

Impacto das alterações climáticas no crescimento de árvores de *Pseudotsuga menziesii* em dois locais em Portugal

Maria Beatriz Sanches de Miranda e Sanchez Jorge

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Gestão e Conservação de Recursos Naturais

Orientadores: Professora Doutora Helena Margarida Nunes Pereira
Doutora Vanda Cristina Paiva Tavares de Oliveira

Júri:

Presidente: Professora Doutora Maria Teresa Marques Ferreira
Professora Catedrática
Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa

Vogais: Professora Doutora Helena Margarida Nunes Pereira
Professora Catedrática
Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa

Doutora Patricia Maria Rodriguez Gonzalez
Investigadora de Pós-Doutoramento
Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa

Muitos participaram nesta minha jornada, dando apoio, transmitindo conhecimentos e mostrando caminhos. Gostaria de expressar a minha gratidão a todos os que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste projeto. Não posso deixar de manifestar os meus agradecimentos à Professora Helena Pereira e à Doutora Vanda Oliveira, pela orientação, disponibilidade e partilha do saber. Por último, agradeço à Doutora Isabel Miranda, minha mãe, por saber que sem ela, nada seria possível.

Resumo

Neste trabalho foi realizada uma análise dendrocronológica em amostras de *Pseudotsuga menziesii*, da Serra da Cabreira e da Serra da Estrela. Esta análise foi feita em 4 níveis de altura das árvores (base, 5 m, 10 m e 15 m), com o objetivo de analisar os efeitos de alterações climáticas no crescimento das árvores em Portugal.

O impacto do clima foi examinado através da comparação das cronologias do anel de crescimento total e das suas componentes integrantes, com os dados climáticos das estações mais próximas.

Os resultados mostraram que as árvores apresentaram um crescimento radial médio elevado. A estrutura do anel é semelhante entre as árvores dos dois locais, assim como dentro de cada árvore. Verificou-se a existência de anéis maiores nos primeiros anos de idade cambial.

O crescimento da *Pseudotsuga menziesii* está relacionado com o clima no período de transição entre o EW e o LW (agosto-setembro), nomeadamente com a radiação solar de agosto e a temperatura mínima de setembro.

Ficaram registados como anos indicadores negativos para a Serra da Cabreira os anos 1981 e 2001, e para a Serra da Estrela os anos 1986, 1990-91, 2009 e 2013, que na sua maioria correspondem a anos de seca.

Palavras-chave: Dendrocronologia / *Pseudotsuga menziesii* / Anel de crescimento / Serra da Cabreira / Serra da Estrela

Abstract

A dendrochronological analysis was performed on samples of *Pseudotsuga menziesii* trees from Serra da Cabreira and Serra da Estrela (Portugal) at four height stem levels (base, 5 m, 10 m and 15 m), aiming at studying the climatic effects on tree growth in Portugal.

The impact of climate was examined through the comparison of ring width chronologies and their components (earlywood and latewood), with climate data from the nearest meteorological stations.

The results showed that the trees presented a high average radial growth. The ring structure was similar in the trees of the two sites, as well as within each tree. There was a higher ring growth in the early years of cambial age.

The growth of *Pseudotsuga menziesii* was related to the climate at the transition period between earlywood and latewood (August-September), especially with August solar radiation, and September minimum temperature.

The years 1981 and 2001 were recorded as negative pointer years for Serra da Cabreira, and the years 1986, 1990-91, 2009 and 2013 for Serra da Estrela. Most of these years corresponded to years of drought.

