



**NOVA**

NOVA SCHOOL OF  
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS E  
ENGENHARIA DO AMBIENTE

LILIANA ANTUNES OLIVEIRA

Licenciada em Engenharia do Ambiente

# IMPACTO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS EM ECOSSISTEMAS FLORESTAIS DE MONTANHA: O CASO DA SERRA DE LOUSÃ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA  
DO AMBIENTE

Universidade NOVA de Lisboa

Dezembro, 2024





# IMPACTO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS EM ECOSSISTEMAS FLORESTAIS DE MONTANHA: O CASO DA SERRA DE LOUSÃ

**Liliana Antunes Oliveira**

Licenciada em Engenharia do Ambiente

**Orientadora:** Maria Teresa Calvão Rodrigues,

Professora Associada, NOVA School of Science and Technology, Universidade NOVA de Lisboa

**Coorientadores:** Carla Pimentel

Investigadora Doutora, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa

## Júri:

**Presidente:** José Carlos Ribeiro Ferreira,

Professor Associado, NOVA School of Science and Technology, Universidade NOVA de Lisboa

**Arguentes:** Vicelina Milena Piteira Rebelo Barnabé de Sousa,

Investigadora Doutora, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa

**Orientador:** Maria Teresa Calvão Rodrigues,

Professora Associada, NOVA School of Science and Technology, Universidade NOVA de Lisboa

**Membros:** Carla Pimentel

Investigadora Doutora, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa



**Impacto das alterações climáticas em ecossistemas florestais de montanha:  
o caso da Serra de Lousã**

Copyright © Liliana Antunes Oliveira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*"Pois o Senhor é quem dá sabedoria, de sua boca procedem o conhecimento e o discernimento. "*

*Provérbios 2: 6*



## AGRADECIMENTOS

À minha orientadora por ser das mais pessoas mais acessíveis na faculdade e me ajudar sempre que precisei de alguma ajuda ao longo do meu percurso académico.

À minha co-orientadora pela ajuda prestada ao longo da minha dissertação e pelas dicas de melhorar a escrita e os tópicos nela relacionados.

Ao João Campôa, pela sua incansável ajuda e compreensão, sem a qual seria impossível realizar a tese.

Agradecimento à Eng<sup>a</sup> Lucília Mota e ao guarda-florestal Sr. Brito do ICNF por todo o apoio à realização do trabalho de campo na Serra da Lousã, e também à Quelvina Fortes pela ajuda durante a colheita das amostras dendrocronológicas.

À minha mãe, pelo apoio prestado ao longo do meu percurso académico, motivando-me a não desistir e a melhorar as minhas competências.

Ao meu namorado pela ajuda prestada.

Ao meu gato, Faísca, que foi a minha maior companhia durante a maior parte do tempo de escrita e aulas do tempo do COVID.

A todas as pessoas que me ajudaram, amigos, colegas, o meu grande obrigada. Sem os quais não seria possível terminar o meu curso



*"Each dream you leave behind is a part of your future  
that will no longer exist" Steve Jobs*



## RESUMO

As alterações climáticas estão a afetar de forma crescente os ecossistemas florestais de montanha, que são especialmente sensíveis devido às variações rápidas dos parâmetros climáticos nos gradientes altitudinais. A gestão eficaz e sustentável dos recursos florestais é essencial para garantir a preservação destes ecossistemas e um futuro equilibrado para as gerações futuras. Esta dissertação analisa a resposta de quatro espécies de árvores da Serra da Lousã (Cipreste de *Lawson*, Pinheiro-bravo, Pinheiro-larício e Pinheiro-silvestre) às alterações climáticas recentes, utilizando métodos dendrocronológicos e dendroclimatológicos para o período de 1965 a 2022.

Os resultados indicam que o Pinheiro-larício e o Pinheiro-silvestre são mais vulneráveis às mudanças climáticas, enquanto o Pinheiro-bravo demonstra maior resiliência, sugerindo que poderá ser uma espécie mais adequada para futuros programas de reflorestação. Estes resultados fornecem informações valiosas para a gestão e conservação das florestas de montanha portuguesas.

**Palavas chave:** Dendroclimatologia, Pinheiro-bravo, Pinheiro-silvestre, Pinheiro-larício, Cipreste de *Lawson*, alterações climáticas, clima, ecossistemas florestais de montanha.



## ABSTRACT

Climate change is increasingly affecting mountain forest ecosystems, which are particularly sensitive due to rapid variations of climatic parameters in altitudinal gradients. Effective and sustainable management of forest resources is essential to ensure the preservation of these ecosystems and a balanced future for the next generations. This dissertation analyzes the response of four tree species from the Serra da Lousã (Lawson cypress, Maritime pine, European Black Pine, and Scots pine) to recent climate changes, using dendrochronological and dendroclimatological methods for the period from 1965 to 2022.

The results indicate that European Black Pine and Scots pine are more vulnerable to climate changes, while Maritime pine shows greater resilience, suggesting that it may be a more suitable species for future reforestation programs. These findings provide valuable information for the management and conservation of Portuguese mountain forests.

**Keywords:** Dendroclimatology, Maritime pine, Scots pine, European Black Pine, Lawson cypress, climate change, climate, mountain ecosystems.



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Organização da dissertação .....	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>5</b>
2.1	Importância das florestas .....	5
2.2	Ecossistemas florestais de montanha .....	9
2.3	Influência das alterações climáticas nas florestas.....	12
2.4	Dendrocronologia e Dendroclimatologia .....	15
2.4.1	Princípios da dendrocronologia .....	17
2.5	Outros estudos.....	21
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>27</b>
3.1	Enquadramento e caracterização da área de estudo: Serra da Lousã .....	27
3.1.1	Clima .....	29
3.1.2	Altitude .....	30
3.1.3	Declive.....	32
3.1.4	Litologia .....	34
3.1.5	Exposição solar.....	36
3.1.6	Radiação solar .....	38
3.1.7	Uso e ocupação do solo.....	40
3.2	Métodos .....	43

3.2.1	Caraterização das espécies .....	43
3.2.2	Caraterização da evolução temporal da temperatura e precipitação.....	46
3.2.3	Recolha e Preparação das amostras .....	46
3.2.4	Obtenção da cronologia .....	49
3.2.5	Análise estatística.....	51
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>54</b>
4.1	Caraterização da evolução temporal da temperatura e precipitação .....	54
4.2	Correlação entre a cronologia e os dados climáticos .....	66
4.2.1	Pinheiro-larício.....	66
4.2.2	Pinheiro-bravo.....	67
4.2.3	Pinheiro-silvestre .....	69
4.2.4	Cipreste de <i>lawson</i> .....	70
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>72</b>
5.1	Conclusões .....	72
5.2	Limitações .....	74
5.3	Desenvolvimento futuro .....	75
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>76</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representatividade das várias classe de Uso do Solo em Portugal continental em 2015 (ICNF, 2019).....	7
Figura 2: Representatividade das espécies florestais (ICNF,2019) .....	8
Figura 3: Evolução das áreas totais por espécie (ICNF,2019).....	9
Figura 4: Principais zonas montanhosas (> 700 m altitude) do norte e centro de Portugal (Aguiar <i>et al.</i> , 2009).....	10
Figura 5: Esquemática do processo de formação do lenho (adaptado de Rathgeber <i>et al.</i> , 2016).....	16
Figura 6: Resultados da correlação e função resposta da análise realizada no cipreste em cada uma das zonas. (a) Glinna, (b) Drawsko, (c) Sieraków, (d) Wirty (Cedro <i>et al.</i> , 2021) .....	21
Figura 7: Correlação entre os anéis de crescimento e a precipitação e temperatura. 1,2,3,4 asterisco indica que a correlação é significativa (Nabais <i>et al.</i> , 2014) .....	23
Figura 8: Coeficientes da função resposta entre crescimento radial e dados do clima (temperatura e precipitação) do ano de abril anterior e do ano de setembro(Vitas, 2004) .....	24
Figura 9: Estabilidade temporal da função resposta, num período móvel de 30 anos. Os asteriscos indicam os coeficientes de resposta significativos (Stajić <i>et al.</i> ,2020). .....	25
Figura 10: Localização da Serra de Lousã .....	28
Figura 11: Classificação climática de Portugal (IPMA).....	29
Figura 12: Climograma da região em estudo de 1960 a 2022 com base nos dados da temperatura e clima obtidos no site <a href="https://climexp.knmi.nl/">https://climexp.knmi.nl/</a> .....	30
Figura 13: Altitude da Serra da Lousã elaborada com base num ficheiro em formato matricial com aproximadamente 27 m de resolução espacial (Shuttle Radar Topographic Mission, SRTM).....	31
Figura 14: Representatividade das várias classes de altitude .....	32
Figura 15: Declive (%).....	33
Figura 16: Representatividade das várias classes de declive .....	34

Figura 17: Litologia.....	35
Figura 18: Representatividade das várias classes de Litologia .....	36
Figura 19: Exposição de vertentes.....	37
Figura 20: Representatividade das várias classes de exposição de vertentes .....	38
Figura 21: Radiação solar global (WH/m2).....	39
Figura 22: Representatividade das várias classes de radiação solar global. ....	40
Figura 23: Ocupação e Uso do Solo (realizado em ArcGis com base na COS2022, DGT).....	41
Figura 24: Representatividade das classes de ocupação e uso do solo .....	42
Figura 25: Sítio de Importância Comunitária Serra da Lousã.....	43
Figura 26: Locais de amostragem (A e B).....	47
Figura 27: Localização das árvores amostradas no local B.....	48
Figura 28: 1) Sonda de Pressler; 2) Broca. Fonte: <a href="https://blog.uvm.edu/jpconstandendrochronology/in-the-field/">https://blog.uvm.edu/jpconstandendrochronology/in-the-field/</a> .....	49
Figura 29: Verrumada de Pinheiro - larício depois de montada, num suporte de madeira, e polida.....	49
Figura 30 : Identificação dos limites dos anéis de crescimento no programa <i>CooRecorder</i> .....	50
Figura 31: Esquema representativo dos passos <i>Rstudio</i> obtenção das séries .....	53
Figura 32: Precipitação anual (mm) para o período de 1901 a 2022 com a respetiva linha de tendência a laranja Fonte: <a href="https://climexp.knmi.nl/">https://climexp.knmi.nl/</a> .....	54
Figura 33: Temperatura média anual no período de 1901 a 2022 e respetiva linha de tendência. Fonte: <a href="https://climexp.knmi.nl/">https://climexp.knmi.nl/</a> .....	55
Figura 34: Quantidade de amostras e árvores por espécie em estudada .....	56
Figura 35: Série de anéis de crescimento para as 15 árvores de Pinheiro-larício na Serra de Lousã das 27 amostras medidas.....	58
Figura 36 : Série de anéis de crescimento para as 13 árvores de Pinheiro-bravo na Serra de Lousã das 25 amostras medidas.....	59
Figura 37 : Série de anéis de crescimento para as 15 árvores de Pinheiro-silvestre na Serra de Lousã das 29 amostras medidas. ....	59
Figura 38 : Série de anéis de crescimento para as 8 árvores de cipreste de Lawson na Serra de Lousã das 15 amostras medidas.....	60
Figura 39 : Incremento em área basal durante o período de vida de cada espécie.....	61
Figura 40 : Curva indexada para o Pinheiro-larício na Serra de Lousã.....	62
Figura 41 : Curva indexada para o Pinheiro-bravo na Serra de Lousã.....	63
Figura 42 : Curva indexada para o Pinheiro-silvestre na Serra de Lousã .....	63
Figura 43 : Curva indexada para o Cipreste de <i>lawson</i> na Serra de Lousã.....	64

Figura 44 : Correlação entre as cronologias e os dados climáticos das estações do ano durante o período de 1965 a 2022 do Pinheiro-larício. Uma e duas estrelas representam níveis de significância de 95% e 99%, respetivamente. Os meses descritos com (-1) significam os meses do ano anterior ao crescimento. ....	67
Figura 45 : Correlação entre as cronologias e os dados climáticos das estações do ano durante o período de 1965 a 2022 do Pinheiro-bravo. Uma ou duas estrelas representam uma significância de 95% e 99%, respetivamente. Os meses descritos com (-1) significam os meses do ano anterior ao crescimento. ....	68
Figura 46 : Correlação entre as cronologias e os dados climáticos das estações do ano durante o período de 1965 a 2022 do Pinheiro-silvestre. Uma e duas estrelas representam níveis de significância de 95% e 99%, respetivamente. Os meses descritos com (-1) significam os meses do ano anterior ao crescimento. ....	70
Figura 47 : Correlação entre as cronologias e os dados climáticos das estações do ano durante o período de 1965 a 2022 do Cipreste de <i>lawson</i> . Uma e duas estrelas representam níveis de significância de 95% e 99%, respetivamente. Os meses descritos com (-1) significam os meses do ano anterior ao crescimento. ....	71



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 : Dados da largura média dos anéis de crescimento por espécie.....	57
Tabela 2 : ANOVA para a largura média dos anéis de crescimento das 4 espécies .....	57
Tabela 3 : Teste de <i>Tukey</i> para a largura média dos anéis de crescimento .....	57
Tabela 4 : Indicadores estatísticos da padronização no <i>Rstudio</i> para cada espécie.....	64
Tabela 5: Área basal para cada uma das espécies obtidas no local de amostragem e respetivo erro padrão .....	4

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

Os ecossistemas florestais ocupam cerca de 31% da área terrestre (FAO, 2020) e oferecem uma ampla gama de serviços de ecossistema essenciais não só para o equilíbrio do planeta como também para o bem-estar humano.

O setor florestal em Portugal desempenha um papel fundamental na economia, no meio ambiente e no desenvolvimento sustentável. O último inventário florestal revela o domínio do uso florestal do solo em Portugal continental (36% do território) (ICNF, 2019). Este setor contribui com aproximadamente 3,2% do Produto Interno Bruto nacional (PIB) e cerca de 10% das exportações totais, gera emprego direto e indireto para milhares de pessoas, especialmente em áreas rurais, e inclui indústrias de elevado Valor Acrescentado. No entanto, este setor enfrenta desafios significativos com os incêndios, que têm impactos severos na economia e no ambiente, a predominância de monoculturas florestais (caso do eucalipto) o que levanta questões relacionadas com a biodiversidade e uso sustentável do solo e ainda dificuldades no ordenamento florestal.

As montanhas cobrem cerca de 25% da superfície do planeta e cerca de 39% da superfície emergida de Portugal continental, principalmente no norte e centro (Azevedo *et al.*, 2016). As zonas montanhosas são consideradas ambientes especiais por várias razões, relacionadas, principalmente, com a topografia, ecologia, economia e sociocultura. De fato estas áreas possuem características únicas que as diferenciam de outros tipos de paisagens. As montanhas abrigam uma biodiversidade única, com espécies adaptadas a condições, por vezes, extremas.

Estas áreas, em função da topografia e variação por vezes muito acentuada, numa curta distância, dos parâmetros ambientais, criam habitats diversificados, que não se encontram noutros locais. Muitos destes ecossistemas são considerados frágeis e têm elevado valor ecológico, dando um contributo essencial para a conservação da natureza.

As alterações climáticas têm uma influência significativa nas florestas em todo o planeta, afetando a sua fitossanidade, crescimento, biodiversidade e capacidade de fornecer serviços de ecossistema. Em Portugal, devido à relevância do setor florestal, essas mudanças são particularmente importantes. Assim, compreende-se que haja uma necessidade constante de

melhorar o planeamento e gestão das florestas para garantir maior produtividade e resiliência ambiental, por forma a assegurar a sua continuidade e manutenção da produtividade face a cenários climáticos futuros, sendo particularmente importante, neste contexto, a escolha das espécies arbóreas.

Os estudos dendrocronológicos podem identificar como as árvores responderam, no passado, a eventos climáticos extremos, como secas, ondas de calor, geadas ou períodos de chuva abundante (Hartl-Meier *et al.*, 2014a). Esta abordagem fornece dados críticos para modelar o impacto das mudanças climáticas futuras no crescimento das árvores, auxiliando na seleção de espécies mais resilientes. Este conhecimento é essencial para planear a floresta do futuro, através de uma abordagem sustentável, resiliente e inovadora.

Desta forma a biodiversidade é particularmente elevada no Norte de Portugal, pois o gradiente altitudinal elevado e consequente diversidade climática, resultam numa heterogeneidade de características físicas da região montanhosa (relevo, solo, geologia).

O aumento das temperaturas mínimas e máximas previstas nos principais cenários de alterações climáticas são preocupantes devido a potenciais impactos diretos sobre a ecologia das espécies associadas às zonas montanhosas do globo. Mudanças nos regimes de precipitação também estão previstas, podendo aumentar em certas zonas e diminuir noutras, como no caso de Portugal. Além disso, haverá um aumento da temperatura nos meses correspondentes às estações de primavera/verão (Assis, *et al.*, 2016). Isto poderá resultar na extinção de algumas espécies assim como a alteração na sua distribuição geográfica (Assis, *et al.*, 2016).

Em Portugal, a precipitação de maior intensidade ocorre nos meses de Inverno (outubro a fevereiro), sendo possível avaliar os efeitos das alterações climáticas na flora (Martins *et al.*, 2012).

As consequências das alterações climáticas incluem alterações do ciclo hidrológico. No caso de Portugal prevê-se uma diminuição da água disponível, o que é uma previsão geral para ecossistemas de climas de influência mediterrânica. Isto pode levar à mortalidade das árvores e a um declínio acentuado da vegetação existente (Lévesque, *et al.*, 2014).

As alterações climáticas afetam diferencialmente as espécies, levando, por exemplo, a um declínio de algumas e a alterações morfológicas noutras. No entanto, em certos casos, o crescimento das árvores pode ser beneficiado pela altitude, uma vez que a temperatura diminui e a disponibilidade hídrica aumenta. O estudo da dendrocronologia fornece importantes dados do que aconteceu no passado e permite comparar com dados atuais (Hartl-Meier *et al.*, 2014a).

Para avaliar o crescimento das espécies, nomeadamente, pinheiros de zonas com variações sazonais temperadas e mediterrânicas podem ser utilizados métodos dendrocronológicos como a medição de anéis de crescimento das árvores. Isto permite estudar eventos que tenham

ocorrido durante a sua formação, nomeadamente, a escassez hídrica, os incêndios, ou outras ocorrências naturais ou também de ações antropogénicas, isto é, com base no passado das árvores é possível prever os acontecimentos futuros através da dendrocronologia (Nabais *et al.*, 2014).

Para estudar as características do clima, condicionadas por altitude elevada, foram realizadas amostragens na serra de Lousã para apurar o crescimento e a adaptação climática das espécies de árvores a diferentes altitudes em zonas de montanha.

## 1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo avaliar a resposta das espécies arbóreas que ocorrem nas zonas montanhosas do centro do país às variações do clima, através da análise dendrocronológica dos seus padrões de crescimento e de séries climáticas. O objetivo final será inferir sobre a resiliência e adaptação destas espécies a futuros cenários climáticos e, consequentemente, a resiliência desses ecossistemas de montanha.

Para tal, foram estudadas 4 espécies florestais (coníferas) na Serra da Lousã: *Pinus pinaster* Aiton (Pinheiro-bravo), *Pinus sylvestris* Lineu (Pinheiro de Casquinha/Pinheiro silvestre), *Pinus nigra* Arnold, subsp. *larício* (Pinheiro-larício) e *Chamaecyparis lawsoniana* (Al. Murray) Parl. (Cipreste de *Lawson*/camaecíparis/cedro-do-oregon).

Esta dissertação pretende responder às seguintes questões:

- 1) Como será afetado o gradiente climático, nomeadamente respeitante à precipitação e temperatura, nas zonas de montanha do centro de Portugal continental face às alterações climáticas?
- 2) Qual das quatro espécies de coníferas terá maior probabilidade de sobrevivência e de desenvolvimento com maior vitalidade em função dos cenários climáticos futuros mais prováveis?

A resposta a estas questões é essencial para uma gestão mais eficaz dos ecossistemas florestais com a finalidade de fomentar uma floresta mais resiliente às alterações globais ou climáticas.

## 1.3 Organização da dissertação

O presente trabalho encontra-se organizado em seis capítulos:

**1. Introdução** –é descrito o enquadramento geral da presente dissertação, e da sua problemática central, que conduziu à definição dos objetivos. Apresenta-se, sumariamente, uma síntese da organização e dos conteúdos abordados no restante trabalho.

**2. Revisão da literatura** –procede-se à revisão da literatura que ajudará a compreender toda a temática abordada ao longo do trabalho. É feita uma descrição das espécies em estudo, da metodologia utilizada, do clima em Portugal, e quais os efeitos que as alterações climáticas nas árvores.

**3. Caracterização das áreas de estudo** –é feita uma caracterização das duas regiões amostradas.

**4. Metodologia** –é descrita toda a metodologia adotada ao longo do processo de trabalho, estando referidos os passos a obtenção dos sinais climáticos.

**5. Resultados e Discussão** –é realizada uma análise dos dados obtidos, onde se procede a uma explicação dos mesmos com base em estudos realizados.

**6. Considerações finais** –é feita uma conclusão do trabalho, onde se referem quais os impactos que o clima teve no crescimento das espécies estudadas, e qual a possível consequência das alterações climáticas na Serra de Lousã e nas espécies estudadas. São também dadas algumas sugestões para desenvolvimentos futuros na área florestal em Portugal.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Importância das florestas

Os ecossistemas florestais ocupam cerca de 4,06 mil milhões de hectares, correspondendo a cerca de 31% da área terrestre do planeta (FAO, 2020), no entanto, a contribuição da biomassa da vegetação florestal para o total da biomassa terrestre é muito superior, aproximadamente 85% (Ma *et al.*, 2021).

As florestas constituem pilares essenciais para a saúde ambiental e o bem-estar humano pois proporcionam um conjunto de serviços de ecossistema essenciais (Ranjan e Gorai, 2024):

- Absorção do dióxido de carbono da atmosfera;
- Apoio à biodiversidade;
- Prestação de serviços de ecossistema como a regulação do ciclo da água, a proteção do solo contra a erosão;
- Fornecimento de matérias-primas.

Os ecossistemas florestais desempenham um papel essencial no ciclo do carbono, ao absorver e armazenar dióxido de carbono atmosférico na folhagem, nas componentes lenhosas (ramos, tronco e raízes) e no solo (Benítez *et al.*, 2023). Harris *et al.* (2021) in Ranjan e Gorai (2024) estimaram que as florestas removem anualmente cerca de 16 mil milhões de toneladas de dióxido de carbono da atmosfera, o equivalente a metade do dióxido de carbono emitido pela queima de combustíveis fósseis. Estes valores revelam, de facto, a importância da vegetação florestal no ciclo do carbono.

As florestas são uma componente crítica da biodiversidade a nível mundial, uma vez que proporcionam habitat para mais de 80% das espécies terrestres (FAO and UNEP, 2020 in Ranjan e Gorai, 2024): 60 % das plantas vasculares, 80 % dos anfíbios, 75% das espécies de aves e 68% dos mamíferos (Xofis *et al.*, 2023).

As florestas são essenciais à sobrevivência da espécie humana (FAO and UNEP, 2020 in Ranjan e Gorai, 2024). Cerca de 300 a 350 milhões de pessoas vivem perto de florestas e dependem estreitamente delas para a sua subsistência, e mais de mil milhões de pessoas para obter emprego e rendimento (FAO, 2020 in Ranjan e Gorai, 2024). De facto, estes ecossistemas fornecem uma vasta gama de recursos e serviços, não apenas económicos, mas também ecológicos, culturais e estéticos.

Cerca de metade da área florestal mundial ainda está relativamente intacta e mais de um terço é floresta primária (FAO, 2020). No entanto, a desflorestação e a degradação das florestas continuam a ocorrer a um ritmo preocupante, o que contribui, significativamente, para a perda contínua de biodiversidade. Estima-se que, desde 1990, cerca de 420 milhões de hectares de floresta tenham sido perdidos através da conversão para outros usos do solo, principalmente agricultura, embora a taxa de desflorestação tenha diminuído ultimamente (FAO, 2024).

Em Portugal continental a floresta original seria dominada por espécies de *Quercus*. Esta matriz florestal foi reduzida e alterada ao longo do tempo, principalmente pelo uso agrícola e pastoril (Correia *et al.*, 2007). Em certas épocas a agricultura tornou-se o principal uso do solo, seguida pela floresta. A partir da segunda metade do século XX, após vários programas de reflorestação à escala nacional e do abandono da agricultura, a floresta voltou a ser a principal classe de ocupação do solo (Correia *et al.*, 2007). No entanto, a composição atual da floresta é muito diferente da original.

O Pinheiro-bravo, atualmente uma das espécies florestais com maior representatividade no continente, teve uma expansão relativamente recente. Foi, no final do século XIX, que, face ao desaparecimento da floresta de grande parte das serras do país, ocorreu uma viragem na política florestal, com a arborização das dunas do litoral e das serras do interior, tendo sido o Pinheiro-bravo seleccionado para esse fim (Correia *et al.*, 2007).

O último inventário florestal (Figura 1) indica que o uso florestal do solo representa o uso dominante, ocupando 36% do território, o que corresponde a cerca de 3,2 milhões de hectares (ICNF, 2019). Os matos e as pastagens têm uma representatividade de 31%, e a agricultura de 23%.

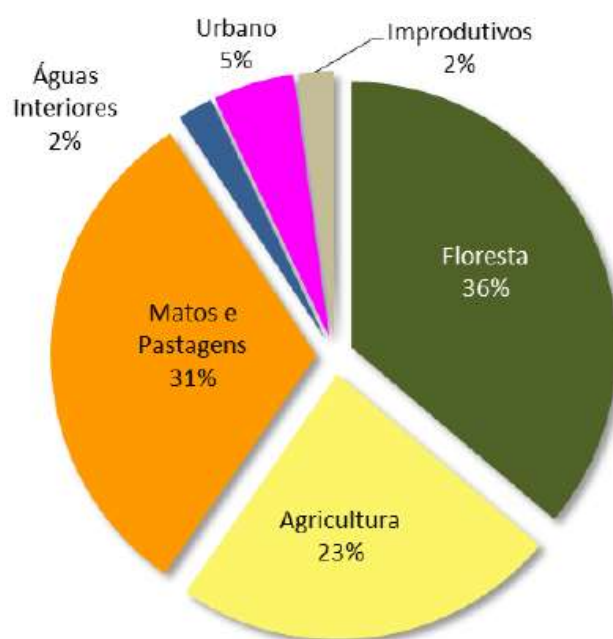


Figura 1: Representatividade das várias classe de Uso do Solo em Portugal continental em 2015 (ICNF, 2019)

A floresta do continente pode ser organizada em quatro grandes grupos (ICNF, 2019):

- 1) sistemas de folhosas perenifólias (“montados”, sobreirais e azinhais);
- 2) pinhais;
- 3) sistemas de folhosas silvo-industriais (eucaliptais);
- 4) sistemas de folhosas caducifólias (carvalhos, castanheiros e outras).

Os montados, sobreirais e azinhais são a principal classe, representando um terço da floresta. São ecossistemas florestais de uso múltiplo, que têm na produção de cortiça a sua principal função. Os pinhais, povoamentos de Pinheiro-bravo e pinheiro-manso, são a segunda formação florestal, sendo a classe que têm tido uma maior redução na área ocupada, principalmente resultante da diminuição da área de pinhais de Pinheiro-bravo, muito afetados pelos incêndios e pragas, apesar do aumento da área dos povoamentos de pinheiro manso. A 3ª classe de representatividade diz respeito a povoamentos silvo-industriais de folhosas (principalmente de eucalipto, cuja área tem vindo a aumentar. A classe com menor expressão corresponde a folhosas caducifólias (carvalhos, castanheiros e outras espécies) (ICNF, 2019).

No respeitante à representatividade em espécies consideradas isoladamente (Figura 2) verifica-se que o eucalipto é a espécie florestal que ocupa maior área (26%), seguida do sobreiro (23%) e do Pinheiro-bravo (22%). A floresta é maioritariamente constituída por espécies florestais autóctones (72%), correspondendo as resinosas a 30% (ICNF, 2019).

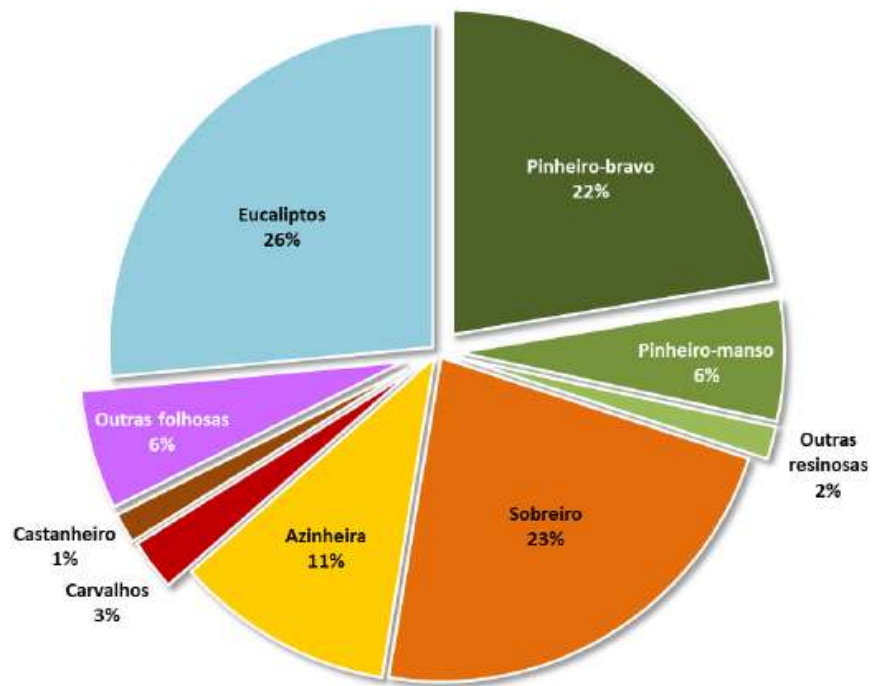


Figura 2: Representatividade das espécies florestais (ICNF,2019)

A posição relativa das 3 espécies com maior representatividade tem variado ao longo do tempo. Assim, a área ocupada pelo Pinheiro-bravo tem tido um decréscimo acentuado, a do eucalipto tem aumentado e a do sobreiro tem conhecido um ligeiro decréscimo.

