAŠINSKIENĖ, I., BENIUŠIENĖ, L., ALEINIKOVAS, M., ŠKĖMA, M. e BALIUCKAS, V., 2024. Evaluation of Mechanical Wood Properties of Silver Birch (*Betula pendula* L. Roth.) of Half-Sib Genetic Families. *Forests*, vol. 15, no. 5

SIMPSON, W.T., 1998. Specific Gravity, Moisture Content, and Density Relationship for Wood. . S.l.: s.n.

SVANBERG, I., SÖUKAND, R., ŁUCZAJ, Ł., KALLE, R., ZYRYANOVA, O., DÉNES, A., PAPP, N., NEDELICHEVA, A., ŠEŠKAUSKAITĖ, D., KOŁODZIEJSKA-DEGÓRSKA, I. e KOŁOSOVA, V., 2012. Uses of tree saps in northern and eastern parts of Europe. *Acta Soc Bot Pol*, vol. 81, no. 4, DOI [10.5586/asbp.2012.036](https://doi.org/10.5586/asbp.2012.036).

VALLADARES CONDE, A. e HERNÁNDEZ MOR, M., 2005. *Prontuario forestal*. 2ª ed. Madrid: Asociación y Colegio de Ingenieros de Montes. ISBN 84-609-4038-1.

VEGA-ALONSO, G., GONZÁLEZ-ROSALES, M., VEGA-ALONSO, P. e RODRÍGUEZ-SAN JOSÉ, A., 1993. Mejora genética de *Betula celtiberica* en Galicia. *Congreso Forestal Español. Ponencias y Comunicaciones*, vol. 2

VELLING, P., 1979. Wood density in two *Betula pendula* Roth progeny trials. *Folia Forestalia, Institutum Forestale Fenniae*, no. No. 416

VIGNOTE PEÑA, S., 2014. Principales maderas de frondosas de España. Características, tecnología y aplicaciones. En: publisher: Archivo Digital UPM. Informe Técnico - Monografía. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

VIGNOTE PEÑA, S. e MARTÍNEZ ROJO, I., 2005. *Tecnología de la madera*. 3ª. Madrid: Mundi-Prensa. ISBN 84-8476-263-7.

VIHERÄ-AARNIO, A. e VELLING, P., 2017. Growth, wood density and bark thickness of silver birch originating from the Baltic countries and Finland in two Finnish provenance trials. *Silva Fennica*, vol. 51, no. 4, DOI [10.14214/sf.7731](https://doi.org/10.14214/sf.7731).

VILLARINO URTIAGA, J. e RIESCO MUÑOZ, G., 1997. La relación diámetro de copa: diámetro normal en *Betula celtiberica* Rothm. & Vasc. *Actas del II Congreso Forestal Español. Mesa*. Pamplona: s.n., pp. 565-571. vol. 4.

VILLARINO URTIAGA, J.J., 1983. *El abedul en Galicia*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

VILLARINO URTIAGA, J.J., 2004. *Guía - Tratamientos silvícolas para a produción de madeira - Bidueiro*. Asociación forestal de Galicia. S.l.: s.n. ISBN 84-688-7913-4.

WAGENFÜHR, R. y WAGENFÜHR, A., 2022. *Holzatlas*. S.l.: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG. ISBN 3-446-46839-0.

WICKHAM, H., 2016. *Programming with ggplot2*. 2nd edition. Cham : Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-24275-0.

WIEMANN, M., 2021. Characteristics and availability of commercially important woods. En: General Technical Report FPL-GTR-282, *Wood Handbook Wood as an Engineering Material*. Madison, Wisconsin, Estados Unidos: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, pp. 48. ISBN 979-8-8463-2324-7.

WILLIAMSON, G. e WIEMANN, M., 2010. Measuring wood specific gravity... correctly. *American Journal of Botany*, vol. 97, no. 3

XUNTA DE GALICIA, 2021. *LEI 11/2021, do 14 de maio, de recuperación da terra agraria de Galicia*. [en liña]. 21 mayo 2021. S.l.: s.n. [consulta: 21 decembro 2024]. Disponible en: https://www.xunta.gal/dog/Publicados/2021/20210521/AnuncioC3B0-190521-0001_gl.html.

XUNTA DE GALICIA, 2024. Índice de Observación-MeteoGalicia. [en liña]. [consulta: 7 setembro 2024]. Disponible en: <https://www.meteogalicia.gal/observacion/inicio.action>.

ZALITIS, T., 2008. The analysis of silver birch (*Betula pendula* roth.) stands in state and private forests in Latvia. *Research for rural development: Annual 14th International Scientific Conference Proceedings, Jelgava, Latvia, 2008*. S.l.: Latvia University of Agriculture, pp. 146-150.

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*, vol. 29, no. 6, ISSN 1432-5225. DOI [10.1007/BF00194204](https://doi.org/10.1007/BF00194204).

ZOBEL, B. e SPRAGUE, J.R., 1998. *Juvenile wood in forest trees*. Berlin: Springer. Springer series in wood science, ISBN 3-540-64032-0.

ZOBEL, B.J. e VAN BUIJTENEN, J.P., 2012. *Wood variation: its causes and control*. S.l.: Springer Science & Business Media. ISBN 3-642-74069-3.



O bidueiro é unha destacada especie frondosa en Galicia, con gran importancia ecolóxica e económica. A pesar da súa prevalencia, existe unha falta de información detallada sobre as propiedades físicas da madeira de bidueiro galego. A presente investigación aborda este tema, realizando unha ampla análise de mostras recollidas en varias parcelas espalladas por Galicia.