Key-words: Dendrochronology / *Pseudotsuga menziesii* / Growth ring / Serra da Cabreira / Serra da Estrela

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	iv
1. Enquadramento e objectivos	1
1.1. Objectivos do trabalho	2
2. Introdução.....	3
2.1. Caracterização da <i>Pseudotsuga menziesii</i>	3
2.2. Os anéis de crescimento anual das árvores	5
2.3. Dendrocronologia	6
2.4. Alterações climáticas	8
3. Material e métodos	11
3.1. Material	11
3.1.1. Caracterização edafoclimática dos dois locais.....	13
3.1.1.1. Serra da Cabreira	13
3.1.1.2. Serra da Estrela.....	14
3.2. Métodos	16
3.2.1. Preparação das amostras	16
3.2.2. Medição dos anéis de crescimento anual	16
3.2.3. Sincronização e datação das séries de anéis de crescimento	17
3.2.4. Principais indicadores estatísticos das séries de anéis de crescimento.....	17
3.2.4.1. Sensibilidade média.....	18
3.2.4.2. Gleichläufigkeit	18
3.2.5. Construção das cronologias	19
3.2.5.1. Padronização das séries de anéis de crescimento	19
3.2.5.2. Indicadores estatísticos das cronologias	21
3.2.5.3. Técnicas das médias das correlações interséries.....	21
3.2.5.4. Sinal expresso da população	22
3.2.6. Identificação do sinal climático das cronologias dos anéis de crescimento	22
3.2.7. Identificação dos anos indicadores	23
4. Resultados e discussão.....	24
4.1. Análise e caracterização das séries de anéis de crescimento.....	24
4.2. Cronologias das séries de anéis de crescimento.....	30

4.3.	Relação entre o clima e o crescimento das árvores	36
4.3.1.	Identificação dos sinais climáticos nas cronologias	36
4.4.	Eventos extremos	41
4.4.1.	Análise das séries de anéis de crescimento	41
4.4.2.	Anos indicadores	44
5.	Conclusão.....	50
6.	Bibliografia	52
Anexos.....		60

Lista de Figuras

- Figura 1 *Pseudotsuga menziesii*: A - Povoamento; B - Agulhas; C - Tronco. 3
- Figura 2 Anéis de crescimento de *Pseudotsuga menziesii*, com os respectivos lenhos de início de estação e de fim de estação. 4
- Figura 3 Localização dos dois locais de amostragem das árvores de *Pseudotsuga menziesii* . Informação de base. Carta Administrativa Oficial de Portugal - Versão 2016 (CAOP 2016), DGTerritório 2016..... 11
- Figura 4 Rodelas cortadas a vários níveis de altura das árvores de *Pseudotsuga menziesii* ... 12
- Figura 5 Gráfico termopluiométrico da Serra da Cabreira para uma série de 36 anos (1979 a 2015), a partir dos dados da estação meteorológica de Molares. 14
- Figura 6 Gráfico termopluiométrico da Serra da Estrela para uma série de 36 anos (1979 a 2015) a partir dos dados da estação meteorológica de Oledo..... 15
- Figura 7 Esquema de amostragem dos provetes 16
- Figura 8 Mesa de medição de deslocamentos (LINTAB Linear table 560 mm / 2,5 mm); Stereo Microscope LEICA M80;..... 17
- Figura 9 Variação radial com a idade do câmbio da percentagem média do lenho de fim de estação (LW) e de início de estação (EW) das 10 árvores de cada local para o nível de altura de 5 m. 26
- Figura 10 Séries de crescimento radial das árvores da Serra da Cabreira para o segundo nível de altura (5 m) de todas as árvores (cada linha corresponde a uma árvore) por idade cambial (RW - anel de crescimento completo; EW - lenho de início de estação; LW - lenho de fim de estação). 27
- Figura 11 Séries de crescimento radial das árvores da Serra da Estrela para o segundo nível de altura (5 m) de todas as árvores (cada linha corresponde a uma árvore) por idade cambial (RW - anel de crescimento completo; EW - lenho de início de estação; LW - lenho de fim de estação) 28

Figura 12 Séries de crescimento médio das árvores da Serra da Cabreira e Serra da Estrela para o segundo nível de altura (5 m) de todas as árvores (RW - anel de crescimento completo; EW - lenho de início de estação; LW - lenho de fim de estação). 29

Figura 13 Séries de crescimento médias das árvores da Serra da Cabreira e da Serra da Estrela aos quatro níveis amostrados (RW - anel de crescimento completo). 30

Figura 14 Diagrama de extremos e quartis para os crescimentos da Serra da Cabreira (SE) e da Serra da Estrela (SE) para o segundo nível de amostragem (5 m de altura). 31