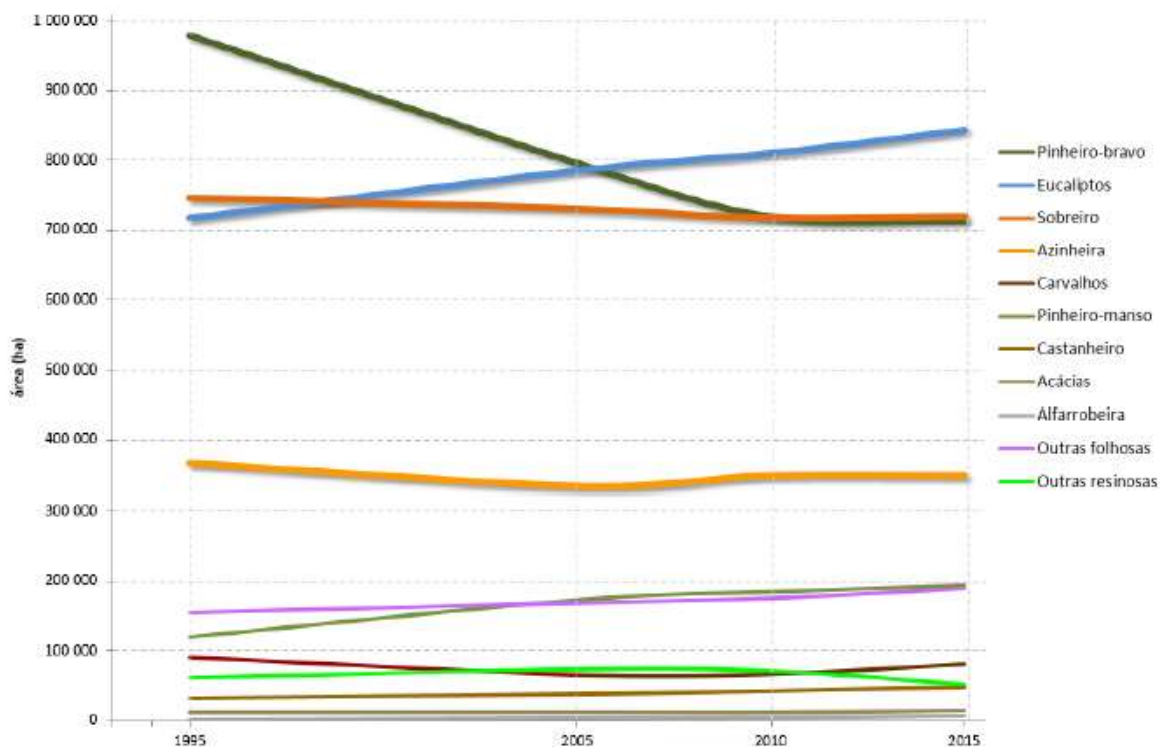


Figura 3: Evolução das áreas totais por espécie (ICNF,2019)

O setor florestal (Figura 3) é um setor de grande importância económica e social para Portugal, contribuindo com 3,2% do PIB nacional e representando 10% do comércio externo (AIFF, 2013; Mota e Vieira, 2008). Assim, compreende-se que a adaptação do setor florestal às alterações climáticas é essencial para assegurar sua resiliência e continuidade diante de cenários climáticos futuros adversos.

## 2.2 Ecossistemas florestais de montanha

As montanhas cobrem cerca de 25% da superfície do planeta (Kräuchi *et al.*, 2000). De acordo com Azevedo *et al.* (2016), as zonas montanhosas (classificadas com base na altitude e declive) ocupam cerca de 39% da superfície emersa de Portugal continental (cerca de 36140 km<sup>2</sup>). Relativamente a outra classificação de zonas montanhosas (zonas de cota superior a 700 m altitude) as zonas montanhosas constituem apenas 11% (Azevedo *et al.*, 2016). No entanto, qualquer que seja a definição adotada, as zonas montanhosas estão localizadas essencialmente na "metade" Norte de Portugal (Figura 4).

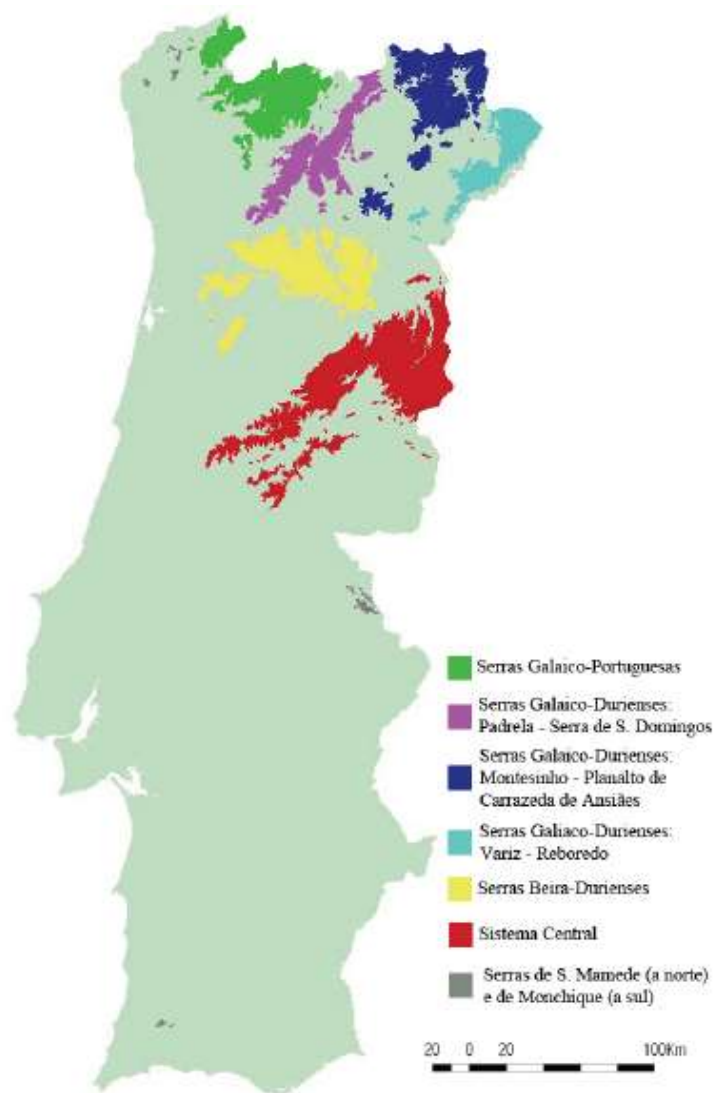


Figura 4: Principais zonas montanhosas (> 700 m altitude) do norte e centro de Portugal (Aguiar *et al.*, 2009)

As montanhas constituem sistemas complexos devido à orografia e possuem elevada particularidade do ponto de vista geomorfológico, biológico, socioeconómico e antropológico (Azevedo *et al.*, 2016; Sarmiento, 1986 in Loughlin *et al.*, 2018 ). Esta especificidade resulta da variação, por vezes muito acentuada numa curta distância, do declive e exposição de vertentes, o que produz, igualmente, uma variação abrupta nos parâmetros ambientais como, por exemplo, da temperatura ou precipitação e ainda da radiação solar (Azevedo *et al.*, 2016; Sarmiento, 1986 in Loughlin *et al.*, 2018). Desta forma, a temperatura média anual diminui com o aumento da altitude, os extremos de temperatura de inverno tornam-se mais acentuados, a amplitude térmica diária e anual aumentam assim como a variabilidade climática interanual (Aguiar *et al.*, 2009 in Azevedo *et al.*, 2016). Com o aumento da altitude ocorre um alargamento do período de geadas, um aumento na velocidade do vento e da quantidade de radiação ultravioleta (Aguiar *et al.*, 2009). A precipitação encontra-se muito dependente da disposição das

zonas montanhosas face aos ventos dominantes, mas, no geral, aumenta até à zona das nuvens, diminuindo a partir desse limite. No entanto, para a vegetação, mais do que a quantidade de precipitação efetiva, é a quantidade de água que fica retida no solo que é crucial, sendo este parâmetro dependente do tipo de solo, da topografia e da exposição de vertentes.

Nas zonas montanhosas o gradiente termoclimático é 600 a 1000 vezes mais forte do que o correspondente gradiente latitudinal, o que causa uma compressão altitudinal dos andares bioclimáticos e conseqüentemente dos ecossistemas característicos de cada andar (Korner e Ohsawa, 2005 in Aguiar *et al.*, 2009).

O reconhecimento da importância das montanhas ainda é limitado, essencialmente devido ao insuficiente nível de conhecimento referente aos ecossistemas presentes. Só a partir dos anos 70 século XX é que ocorreu a descentralização da rede de instituições de ensino superior o que propiciou o aprofundamento e consolidação do conhecimento sobre as zonas de montanhas em Portugal. No entanto, o estado atual de conhecimento ainda apresenta algumas lacunas (Azevedo, *et al.*, 2016).

As zonas de montanhas são frágeis uma vez que o declive acentuado dificulta o desenvolvimento do solo, favorece a erosão e o deslizamento de terrenos. No entanto, apesar das limitações ambientais referidas, os ecossistemas de montanha em Portugal têm uma elevada importância ecológica e socioeconómica, essencialmente pelo leque diverso de serviços de ecossistema que fornecem, muitos destes fundamentais para as populações, mesmo as que habitam longe das zonas de montanha, em zonas de planície.

Assim, estas zonas têm um papel fundamental na regulação do ciclo hidrológico, com conseqüências na qualidade, quantidade e regularidade dos recursos hídricos que fornecem (Aguiar *et al.*, 2009; Beniston *et al.*, 1997). De facto, as montanhas, por meio do arrefecimento e interferência na circulação das massas de ar da atmosfera, conduzem a níveis muito elevados de precipitação (nas encostas expostas aos ventos húmidos) dando origem a linhas de água de caudal muito elevado (Azevedo *et al.*, 2016).

No que diz respeito a serviços de aprovisionamento de salientar: a produção de materiais lenhosos; o fornecimento de alimentos, através da caça e pesca ou recolha de cogumelos e ainda o provimento de plantas aromáticas e medicinais. Como já referido, pode dizer-se que as zonas montanhosas contribuem para a produção de água, possibilitando serviços como a produção de energia hidroelétrica (Korner e Ohsawa in Azevedo *et al.*, 2016).

As zonas montanhosas fornecem ainda serviços culturais como recreio e turismo (Korner e Ohsawa, 2005 in Azevedo *et al.*, 2016).

As montanhas possuem elevada diversidade a vários níveis (ecossistemas, espécies e genes), devido essencialmente à compressão de gradientes ambientais, já referida, e ainda pelo isolamento (do ponto de vista funcional é como se de ilhas se tratasse) (Aguiar *et al.*, 2009). Assim, estas zonas apresentam normalmente mais biodiversidade do que as áreas planas envolventes, possuindo muitos endemismos (Aguiar *et al.*, 2009 in Azevedo *et al.*, 2016). A biodiversidade é particularmente alta no Norte de Portugal, pois o gradiente altitudinal acentuado e consequente diversidade climática, resultam numa heterogeneidade das características físicas da região montanhosa (relevo, solo, geologia) (Aguiar *et al.*, 2009). Muitas espécies endémicas têm frequentemente tolerância limitada a mudanças ambientais, o que contribui para a fragilidade destes ecossistemas.

## **2.3 Influência das alterações climáticas nas florestas**

As atividades humanas (emissões de gases de efeito estufa, desflorestação e alterações no uso do solo), causaram, desde a Revolução Industrial, alterações significativas na atmosfera, no meio terrestre, nos oceanos e na biosfera, conduzindo a grandes mudanças no planeta - alterações globais (de Wergifosse *et al.*, 2022).

O aumento da concentração de gases com efeito de estufa na atmosfera é considerado o principal fator das alterações climáticas, nomeadamente do aquecimento global. Estas alterações têm tido um grande impacto no meio ambiente, na economia e na sociedade, devido ao aumento da frequência e intensidade de fenómenos meteorológicos extremos.

As alterações climáticas afetam as atividades de vários sectores económicos como é o caso da agricultura e silvicultura (Nunes *et al.*, 2019b). De facto, o aquecimento global tem impactos acentuados nos ecossistemas florestais, alterando os fluxos hidrológicos, biogeoquímicos e energéticos, assim como a capacidade dos ecossistemas para manter a biodiversidade e as actividades económicas (Bonan, 2002 in Feng *et al.*, 2016).

Em algumas regiões a previsão consiste no aumento de secas severas, fato que poderá levar à redução da capacidade de retenção de água das florestas, afetando os rios e aquíferos que desta dependem. Por outro lado, noutras regiões poderão ocorrer chuvas intensas num curto período, o que poderá causar erosão do solo e destruição de vegetação.

O aumento das secas tem sido, de facto, um fator crítico, resultando num declínio significativo de muitas espécies. No entanto, também é possível observar a presença de espécies mais resistentes à seca, que demonstram uma capacidade de adaptação a estas mudanças climáticas (Lévesque *et al.*, 2014). Assim, têm sido observadas alterações no crescimento e na vitalidade das espécies arbóreas.

De facto, o aumento da temperatura, especialmente se associado a uma menor disponibilidade hídrica conduz, frequentemente, a uma menor resistência a pragas e doenças, ou seja, torna as florestas mais vulneráveis. Além disso, o aumento da temperatura conduz a mudanças nos ciclos fenológicos, podendo haver alterações na floração, frutificação e queda das folhas desregulando, conseqüentemente, a interação com a fauna, especialmente no caso de polinizadores e dispersores.

As mudanças climáticas provocam alteração na distribuição geográfica das espécies (Xofis *et al.*, 2023). Assim, com o aquecimento verifica-se a migração das espécies para andares altitudinais superiores ou latitudes mais frias em busca de condições climáticas favoráveis. Em alguns casos, poderá ocorrer a extinção local de espécies por migração ou falta de adaptação (Assis, *et al.*, 2016; Nunes *et al.*, 2019b).

Vários estudos indicam que na Europa as secas potenciaram a crescente mortalidade das árvores e alteração da vegetação em locais secos assim como a distribuição das espécies (Lévesque *et al.*, 2014; Galiano *et al.*, 2010; Rigling *et al.*, 2013).

Se não ocorrer um aumento da precipitação associado ao aumento de temperatura, o crescimento das árvores da Europa Central será afetado de acordo com o estudo de Lévesque *et al.* (2014), resultante do aumento da evapotranspiração e do défice hídrico. No entanto, o estudo de Savva *et al.* (2006) mostra que o aumento das temperaturas de verão resultará muito possivelmente num incremento do crescimento radial, principalmente nos locais de altitude elevada (acima de 1200 m), onde o crescimento dos anéis está mais fortemente ligado à variação climática, em comparação com os locais de baixa altitude (acima de 600 m) (Savva *et al.*, 2006; Makinen *et al.*, 2002b).

A resposta do crescimento dos anéis das árvores face às alterações climáticas fornece informação importante para avaliar a produtividade das florestas, a disposição das comunidades vegetais e a distribuição das espécies (Fan *et al.*, 2009). A altitudes elevadas, presume-se que o crescimento radial seja maior por ação do aquecimento global, como observado nos Alpes Europeus (Hartl-Meier *et al.*, 2014a; Paulsen *et al.*, 2000; Rolland *et al.*, 1998).

A existência de gradientes ambientais acentuados torna os ecossistemas de montanha mais vulneráveis às alterações climáticas do que os de planície. Nas planícies os gradientes ambientais são mais suaves, permitindo maior resiliência por parte dos seres vivos. Pelo contrário, nas zonas montanhosas, o clima, o solo e a vegetação podem mudar drasticamente numa distância de poucos metros. Se, por um lado, esta variação rápida cria nichos ecológicos, por outro lado, limita a capacidade de adaptação das espécies. Por exemplo, o aumento da temperatura média anual induz uma rápida subida em altitude da vegetação, podendo certas espécies deslocar-se para zonas inviáveis, com a sua eventual extinção (Theurillat e Guisan, 2001 in Aguiar *et al.*, 2009).

Prevê-se que as alterações climáticas venham a afetar os ecossistemas montanhosos, contudo, ainda existem incertezas consideráveis quanto à forma e amplitude em como estes serão afetados (Hartl-Meir *et al.*, 2014a). No âmbito destas preocupações, diversos autores têm desenvolvido estudos para elucidar as relações entre o crescimento radial das espécies arbóreas e o clima.

Nas montanhas centrais de Hengduan (sudoeste da China), Fan *et al.* (2009) verificaram que a relação crescimento radial e clima varia consoante os andares latitudinais no qual as espécies arbóreas habitam. Nas altitudes médias a altas, o desenvolvimento radial é favorecido por temperaturas de verão mais elevadas, enquanto a altitudes baixas a humidade edáfica é o parâmetro ambiental mais importante, principalmente na primavera. Nas montanhas Tatra, na fronteira entre a Polónia e a Eslováquia, (entre 800 e 15550 m altitude) Buntgen *et al.* (2007) observaram uma dependência em relação à temperatura nos andares mais elevados e em função do défice hídrico nos andares mais baixos.

Wang *et al.*, (2006) desenvolveram um estudo sobre o crescimento radial de uma conífera nas montanhas Tianshan, noroeste da China, com o objetivo de elucidar a dinâmica da linha arbórea em décadas recentes em relação à variabilidade climática. Encontraram associações fortes entre parâmetros climáticos e o padrão da largura dos anéis de crescimento do tronco das árvores. Assim, o aumento das temperaturas mínimas médias em fevereiro e agosto e o aumento da precipitação total em agosto e janeiro anteriores tiveram um efeito positivo na largura dos anéis de crescimento.

Nas regiões montanhosas o crescimento radial das árvores em altitudes mais elevadas mostra dependência da temperatura enquanto em altitudes mais baixas parece depender mais da precipitação (Fan *et al.*, 2009; Buntgen, *et al.*, 2007).

Em geral, os ecossistemas de montanha são mais sensíveis às alterações climáticas do que aqueles situados em zonas de planície. Por outro lado, estes ecossistemas de montanha podem contribuir significativamente para atenuar as alterações climáticas (Ranjan *et al.*, 2022a in Ranjan e Gorai, 2024).

## 2.4 Dendrocronologia e Dendroclimatologia

O crescimento radial é o processo através do qual as plantas lenhosas (árvores ou arbustos) aumentam o diâmetro do seu tronco, ramos e raízes ao longo do tempo. Este crescimento acontece devido à atividade do câmbio vascular, um tecido meristemático responsável pela génese de novos tecidos de condução (xilema/ tecidos mortos e floema/ tecidos vivos, responsáveis pelo transporte dos nutrientes e água) assim como pelo espessamento dos órgãos vegetais (Figura 5). O crescimento radial é um processo essencial para o desenvolvimento e sobrevivência das plantas lenhosas, permitindo que estas cresçam em diâmetro ao longo do tempo.

O processo de formação do lenho ou xilema resulta da diferenciação das células xilémicas, sendo possível distinguir-se (Rathgeber *et al.*, 2016):

- 1) Divisão de uma célula-mãe do câmbio numa nova célula-filha;
- 2) Expansão da célula formada e formação da parede primária;
- 3) Formação da parede secundária;
- 4) Lenhificação da parede secundária;
- 5) Morte celular programada, permanecendo apenas a parede secundária.

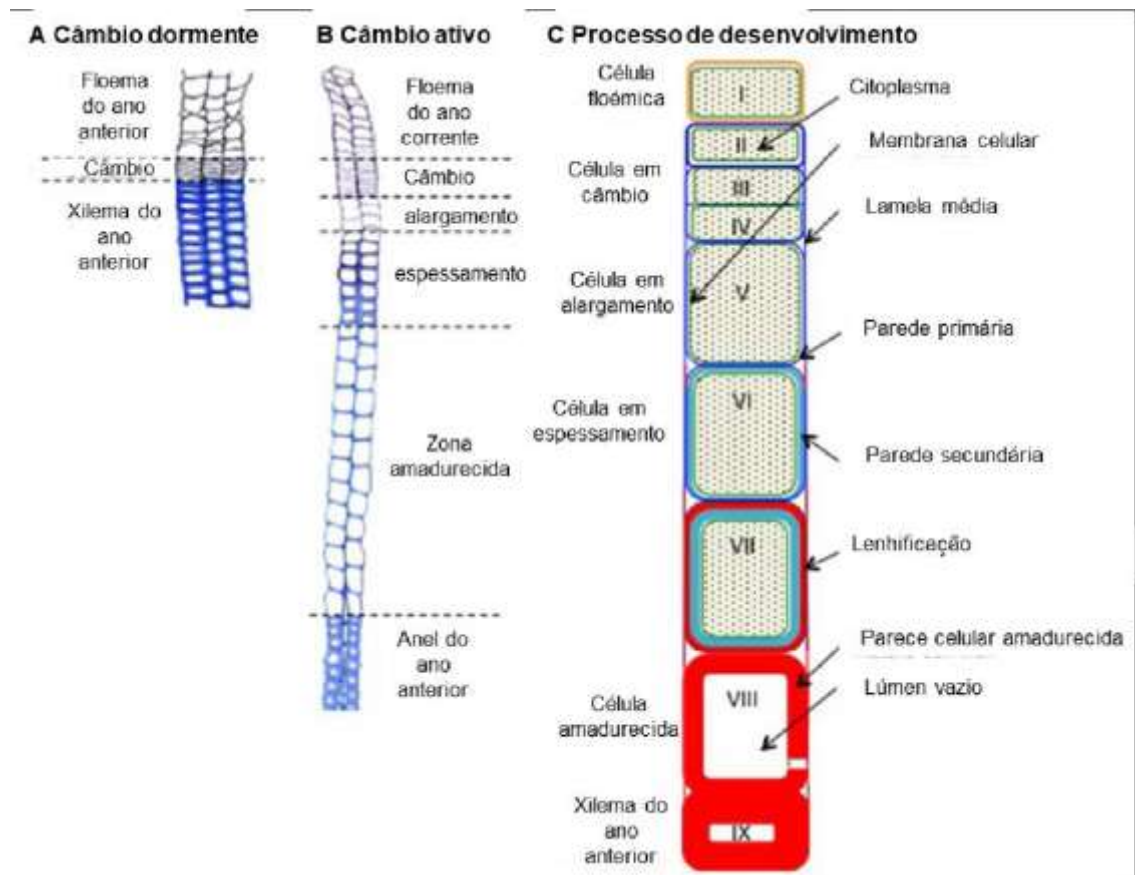


Figura 5: Esquematização do processo de formação do lenho (adaptado de Rathgeber *et al.*, 2016)

Nas regiões temperadas há alternância de períodos favoráveis/desfavoráveis à atividade merismática. Assim, os anéis de crescimento refletem a atividade sazonal do câmbio vascular, com períodos de crescimento (primavera/verão) e inatividade ou crescimento reduzido (outono/inverno). Anéis largos indicam crescimento rápido, estando associados a estações favoráveis, com abundância de água, temperaturas adequadas e boa disponibilidade de nutrientes. Pelo contrário, anéis estreitos indicam crescimento lento, estando associados a períodos de seca, temperaturas extremas, deficiência de nutrientes ou ainda danos (pragas, doenças, fogos).

Os anéis apresentam uma zona com coloração mais clara (células com parede celular mais fina) e outra com coloração mais escura (células com parede celular mais espessa). Portanto, cada anel de crescimento é como um "registro anual" da vida da árvore, fornecendo informação sobre o crescimento e as condições ambientais a que a árvore esteve submetida. A sequência de anéis corresponde ao "registro natural" do ritmo de crescimento da árvore ao longo do tempo, refletindo as diferentes condições a que a árvore esteve submetida ao longo da sua vida.

A dendrocronologia é a ciência que estuda os anéis de crescimento das árvores para obter informação sobre as condições a que as árvores estiveram submetidas ao longo do seu crescimento, nomeadamente avaliar a sua vitalidade e reconstruir eventos ecológicos e climáticos da região onde as árvores se encontram, assim como prever a resposta das árvores a possíveis cenários futuros resultantes das alterações globais.

Antes da formalização da dendrocronologia como área da ciência, há muito que se sabia que as árvores formavam anéis anuais que podiam fornecer informação sobre a sua idade e condições ambientais em que vegetam. A formalização ocorreu no início do século XX, com os trabalhos do astrónomo Andrew Ellicott Douglass que observou não só a variação na largura dos anéis das árvores, mas também que esta variabilidade era semelhante entre árvores. Para além disso Douglas sugeriu que o parâmetro responsável pelo fato de várias árvores numa mesma área apresentarem padrões semelhantes de variabilidade dos anéis era o clima. Foi assim que começou a desenvolver-se a sub-área da dendroclimatologia.

As vantagens da dendrocronologia, segundo Hughes (2002), estão relacionadas com a capacidade de datar os anéis das árvores com elevado grau de confiança; a existência, no mesmo ano, de padrões significativos de variabilidade comum nos anéis das árvores na mesma zona geográfica; o desenvolvimento de uma base de dados cronológica de anéis de árvores com grande dimensão (árvores com mais anos) e idade; a eficácia de modelos lineares simples de correlação entre a informação dos anéis e o clima; e uma compreensão crescente dos mecanismos que levam à variabilidade dos anéis.

As desvantagens da dendrocronologia (Hughes, 2002) estão relacionadas com o facto de que as cronologias dos anéis apenas refletem uma parcela da variabilidade climática, a sua resposta pode ser limitada a um dado período, algumas respostas podem não estar relacionadas diretamente à variável climática mensal ou até mesmo sazonal. Ainda, existe a dúvida de que no futuro os anéis das árvores irão formar-se do mesmo modo que no passado.

### **2.4.1 Princípios da dendrocronologia**

A dendrocronologia, tal como as restantes áreas das ciências, é regida por um conjunto de princípios que devem ser seguidos, caso contrário corre-se o risco de não se obterem dados fiáveis (Fritts, 1976; Grissino-mayer, 2017):

### **Princípio Uniformitarista**

O princípio uniformitarista baseia-se na ideia de estudar o passado e associar os acontecimentos passados ao futuro. Isto, no entanto, não indica que acontecimentos do paleolítico aconteçam no presente, mas que, com base no estudo das variações climáticas passadas, se possa aferir o futuro. As correlações encontradas podem ser facilmente conjugadas e assim se ter uma melhor previsão do que poderá ocorrer futuramente. Assim, os padrões de crescimento observados hoje podem ser usados para interpretar anéis de crescimento do passado.

### **Princípio dos fatores limitantes**

O princípio dos fatores limitantes refere-se ao facto de que um processo não pode ocorrer como era suposto devido a fatores limitantes que fazem com que os anéis de crescimento não se formem como teoricamente previsto. Pelo que dependendo de diferentes fatores, tais como o clima e o solo, as árvores poderão formar falsos anéis devido a esses acontecimentos. A variável ambiental mais limitante é a que mais influência terá na largura e padrão dos anéis.

### **Sensibilidade**

Este princípio estabelece que os locais mais úteis para estudos dendrocronológicos podem ser identificados baseando-se em raciocínios que identificarão séries de anéis de crescimento sensíveis ao parâmetro ambiental em estudo. Por outras palavras, árvores em ambientes mais extremos são mais vantajosas para a dendrocronologia do que árvores em ambientes mais estáveis que, muito provavelmente, irão produzir anéis de largura uniforme, dificultando a análise da cronologia. Uma inspeção dos anéis com maior detalhe, por exemplo com o auxílio de uma lupa, fornece pistas mais concretas em como o clima se torna um fator limitante ao crescimento. Logo, a largura dos anéis vai ser influenciada por estes fatores, e a medição do anel adjacente permite avaliar a sensibilidade média possibilitando saber outros aspetos relativos ao crescimento da árvore.

### **Datação cruzada**

O princípio da datação cruzada é um dos princípios mais importantes da dendrocronologia, permitindo o correto posicionamento temporal dos anéis. As larguras anuais dos anéis devem ser datadas e cruzadas entre todos os raios dentro de uma amostra de uma árvore e entre diferentes árvores num determinado povoamento, assim como nas árvores dos povoamentos vizinhos. As variações existentes entre cada anel são examinadas e combinadas com as amostras obtidas na região. Esta datação cruzada é possível uma vez que as espécies estão sujeitas às mesmas condições ambientais e as variações dos fatores limitantes entre cada árvores são semelhantes, permitindo assim avaliar as diferentes amostras e obter resultados muitos

semelhantes em cada amostra. Por exemplo, em anos onde houve seca intensa pode acontecer que a árvore não forme um anel de crescimento, logo avaliando esse acontecimento noutras amostras pode aferir-se a veracidade dessa suposição e constatar que nesse ano houve um período de seca muito evidente. Além disso, também é possível analisar a largura dos anéis e constatar que em certos anos estes são mais largos, correspondendo a períodos em que ocorreu maior precipitação. No entanto, caso ocorra uma baixa correlação entre os anéis ou uma disparidade muito alta entre as amostras, excluem-se essas amostras, de modo a obter-se resultados mais próximos da realidade, representativos daquele local de amostragem. Assim, a datação cruzada inclui uma correspondência de padrões entre largura de anéis entre espécies permitindo identificar os locais onde possam existir erros na medição ou locais onde tenham acontecido condições climáticas extremas ou de elevada precipitação. Logo, este princípio garante a precisão na identificação do ano exato em que cada anel foi formado e na criação de cronologias extensas.

### **Princípio da replicação**

Um determinado número de replicados deve ser examinado e datado em qualquer local de estudo para evitar que possam ocorrer falhas na datação. A replicação das medições permite obter resultados mais fiáveis porque a estimativa obtida irá corresponder a um menor erro, uma vez que grande parte do efeito dos fatores não climáticos que afetam indivíduos de local para local é reduzido com o processo de cálculo da média. A repetição ou replicação das amostras (mais de uma amostra), permite cruzar os dados mais facilmente e averiguar onde podem existir variações. Logo, quanto maior o número de replicações mais resultados confiáveis se irão obter para realizar as correspondências. Basicamente o princípio da replicação enuncia que a amostragem deve ser alargada ou seja, vários indivíduos da mesma espécie (e mais do que uma amostra por árvore) situados na região em estudo para confirmar os padrões de crescimento, reduzindo, desta forma, erros individuais causados por fatores locais, que não estão a ser investigados. Assim, o sinal do factor ambiental em estudo fica maximizado e a quantidade de "ruído" (ou seja, a variabilidade intra-árvore resultante de fatores locais) minimizada.

### **Princípio da amplitude ecológica**

O intervalo de condições ambientais em que uma espécie consegue sobreviver, crescer e reproduzir-se é conhecido como amplitude ecológica, determinando a sua distribuição geográfica. O princípio da amplitude ecológica refere-se à capacidade de cada espécie de árvore

responder, de forma específica, às condições ambientais do local onde se encontra. Espécies com amplitude ecológica ampla adaptam-se a uma variedade de condições ambientais, podendo ser encontradas em diferentes condições climáticas e edáficas. Pelo contrário, espécies com amplitude ecológica restrita crescem em condições ambientais específicas e limitadas, sendo mais sensíveis às mudanças nas condições ambientais. Ainda, as espécies são mais sensíveis a alterações do seu meio ambiente nos limites de latitude e altitude da sua área de distribuição, o que vai ter consequência no padrão dos seus anéis de crescimento. Por exemplo, algumas árvores crescem em terrenos e solos mais áridos, enquanto outras se desenvolvem em altitudes mais elevadas, onde há maior escassez de água. Fatores como o período de crescimento e a riqueza mineral do solo também influenciam o crescimento das espécies, incluindo o crescimento radial.

### **Princípio da seleção do local**

O princípio da seleção do local estabelece que os locais mais favoráveis para estudos dendrocronológicos podem ser identificados com base em raciocínios que identificarão séries de anéis de crescimento sensíveis à variável ambiental de interesse. Assim, a escolha correta do local maximizará a sensibilidade dos anéis de crescimento à variável escolhida e minimizará a sensibilidade face a outras variáveis. Portanto, a seleção do local é importante, uma vez que o fenótipo será semelhante onde os fatores climáticos de crescimento forem iguais. Assim, a seleção de árvores que apresentem fatores limitantes bem definidos permite estudar essas características com maior precisão, o que está relacionado com o princípio da seleção do local.

### **Princípio do crescimento agregado da árvore**

O crescimento de uma árvore é influenciado por múltiplos fatores que, ao interagirem, produzem o padrão final dos anéis de crescimento. O princípio do crescimento agregado de uma árvore afirma que a variação encontrada em qualquer série individual de anéis de crescimento pode ser "decomposta" em componentes e cada componente associada a variáveis ambientais de interesse. A padronização é um processo básico da dendrocronologia, baseado no princípio de que os anéis podem variar não só com as flutuações ambientais, mas também com mudanças intrínsecas a cada indivíduo ao longo do seu crescimento. Logo, é mais coerente estimar as mudanças sistemáticas na largura do anel associadas à idade e removê-las das medições. Esta correlação entre a largura do anel e geometria da árvore é conhecida como padronização, e os valores transformados são designados de índices de largura do anel. Os índices apresentam valores próximos de 1.

## 2.5 Outros estudos

Foram analisados outros estudos para poder comprovar posteriormente a veracidade dos resultados obtidos na dissertação realizada. A precipitação e temperatura foram as variáveis de estudo por apresentarem dados mais coerentes.

Para verificar a dendroclimatologia do Cipreste de *lawson* na Polónia (Figura 6) foi realizado um estudo com vários parâmetros em cidades diferentes da Polónia (Cedro *et al.*, 2021).

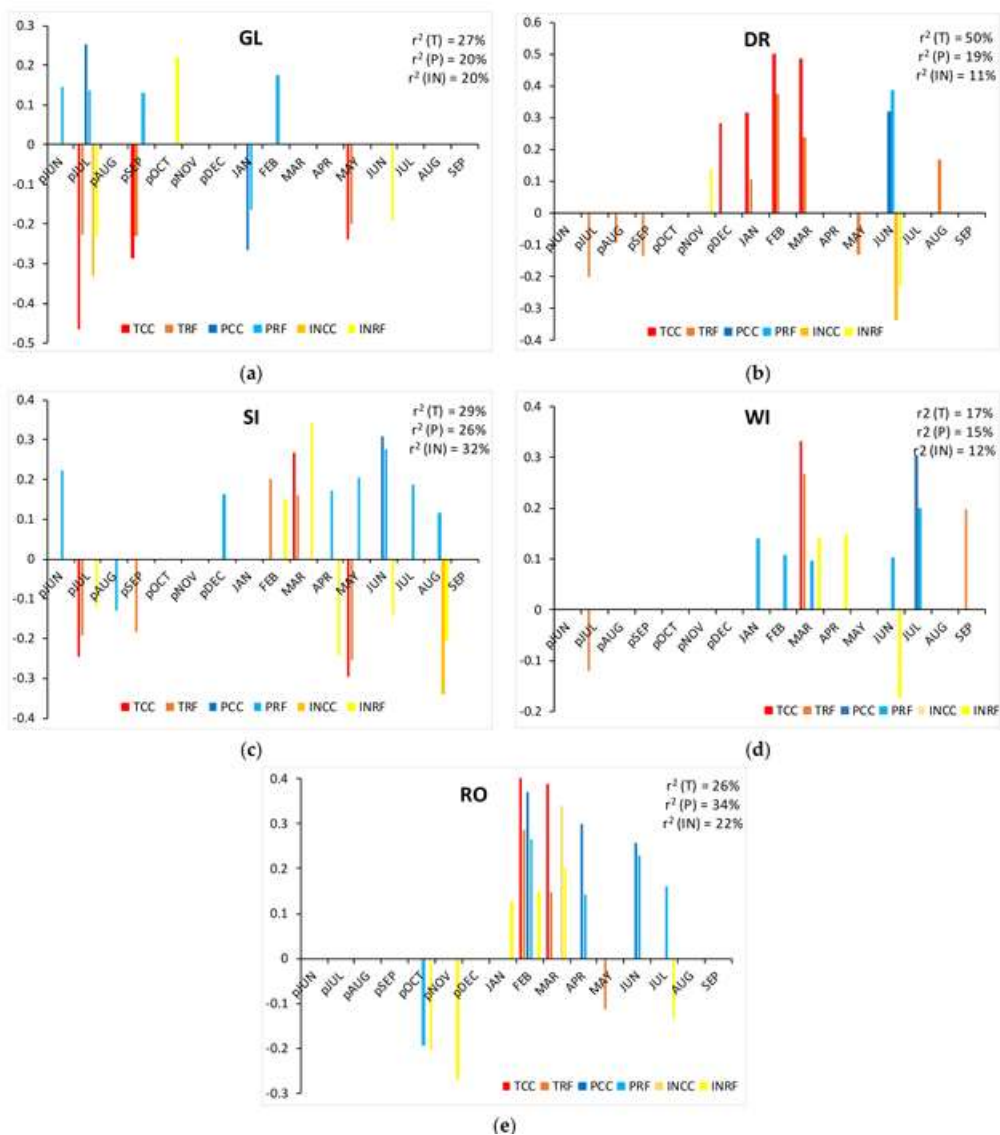


Figura 6: Resultados da correlação e função resposta da análise realizada no cipreste em cada uma das zonas. (a) Glinna, (b) Drawsko, (c) Sieraków, (d) Wirty (Cedro *et al.*, 2021)

Para se averiguar a dendroclimatologia do pinheiro-bravo (Figura 7) em Portugal foi realizado um estudo a nível nacional para se perceber a correlação entre temperatura e precipitação e como estes parâmetros influenciam os anéis de crescimento (Nabais *et al.*, 2014).

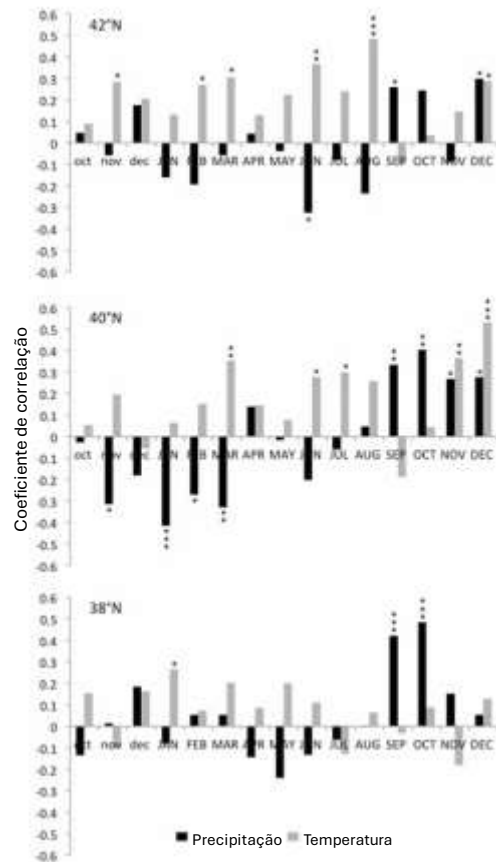


Figura 7: Correlação entre os anéis de crescimento e a precipitação e temperatura. 1,2,3,4 asterisco indica que a correlação é significativa (Nabais *et al.*, 2014)

No caso do pinheiro silvestre (Figura 8) foi realizado um estudo na Lituânia de 18 árvores e 34 séries de anéis de crescimento para avaliar a correlação entre a precipitação com a temperatura e tirar conclusões a respeito das características das espécies a nível das alterações climáticas (Vitas, 2004).

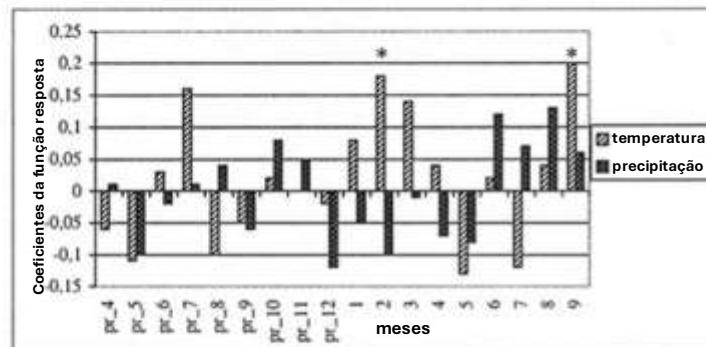


Figura 8: Coeficientes da função resposta entre crescimento radial e dados do clima (temperatura e precipitação) do ano de abril anterior e do ano de setembro (Vitas, 2004)

Com o objetivo de avaliar a correlação entre a temperatura e precipitação do Pinheiro-larício (Figura 9) na Sérvia foi realizado um estudo dendroclimático utilizando análise de correlação e função de resposta (Stajić *et al.*, 2020).

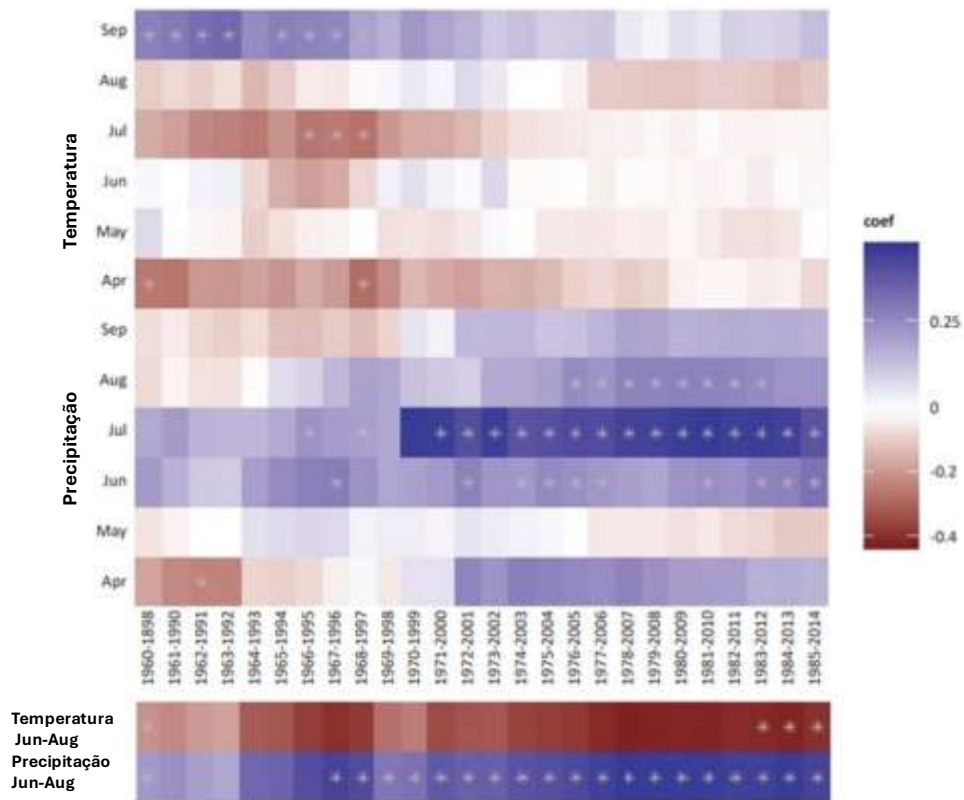


Figura 9: Estabilidade temporal da função resposta, num período móvel de 30 anos. Os asteriscos indicam os coeficientes de resposta significativos (Stajić *et al.*,2020).



## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Enquadramento e caracterização da área de estudo: Serra da Lousã**

O presente estudo foi desenvolvido na Serra da Lousã (Figura 10), que constitui a extremidade sudoeste da Cordilheira Central Portuguesa. Esta Serra espalha-se pelos concelhos de Castanheira de Pera, Figueiró dos Vinhos, Góis, Lousã, Miranda do Corvo, Penela e Pedrogão Grande, das atuais NUTS III de Coimbra e Leiria. A Serra de Lousã situa-se a uma grande altitude, ocupando 15 158 hectares, com declives elevados, encostas íngremes e linhas de água em zonas de difícil acesso (Carvalho & Alves, 2016).

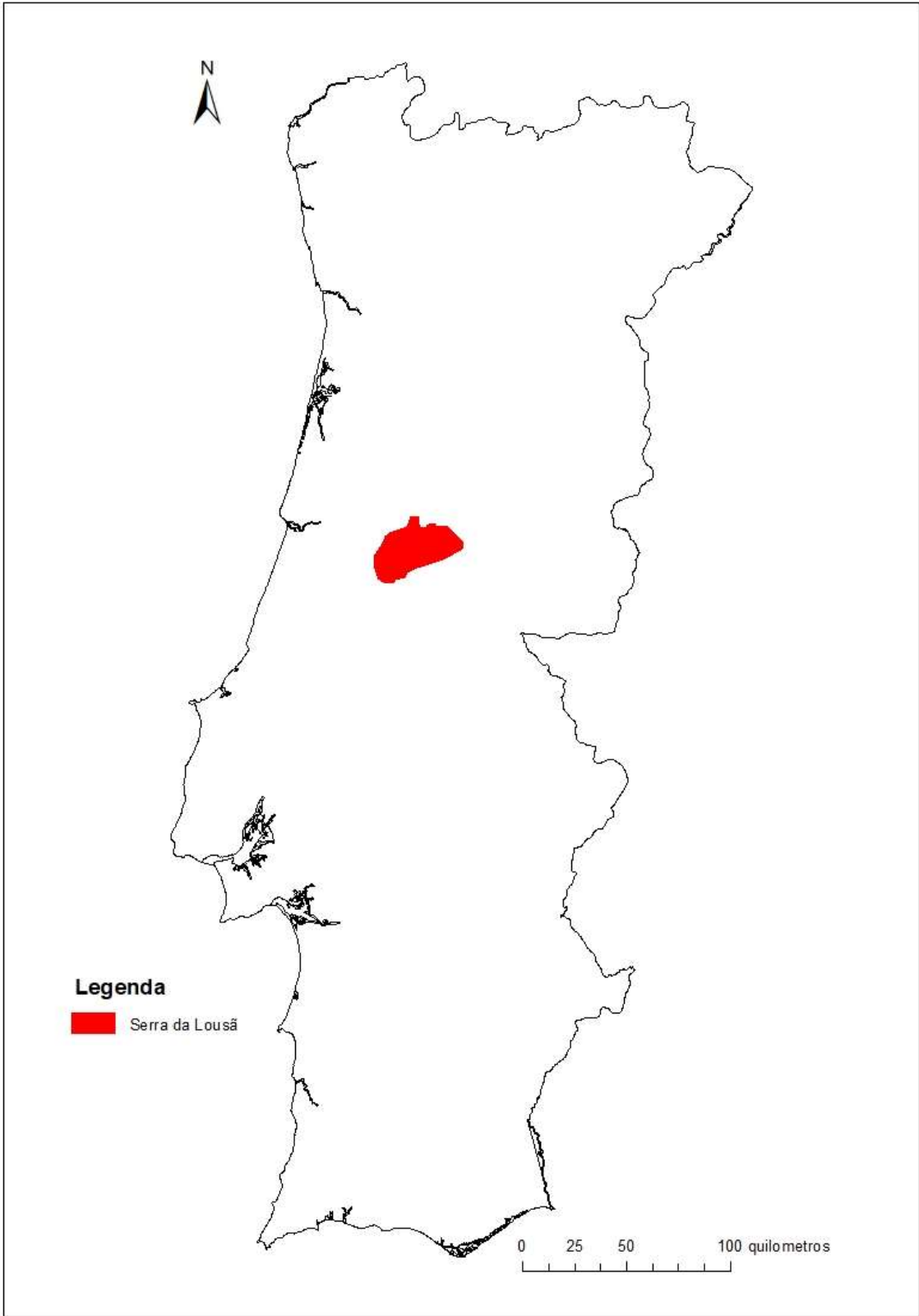


Figura 10: Localização da Serra de Lousã

### 3.1.1 Clima

Portugal situa-se aproximadamente entre a latitude 37° N e 42° N e a longitude 9.5° W e 6.5° W, no extremo sudoeste da Europa, localizado na zona de transição entre o anticiclone subtropical e a zona das depressões subpolares (Miranda *et al.*, 2006). Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, Portugal apresenta, maioritariamente, um clima temperado do tipo C, incluindo Csb e Csa (Figura 11):

Csb, clima temperado com Verão seco e suave, em quase todas as regiões a Norte do sistema montanhoso Montejunto-Estrela e nas regiões do litoral oeste do Alentejo e Algarve.

Csa, clima temperado com verão quente e seco nas regiões interiores do vale do Douro, assim como nas regiões a sul do sistema montanhoso Montejunto-Estrela

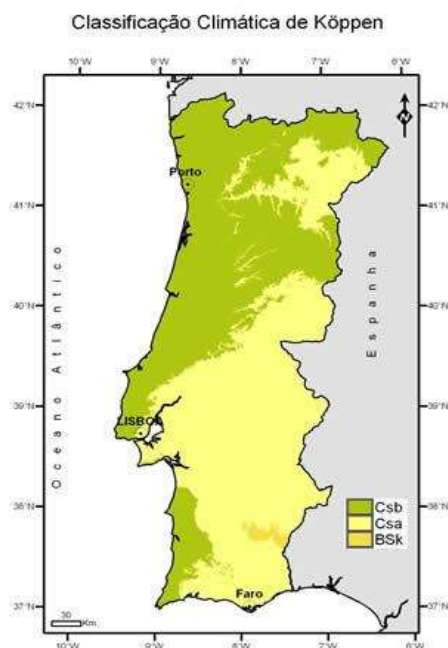


Figura 11: Classificação climática de Portugal (IPMA)

O diagrama termo-pluviométrico (elaborado com base nos dados da temperatura e clima de 1960 a 2022, obtidos no site <https://climexp.knmi.nl/>) da área de estudo (Fig. 12) revela um clima de características mediterrânicas, com dois períodos distintos: um período húmido mais fresco (do Outono à Primavera) e um período seco e quente, Verão.

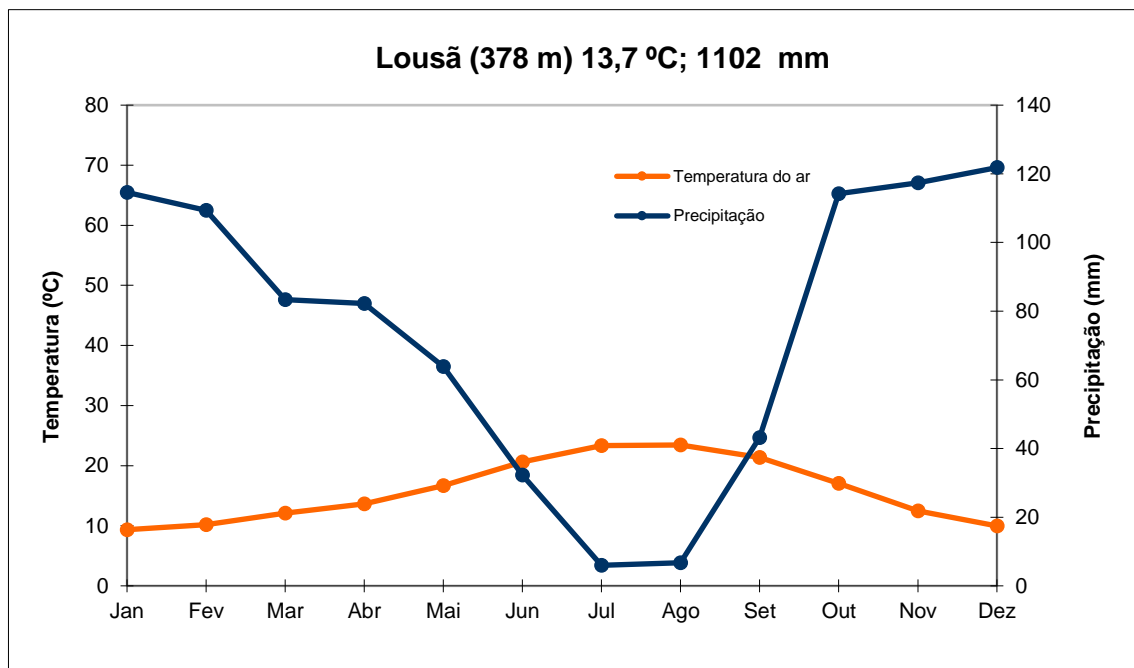


Figura 12: Climograma da região em estudo de 1960 a 2022 com base nos dados da temperatura e clima obtidos no site <https://climexp.knmi.nl/>

### 3.1.2 Altitude

O relevo (topografia) é um imprescindível indicador do funcionamento ecológico da paisagem e, por conseguinte, uma componente fundamental para o estudo e interpretação de um território. O relevo afeta vários parâmetros ambientais como por exemplo climáticos e edáficos (pH e a humidade), que controlam a distribuição das plantas (Zhang *et al.*, 2022).

No presente trabalho a base da análise topográfica consistiu num ficheiro matricial (raster) com valores da altitude (Modelo Digital de Terreno, MDT), com aproximadamente 27 m de resolução espacial, obtido pelo Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) e retirado do site U.S. Geological Survey (U.S. Geological Survey, em 22 Abril 2024). Este MDT foi cortado pelo limite da zona de estudo e usado para o cálculo dos restantes parâmetros topográficos no software ArcMap 10.4 (ESRI).

Na Figura 13 pode observar-se a altitude da Serra da Lousã que varia entre 120 m e cerca de 1200 m, os valores mais elevados localizando-se na zona norte.

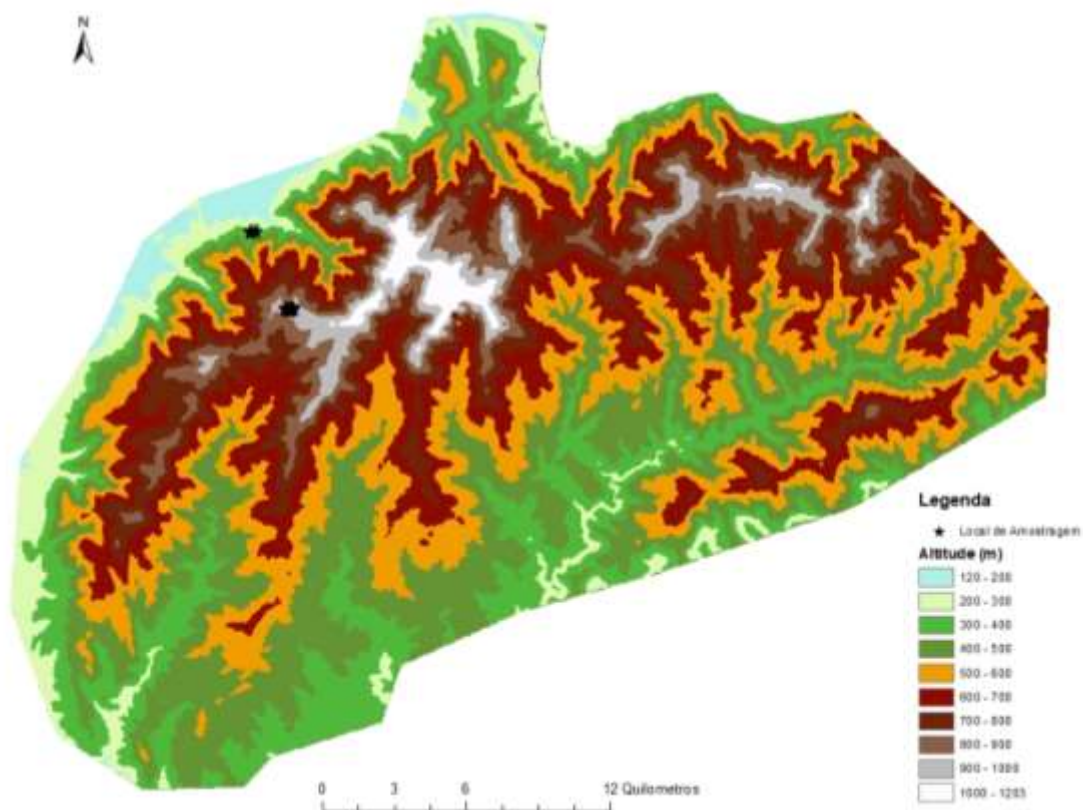


Figura 13: Altitude da Serra da Lousã elaborada com base num ficheiro em formato matricial com aproximadamente 27 m de resolução espacial (Shuttle Radar Topographic Mission, SRTM)

A maior parte da área de estudo (cerca de 43%) situa-se entre 400-600 m de altitude (Figura 14).

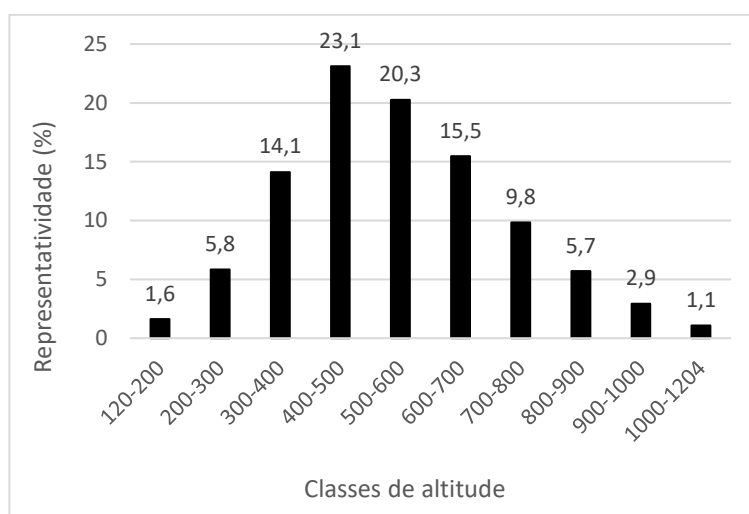


Figura 14: Representatividade das várias classes de altitude

### 3.1.3 Declive

O declive é uma das variáveis fundamentais para os estudos sobre qualquer tema relacionado com a morfologia do território, uma vez que é o principal elemento restritivo aos processos físicos e às atividades humanas. O declive foi elaborado a partir do ficheiro em formato matricial da altitude. Na Figura 15 encontra-se representado o declive reclassificado em 6 classes (valores iniciais de 0-25%).