Figura 15 Diagrama de extremos e quartis para o indicador Gleichläufigkeit para as séries cronológicas da Serra da Cabreira (SE) e da Serra da Estrela (SE) para o segundo nível de amostragem (5 m de altura). 31

Figura 16 Representação da espessura dos anéis de crescimento em função da idade da árvore (como exemplo a árvore de código número 1, da Serra da Cabreira). A linha preta corresponde aos dados observados, a linha verde à curva Spline, a linha vermelha à curva Exponencial negativa ou Straight Line, a linha azul escura à Linha média, a linha roxa à curva Ar e a linha azul clara à curva Friedman's super soother. 32

Figura 17 Representação da espessura dos anéis de crescimento em função da idade da árvore (como exemplo a árvore de código número 8, da Serra da Estrela). A linha preta corresponde aos dados observados, a linha verde à curva Spline, a linha vermelha à curva Exponencial negativa ou Straight Line, a linha azul escura à Linha média, a linha roxa à curva Ar e a linha azul clara à curva Friedman's super soother. 32

Figura 18 Cronologias finais indexadas para os dois locais de amostragem, juntamente com o número de amostras usado para cada ano da cronologia (área sombreada). 34

Figura 19 Resumo da análise SEASCORR do sinal climático nos dados residuais da cronologia. As variáveis climáticas são a evapotranspiração e a precipitação. Na primeira linha a correlação entre o anel total aos 5 metros de altura das árvores da Serra da Cabreira com a evapotranspiração mensal, soma de 3 meses e soma de 6 meses, com o ano hidrológico desde agosto do ano anterior a setembro do ano corrente. Na segunda linha correlações parciais entre o mesmo anel e a precipitação mensal. 38

Figura 20 Resumo da análise SEASCORR do sinal climático nos dados residuais da cronologia. As variáveis climáticas são a temperatura mínima e a precipitação. Na primeira linha a correlação entre o anel total aos 5 metros de altura das árvores da Serra da Cabreira com a temperatura mínima, soma de 3 meses e soma de 6 meses, com o ano hidrológico desde agosto do ano anterior a setembro do ano corrente. Na segunda linha correlações parciais entre o mesmo anel e a precipitação mensal. 38

Figura 21 Resumo da análise SEASCORR do sinal climático nos dados residuais da cronologia. As variáveis climáticas são a evapotranspiração e a precipitação. Na primeira linha a correlação entre o anel total aos 5 metros de altura das árvores da Serra da Estrela com a evapotranspiração, soma de 3 meses e soma de 6 meses, com o ano hidrológico desde agosto do ano anterior a setembro do ano corrente. Na segunda linha correlações parciais entre o mesmo anel e a precipitação mensal. 39

Figura 22 Identificação das principais secas nas séries de crescimento dos anéis das 10 árvores dos dois locais, no nível de altura de 5 metros. A vermelho estão assinalados os anos com diminuição do crescimento visível e com secas documentadas pelo IPMA, a laranja os anos com diminuição do crescimento devido a anos de seca localizada e a azul os anos com diminuição dos crescimentos devido a precipitações abundantes e localizadas. 44

Figura 23 Identificação dos anos indicadores (pointer years) nas séries indexadas da Serra da Cabreira, nos quatro níveis de altura (base, 5 metros, 10 metros e 15 metros). A vermelho estão assinalados os anos indicadores e com secas documentadas pelo IPMA, a laranja os anos indicadores com de seca localizada e a azul os anos indicadores com precipitações abundantes e localizadas. 45

Figura 24 Identificação dos anos indicadores (pointer years) nas séries indexadas da Serra da Cabreira, nos quatro níveis de altura (base, 5 metros, 10 metros e 15 metros). A vermelho estão assinalados os anos indicadores e com secas documentadas pelo IPMA, a laranja os anos indicadores com de seca localizada e a azul os anos indicadores com precipitações abundantes e localizadas. 46