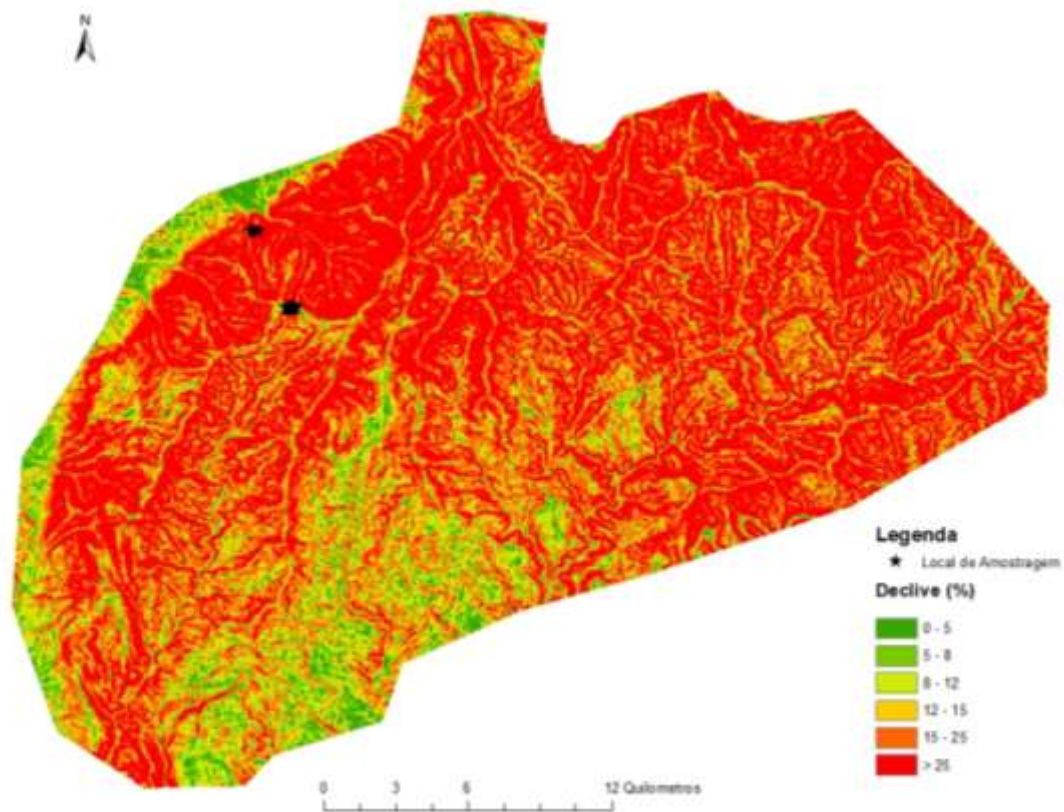


Figura 15: Declive (%)

A maior parte da área de estudo (cerca de 46%) tem declive >25% (Figura 16). Para estes valores tão elevados do declive o uso do solo recomendado é florestal, por forma a conseguir-se prevenir os processos erosivos.

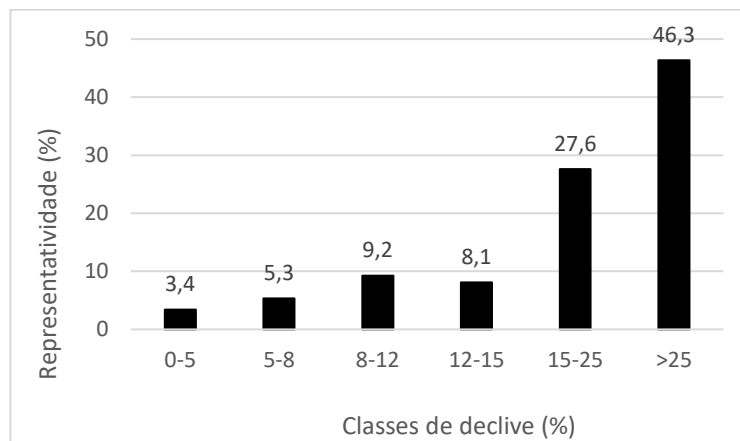


Figura 16: Representatividade das várias classes de declive

### 3.1.4 Litologia

Segundo a Carta Litológica do Atlas Digital do Ambiente (Atlas do Ambiente Digital, 2019) domina, na área de estudo (Figura 17), a classe correspondente a “Xistos, grauvaques (Complexo xisto-grauvaquico)” que ocupa cerca de 86% da área (Figura 18). Trata-se de uma litologia que dá origem a solos pobres, de natureza ácida, extremamente suscetível à erosão pela sua impermeabilidade. Esta é mais uma razão para a ocupação do solo consistir preferencialmente em floresta, principalmente floresta de proteção.

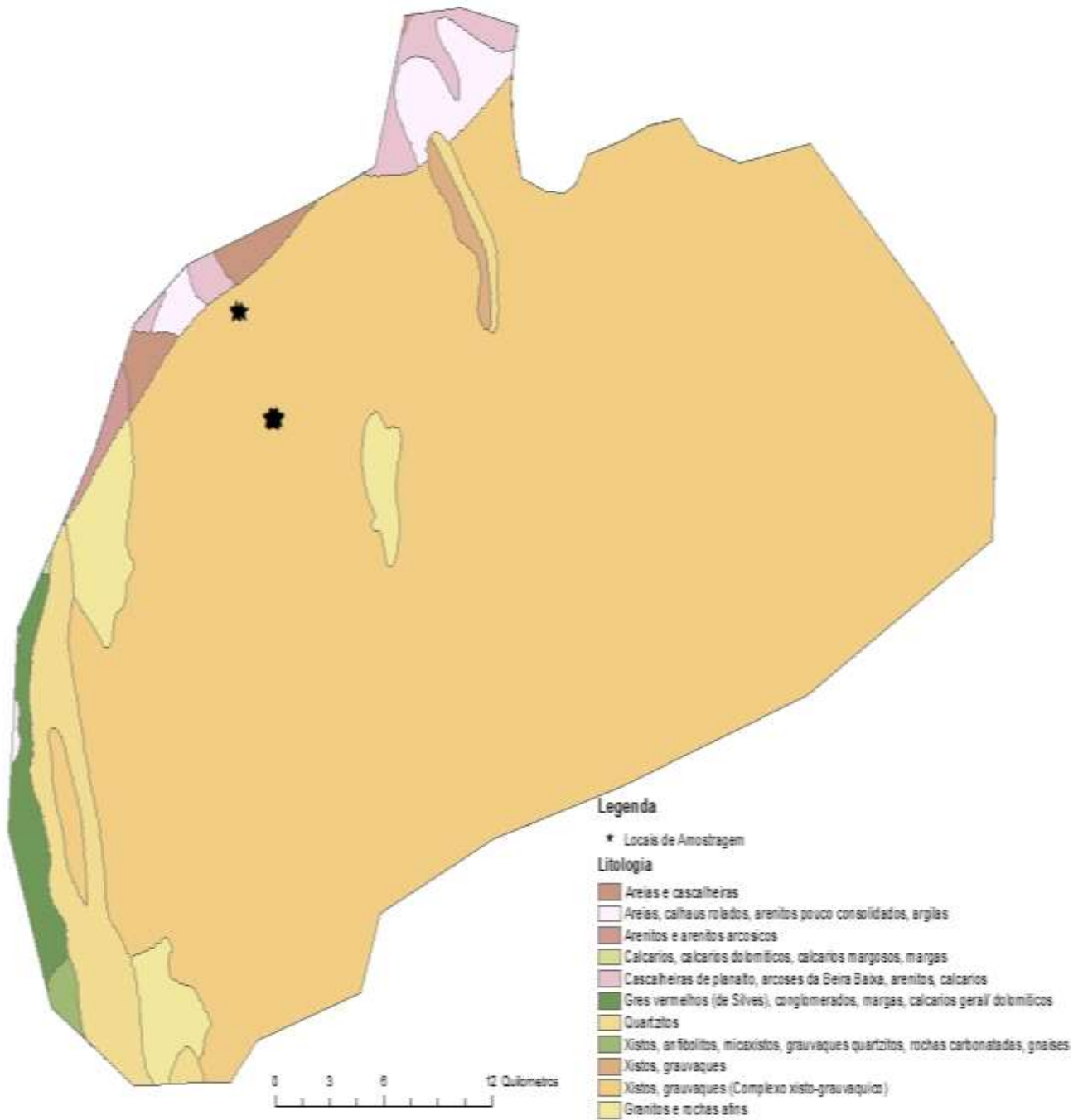


Figura 17: Litologia

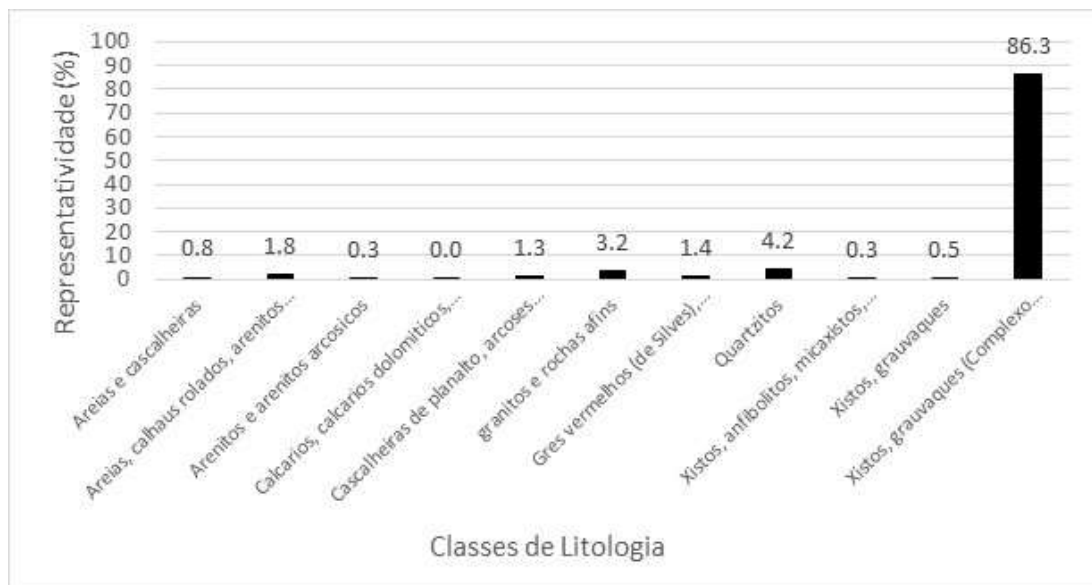


Figura 18: Representatividade das várias classes de Litologia

### 3.1.5 Exposição solar

A exposição de vertentes assume grande significado ecológico, pois determina diretamente a radiação solar recebida e, portanto, a temperatura e a humidade do solo e, consequentemente, o tipo de ocupação vegetal. Assim, com base no ficheiro em formato matricial (*raster*) da altitude foi determinada a exposição de vertentes, tendo os valores sido posteriormente reclassificados em cinco classes (Figura 19).

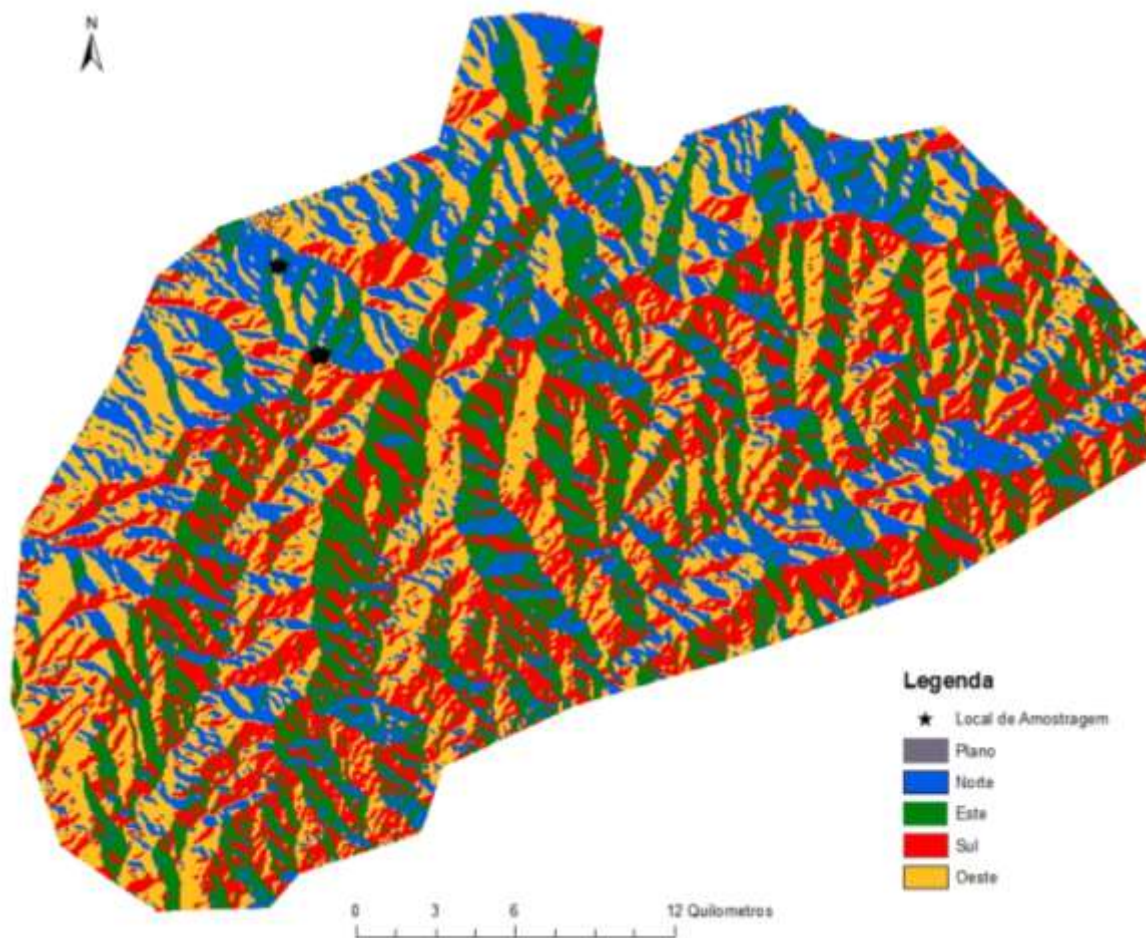


Figura 19: Exposição de vertentes

A classe com maior representatividade corresponde à exposição Oeste (Figura 20). A classe correspondente à planície (plano) tem representatividade muito baixa.

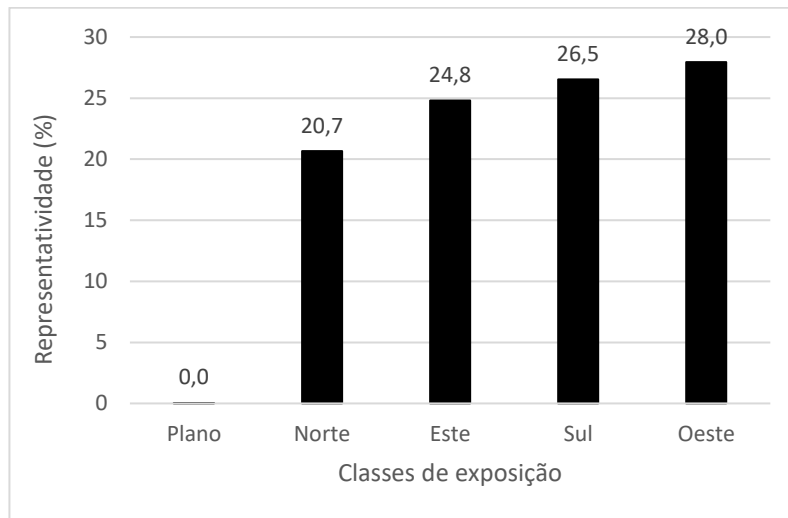


Figura 20: Representatividade das várias classes de exposição de vertentes

### 3.1.6 Radiação solar

A radiação solar recebida num determinado local está muito dependente da exposição desse local, contudo é também influenciada pelo contexto de elementos presentes na paisagem como é o caso de colinas/montanhas que causam ensombramento. Assim, foi também calculada, no ArcMap, a quantidade total de radiação solar (irradiação) recebida, em cada local, no ano de 2024. A radiação é expressa em Wh/m<sup>2</sup>, tendo sido posteriormente reclassificada em 6 classes (Figura 21).

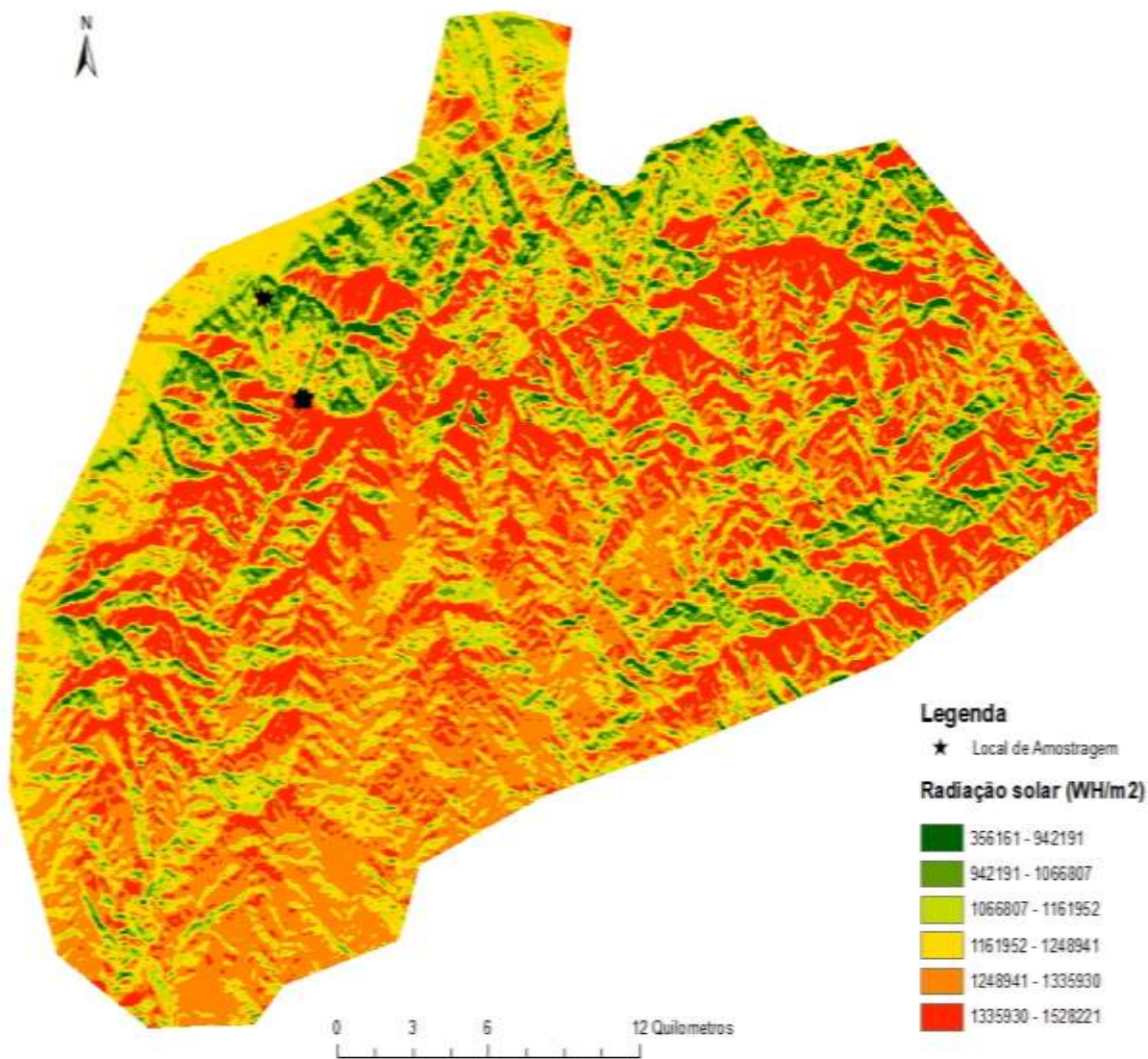


Figura 21: Radiação solar global (WH/m<sup>2</sup>)

Pode observar-se que as classes de radiação mais representativas (Figura 22) correspondem aos mais elevados valores da radiação solar.

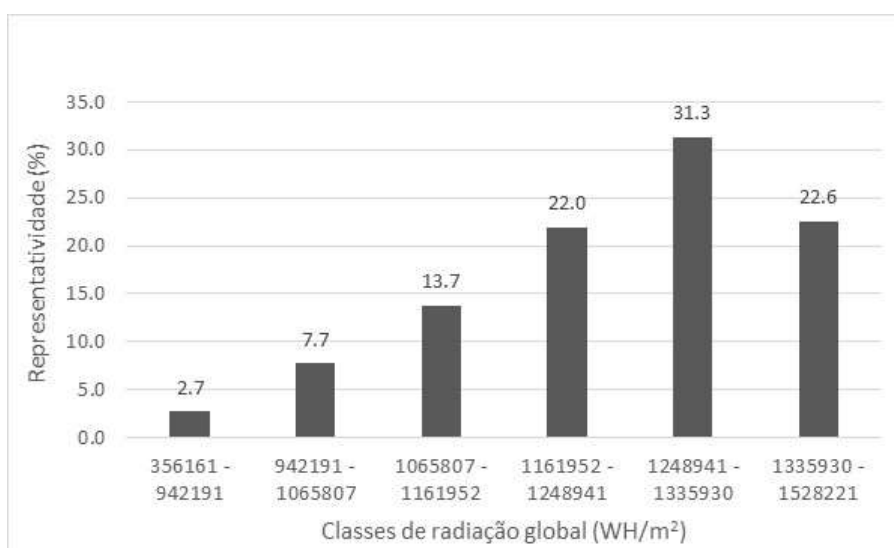


Figura 22: Representatividade das várias classes de radiação solar global.

### 3.1.7 Uso e ocupação do solo

A Figura 23 apresenta a Ocupação do Solo correspondente ao ano de 2022 (COSc2022, DGT).

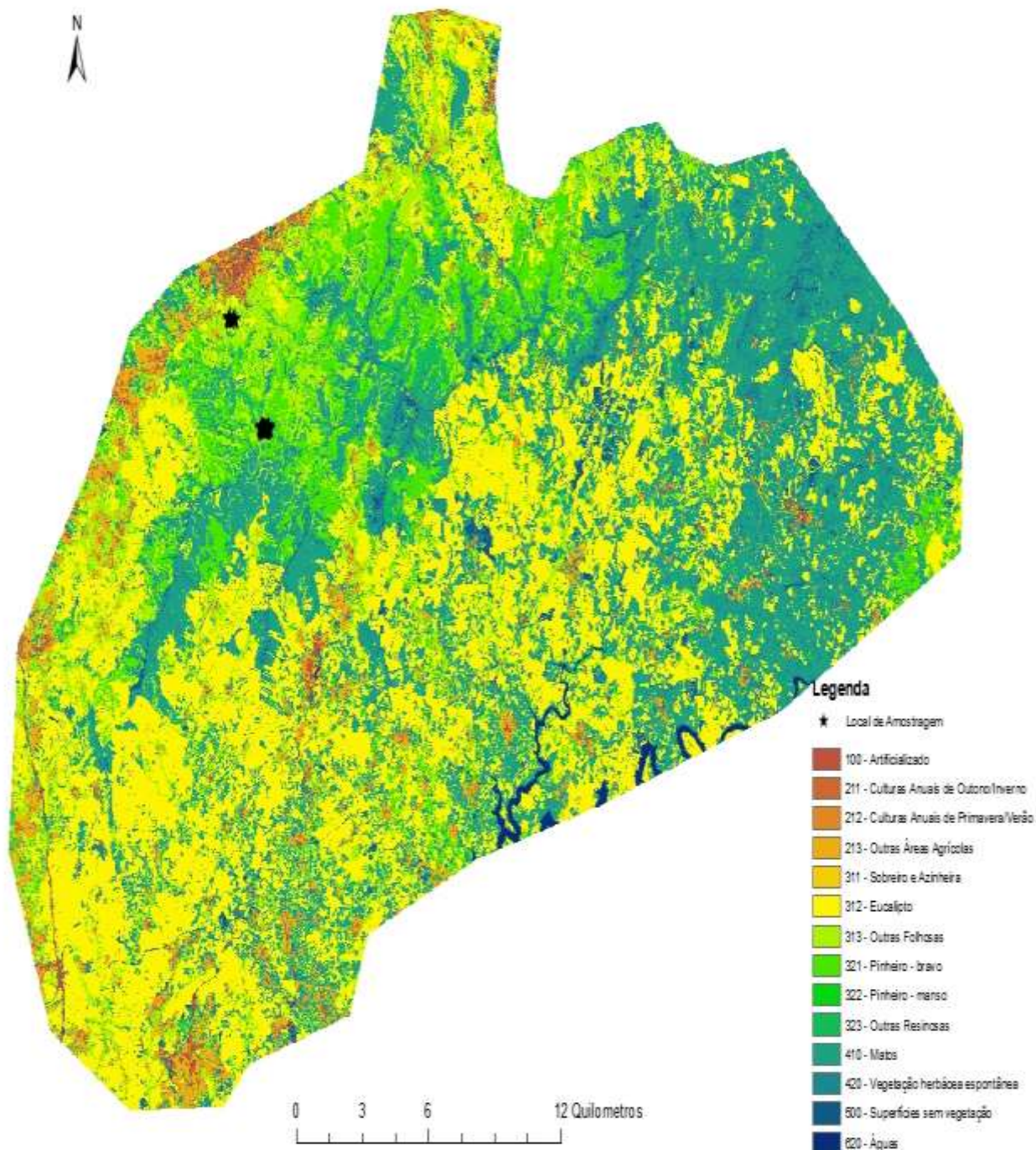


Figura 23: Ocupação e Uso do Solo (realizado em ArcGis com base na COS2022, DGT)

A classe dominante corresponde a eucaliptos (Figura 24) seguida de matos. Estas 2 classes têm uma representatividade de cerca de 67%.

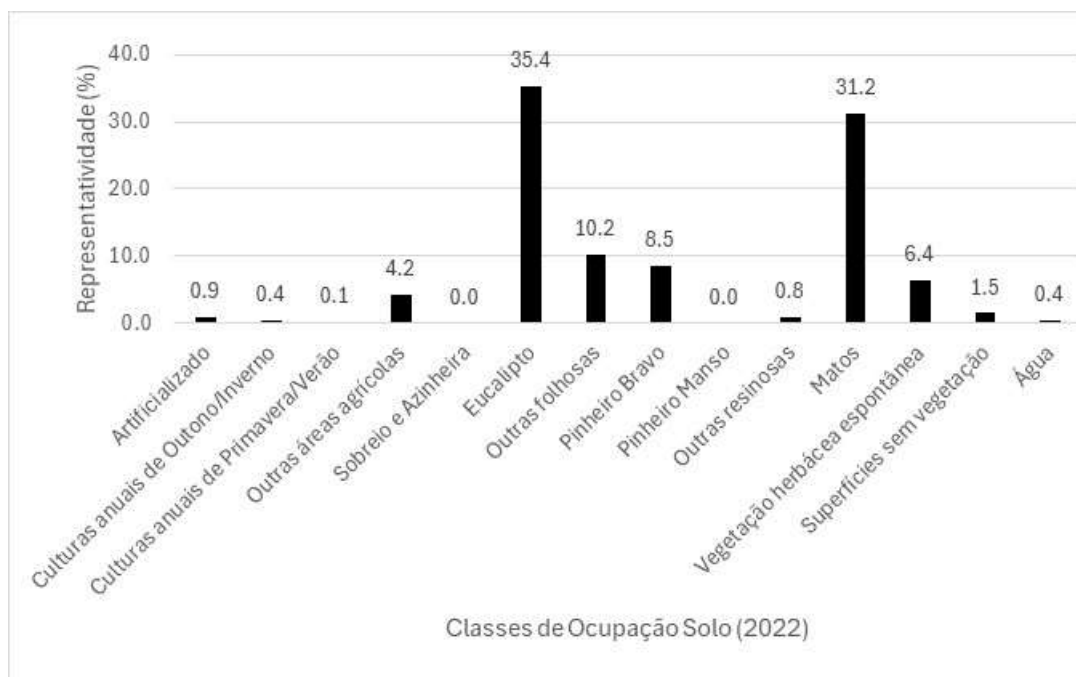


Figura 24: Representatividade das classes de ocupação e uso do solo

A área de estudo abrange o Sítio de Importância Comunitária (SIC) Serra da Lousã (Figura 25), que protege habitats importantes. O sítio Serra da Lousã (PTCON0060) foi incluído na Lista Nacional de Sítios através da Resolução do Conselho de Ministros n.º 76/00, de 5 de julho e reconhecido como Sítio de Importância Comunitária (SIC) pela Decisão da Comissão n.º 2006/613/CE, de 19 de julho, que adota, nos termos da Diretiva 92/43/CEE, do Conselho, a lista dos SIC da região biogeográfica mediterrânica. A sua publicitação como SIC foi efetuada pela Portaria n.º 829/2007, de 1 de agosto.

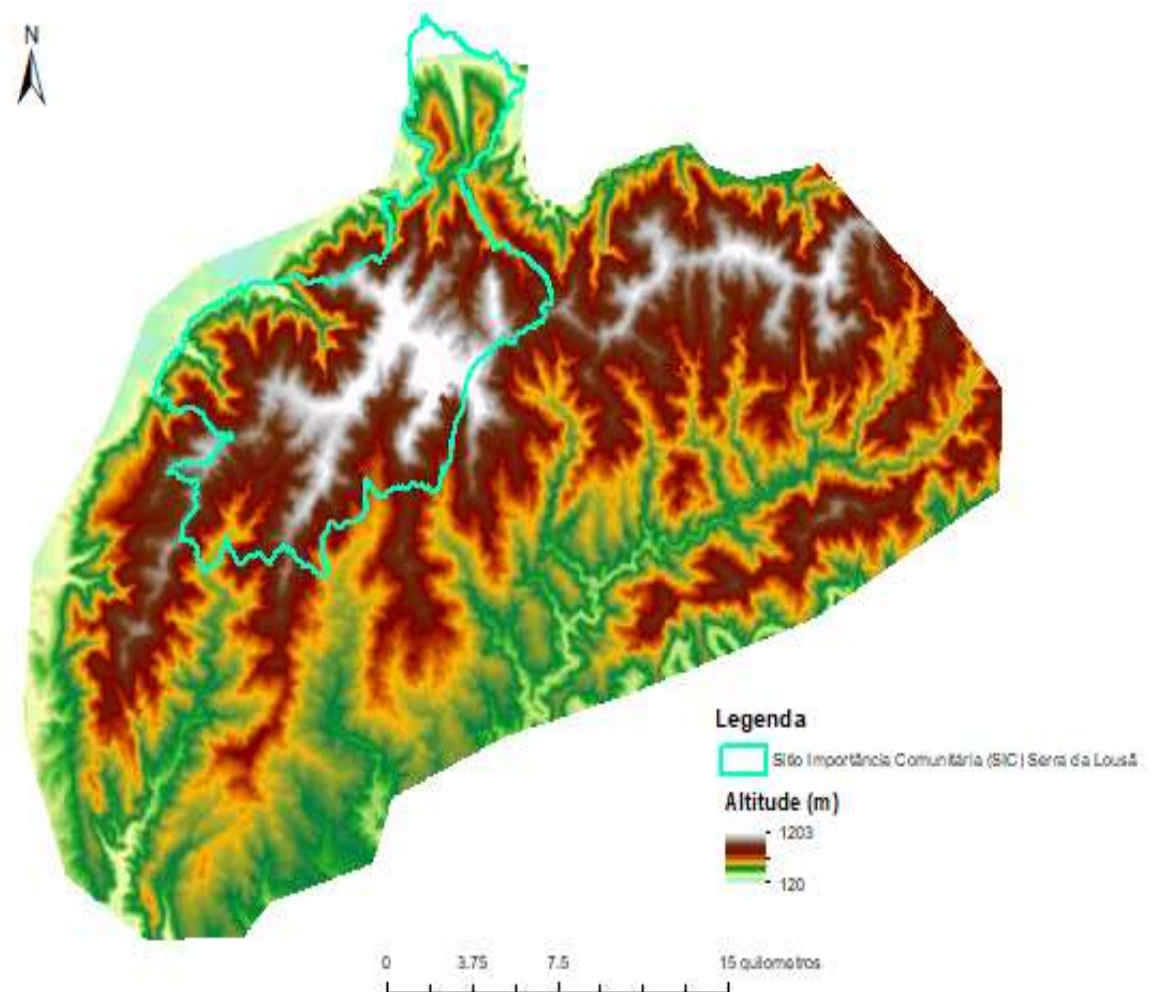


Figura 25: Sítio de Importância Comunitária Serra da Lousã.

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Caracterização das espécies

Para o presente estudo foi selecionada a serra de Lousã pois esta serra constitui a extremidade sudoeste da Cordilheira Central Portuguesa, ocupando, assim, uma posição geográfica de charneira entre o clima temperado e mediterrânico. De facto, a sul desta cordilheira, globalmente a Temperatura toma valores mais elevados e a Precipitação Anual valores mais baixos, o que se vai refletir na distribuição de muitas espécies.

#### 3.2.1.1 Pinheiro-bravo

O Pinheiro-bravo é uma conífera endémica da parte ocidental da Bacia Mediterrânica, sendo uma das espécies arbóreas mais abundantes nesta região (Vinãs *et al*, 2022). A

temperatura média anual da sua área de distribuição situa-se entre 13 °C-15 °C, a temperatura média do mês mais quente é inferior a 20 °C e a do mês mais frio situa-se entre 8 °C-10 °C. A precipitação toma valores entre 500 mm e 1400 mm (Alves *et al*, 2012; Almeida *et al*, 2020). A partir dos 800 m de altitude verifica-se um menor crescimento devido ao frio. A sua área de distribuição tem vindo a expandir-se, não só na Europa, na reflorestação de áreas degradadas, para proteção do solo contra a erosão, mas também no Hemisfério Sul, principalmente com objetivos económicos (Pascual *et al.*, 2024; Vinãs *et al*, 2022). O Pinheiro-bravo é umas das espécies mais abundantes em Portugal, por ação das plantações que começaram a ocorrer no século XIX.

O Pinheiro-bravo é uma espécie de crescimento rápido, heliófila e capaz de crescer em solos pobres e degradados (espécie pioneira), exceto solos de calcário solúvel (pH elevado), solos hidromórficos ou solos com má drenagem (Alves, 1982; Almeida *et al*, 2020).

A sua madeira é usada para construção de mobília e postes. A resina, após destilação, é utilizada para fazer terebintina, óleos, vernizes, adesivos e produtos medicinais (Vinãs *et al*, 2022).

Segundo o 6º Inventário Florestal Nacional (ICNF, 2015), o Pinheiro-bravo tem uma representatividade de 22% no território continental.

### 3.2.1.2 Cipreste de Lawson

O cipreste de *Lawson* (*Chamaecyparis lawsoniana*) é uma conífera endémica da América do Norte, de uma área muito restrita da costa oeste. Esta espécie foi introduzida na Europa em 1854, na França, Alemanha, Noruega, Dinamarca e Inglaterra principalmente com fins ornamentais, mas também pela madeira, considerada de boa qualidade. Também foi introduzida noutros locais como Nova Zelândia, Austrália, sul de África (Zobel & Háwk, 1980; Caudullo *et al.*, 2016). Esta espécie foi introduzida em Portugal para reflorestação nos pontos de altitude mais elevados, nomeadamente na cordilheira que integra a Serra da Lousã, por ser uma espécie bem-adaptada a climas frios e a altitudes elevadas.

O cipreste de *Lawson* tem preferência por solos de textura média com alguma humidade no verão, mas também pode encontrar-se em condições secas assim como numa ampla gama de tipos de solo. É capaz de crescer tanto no sub-coberto de florestas como pioneira em campo aberto, suportando uma vasta gama de condições de luminosidade. Assim, trata-se de uma espécie interessante do ponto de vista ecológico pois, apesar de ser originária de uma

zona muito restrita, nela existem numerosos habitats com variações a nível de condições edáficas e de precipitação e, além disso, conseguiu adaptar-se a uma ampla gama de condições ecológicas nos locais onde foi introduzida (Caudullo *et al.*, 2016).

A sua madeira apresenta excelente qualidade: textura fina, fácil de trabalhar e resistente ao apodrecimento, sendo adequada para uma gama ampla de aplicações tais como: ferrovias, brinquedos e no passado flechas. Oferece uma boa proteção contra a erosão do solo e o seu sistema radicular mitiga o eventuais deslizamentos de terrenos (Caudullo *et al.*, 2016).

### **3.2.1.3 Pinheiro-larício**

O Pinheiro-larício (*Pinus nigra*) é uma conífera com uma distribuição natural ampla, fragmentada, no entanto, estendendo-se desde o Norte do Mediterrâneo, Norte de África e Leste até ao Mar Negro, Córsega e Sicília (Enescu *et al.*, 2016). Em Portugal, esta espécie foi usada na arborização de vários maciços montanhosos do norte e centro (Lousã), na década de 30 do século XX, dada a sua capacidade de crescer em altitudes elevadas (Dias *et al.*, 2020).

Trata-se de uma espécie muito robusta e de grande plasticidade, tendo a capacidade de se desenvolver em solos pobres (Alves, 1982; Almeida *et al.*, 2020). Coloniza zonas com altitude entre 600 m e 1500 m, sendo o seu ideal 1000 m a 1300 m (Alves, 1982; Almeida *et al.*, 2020) e com precipitação anual mínima entre 800 mm a 900 mm (Alves, 1982; Almeida *et al.*, 2020). Esta espécie desenvolve-se bem no inverno com temperaturas inferiores a 0° C.

### **3.2.1.4 Pinheiro-silvestre**

O Pinheiro-silvestre é uma conífera com uma vasta área de distribuição na Europa e Ásia (desde Portugal até ao extremo oriental da Rússia), podendo crescer em diferentes habitats e valores de altitude. Consegue colonizar zonas do interior dada a capacidade de resistir a elevados valores de amplitude térmica anual.

Na Península Ibérica esta espécie localiza-se entre os 800 m e os 2000 m de altitude, encontrando-se os seus melhores povoamentos entre os 1200 m e 1600 m. A temperatura média anual toma valores que rondam os 4° C a 12° C. E prefere locais onde a precipitação anual tome valores entre 700 e 1300 mm e alguma precipitação nos meses mais secos (Correia e Oliveira, 2003; Almeida *et al.*, 2020).

Trata-se de uma espécie pioneira, que consegue sobreviver em solos pobres e degradados. Além disso prefere solos arenosos não vegetando bem nos solos calcários (Correia *et al.*,

2007). Tem uma fraca resistência à poluição atmosférica e a ventos marinhos com elevada salinidade (Rio *et al.*, 2016).

O Pinheiro-silvestre encontra-se em Portugal nos locais de maior altitude, oriundo da reflorestação nas serras do Gerês, Peneda, Larouco, Cabreira, Padrela, Montesinho, Nogueira, Lousã entre outras. Na serra do Gerês existe, no entanto, uma população considerada autóctone que tem sido alvo de projetos de conservação.

O Pinheiro-silvestre é uma espécie com interesse comercial nos países nórdicos. A madeira é facilmente trabalhada, apresentando uma boa relação custo benefício, utilizada como madeira de construção, móveis, celulose e papel. Além de ser uma espécie aplicada para recuperação de terras degradadas (Rio *et al.*, 2016).

### **3.2.2 Caracterização da evolução temporal da temperatura e precipitação**

Do site *Climate Explorer* (<https://climexp.knmi.nl/>) foram retirados, para a zona de estudo, desde o início do século XX: 1) valores anuais da temperatura e precipitação e 2) valores mensais da temperatura máxima e mínima, realizando-se a média das temperaturas máxima e mínima e precipitação para analisar a sua variação temporal e posterior correlação com os dados dendrocronológicos.

Foi estudada a variabilidade climática da precipitação e temperatura. No que a comparação tem de ser realizada para um período comum, de modo que a amostragem e os gráficos sejam mais precisos. Sendo realizada esta análise com o package *TreeClim* do *Rstudio*. Com estes dados é possível avaliar quais as espécies mais influenciadas pela temperatura e precipitação e assim prever o futuro dessas espécies.

### **3.2.3 Recolha e Preparação das amostras**

Para a amostragem foram selecionadas, na Serra da Lousã, duas zonas situadas a altitude diferente: uma zona com altitude entre 300-400 m (A) e outra com altitude entre 900-1000 m (B) (Figura 26). A amostragem foi efetuada em novembro de 2022. Na zona A, a temperatura média anual é de 14.8 °C e a precipitação anual toma o valor de 995 mm enquanto na zona B os valores são respetivamente 11.9 °C e 1297 mm (dados retirados de *Worldclim*-<https://www.worldclim.org/>). Trata-se, portanto, de dois andares diferentes do ponto de vista bioclimático.

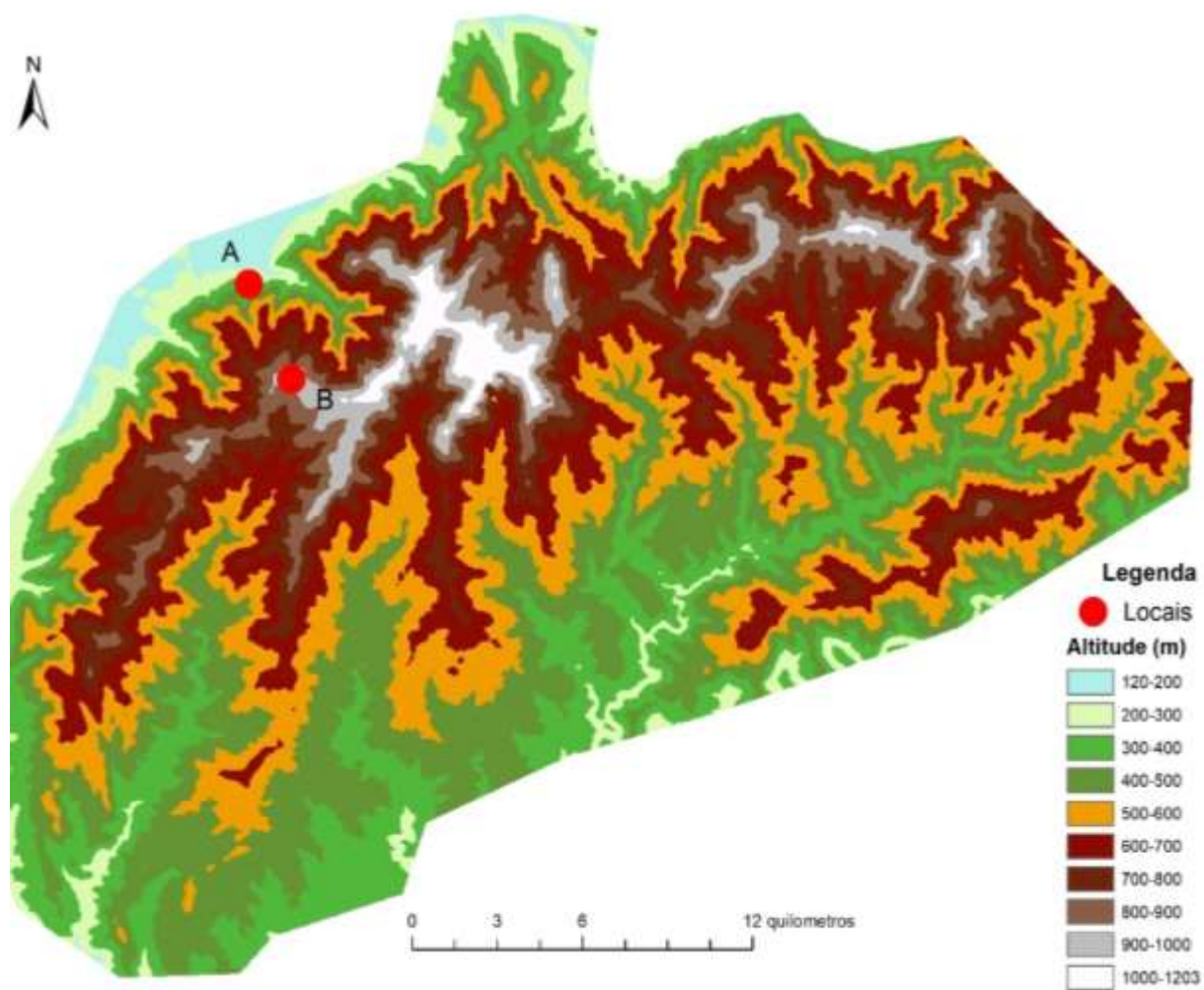


Figura 26: Locais de amostragem (A e B).

Na zona A, a altitude mais baixa, foram amostrados 13 indivíduos da espécie *P. pinaster* (Pinheiro-bravo). Na zona B (Figura 27) foram amostradas 8 árvores de *Chamaecyparis lawsoniana*, (Cipreste de lawson) 15 de *Pinus nigra* (Pinheiro-larício) e 15 de *Pinus sylvestris* (Pinheiro-silvestre). Foram, portanto, amostradas, nos dois locais, um total de 51 árvores. As árvores amostradas correspondem a árvores dominantes e que não mostravam sinais de doenças ou de ataque por pragas.

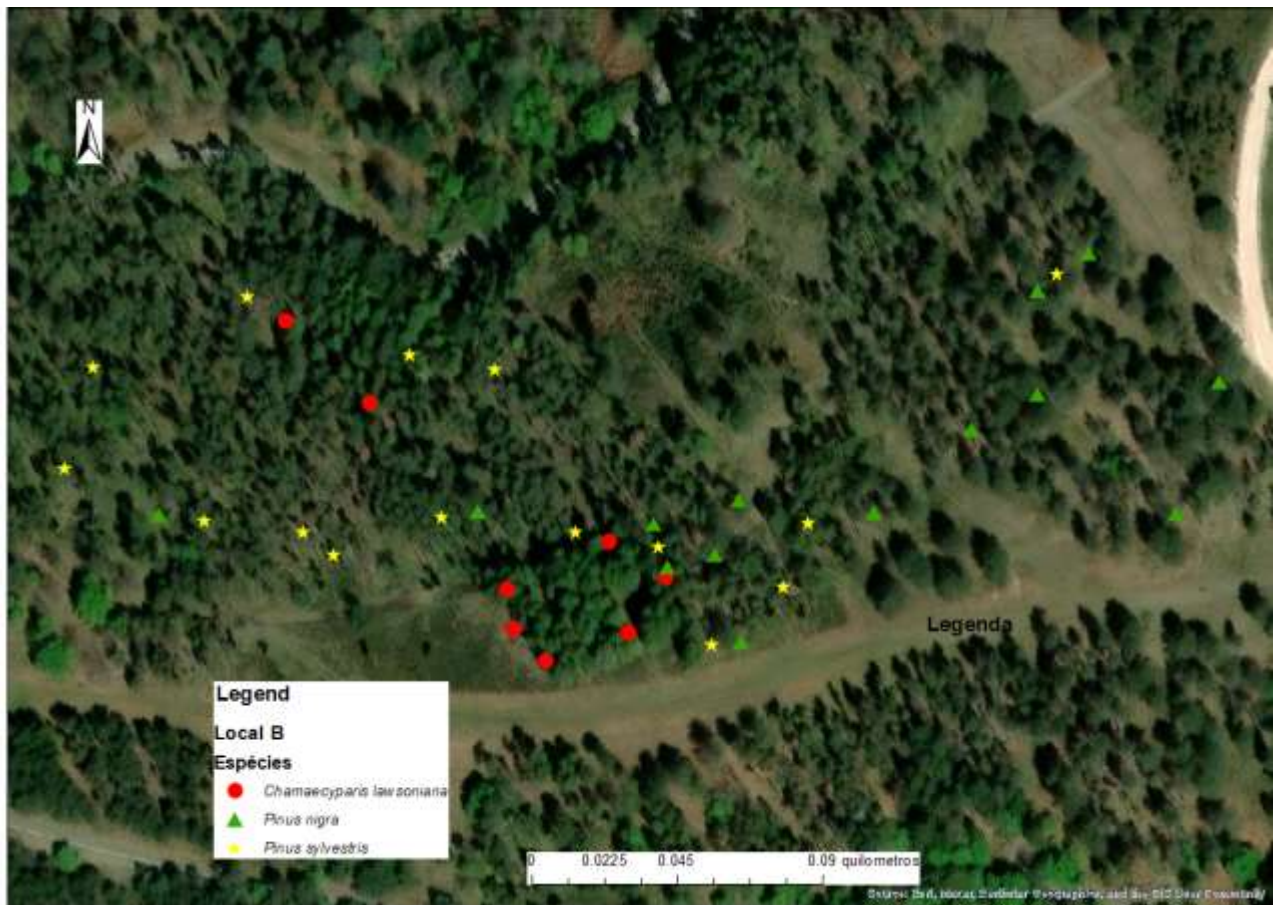


Figura 27: Localização das árvores amostradas no local B

A localização de cada árvore foi adquirida com um GPS (GARMIN 66ST), tendo sido obtidos dados relativos à altura, e diâmetro do tronco das árvores (Diâmetro à Altura do Peito). Foi ainda obtida informação relativa à área basal da componente arbórea, usando um 10 BAF Wedge Prism seguindo protocolos bem estabelecidos (West, 2015).

Em seguida foram obtidas amostras do tronco através de verrumadas, de acordo com métodos tradicionais (amostras retiradas à Altura do Peito; 1,30 m de altura da árvore) tendo sido retiradas duas amostras por árvore, em direções perpendiculares. Para extrair as amostras foi utilizada uma sonda de *Pressler* ou verruma (Figura 28).

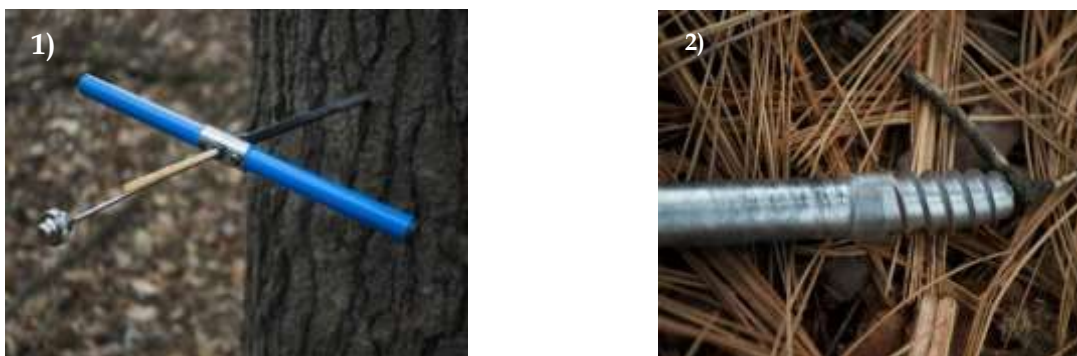


Figura 28: 1) Sonda de Pressler; 2) Broca. Fonte: <https://blog.uvm.edu/jpconsta-dendrochronology/in-the-field/>

As verrumadas extraídas foram armazenadas dentro de tubos cilíndricos de plástico, devidamente identificados para o transporte. No laboratório foram montadas em suportes de madeira, secando à temperatura ambiente. Posteriormente as amostras foram coladas e depois polidas com uma lixadeira com papel abrasivo com granulometria sucessivamente decrescente até se obter uma superfície plana e lisa, a mostrar claramente o limite entre os anéis de crescimento de cada ano (figura 29). As amostras foram depois digitalizadas num *scanner* com a resolução de 1200 *dpi*, tendo-se obtido imagens em formato TIFF.



Figura 29: Verrumada de Pinheiro - larício depois de montada, num suporte de madeira, e polida

### 3.2.4 Obtenção da cronologia

O passo seguinte consistiu na obtenção das séries dos anéis de crescimento. A série dos anéis de crescimento refere-se à sequência de anéis anuais visíveis numa seção transversal do tronco das árvores. Cada anel representa um ano de crescimento, variando a sua largura em função das condições ambientais. Esta sequência é usada para estudar o crescimento da árvore ao longo do tempo. A largura de cada anel de crescimento foi obtida pela medição do lenho de início e fim de estação.

Foi utilizado o *software Coo Recorder + CDendro*, que contem dois programas, um deles *CooRecorder* faz a datação dos anéis de crescimento após a ampliação das amostras, de modo a distinguir mais facilmente o lenho de início e fim de estação e detetar os anéis em falta, sendo a medição realizada da zona próxima da casca para o centro (figura 30).



Figura 30 : Identificação dos limites dos anéis de crescimento no programa *CooRecorder*

Com o programa *CDendro* foi possível compilar os ficheiros das medições e ajudar na datação dos anéis mais difíceis, sendo que quanto maior for a correlação maior a probabilidade de as árvores terem passado por eventos semelhantes durante a sua vida. Isto permite avaliar os efeitos de eventos similares a afetar no futuro essas mesmas espécies.

Para se confirmar a datação realizada foi utilizado o programa *COFECHA* (Grissino -Mayer, 2001).

Após a realização destes procedimentos foi efetuada a análise estatística com os programas do *Rstudio*: *dplR* e *detendreR*. Sendo que após a obtenção dos parâmetros estatísticos iniciais (média da largura dos anéis, média das idades de cada espécie, média da área basal para cada espécie, AR1, rbt) se realizou uma padronização de modo a conseguir obter-se a correlação entre espécies mais precisa, além da averiguação da Relação sinal-ruído. (AR1 residual, rbt, EPS, SNR).

Após a leitura dos anéis das diferentes árvores com o software *CooRecorder* obtém-se séries de crescimento. depois é feita a datação cruzada das diferentes séries de modo a assegurar a datação de cada anel, possibilitando selecionar as correlações mais fortes entre cada espécie e entre cada série de anéis de crescimento.

Para verificar a existência de falsos anéis, após terem sido lidas as amostras de todas as espécies no *software CDendro*, foi realizada a correlação para cada espécie com uma referência (amostra que representa valores mais próximos com os anéis de crescimento medidos). Caso essa correlação seja negativa, é necessário efetuar novamente a leitura das amostras para analisar os falsos anéis. Com as novas amostragens e amostras corrigidas é possível acrescentar essas amostras à referência. Após a obtenção de valores positivos no *CDendro*, verifica-se no *COFECHA* a qualidade da amostragem. Caso ocorra um valor superior ou inferior a 0.3 (Nabais *et al*, 2014), é necessário analisar a amostra novamente ou mesmo descartá-la dos dados.

Após essa análise dupla de verificar os dados no *CDDENDRO* e no software *COFECHA*, é necessário realizar uma comparação direta entre as amostras e para tal recorre-se ao

pacote do *Rstudio dplR* que irá permitir transformar as séries das larguras dos anéis em áreas respetivas.

Seguidamente as séries de crescimento foram transformadas em series padronizadas para retirar o efeito da idade e alguns fatores biológicos, através de dois passos: 1º passo, exponencial positiva; 2º passo, *spline* em que o período de recorte é de 67%. Como existe alguma influência no crescimento dos anos anteriores, foi aplicado um modelo autorregressivo, para tirar esse efeito, e assim foi obtida uma série residual. Depois, foi feita uma média robusta das séries para se obter a cronologia do local. Essa cronologia é que vai conter a variabilidade climática pretendida.

Depois da produção das cronologias procedeu-se ao cálculo de indicadores estatísticos referentes às cronologias, de modo a avaliar-se a existência de influência climática. A análise estatística foi efetuada com o package *dplR* e *DetrendeR* do *rstudio*, tendo sido calculados os seguintes indicadores: 1) Relação Sinal-Ruído (SNR), 2) Sinal Efetivo da Cronologia (Cook & Kairiukstis, 1992), 3) Sinal inter-árvore (rbt) e 4) Sinal expresso da população (EPS).

### 3.2.5 Análise estatística

Foram produzidas as seguintes estatísticas para averiguar a qualidade das cronologias para o estudo climático.

A **relação sinal ruído (SNR)** é uma medida da qualidade da cronologia e é calculada usando o número médio de árvores. Este índice comporta-se de maneira não linear em função do número de árvores, apresentando valores altos se o número de árvores também for elevado e é dado por:

$$SNR = \frac{t * reff}{1 - reff}$$

Onde *reff* é o sinal efetivo da cronologia e *t* o número de séries.

De forma a complementar-se a informação dada por SNR foi calculado o **Sinal Expresso da População (EPS)** (Cook & Kairiukstis, 1992). Este índice quantifica a cronologia das árvores e a sua precisão. Considera-se que valores de EPS acima de 85% podem ser utilizados para análise da dendroclimatologia. Maiores valores de SNR significa uma maior variabilidade no crescimento. EPS é calculado pela expressão (Leal *et al.*, 2008):

$$EPS = \frac{r_{eff}}{r_{eff} + \frac{1 - r_{eff}}{n}}$$

Onde  $r_{eff}$  é sinal efetivo da cronologia e  $n$  o número de árvores.

A combinação de SNR e de EPS permite uma maior certeza na interpretação dos resultados obtidos. No entanto, a adição à análise de outros índices proporciona ainda uma maior segurança, como é o caso do índice que se descreve em seguida:

**O sinal efetivo da cronologia** ( $r_{eff}$ ) correlaciona os coeficientes dentro (intra) e entre (inter) árvores (Cook & Kairiukstis, 1992):

$$r_{eff} = \frac{r_{bt}}{r_{wt} + \frac{1 - r_{wt}}{c}}$$

Onde  $r_{bt}$  é o sinal inter árvores que se obtém pela média dos coeficientes de correlação calculados para todos os pares possíveis de séries obtidas para as diferentes árvores do mesmo local;  $r_{wt}$  é o sinal Intra árvore que é obtido pela média dos coeficientes de correlação calculados entre as séries indexadas da mesma árvore, para todas as árvores; e  $C$ , o número de amostras por árvore.

Após a análise dos coeficientes, fez-se a análise estatística de maio do ano anterior de cada ano das amostras, sendo este valor referente ao ano anterior, a uma média das amostras dos diferentes anos do crescimento até dezembro de 2022, com o *package dplR* e *DetrendeR* do *rstudio* sendo obtidos os indicadores de  $r_{bt}$ ,  $EPS$ ,  $SNR$  e  $AR1$  para avaliar as características das árvores e constatar quais as amostras mais eficazes para aplicar nos dados do clima de modo a obter-se valores mais precisos. Esta análise consiste no cálculo do índice de correlação de *Pearson* e serve para identificar as variáveis climáticas que mais influenciam o crescimento.

O modelo  $AR1$  permite avaliar a dependência das amostras. Quanto mais baixo for o valor residual maior precisão se vai ter na análise climática uma vez que as amostras não apresentem interdependências umas com as outras.

Após a obtenção dos valores da largura média dos anéis foi realizada uma ANOVA no *Rstudio*, sendo usado o teste *post hoc* de *Tukey*. Foi usado o teste de *Shapiro-Wilk*, para avaliar a normalidade das variáveis e o teste de *Bartlett's K-squared*, para avaliar a homogeneidade das variâncias.

Finalmente, foi efetuada a **análise do clima** através da avaliação da variabilidade climática da precipitação e temperatura (obtidos em <https://climexp.knmi.nl/>), para comparar todas as espécies. Pelo que, a comparação tem de ser realizada para um período comum, de modo que a amostragem e os gráficos sejam mais precisos. Sendo realizada esta análise com o

package *TreeClim* do *Rstudio*. Com esses dados é possível avaliar onde ocorreu maior influência da temperatura e precipitação nas espécies e com isso prever o futuro dessas espécies.