Figura 25 Gráfico Termopluiométrico da Serra da Cabreira para o ano 2001. 47

Figura 26 Gráfico Termopluiométrico da Serra da Estrela para o ano 1986. 48

Figura 27 Gráfico Termopluiométrico da Serra da Estrela para o ano 2009. 48

Figura 28 Gráfico Termopluiométrico da Serra da Estrela para o ano 2013. 49

Lista de Quadros

Quadro 1 Dados biométricos das árvores de <i>Pseudotsuga menziesii</i> amostradas nos dos dois locais.	12
Quadro 2 Caracterização da amostragem na árvore por nível de altura e respectivas datações nos dois locais (Serra da Cabreira e Serra da Estrela).	13
Quadro 3 Espessura do anel de crescimento completo (RW, mm), espessura do lenho de início de estação (EW, mm) e espessura do lenho de fim de estação (LW, mm) e percentagem da espessura do anel de fim de estação no anel total (% LW) e desvio padrão de árvores de <i>Pseudotsuga menziesii</i> em dois locais (Serra da Cabreira e Serra da Estrela). Média e desvio padrão para cada nível de altura e local de todos os anéis em cada rodela e de dez árvores por local.	24
Quadro 4 Intensidade do sinal das cronologias e estatística das cronologias, por local (RW–anel de crescimento completo; EW-lenho de início de estação; LW-lenho de fim de estação) (rbar.eff - sinal efectivo da cronologia; eps - sinal expresso da população).	35
Quadro 5 Compilação dos parâmetros climáticos que mostraram correlações com significado estatístico com o anel total (RW), o lenho de início de estação (EW) e de fim de estação (LW) para as árvores da Serra da Cabreira e da Serra da Estrela.....	36

Lista de Anexos

Anexo 1 Coeficientes de correlação entre a temperatura mínima, a radiação solar e número de dias com precipitação superior a 1mm com os anéis de crescimento completos (RW) das árvores da Serra da Cabreira, no segundo nível de altura (5 m).....	60
Anexo 2 Coeficientes de correlação entre a temperatura mínima com os lenhos de início (EW) e de fim (LW) de estação das árvores da Serra da Cabreira, no segundo nível de altura (5 m).	61
Anexo 3 Coeficientes de correlação entre o número de dias de chuva superior a 1 m e a radiação solar com os lenhos de início de estação das árvores da Serra da Cabreira, no segundo nível de altura (5 m).	62
Anexo 4 Coeficientes de correlação entre a humidade relativa e os lenhos de fim de estação das árvores da Serra da Cabreira, no segundo nível de altura (5 m).....	62

Anexo 5 Coeficientes de correlação entre a precipitação e os dias com chuva superior a 1 mm com os lenhos de início de estação das árvores da Serra da Estrela, no segundo nível de altura (5 m).
..... 63

Anexo 6 Coeficientes de correlação entre os dias com chuva superior a 1 mm e os lenhos de fim de estação das árvores da Serra da Estrela, no segundo nível de altura (5 m). 63

Anexo 7 Quadro com os anos indicadores (pointer years), por local e nível de altura, e especificações (nº de séries, Percentagem de séries que mostram uma variação do crescimento radial positiva e negativa significativa, pointer year positivo (1) ou negativo (-1), Variações médias e desvio padrão de crescimento radial sobre as séries disponíveis). A cinzeno anos indicadores que, por ter menos de 5 séries, não foram utilizados. 64

Lista de Abreviaturas

RW – Ring width (anel de crescimento total)

EW – Earlywood (lenho de início de estação)

LW – Latewood (lenho de fim de estação)

DAP - Diâmetro à altura do peito

1. Enquadramento e objectivos

As alterações climáticas consistem em modificações significativas na distribuição estatística das variáveis climáticas à escala global, devido a processos naturais e a processos induzidos pelas actividades humanas tendo grande impacto na sociedade e no meio ambiente (Miranda et al., 2002). Mudanças no clima têm impacto na vegetação e nas florestas, que se refletem nas alterações nas taxas de crescimento, fenologia, composição das comunidades, danos patogénicos (Kovats et al., 2014). É conhecido que as condições climáticas sob as quais a vegetação se desenvolve estão em mudança desde a Era pré-industrial (Metz et al., 2007). Muitas vezes, estas alterações levam ao aumento da mortalidade das árvores e conseqüente declínio das florestas (Kovats et al., 2014).