Em resumo, calculou-se o incremento das áreas basais com recurso à função *bai* do pacote *dplR* do *Rstudio*. Na Figura 31 apresentam-se os vários passos para a obtenção das séries de crescimento e posteriormente a comparação com os dados climáticos.

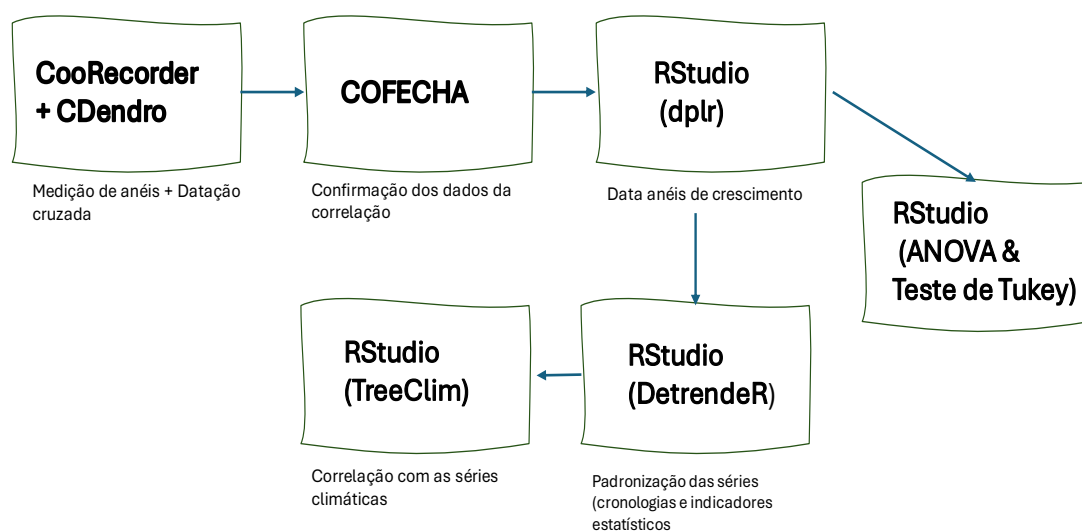


Figura 31: Esquema representativo dos passos *Rstudio* obtenção das séries

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização da evolução temporal da temperatura e precipitação

Como referido na metodologia, foram retirados do site *Climate Explorer* (<https://climexp.knmi.nl/>) os valores anuais da temperatura e precipitação para a zona de estudo desde o início do século XX.

A Figura 32 apresenta a evolução da precipitação anual de 1901 a 2022, assim como a linha de tendência. Os dados revelam uma grande variabilidade inter-anual da precipitação, como é comum no clima de tipo mediterrânico e a constatação de uma tendência quase constante ao longo do tempo.

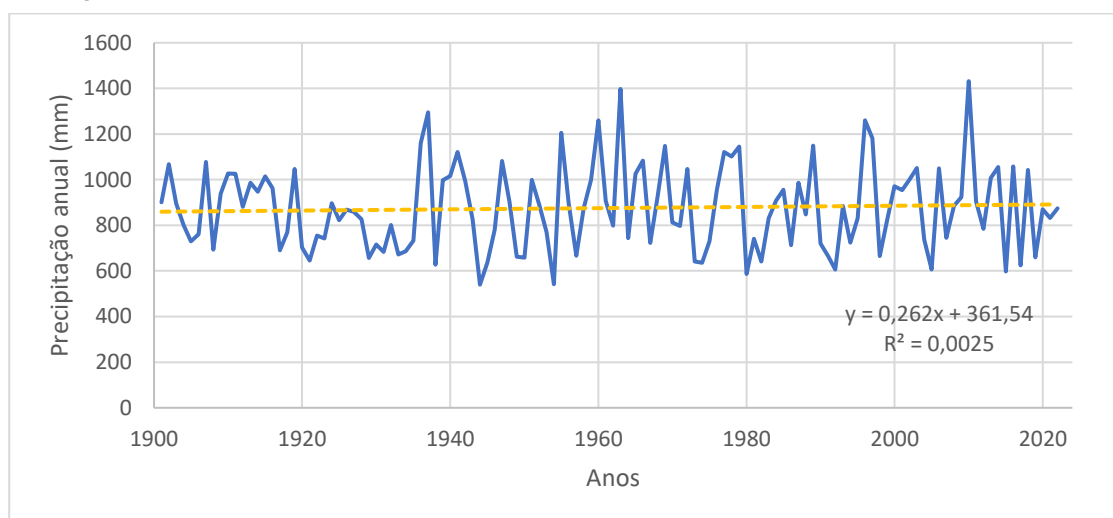


Figura 32: Precipitação anual (mm) para o período de 1901 a 2022 com a respetiva linha de tendência a laranja

Fonte: <https://climexp.knmi.nl/>

A Figura 33 mostra a evolução da temperatura média anual de 1901 a 2022, assim como a linha de tendência. Pode constatar-se um aumento da temperatura, mais acentuado a partir dos anos 1970.

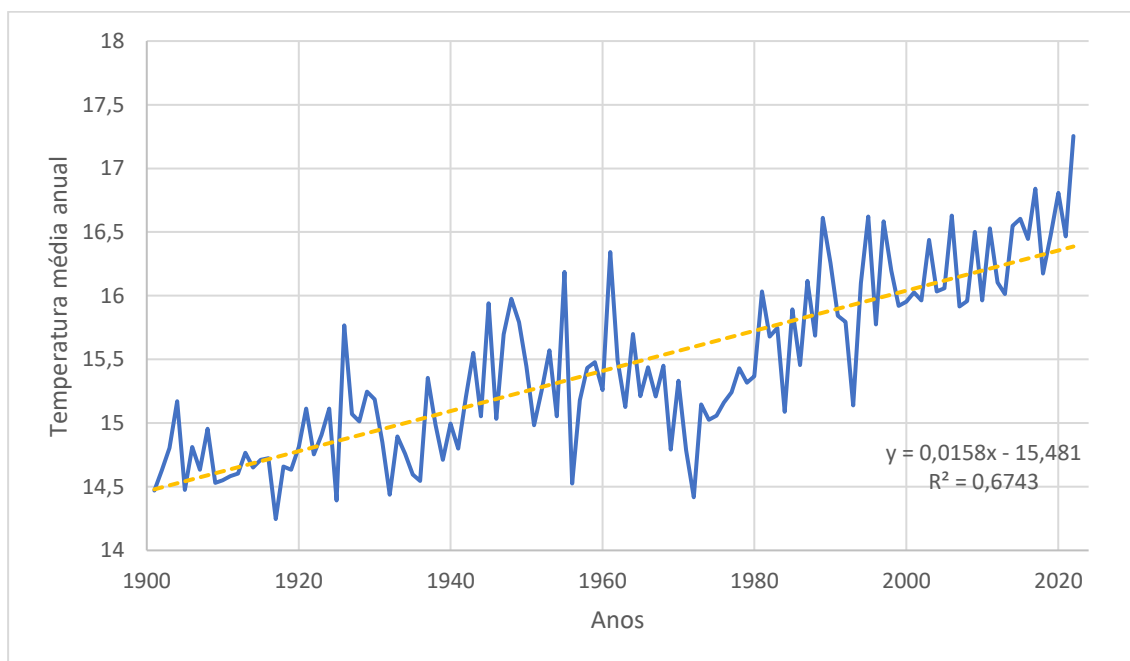


Figura 33: Temperatura média anual no período de 1901 a 2022 e respetiva linha de tendência. Fonte: <https://climexp.knmi.nl/>

Como referido anteriormente, foram efetuadas duas verrumadas (amostras) por árvore. No entanto, 8 das amostras não apresentavam qualidade para a análise pelo que restaram

apenas 96 amostras das 104 iniciais. A Figura 34 apresenta informação relativa à quantidade de árvores amostradas e número de amostras por espécie.

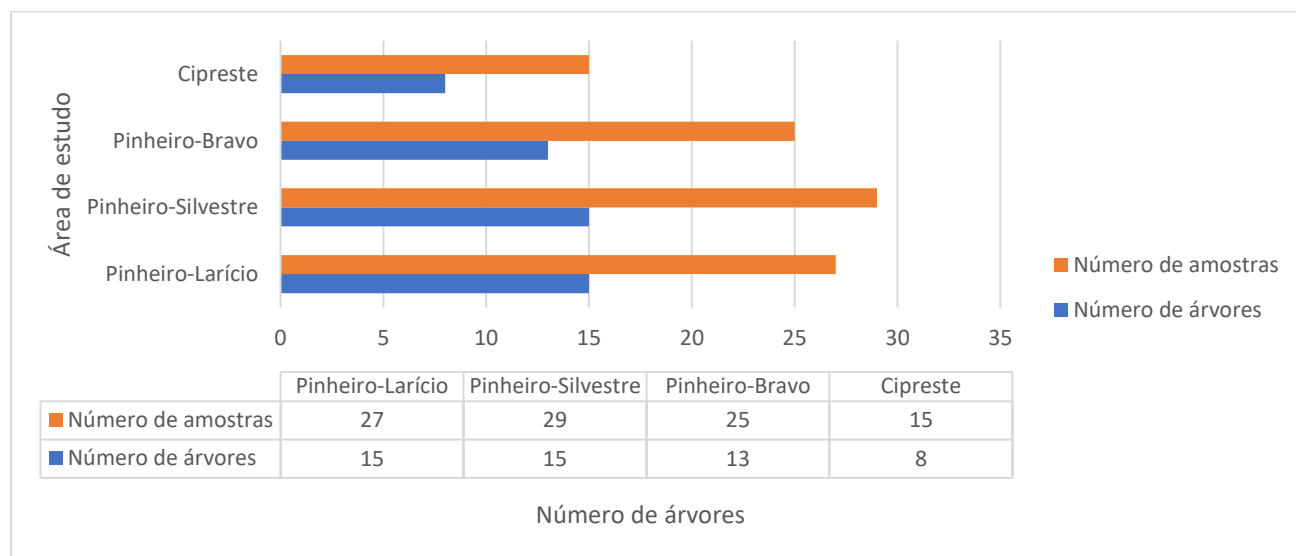


Figura 34: Quantidade de amostras e árvores por espécie em estudada

Das 52 árvores iniciais, após a datação cruzada, foram utilizadas 51 das 96 amostras, devido a uma árvore do Pinheiro-bravo apresentar valores muito dispare e não tendo correlações positivas para análise.

Verificou-se que o período comum de todas as amostras é de 1965 a 2022 (57 anos), 90% das amostras apresentam um intervalo de idades de 50/60 anos.

A Tabela 1 apresenta a largura média dos anéis de crescimento por espécie. Os anéis de Pinheiro-larício apresentam maior largura seguindo-se os de Pinheiro-bravo e Cipreste de *lawson*. O Pinheiro-silvestre apresenta a menor largura.

Estes dados estão de acordo com literatura. O Pinheiro-bravo amostrado encontra-se a 300-400 m, zona com temperatura e precipitação favoráveis ao seu crescimento. Na zona B a altitude média é de 900-1000 m, o que explica o maior crescimento do Pinheiro-larício (com zona óptima de crescimento entre 1000-1300 m de altitude) e o menor crescimento do Pinheiro-silvestre (com zona óptima a altitude mais elevada, de 1200-1600 m).

Tabela 1 : Dados da largura média dos anéis de crescimento por espécie

Espécie	Largura média dos anéis (mm)	Desvio Padrão	Erro Padrão
<b>Pinheiro-larício</b>	3,16	1,41	0,36
<b>Pinheiro-silvestre</b>	2,13	1,11	0,29
<b>Pinheiro-bravo</b>	2,89	1,27	0,35
<b>Cipreste de lawson</b>	2,35	1,19	0,42

A Tabela 2 apresenta os resultados da ANOVA realizada à largura média dos anéis de crescimento. Os pressupostos da ANOVA referentes à distribuição normal da variável dependente e homogeneidade das variâncias foram seguidos: *Teste Shapiro-Wilk*:  $W = 0.98639$ ,  $p$ -valor = 0.4275 o que indica que os dados seguem a distribuição normal. *Bartlett's K-squared* = 4.7339,  $df = 3$ ,  $p$ -valor = 0.1923, o que revela homogeneidade das variâncias.

Tabela 2 : ANOVA para a largura média dos anéis de crescimento das 4 espécies

	Graus de liberdade	Soma quadrados	Quadrado médio	F-valor	P-Valor (>F)
Espécie	3	17,87	5,957	21,66	1,07e-10***
Classe resíduos	92	25,31	0,275		

O valor F é usado para determinar se existem diferenças significativas entre as médias de dois ou mais grupos. Sendo este valor maior que o Pvalor, observa-se que existem variações na largura média dos anéis de crescimento (representando os asteriscos a diferença significativa), logo concluiu-se que a ANOVA revelou diferenças significativas entre pelo menos um par de espécies no referente à largura média dos anéis de crescimento:  $F(3,92)=21.66$ ,  $p=1,07e-10$ . Assim, procedeu-se ao teste de Tukey (Tabela 3).

Tabela 3 : Teste de *Tukey* para a largura média dos anéis de crescimento

	diferença	Pvalor
<b>Pinheiro-bravo - Cipreste de lawson</b>	0,546000	0,0104007
<b>Pinheiro-larício - Cipreste de lawson</b>	0,811963	0,0000348
<b>Pinheiro-silvestre - Cipreste de lawson</b>	-0,223000	0,5420473
<b>Pinheiro-larício - Pinheiro-bravo</b>	0,265963	0,2673950
<b>Pinheiro-silvestre - Pinheiro-bravo</b>	-0,769000	0,0000035
<b>Pinheiro-silvestre - Pinheiro-larício</b>	-1,034963	0,0000000

O teste de *Tukey* revela que não há diferenças significativas na largura média dos anéis de crescimento apenas entre dois pares de espécies: Pinheiro-silvestre/Cipreste de lawson e

Pinheiro-larício/Pinheiro-bravo. Por outro lado, o pinheiro-larício e o Pinheiro-bravo, apresentam crescimento semelhante e superior ao do pinheiro-silvestre.

Nas figuras seguintes (Figura 35 à Figura 38) encontram-se representadas as séries de anéis de crescimento obtidas para as quatro espécies em estudo.

Em relação ao Pinheiro-larício (intervalo de 53 anos) ocorrem algumas situações com um aumento abrupto da largura dos anéis, no entanto verifica-se, globalmente, uma diminuição da largura dos anéis ao longo do tempo (Figura 35)

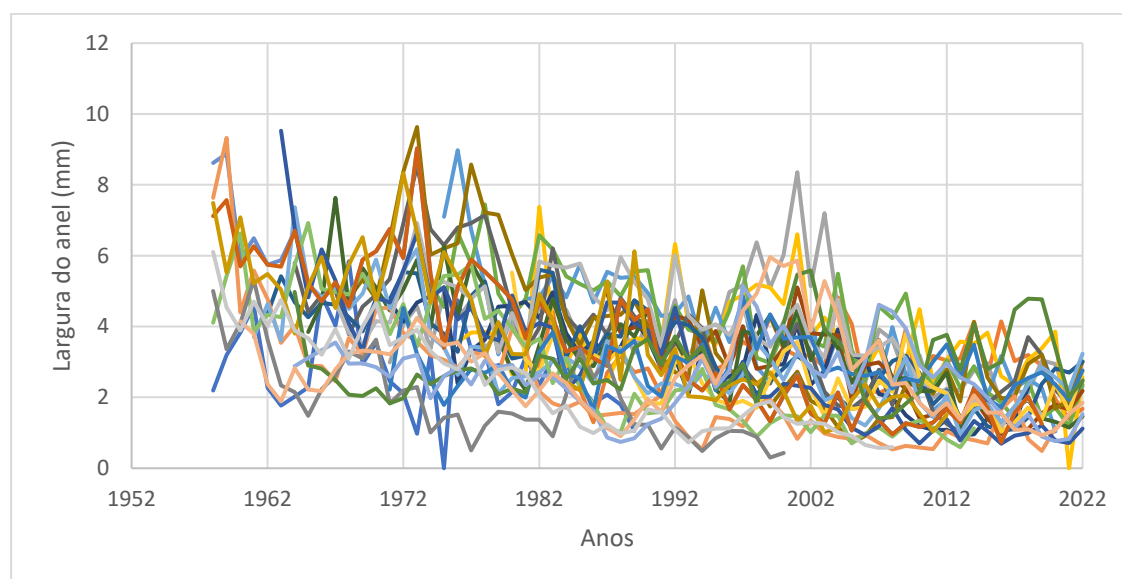


Figura 35: Série de anéis de crescimento para as 15 árvores de Pinheiro-larício na Serra de Lousã das 27 amostras medidas

No Pinheiro-bravo (59 anos de idade) os anéis apresentam um crescimento variável ao longo do tempo, não se verificando um padrão definido (Figura 36). Visualmente constata-se falta de sincronia, em certas datas.

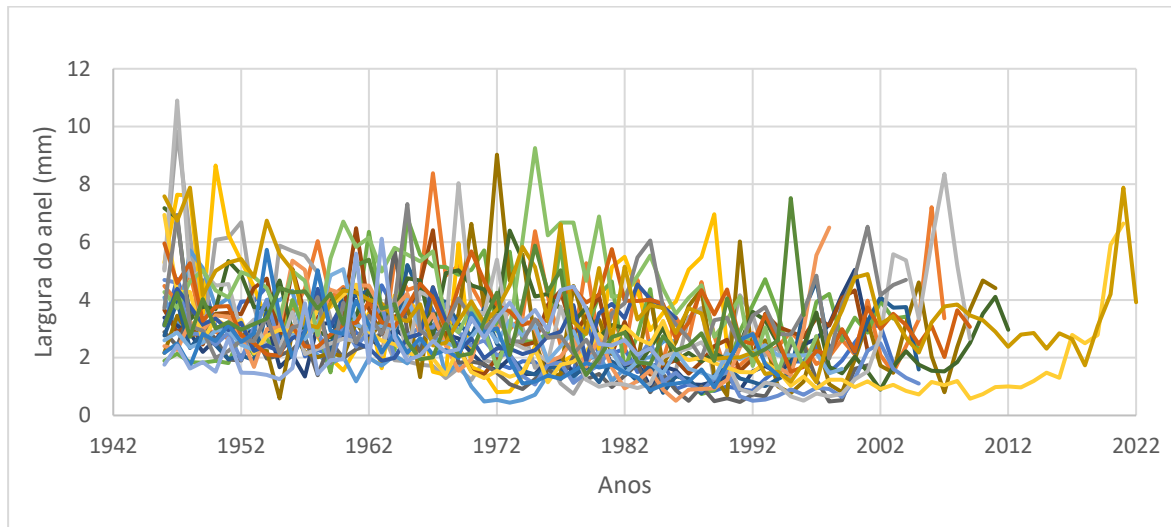


Figura 36 : Série de anéis de crescimento para as 13 árvores de Pinheiro-bravo na Serra de Lousã das 25 amostras medidas

Em relação ao Pinheiro-silvestre (59 anos de idade) observa-se uma diminuição do crescimento ao longo do tempo (Figura 37).

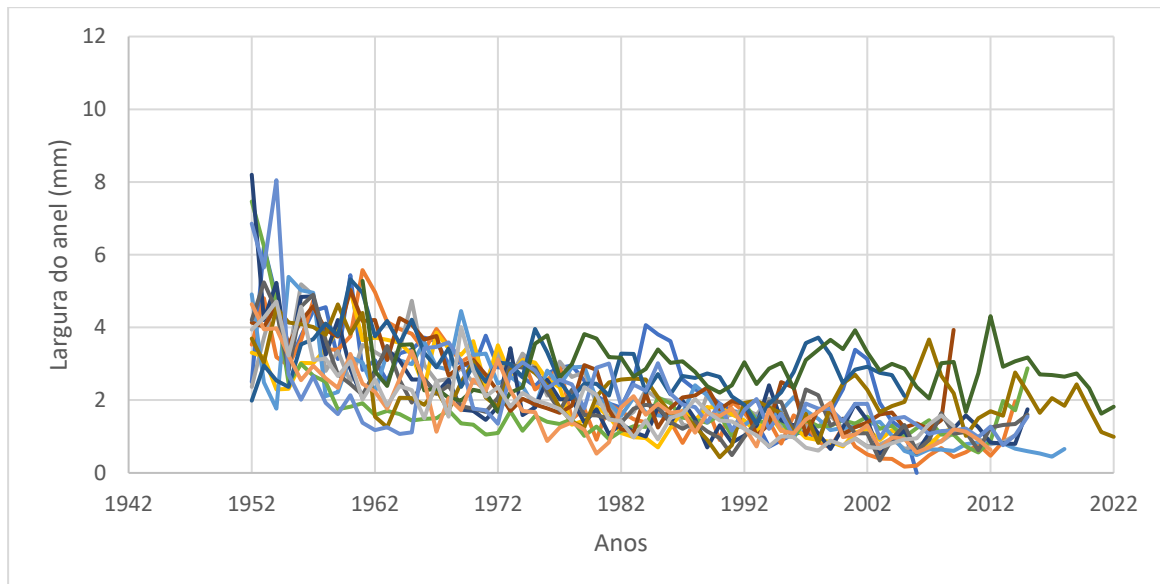


Figura 37 : Série de anéis de crescimento para as 15 árvores de Pinheiro-silvestre na Serra de Lousã das 29 amostras medidas.

No referente ao Cipreste de *lawson* (59 anos de idade) não se observa uma elevada sincronia entre amostras dos anos anteriores, no entanto, consegue-se discernir uma tendência de diminuição do crescimento ao longo dos anos (Figura 38).

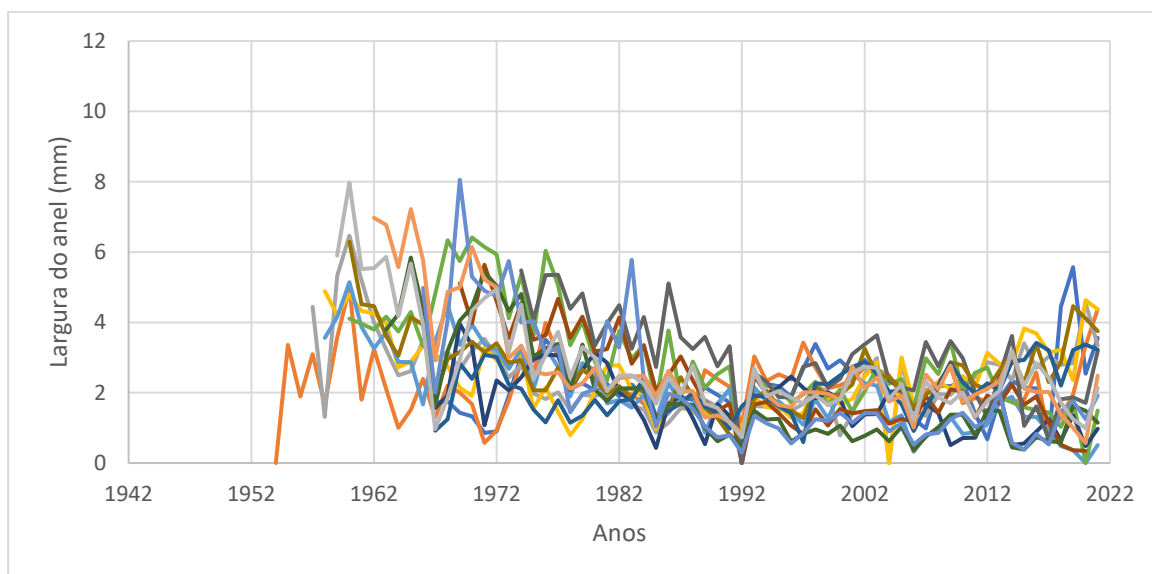


Figura 38 : Série de anéis de crescimento para as 8 árvores de cipreste de Lawson na Serra de Lousã das 15 amostras medidas

Concluindo, verifica-se, de uma forma geral que, ao longo do tempo, a largura dos anéis diminui, excepto para o Pinheiro-bravo. Este decréscimo era de se esperar, pois, o diâmetro das árvores aumenta rapidamente até à fase adulta, diminuindo depois, fato que se traduz na redução da largura dos anéis e posterior estabilização (Rubio-Cuadrado *et al.*, 2024). Este padrão deve-se a causas de natureza variada, tanto inerentes à própria árvore como ao seu meio ambiente. Uma possível explicação para o fato do Pinheiro-bravo não ter o mesmo comportamento das restantes espécies consiste numa taxa elevada de crescimento, não sendo, consequentemente, tão sensível às variações ambientais.

A figura (39) mostra o incremento da área basal para cada espécie.

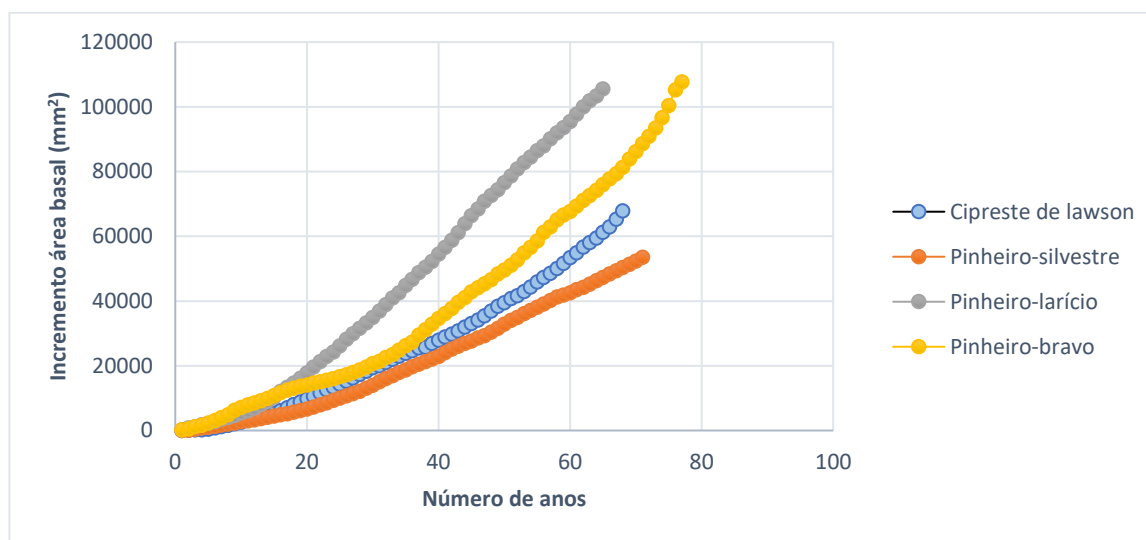


Figura 39 : Incremento em área basal durante o período de vida de cada espécie

Nota-se, como previsto, que 1) no início do crescimento (árvores jovens) o incremento anual da área basal é menor, 2) durante a fase adulta o incremento anual é maior, ou seja, a área basal aumenta rapidamente. Ao longo da vida da árvore há ainda a fase de envelhecimento na qual o crescimento desacelera, mas a área basal total ainda aumenta. No entanto, as árvores amostradas parecem ainda não ter atingido essa fase.

Na fase inicial do crescimento (árvores jovens) não parece haver muitas diferenças entre as quatro espécies. As diferenças tornam-se mais acentuadas na fase adulta: o Pinheiro-larício tem a maior taxa de incremento da área basal, seguido do Pinheiro-bravo. Na curva referente ao Pinheiro-silvestre não se nota uma grande diferença no incremento entre a fase jovem e adulta. Em relação ao Cipreste de *lawson* o número de amostras é mais reduzido, o que se traduziu na dimensão mais pequena da curva respetiva.

As curvas indexadas (resultantes da média das cronologias de todas as amostras da mesma espécie) são apresentadas nas figuras seguintes (Figura 40, Figura 41, Figura 42 e Figura 43) em que a área sombreada representa o número de amostras utilizadas para o cálculo da cronologia. As cronologias não apresentam uma tendência linear, variando entre zero e dois, apresentando picos máximos e mínimos de crescimento influenciados pelos parâmetros ambientais. Estas curvas, como resultam da remoção de tendências sistemáticas de crescimento (por exemplo, a diminuição do crescimento com o aumento da idade), permitem identificar eventuais alterações ao desenvolvimento das árvores, devido a eventos extremos que ocasionam stress.