Uma das conseqüências das alterações climáticas é a alteração dos padrões de crescimento das árvores, que fica registado e pode ser observado no padrão dos seus anéis de crescimento, ou seja, as condições climáticas do sítio são “armazenadas” no xilema, na sua anatomia, através dos seus crescimentos cíclicos – anéis de crescimento. A espessura dos anéis de crescimento de uma árvore (que se podem observar na secção transversal do tronco) varia consoante alguns factores, tais como a temperatura, a precipitação, o fotoperíodo, a competição ou o armazenamento de água no solo (Dickison, 2000). Essa sincronia entre os factores que influenciam o crescimento dos anéis e a sua espessura fornece muita informação sobre o ambiente onde ocorreu o crescimento da árvore (Schweingruber, 1996).

Ao estudo das sequências cronológicas e espessura dos anéis de crescimento de uma árvore dá-se o nome de dendrocronologia (Dickison, 2000). A dendrocronologia é uma área de estudo muito actual, utilizada tanto em arqueologia no que se refere a datações absolutas, como em estudos paleoclimáticos, assim como para a análise dos efeitos climáticos no crescimento das árvores.

Portugal é um país muito sujeito a episódios de seca (Santos et al., 2001) atendendo à sua localização geográfica, pois situa-se numa região de transição entre a depressão subpolar (Norte) e o anticiclone subtropical (Sul), com um período de retorno de secas extremas de 10-15 anos e com duração de 1-3 anos (Comissão Europeia, 2007).

O estudo do efeito das secas em Portugal já foi avaliado em algumas espécies como o sobreiro (*Quercus suber*) (Oliveira et al., 2016), principalmente para a zona sul do país, pois é a mais vulnerável à ocorrência de secas (Santos et al., 2001), e onde a água pode ser um recurso escasso e limitante do crescimento das árvores. No

entanto, é importante verificar se em regiões menos vulneráveis à seca (por exemplo no norte do país), o crescimento das árvores é afectado em anos considerados secos. A *Pseudotsuga menziesii* é uma espécie conífera de grande importância económica pois produz madeira de boa qualidade para construção, nomeadamente para a produção de peças de grande comprimento. Originária da América do Norte, a pseudotsuga foi introduzida na Europa onde mostrou uma boa adaptação. Também em Portugal a pseudotsuga mostrou um crescimento elevado e tem sido proposta como uma espécie adequada para a florestação (Fontes et al., 2005).

1.1. Objectivos do trabalho

Este trabalho pretende estudar as relações entre factores climáticos e o crescimento radial da *Pseudotsuga menziesii*, nomeadamente o efeito das secas de maior severidade.

Pretende-se analisar os efeitos potenciais de mudanças climáticas relativos à ocorrência de eventos extremos no crescimento das árvores em Portugal, usando como caso de estudo árvores de *Pseudotsuga menziesii*, através de técnicas dendrocronológicas, em amostras recolhidas em dois locais em Portugal.

Com este trabalho pretende-se também estudar a variação dos efeitos climáticos no crescimento radial para diferentes idades da árvore.

2. Introdução

2.1. Caracterização da *Pseudotsuga menziesii*

A *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco var. *menziesii* é uma espécie da família *Pinaceae*, originária da América do Norte. A espécie foi introduzida na Europa, Nova Zelândia e América do Sul (Lavender et al., 2014). Chegou a Portugal no séc. XIX, presumivelmente a partir das Ilhas Britânicas, e a sua introdução verificou-se com a inauguração do Parque da Pena, em Sintra. Comumente chamada pinheiro-do-Oregon, abeto-de-Douglas, abeto-de-Oregon ou Douglas fir, é uma conífera de grande porte (Leitão, 1990) (Figura 1A).

É uma espécie economicamente importante dada a elevada qualidade da madeira e facilidade de gestão florestal. É uma das principais madeiras de construção no mundo utilizada em construção civil, decoração, obras de arte, construção naval, entre outros (Marques et al., 2012; Pulkrab et al., 2014).