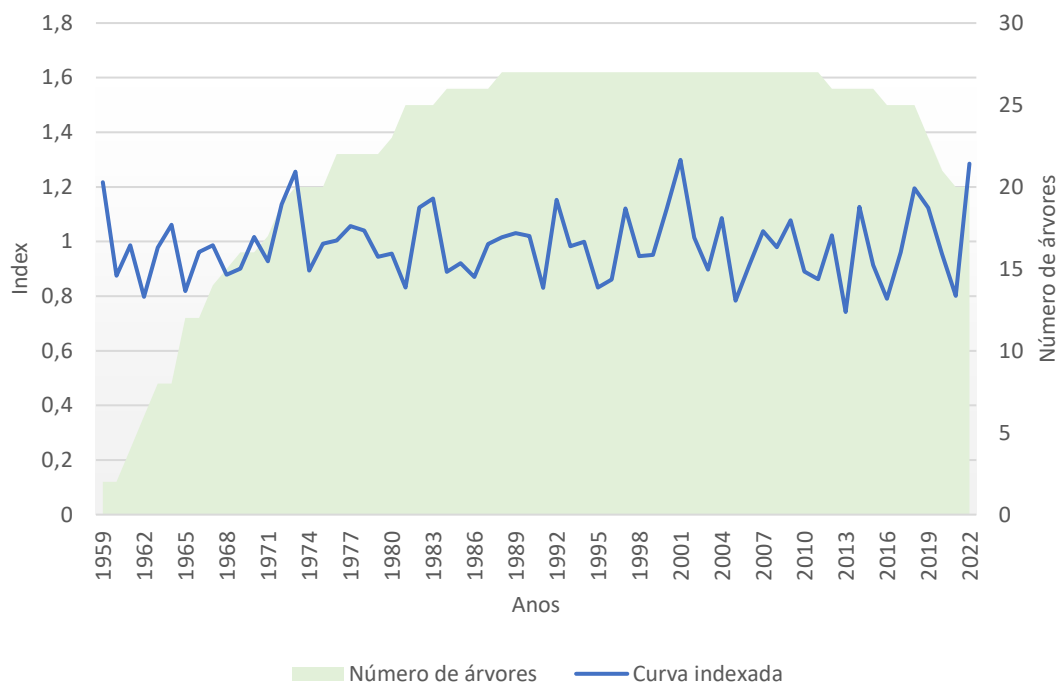


Figura 40 : Curva indexada para o Pinheiro-larício na Serra de Lousã

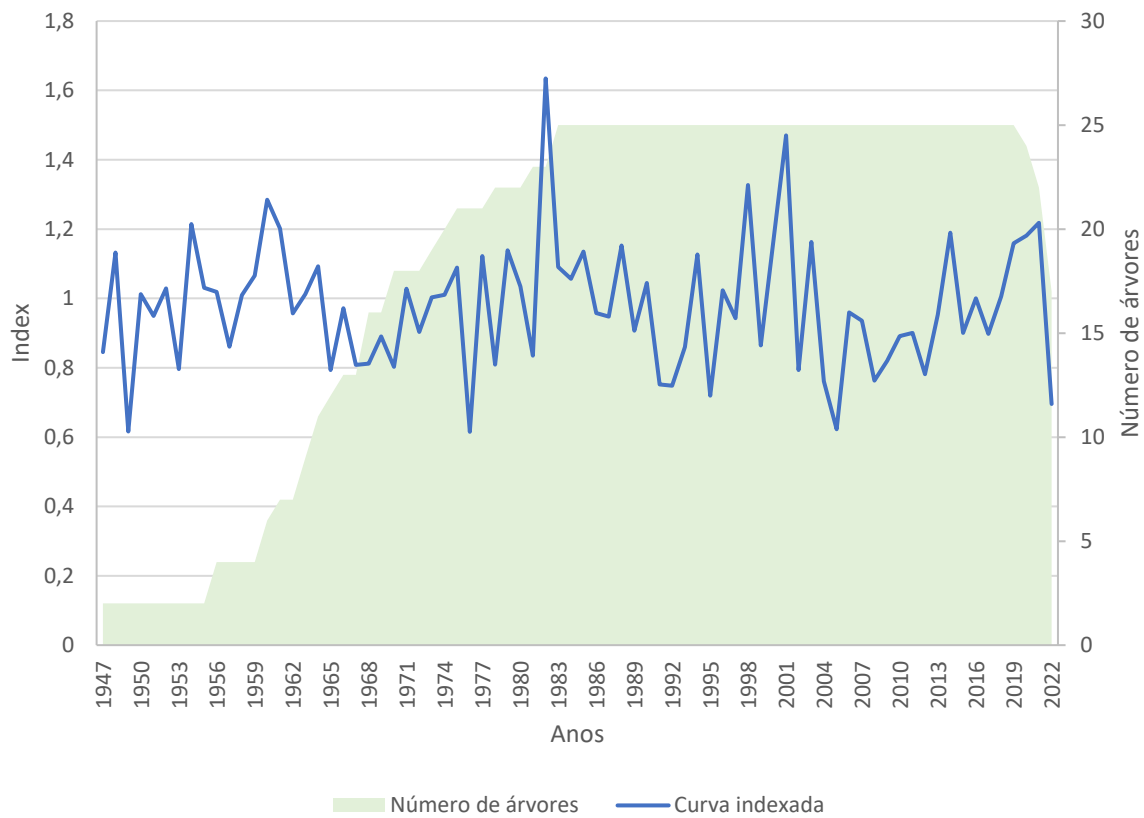


Figura 41 : Curva indexada para o Pinheiro-bravo na Serra de Lousã

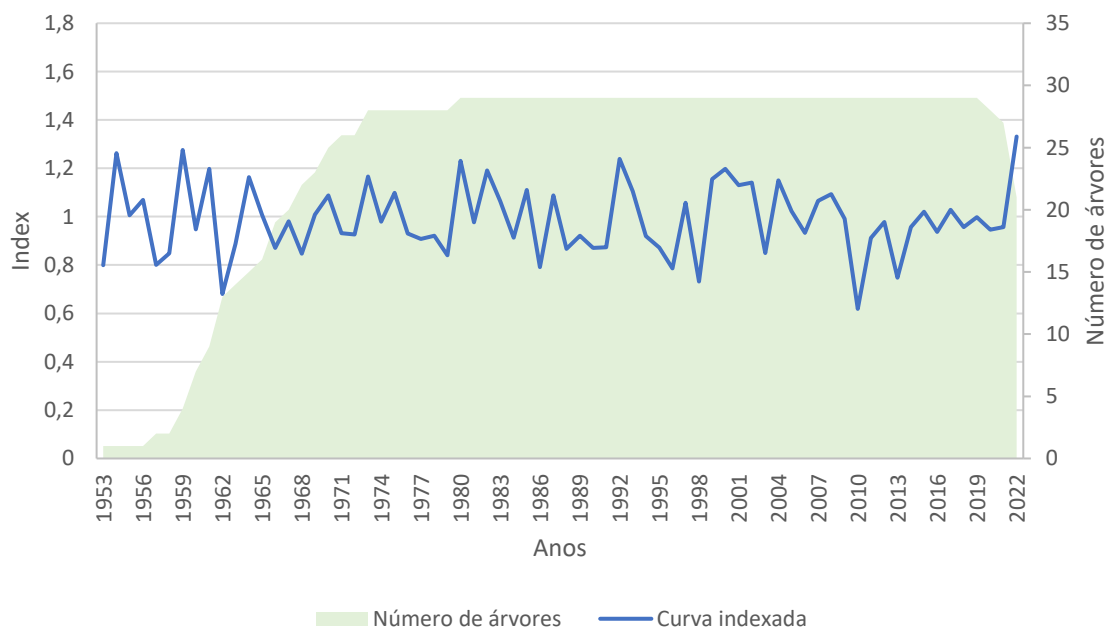


Figura 42 : Curva indexada para o Pinheiro-silvestre na Serra de Lousã

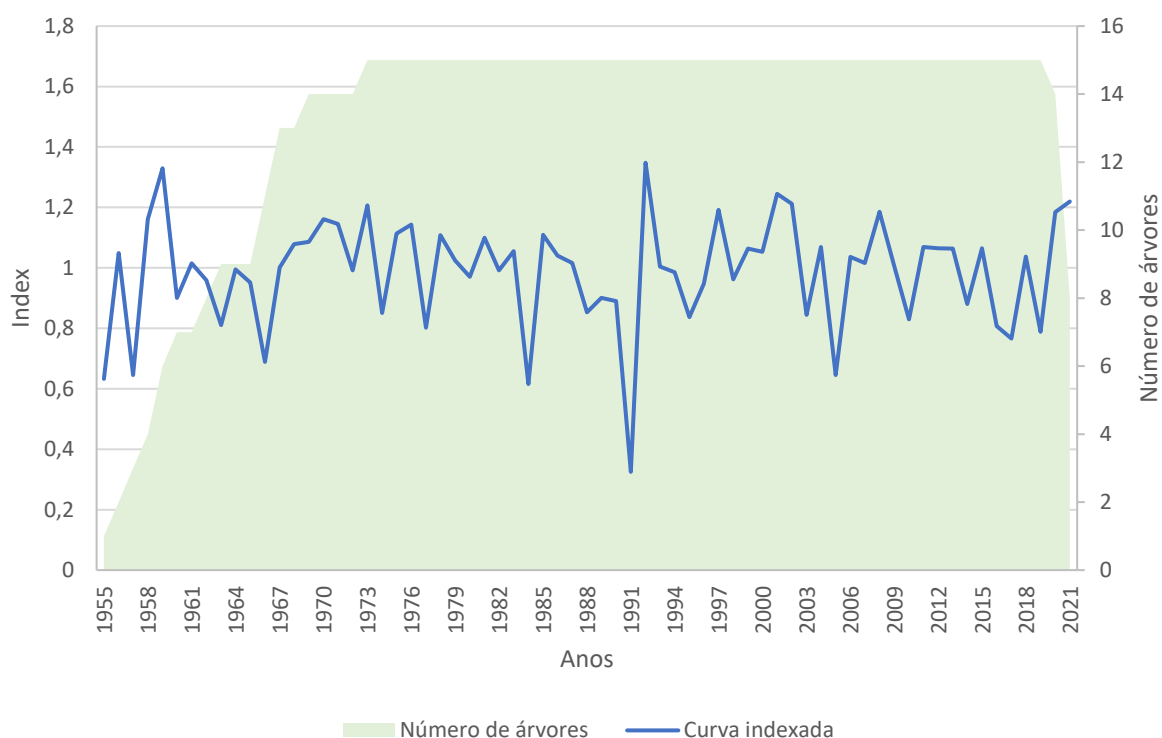


Figura 43 : Curva indexada para o Cipreste de *lawson* na Serra de Lousã

Em geral, não se verifica uma tendência bem definida, para nenhuma das espécies, existindo vários picos de crescimento e decréscimo ao longo da cronologia. O Pinheiro-bravo e o Cipreste de *lawson* exibem maior variabilidade como resposta às condições ambientais.

Com exceção do Pinheiro-silvestre, todas as espécies revelam um decréscimo acentuado do crescimento no ano de 2005, caracterizado por mínimo de precipitação. As quatro espécies em estudo apresentaram um aumento de crescimento no ano de 2001 no qual ocorreu um ligeiro pico de precipitação.

Com base nas curvas indexadas e após padronização foram calculadas as estatísticas das cronologias (Tabela 4).

Tabela 4 : Indicadores estatísticos da padronização no *Rstudio* para cada espécie

Espécies	<i>rbt</i>	EPS	AR1 série original	AR1 residual	SNR
Pinheiro-larício	0,246	0,877	0,671	0,264	7,154
Pinheiro-bravo	0,335	0,919	0,53512	0,028	11,3
Pinheiro-silvestre	0,26	0,911	0,684069	0,077	10,2
Cipreste de <i>lawson</i>	0,234	0,766	0,6356	0,005	3,272

⇒ Pela tabela 4 pode-se verificar que as espécies com maior variabilidade no crescimento são o Pinheiro-bravo e Pinheiro-silvestre uma vez que apresentam uma maior diferença ao longo dos anos. O cipreste de *lawson* é a espécie que apresenta menor variabilidade.

⇒ Quanto ao modelo autorregressivo de 1ª ordem verifica-se que o Pinheiro-silvestre e o Pinheiro-larício possuem os maiores valores de AR1 relativos à série residual, o que indica que, para estas espécies, há mais influência do crescimento do ano anterior. Conclui-se também pela tabela 4 que as espécies com menor interdependência na amostragem são o cipreste e o Pinheiro-bravo, o que representa uma maior precisão na análise climática.

Relativamente ao EPS, as espécies de Pinheiro-larício, Pinheiro-silvestre e Pinheiro-bravo apresentam valores superiores a 85%, o que, como sugerido por Wigley *et al.* (1984), confirma a qualidade estatística da cronologia e sendo um indício que os fatores climáticos em comum influenciaram as espécies de forma semelhante. Apenas o cipreste apresenta um valor menor, no entanto, está adequado para estudos climáticos uma vez que as outras variáveis apresentam valores apropriados.

Valores altos de SNR indicam que o sinal ambiental é dominante, enquanto uma relação baixa assinala que o ruído é predominante. Assim, o sinal ambiental é dominante para o Pinheiro-bravo e Pinheiro-silvestre. Verifica-se, portanto, uma concordância entre os indicadores SNR e EPS.

O *rbt* apresenta o maior valor ( $>0,3$ ) no Pinheiro-bravo, o que indica que há um forte sinal comum e que a maior parte da variação no crescimento é explicada por fatores climáticos regionais. Pelo contrário, o Cipreste de *lawson* tem o menor valor (entre 0,2 e 0,3), fato que dá indicação de um sinal comum moderado e de que poderá haver fatores climáticos e não climáticos a influenciar o crescimento. Em relação ao Cipreste de *lawson* há a referir o fato de ter um número de amostras bastante inferior aos das outras espécies, o que poderá ter influenciado o cálculo dos indicadores.

## 4.2 Correlação entre a cronologia e os dados climáticos

Nas Figuras 44 a 47 apresentam-se graficamente os coeficientes de correlação entre a temperatura e precipitação) por forma a identificar possíveis sinais climáticos.

### 4.2.1 Pinheiro-larício

O Pinheiro-larício responde, por vezes, inversamente à temperatura (Figura 44), como é o caso dos meses de dezembro do ano anterior à estação de crescimento, março, abril, agosto, setembro e outubro, existindo por vezes valores elevados das correlações (caso de agosto). Isto significa que muito provavelmente esta espécie será afetada com o aumento da temperatura resultante das alterações climáticas previstas para o futuro.

A relação negativa entre o crescimento e a precipitação de outubro do ano anterior à estação de crescimento poderá ser explicada pelo fato de que a precipitação elevada pode eventualmente levar à lixiviação dos nutrientes no solo. Se a árvore crescer menos, não conseguirá armazenar uma tão elevada quantidade de nutrientes para a estação de crescimento seguinte. A relação positiva com a precipitação de março indica a importância da disponibilidade de água neste período.

Por vezes a relação entre o crescimento e a precipitação é negativa (outubro do ano anterior), por vezes positiva (março).

Nas latitudes da área de estudo o período de crescimento geralmente começa em março, quando as temperaturas já são favoráveis, se houver água disponível no solo. No presente estudo as temperaturas durante os meses de março e abril (estação de crescimento) mostram um efeito negativo na formação dos anéis de crescimento, possivelmente devido a baixa disponibilidade hídrica, o que conduz a um atraso dos processos fisiológicos que impulsionam o crescimento. As correlações negativas com a temperatura dos meses de agosto a outubro podem estar associadas ao fecho dos estomas por parte das árvores para reduzir a transpiração excessiva (uma vez que há défice hídrico resultante da falta de água no solo), o que se traduz numa diminuição da atividade fotossintética e do crescimento (Devi *et al.*, 2023).

No estudo realizado na Sérvia, o crescimento do Pinheiro-larício apresenta correlações negativas com a temperatura no início do outono e no verão. Observando-se que a espécie tem uma relação com a seca, evidenciando correlações positivas com a precipitação ocorrida no verão (Stajić *et al.*, 2020).

Resumindo, o Pinheiro-larício mostra um forte sinal negativo com a temperatura, o que indica que esta espécie será, muito provavelmente, afetada, de forma negativa, pelas alterações climáticas, deslocando-se para andares superiores (máximo cerca de 1200 m altitude) e, em última instância, desaparecendo desta zona montanhosa.

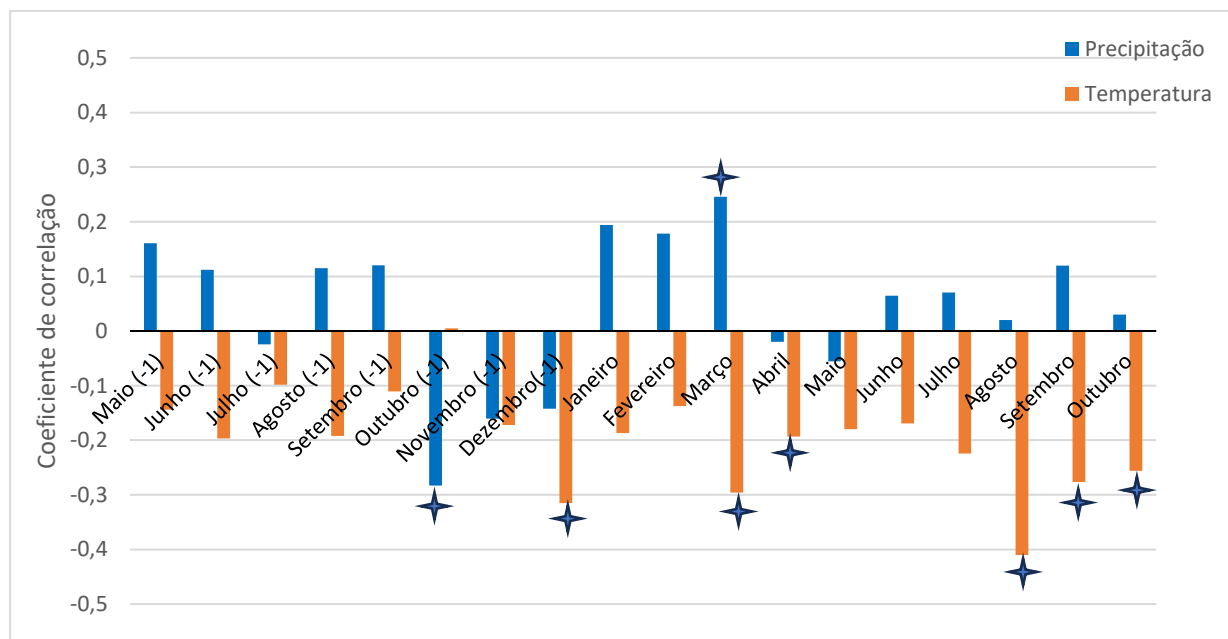


Figura 44 : Correlação entre as cronologias e os dados climáticos das estações do ano durante o período de 1965 a 2022 do Pinheiro-larício. Uma e duas estrelas representam níveis de significância de 95% e 99%, respetivamente. Os meses descritos com (-1) significam os meses do ano anterior ao crescimento.

## 4.2.2 Pinheiro-bravo

O crescimento do Pinheiro-bravo (Figura 45) tem algumas correlações positivas com a precipitação (dezembro do ano anterior, janeiro e julho, sendo a mais elevada referente a dezembro do ano anterior) e negativas com a temperatura (junho, julho e agosto, sendo a mais elevada a relativa a julho).

A relação positiva com a precipitação dos meses frios (dezembro do ano anterior e janeiro) poderá explicar-se com a recarga das reservas de água no solo, assegurando disponibilidade de água durante o período de crescimento e eventualmente durante a estação seca.

Nas regiões sujeitas a clima mediterrânico o verão é, geralmente, uma estação durante a qual as árvores entram em dormência pois as condições são demasiado áridas para a manutenção da atividade cambial e diferenciação das células do xilema (Campelo *et al.*, 2007). A relação positiva entre o crescimento e a precipitação de julho poder-se-á explicar pelas condições favoráveis de temperatura nesta altura do ano, o que fará aumentar o crescimento, se houver disponibilidade hídrica. De facto, a precipitação durante o período estival é um importante fator limitante à distribuição desta espécie.

As larguras dos anéis das árvores das espécies estudadas no clima mediterrânico revelaram uma correlação negativa com as temperaturas no verão. Este resultado indica que a árvore pode crescer durante o verão. Caso não existissem correlações, isso indicaria que não crescia (Campelo *et al.*, 2007,2009 & Nabais *et al.*, 2014).

Verificou-se uma correlação positiva entre O crescimento radial e a precipitação, tanto no inverno como na primavera. Esta relação indica um início precoce da divisão celular cambial, diferenciação do xilema e um período de crescimento prolongado (Begum, 2008 & Nabais *et al.*, 2014).

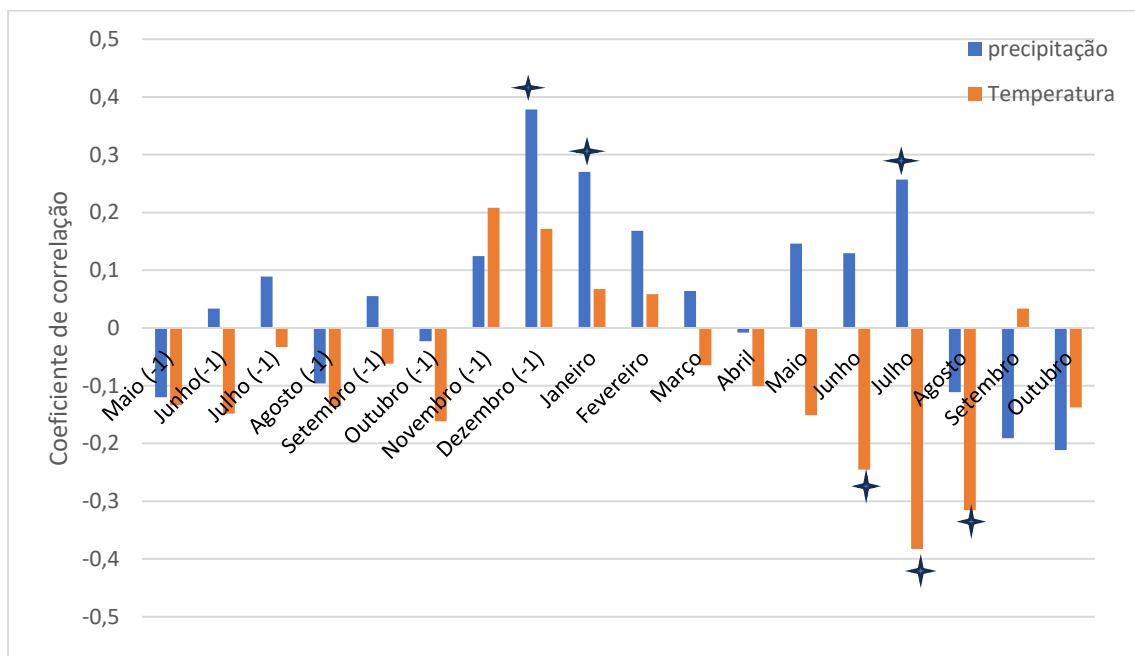


Figura 45 : Correlação entre as cronologias e os dados climáticos das estações do ano durante o período de 1965 a 2022 do Pinheiro-bravo. Uma ou duas estrelas representam uma significância de 95% e 99%, respetivamente. Os meses descritos com (-1) significam os meses do ano anterior ao crescimento.

### 4.2.3 Pinheiro-silvestre

No caso do Pinheiro-silvestre (Figura 46), o crescimento encontra-se relacionado negativamente tanto com a temperatura como com a precipitação para outubro e abril. A correlação negativa referente ao mês de abril indica que o aumento de temperatura esperado para o futuro terá repercussões negativas para esta espécie. Para este mês também há uma correlação negativa com a precipitação, o que sugere que esta espécie não está bem-adaptada às condições mediterrânicas.

O Pinheiro-silvestre de acordo com vários estudos, apresenta um crescimento radial baixo quando a temperatura é alta e a precipitação baixa. Pelo que o fator que mais limita o crescimento da árvore é a temperatura, exceto na Grã-Bretanha onde a precipitação e temperatura representam ambos fatores que condicionam o crescimento da árvore. (Brichta, *et al*, 2024).

Os resultados obtidos num estudo na Lituânia indicam que o Pinheiro-silvestre apresenta uma maior sensibilidade ao frio nos meses de fevereiro e março. Apresenta correlações significativas positivas para a temperatura no mês de fevereiro e setembro, mas não sendo revelados correlações significativas para a precipitação. Contudo apresenta correlações negativas significativas na Polónia para os mesmos meses. Se os verões forem muitos secos podem ocorrer correlações negativas significativas durante os meses de junho a agosto (Vitas, 2004 , Krapiec *et al.*, 2003,Laanelaid *et al.*, 2001 & Linderson *et al.*,1992).

Assim, com as mudanças climáticas o Pinheiro-silvestre deslocar-se-á para andares superiores nas zonas montanhosas ou mesmo poderá desaparecer destas zonas, alterando a disposição geográfica do Pinheiro-silvestre. A dispersão das sementes ocorrerá de modo diferente e em épocas diferentes o que fará com que a sua distribuição seja alterada (Richter *et al.*, 2012 & Herrero *et al.*, 2013).

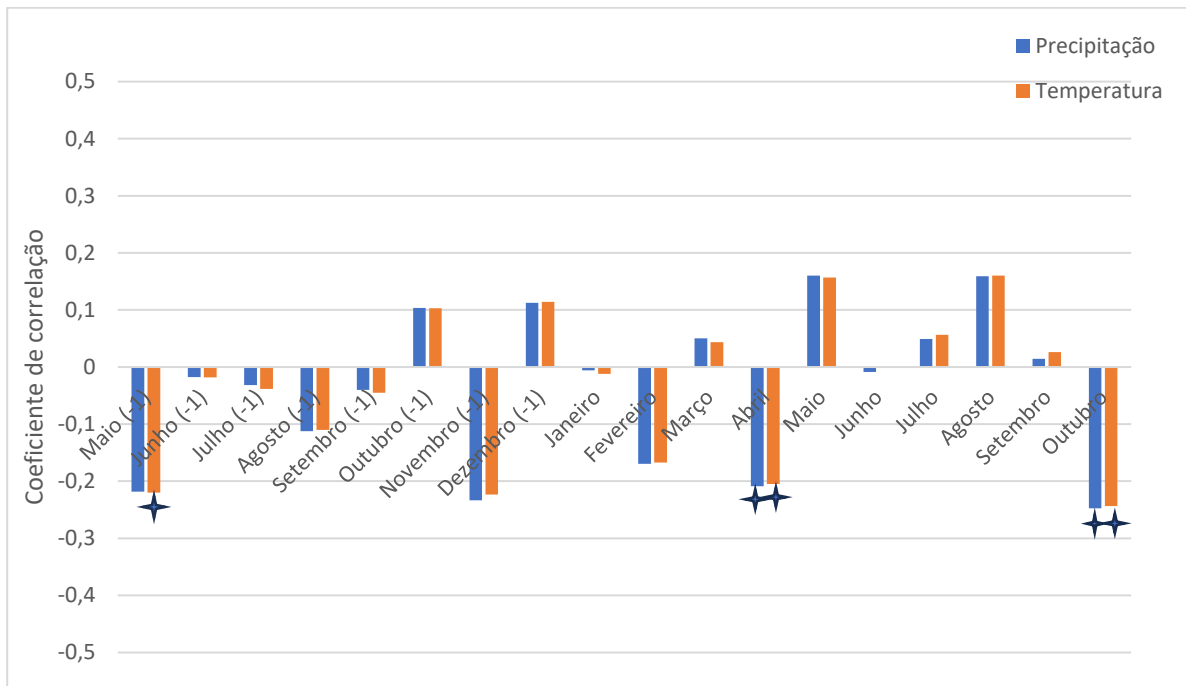


Figura 46 : Correlação entre as cronologias e os dados climáticos das estações do ano durante o período de 1965 a 2022 do Pinheiro-silvestre. Uma e duas estrelas representam níveis de significância de 95% e 99%, respetivamente. Os meses descritos com (-1) significam os meses do ano anterior ao crescimento.

#### 4.2.4 Cipreste de *lawson*

No referente ao Cipreste de *lawson* (Figura 47) encontrou-se uma relação positiva entre o crescimento e na precipitação e temperatura para o mês de março e negativa com a temperatura e precipitação do mês de outubro do ano anterior.

A relação negativa entre o crescimento e a precipitação de outubro do ano anterior poderá ser explicada pelo fato da precipitação elevada poder eventualmente levar à lixiviação dos nutrientes no solo, o que terá consequências negativas na estação de crescimento seguinte, quando as árvores precisarem dos nutrientes para formarem o novo lenho. Em março já se está no período de crescimento e, portanto, as árvores respondem positivamente à temperatura e precipitação, aumentando o crescimento radial. Face ao aumento previsto da temperatura como resultado das alterações climáticas o Cipreste de *lawson* será, muito provavelmente, uma espécie favorecida.

Os resultados obtidos num estudo na Polónia (Cedro *et al.*, 2021) indicam que o cipreste de *lawson* apresenta correlações positivas significativas com temperatura nos meses de verão (junho e julho) e correlações negativas significativas no mês de maio. Os anos em que a correlação é negativa estão associados à ocorrência de invernos frios e outonos frescos, com

insuficiência de precipitação no verão. As correlações positivas estão associadas a períodos com inverno mais quente, primavera precoce e valores elevados de precipitação no verão. Logo, trata-se de uma espécie que beneficia essencialmente com o início da primavera, apresentando correlações positivas significativas, momento em que o seu crescimento é favorecido (Cedro *et al.*, 2021)

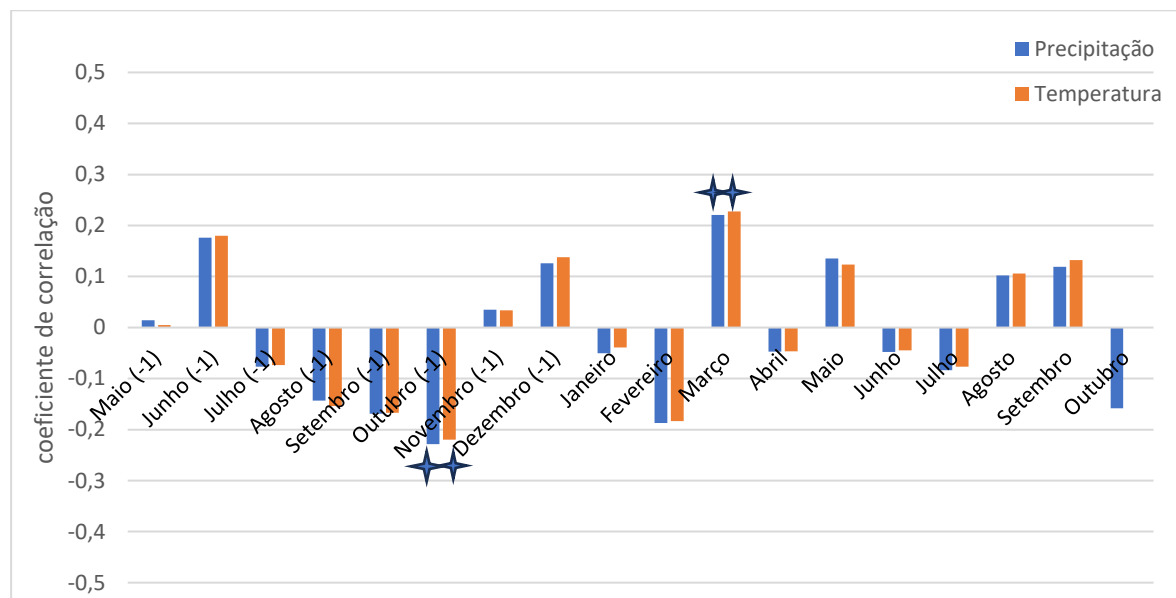


Figura 47 : Correlação entre as cronologias e os dados climáticos das estações do ano durante o período de 1965 a 2022 do Cipreste de *lawson*. Uma e duas estrelas representam níveis de significância de 95% e 99%, respectivamente. Os meses descritos com (-1) significam os meses do ano anterior ao crescimento.

# 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

## 5.1 Conclusões

As previsões para o futuro indicam que nesta região haverá um aumento da temperatura, o que conduzirá ao incremento da taxa de evapotranspiração das árvores. Este fato terá repercussões negativas no crescimento das árvores.

Face aos resultados obtidos no presente trabalho, o Pinheiro-larício e o Pinheiro-silvestre serão as espécies mais afetadas com as alterações climáticas futuras, uma vez que foram obtidas várias correlações negativas entre o crescimento destas espécies e a temperatura. De facto, trata-se de duas espécies típicas de climas frios, que não estarão bem-adaptadas às condições futuras da área de estudo.

O Cipreste de *lawson* mostra uma correlação positiva com a temperatura e precipitação da estação de crescimento, o que sugere que esta espécie poderá ter, no futuro, condições de sobrevivência.

No referente às espécies que apresentam correlações positivas com a precipitação, estas correlações referem-se, na maior parte dos casos, à precipitação de primavera, o que demonstra a importância da disponibilidade hídrica nesta estação, para o crescimento das árvores.

O Pinheiro-bravo mostra várias correlações negativas com a temperatura (verão) mas também várias positivas com a precipitação (primavera). O Pinheiro-bravo, que é uma espécie de crescimento rápido, apresentou a melhor adaptação às alterações bruscas do clima face à variação da temperatura e precipitação.

Assim, para a Serra da Lousã sugere-se a substituição dos povoamentos de Pinheiro-larício e Pinheiro-silvestre, por não se encontrarem adaptados às condições mais prováveis do futuro e sua substituição por espécies mais bem-adaptadas, nomeadamente Pinheiro-bravo e Cipreste de *lawson*.

Desta forma, a presente tese poderá dar um contributo para a escolha das melhores espécies a plantar nesta zona do país.

Assim, as espécies mais habituadas a altitudes elevadas e a temperaturas mais frias, terão de se adaptar a climas mais quentes e chuvosos, o que resultará a uma diminuição do seu

crescimento, não só devido à altitude, mas também à maior taxa de evapotranspiração. Uma vez que são espécies de crescimento mais lento, não irão conseguir crescer ao mesmo ritmo do que as espécies a altitudes mais baixas.

Pelo que, de modo a preservar as espécies, será necessária uma gestão florestal mais rigorosa e uma diminuição da desflorestação nas zonas onde essas espécies já estão ameaçadas pelas alterações climáticas.

Verificou-se no estudo de dendroclimatologia que as melhores condições para favorecer o crescimento das árvores correspondem a temperaturas moderadas com ocorrência de precipitação. Quando existem variações nesses aspetos as espécies tendem a diminuir o seu crescimento radial ou investir na reserva de nutrientes de modo a garantir a sua sobrevivência.

O crescimento radial das espécies em Portugal será menor por ação das temperaturas serem mais elevadas, mas noutros países o crescimento poderá ser maior devido às alterações climáticas.

## 5.2 Limitações

Algumas das limitações do presente estudo prendem-se pela presença, quer de falsos anéis em algumas árvores, quer de canais de resina, quer ainda do crescimento de novos nós sobre os anéis de crescimento já consolidados. Estas limitações dificultaram a análise das amostras e, para além disso, o fato de algumas amostras estarem partidas tornou impossível realizar a sua análise no *CooRecorder*. Podem também ter ocorrido erros causados por existir, em algumas amostras, lenho de compressão/reação, aquando da extração das amostras.

### 5.3 Desenvolvimento futuro

Face a estes eventos, é necessário, com base das características de cada espécie encontrar mecanismos que resultem num menor dano ao ambiente, florestando essas zonas com espécies mais adaptadas ao clima. É necessário um maior controlo de modo a evitar desflorestação em zonas em que as árvores se apresentam mais estáveis e em crescimento (nomeadamente no período do seu crescimento, Outono e Primavera).

O Pinheiro-bravo poderia ser uma dessas espécies uma vez que tem crescimento rápido, beneficiando e minimizando o efeito das alterações climáticas, sendo a espécie mais rentável para a área em estudo. Nesse sentido poderia ser interessante realizar um estudo do crescimento do Pinheiro-bravo a diferentes altitudes para avaliar se a lixiviação dos nutrientes ocorre das zonas mais altas para as mais baixas.

Desta forma, esta dissertação vai ao encontro de duas teses de doutoramento, possibilitando avaliar em maior detalhe a serra da Lousã e tirar conclusões mais aprofundadas ou mesmo realizar novos estudos que complementem os resultados aqui obtidos.

Assim, sugere-se a continuação da amostragem num maior número de árvores por forma a que estas dúvidas possam ser esclarecidas.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, C.; Viçosa, C. (2009) A flora e a vegetação das montanhas de Portugal continental. Sustentabilidade da Montanha Portuguesa: Realidades e Desafios. Biblioteca Digital do IPB: Sustentabilidade da montanha portuguesa: realidade e desafios. <http://hdl.handle.net/10198/15034>
- Aguiar, C.; Rodrigues, O.; Azevedo, J. e Domingos, T. (2009b) - Montanha. In: Pereira, H.M.; Domingos, T.; Vicente, L. e Proença, V. (Eds.) - Ecossistemas e bem-estar humano: resultados da avaliação do milénio para Portugal. Lisboa, Escolar Editora, p. 295-339.
- Almeida, D., Soares, P., Costa E Silva, F., Carrasquinho, I., Soares David, T., Silva, M., Gaspar, M., Louzada, J., Cunha, J., Calado, N. (2020) Relatório de identificação e justificação das espécies e proveniências de Pinus spp. mais produtivas e mais adaptadas às alterações climáticas. ISA Acesso a 18/6/24 Disponível em : [https://replant.pt/wp-content/uploads/2022/11/1\\_Deliverable-E.1.1.1\\_Relatorio-identificacao-especies.pdf](https://replant.pt/wp-content/uploads/2022/11/1_Deliverable-E.1.1.1_Relatorio-identificacao-especies.pdf)
- Alves AAM 1982. Técnicas de produção Florestal. Instituto Nacional de Investigação Científica, Lisboa
- Alves AM, Pereira JS, Correia AV 2012. Silvicultura – a gestão dos ecossistemas florestais. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- Assis, M.V.; Mattos. E.A. (2016) Vulnerabilidade da vegetação de campos de altitude às mudanças climáticas. *Oecologia Australis* 20(2): 162-174, 2016. Acesso a 17/6/24. Disponível em <https://revistas.ufrj.br/index.php/oa/article/view/8357>
- AIFF. (2013). Uma visão para o sector florestal.
- Azevedo, J.C.; Cadavez, V.; Arrobas, M.; Pires, J.M. (2016) Sustentabilidade da Montanha Portuguesa: Realidades e Desafios. Instituto Politécnico de Bragança.
- Beniston, M., Diaz, H. F., & Bradley, R. S. (1997). CLIMATIC CHANGE AT HIGH ELEVATION SITES: AN OVERVIEW
- Benítez, G., Monjardín, L., Thaden, J., Rosado, I., Castillo, G., Queihua, M. (2023) Carbon storage in a peri-urban neotropical forest: Assessing its potential and patterns of change over half a century *Urban Forestry & Urban Greening* 86 (2023) 128009 <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128009>
- Begum, S., Nakaba, S., Bayramzadeh, V., Oribe, Y., Kubo, T. and Funada, R. (2008) Temperature responses of cambial reactivation and xylem differentiation in hybrid poplar (*Populus sieboldii* x *P. grandidentata*) under natural conditions. *Tree Physiol.* 28, 1813–1819.
- Buntgen, U.; Frank, D.; Kaczka, R.; Verstege, A.; Kozica, T.; Esper, J. (2007) Growth responses to climate in a multi-species tree-ring network in the Western Carpathian Tatra Mountains, Poland

- and Slovakia. *Tree Physiology* 27, 689–702. <https://academic.oup.com/treephys/article/27/5/689/1671139>
- Brichta, J., Simunek, V. Bílek, L. Vacek, Z., Gallo, j., Drozdowski, w., Fernandez, J., Mason, B., Gomez, S.R., Hajek, V., Vacek, S., Štícha, v., Brabec, P., Fuchs, z. Effects of Climate Change on Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Growth across Europe: Decrease of Tree-Ring Fluctuation and Amplification of Climate Stress. *Forests* 2024, 15, 91. Acesso a 23/6/24. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f15010091>
- Bonan, G.B., 2002. *Ecological Climatology: Concepts and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge, UK <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-5871.2009.00640.x>.
- Campelo, F., Nabais, C., Freitas, H. and Gutierrez, E. (2007) Climatic significance of tree-ring width and intra-annual density fluctuations in *Pinus pinea* from a dry Mediterranean area in Portugal. *Ann. For. Sci.* 64, 229–238.
- Campelo, F., Nabais, C., García-González, I., Cherubini, P., Gutiérrez, E. and Freitas, H. (2009) Dendrochronology of *Quercus ilex* L. and its potential use for climate reconstruction in the Mediterranean region. *Can. J. For. Res.* 39, 2486–2493.
- Carvalho, P., & Alves, L. (2016). Áreas protegidas e desenvolvimento inclusivo em territórios rurais: contributo para uma proposta de classificação da Serra da Lousã. <https://www.researchgate.net/publication/312233895>
- Caudullo, G.; Durrant, T.H. (2016) *Chamaecyparis lawsoniana* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. [https://www.researchgate.net/publication/299468172\\_Chamaecyparis\\_lawsoniana\\_in\\_Europe\\_distribution\\_habitat\\_usage\\_and\\_threats](https://www.researchgate.net/publication/299468172_Chamaecyparis_lawsoniana_in_Europe_distribution_habitat_usage_and_threats)
- Cedro, A., Nowak, g., Kowalewska-Kalkowska, H. (2021) Climate Response in Tree-Rings of Sawara Cypress [*Chamaecyparis pisifera* (Siebold & Zucc.) Endl.] in Poland. *Forests* 2021, 12, 967. <https://doi.org/10.3390/f12080967>
- Cook, E. R. e Kairiukstis, L. A. (1992). *Methods of Dendrochronology: applications in the environmental science*. Springer Science+Business Media, Dordrecht, 403 pp
- Correia AV, Oliveira AC 2003. Principais espécies florestais com interesse para Portugal. Zonas de influência atlântica. Estudos e Informação nº 322, DGF, Lisboa.
- Correia, A.V.; Carvalho, A.M.M.; Fabião, A.M.D.; Mendes, A.M.S.C.; Fialho, A.A.B.; Aguiar, C.; Feliciano, D.M.S.; Catry, F.X.; Goes, F.A.; Sequeira, E.M.B.M.; Soares, J.M.A.; Pereira, J.S.; Capelo, J.H.; Costa, J.C.A.; Leal, L.F. G.C.; Radich, M.C.; Lousã, M.F.; Canaveira, P.T.; Silva, J.S. (2007) Pinhais e eucaliptais. *Árvores e florestas de Portugal*. Fundação Luso Americana. ISBN: 978-989-619-101-6. p.47-89

- Devi, N.M, Kukarskih, V.V., Bubnov, M.O. (2023) Elevational changes in climate response of *Pinus nigra pallasiana* tree-rings on the Crimean Peninsula. *Dendrochronologia* 79 (2023) 126092. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2023.126092>
- de Wergifosse, 'Louis, André, F., Goosse, H., Boczon, A., Cecchini, S., Ciceu, A., Collalti, A., Cools, N., D'Andrea, E., De Vos, B., Hamdi, R., Ingerslev, M., Knudsen, M. A., Kowalska, A., Leca, S., Matteucci, G., Nord-Larsen, T., Sanders, T. G., Schmitz, A., ... Jonard, M. (2022). Simulating tree growth response to climate change in structurally diverse oak and beech forests. *Science of the Total Environment*, 806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150422>
- Decreto Lei nº 92/2019 de 10 de julho Estratégia Nacional para a conservação da natureza e biodiversidade. Diário da República n.º 130/2019, Série I de 2019-07-10. Acedido a 21/6/24. Disponível em [www.dre.pt](http://www.dre.pt).
- Diário da República n.º 96/1999, Série I-A de 1999-04-24  
<https://diariodarepublica.pt/dr/legislacao-consolidada/decreto-lei/1999-34527675>  
Acesso a 20/10/2023
- Dias, A., Carvalho, A., Silva, M.E., Brito, J., Gaspar, M., Alves, A., Rodrigues, J., Pereira, F., Morais, J., Lousada, J. (2020) Physical, chemical and mechanical wood properties of *Pinus nigra* growing in Portugal. *Annals of Forest Science* (2020) 77: 72. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00984-8>
- EEA (2010) - Europe's ecological backbone: recognising the true value of our mountains. Copenhagen, European Environment Agency, 248 p.
- Enescu, C.M.; Rio, D.; Caudullo, G.; Mauri, A.; Durrant, T.H. (2016) *Pinus nigra* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. European Atlas of Forest Tree Species | Tree species [https://www.researchgate.net/publication/299470596\\_Pinus\\_nigra\\_in\\_Europe\\_distribution\\_habitat\\_usage\\_and\\_threats](https://www.researchgate.net/publication/299470596_Pinus_nigra_in_Europe_distribution_habitat_usage_and_threats)
- Fan, Z. X., Bräuning, A., Cao, K. F., & Zhu, S. D. (2009). Growth-climate responses of high-elevation conifers in the central Hengduan Mountains, southwestern China. *Forest Ecology and Management*, 258(3), 306–313. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.04.017>
- FAO. (2020). Global Forest Resources Assessment 2020 – Key findings. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca8753en>
- FAO. (2024). The State of the World's Forests 2024 – Forest-sector innovations towards a more sustainable future. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd1211en>
- Feng, M., Sexton, J., Huang, C., Naand, A., Channan, S., Song, X., Song, D., Kim, D., Noojipady, P., Townshend, J. (2016) Earth science data records of global forest cover and change: Assessment of accuracy in 1990, 2000, and 2005 epochs. M. Feng *et al.* / *Remote Sensing of Environment* 184 (2016) 73–85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.06.012>

- Fritts, H.C. (1976) Tree rings and climate. Laboratory of tree ring research. University of Arizona, Tucson. USA
- Galiano, L., Martinez-Vilalta, J., Lloret, F., 2010. Drought-induced multifactor decline of Scots pine in the Pyrenees and potential vegetation change by the expansion of co-occurring oak species. *Ecosystems* 13 (7), 978–991.
- Grissino-mayer, H. D. (2017). *The Time is Right : Redefining the Principles in Dendrochronology*. University of Tennessee, Laboratory of Tree-Ring Science, Knoxville
- grissino -mayer, Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA (2001) *tree ring research*, vol. 57(2), 2001, pp. 205-221
- Hartl-Meier, C., Dittmar, C., Zang, C., & Rothe, A. (2014a). Mountain forest growth response to climate change in the Northern Limestone Alps. *Trees - Structure and Function*, 28(3), 819–829. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-0994-1>
- Harris, N. , Gibbs, D., Baccini, A., Birdsey, R., Bruin, S., Farina, M., Fatoyinbo, L., Hánsen, M., Herold, M., Houghton, R., Potapov, P., Suarez, D., Cuesta, R., Saatchi, S., Slay, C., Turubanova, S. Tyukavina, A. (2021) Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. <https://www.nature.com/articles/s41558-020-00976-6>
- Kapos, V.; Rhind, J.; Edwards, M.; Price, M.F. e Ravilious, C. (2000). Developing a map of the world's mountain forests. In: Price, M.F. e Butt, N. (Eds.) - *Forests in Sustainable Mountain Development: A State-of-Knowledge Report for 2000*. Wallingford, CAB International, p. 4-9.
- Herrero, A.; Rilin, A.; Zamora, R. (2013) Varying climate sensitivity at the dry distribution edge of *Pinus sylvestris* and *P. nigra*. A. Herrero, *et al.* / *Forest Ecology and Management* 308 (2013) 50–61. Acesso a 29/3/ 24. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.034>
- Hughes, M. K. (2002). Dendrochronology in climatology ± the state of the art. <http://www.urbanfischer.de/journals/dendro>
- ICNF 2019 A. Inventário Florestal Nacional VI. Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, Lisboa. Acesso a 18/6/24 Disponível em: <https://www.fc.up.pt/pessoas/mccunha/Silvicultura/Aulas/estatisticas/IFN6-Principais-resultados-Jun2019.pdf>
- IPMA. Disponível em: <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/?print=true>
- Krapiec, M., Szychowka-Krapiec, M., Wilezynski, E., Zielski S.A. (2003) Dendrochronological signal of scots pine in Poland. *Eurodendro-2003. Abstracts of the international conference*. 2003: 49.
- Körner C, e Ohsawa, M. (2005) - Mountain systems. In: Hassan, R.; Scholes, R. e Ash, N. (Eds.) - *Ecosystem and Human Well-being: Current State and Trends. Millennium Ecosystem Assessment, Vol 1*. Washington, DC, Island Press, p. 681–716.

- Koerner C (2012) Alpine treelines. Functional ecology of the global high elevation tree limits. Springer, Basel
- Laanelaid, A. (2001) Response of pines to climate factors in Estonia. Tree rings and people. Abstracts of the International conference on the future of Dendrochronology, 2001:89
- Leal, S., Nunes, E., Pereira, H. (2008). Cork oak (*Quercus suber* L.) wood growth and vessel characteristics variations in relation to climate and cork harvesting. *European Journal of Forest Research*, 127, pp. 33–41. doi: 10.1007/s10342-007-0180-8
- Kräuchi, N., Brang, P. & Schönenberger, W. 2000. Forests of mountainous regions: gaps in knowledge and research needs. *Forest Ecology and Management* 132, 73-82.

- Lévesque, M., Rigling, A., Bugmann, H., Weber, P., & Brang, P. (2014). Growth response of five co-occurring conifers to drought across a wide climatic gradient in Central Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 197, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.06.001>
- Linderson, L. 1992. Dendroclimatological investigation in Southern Sweden. *Tree rings and environment. Proceedings of the International Dendrochronological*, 16-17:193-204
- Loughlin, N., J. D., Gosling, W. D., Coe, A. L., Gulliver, P., Mothes, P. e Montoya, E. (2018). Landscape-scale drivers of glacial ecosystem change in the montane forests of the eastern Andean flank, Ecuador. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 489: 198–208
- Ma, J., Xiaoting, L., Baoquan, J., *et al.* (2021). Spatial variation analysis of urban forest vegetation carbon storage and sequestration in built-up areas of Beijing based on i-Tree Eco and Kriging. *Urban Forestry & Urban Greening*, 66: 127413
- Makinen H, N ojd P, Kahle HP, Neumann U, Tveite B, Mielik oainen K, Rohle H, Spiecker H (2002b) Radial growth variation of Norway o spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe. *Forest Ecol Manage* 171:243–259
- Martins, D. S., Raziei, T., Paulo, A. A., & Pereira, L. S. (2012). Spatial and temporal variability of precipitation and drought in Portugal. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(5), 1493–1501. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-1493-2012>
- Miranda, P. M., Valente, M. A., Rodrigues Tomé, A., & Trigo, R. M. (2006). O clima de Portugal nos séculos XX e XXI View project. <https://www.researchgate.net/publication/258839031>
- Modes, K. S., Antunes, M.A.G., Melo, R.C., Junior, M.D., Vivian, M.A. (2024) Influência do lenho de compressão e amarelecimento de copa nas propriedades da madeira de *Pinus taeda* L. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Curitiba/SC, Brasil; 2 Florestal Gateados Ltda, Campo Belo do Sul/SC, Brasil
- Mota, M. M., & Vieira, P. (Eds.). (2008). *Pine Wilt Disease: A Worldwide Threat to Forest Ecosystems*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8455-3>
- Nabais, C., Campelo, F., Vieira, J., & Cherubini, P. (2014). Climatic signals of tree-ring width and intra-annual density fluctuations in *Pinus pinaster* and *Pinus pinea* along a latitudinal gradient in Portugal. *Forestry*, 87(4), 598–605. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu021>.
- Nunes, L. J. R., Meireles, C. I. R., Gomes, C. J. P., & Ribeiro, N. M. C. A. (2019b). The evolution of climate changes in Portugal: Determination of trend series and its impact on forest development. *Climate*, 7(6). <https://doi.org/10.3390/cli7060078>
- Rathgeber, C. B. K., Cuny, H. E., Fonti, P. (2016). Biological Basis of Tree-Ring Formation: A Crash Course. *Frontiers in Plant Science*, 7, 734. doi: 0.3389/fpls.2016.00734
- Richter, S., Kipfer, T., Wohlgemuth, T., Calderón Guerrero, C., Ghazoul, J., Moser, B., 2012. Phenotypic plasticity facilitates resistance to climate change in a highly variable environment.

- Oecologia 169, 269–279. Acesso a 23/6/24. Disponível em: [http://refhub.elsevier.com/S0378-1127\(13\)00476-3/h0285](http://refhub.elsevier.com/S0378-1127(13)00476-3/h0285)
- Rigling, A., *et al.*, 2013. Driving factors of a vegetation shift from Scots pineto pubescent oak in dry Alpine forests. *Global Change Biol.* 19 (1), 229–240  
<https://www.spikevm.com/calculators/logging/convert-sq-foot-sq-meters.php>
- Rio, D.; Caudullo, g. (2016) *Pinus sylvestris* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. European Atlas of Forest Tree Species | Tree species.  
[https://www.researchgate.net/publication/299470777\\_Pinus\\_sylvestris\\_in\\_Europe\\_distribution\\_habitat\\_usage\\_and\\_threats](https://www.researchgate.net/publication/299470777_Pinus_sylvestris_in_Europe_distribution_habitat_usage_and_threats)
- Rolland C, Petitcolas V, Michalet R (1998) Changes in radial tree growth for *Picea abies*, *Larix decidua*, *Pinus cembra* and *Pinus uncinata* near the alpine timberline since 1750. *Trees Struct Funct* 13:40–53
- Rubio-Cuadrado, A., Montes, F., Alberdi, I., Cañellas, I., Aulló-Maestro, I., Sánchez-Salguero, R., Hevia, A., Pérez-Cruzado, C., Molina-Valero, J. A. E Camarero, J. J. (2024). Analyses from stand to tree level allow disentangling the effects of age, size, origin and competition on tree growth sensitivity to climate in natural and afforested Scots pine forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 355 (2024) 110148
- Pascual, J. , Hidalgo, C., Feito, I., Majada, J., Meijóm, M. (2024) An analysis of natural variation in *Pinus pinaster* through the lens of systems biology. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105828>
- Paulsen J, Weber U, Körner C (2000) Tree growth near treeline: abrupt or gradual reduction with altitude? *Arct Antarct Alp Res* 32(1):14–20
- Pillow, M.Y., Schafer, E.R., Pew, J.C. (1936) Occurrence of compression wood in black spruce and its effect on properties of groundwood pulp. Presented at annual meeting of technical association of the pulp and paper industry, new York city, feb 17-20 ,1936 published in the paper trade jornal, april 16,1936.
- Ranjan, A., Gorai, A. (2024) Assessment of global carbon dynamics due to mining-induced forest cover loss during 2000–2019 using satellite datasets. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123271>
- Savva, Y., Oleksyn, J., Reich, P. B., Tjoelker, M. G., Vaganov, E. A., & Modrzynski, J. (2006). Interannual growth response of Norway spruce to climate along an altitudinal gradient in the Tatra Mountains, Poland. *Trees - Structure and Function*, 20(6), 735–746.  
<https://doi.org/10.1007/s00468-006-0088-9>
- Sarmiento, G., 1986. High altitude tropical biogeography. In: Vuilleumier, F., Monasterio, M. (Eds.), *Ecologically Crucial Features of Climate in High Tropical Mountains*. Oxford University Press, Oxford, pp. 11–45.

- Stajić, B., Kazimirović, M., Dukić, V., Radaković, N. (2020) First Dendroclimatological Insight into Austrian Pine (*Pinus nigra* Arnold) Climate-Growth Relationship in Belgrade Area, Serbia. *South-east Eur for* 11(2): early view. <https://doi.org/10.15177/seefor.20-12> Received: 1 Jul 2020; Revised: 22 Sep 2020; Accepted: 23 Sep 2020; Published online: 8 Oct 2020
- Theurillat, J., Guisan, A. (2001) Potential Impact of Climate Change on Vegetation in the European Alps: A Review. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1010632015572>
- Vitas, A. (2004) Dendroclimatological Research of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Baltic Coastal Zone of Lithuania. *Baltic Forestry*, 10 (1): 65-71.
- Vinãs, R.A; Oliveira, C.S.; Rigo, D. (2022) *Pinus Pinaster* In Europe: Distribution, Habitat, usage and threats. *European Atlas of forest tree species*.
- Wang, T., Zhang, Q. Bin, & Ma, K. (2006). Treeline dynamics in relation to climatic variability in the central Tianshan Mountains, northwestern China. *Global Ecology and Biogeography*, 15(4), 406–415. <https://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2006.00233.x>
- West, P. W. (2015). *Tree and Forest Measurement*. Springer.
- Wigley, T. M. L., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2), 201–213. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)0232.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)0232.0.CO;2)
- Xofis, P., Kefalas, G., Oirazidis, K. (2023) Biodiversity and Conservation of Forests. *Forests* 2023, 14, 1871. <https://doi.org/10.3390/f14091871>
- Zhang, X., Xiang, De-Q., Yang, C., Wu, W. e Liu, H.-B. 2022. The spatial variability of temporal changes in soil pH affected by topography and fertilization. *Catena* 218, 106586.
- Zobel, D., Hawk, G. (1980) The Environment of *Chamaecyparis lawsoniana*. <https://doi.org/10.2307/2424626>
- Yang, Q., Liu, G., Casazza, M., Dumentet, S., Yang, Z. (2021) Ecosystem restoration programs challenges under climate and land use change. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150527>  
<https://www.eea.europa.eu/publications/10-messages-for-2010-mountain-ecosystems>

## APÊNDICE

Com base nos dados obtidos nos pontos de amostragem foi possível ter uma noção das áreas basais respectivas para cada espécie (tabela 5). Obtidos pela conversão de pé quadrado por acre para metros quadrados por hectare através do site: <https://www.spikevm.com/calculators/logging/convert-sq-foot-sq-meters.php>.

Tabela 5: Área basal para cada uma das espécies obtidas no local de amostragem e respetivo erro padrão

Área de estudo	Altura média de árvores (erro padrão)	Diâmetro (erro padrão)	Área basal (PINI) m <sup>2</sup> /ha	Área basal (PISY) m <sup>2</sup> /ha	Área basal (CHAMA) m <sup>2</sup> /ha	Área basal (PIPI) m <sup>2</sup> /ha	Área basal (sobreiro) m <sup>2</sup> /ha
<b>PINI</b>	23(0,50)	50(1,60)	15,38(1,68)	8,75(1,89)	8,42(1,26)	0	2,30(0)
<b>PISY</b>	23(0,57)	34(1,44)	6,89(1,50)	15,66(1,97)	9,94(1,00)	0	2,30(0)
<b>PIPI</b>	29(0,44)	50(1,21)	0	0	0	9,84(1,41)	2,30(0)
<b>CHAMA</b>	22(0,50)	39(1,32)	4,97(1,07)	4,13(0,75)	23,96(4,46)	0	0

## **Lenho de compressão e lenho de reação**

O lenho de reação manifesta-se pela presença de medula excêntrica no tronco das árvores, causado pela diferença de atividade cambial por consequência de um estímulo desordenado dos hormônios de crescimento pela copa (Modes, *et al.*, 2024). Estes defeitos na árvore ocasionam que possa ocorrer amostras que não seja possível de ler no programa *CooRecorder*, sendo descartadas. Sendo necessário para tal realizar outra verumada quando se deteta a presença de um lenho de reação do tipo de compressão.

Os lenhos de compressão são mais evidentes em amostragens de um número pequeno de amostra, 60 a 80 % das árvores apresentam lenho de compressão. Devido à competição existente pelos nutrientes, sol, água as árvores tendem a inclinar - se, ocasionando pontos de compressão (Pillow, *et al.*, 1936). O lenho tensionado geralmente apresenta uma maior porção de celulose e menos lenhificado do que o lenho normal.



(2024)

LILIANA OLIVEIRA

IMPACTO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS EM ECOSISTEMAS FLORESTAIS DE MONTANHA:  
O CASO DA SERRA DE LOUSÃ