Trata-se de uma árvore que ocorre numa faixa ampla de latitude e de elevação e que foi reconhecida por Weiskittel et al. (2012) como uma espécie sensível a mudanças climáticas.

A *Pseudotsuga menziesii* é uma árvore de luz, monóica de grande porte que pode atingir 100 m de altura, de forma piramidal, com um tronco direito e cilíndrico (Figura 1C). Apresenta um ritidoma acinzentado em indivíduos mais novos, com vesículas dispersas e levantadas que contêm resina fluida muito odorífica. Tem nós pouco salientes e ramos verticilados e numerosos. Possui folhas planas, muito estreitas e flexíveis (Figura 1B). As pinhas são pendentes, aguçadas e ovóides (Costa, 1991).



Figura 1 *Pseudotsuga menziesii*: A - Povoamento; B - Agulhas; C - Tronco.

A madeira é dura e resistente, com borne espesso e amarelado e cerne abundante de cor salmão (Marques et al., 2012). Como se trata de uma conífera de crescimento rápido, os lenhos de início e de fim de estação são bastante distintos (Domec, 2002) (Figura 2).

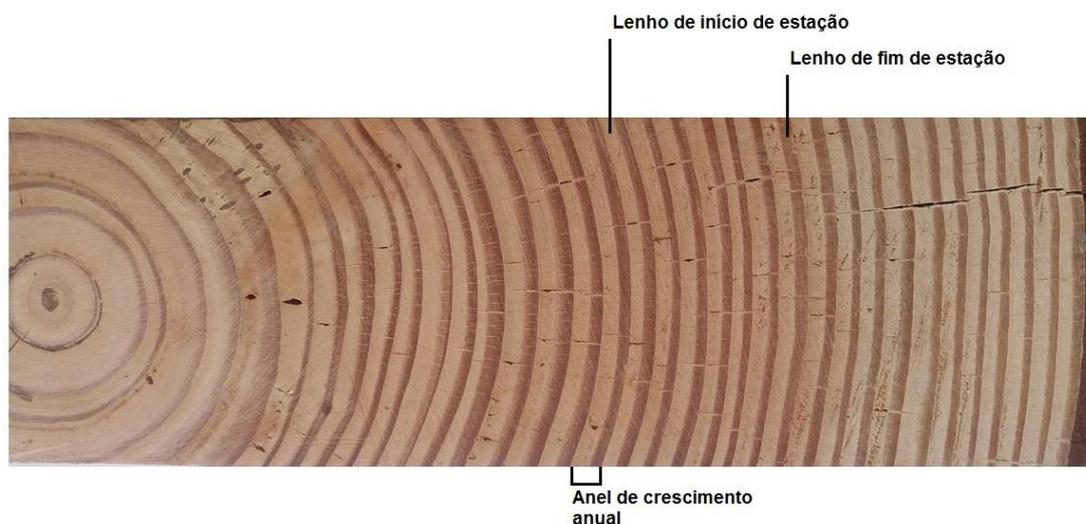


Figura 2 Anéis de crescimento de *Pseudotsuga menziesii*, com os respectivos lenhos de início de estação e de fim de estação.

É uma árvore com algumas exigências no que toca ao meio que a rodeia, preferindo solos siliciosos, graníticos, soltos e profundos, mas não encharcados. O seu desenvolvimento é fraco em solos áridos, dunas marítimas e terrenos argilosos, chegando mesmo a morrer na presença de água salobra e em solos calcários (Costa, 1991). É uma espécie conhecida por ser muito produtiva, que se adapta facilmente a ambientes com escassez de água e pobreza de nutrientes (Curt et al., 2001). Foi reconhecida por Fritts (1976) como sensível ao clima. Segundo Feliksik & Wilczyński (2003) o principal factor que determina a homogeneidade do crescimento da *Pseudotsuga menziesii* são as condições térmicas no final do inverno e o factor que desencadeia heterogeneidades no crescimento é a ocorrência de chuvas durante a estação da vegetação. Em Portugal, os factores do local de maior influência no crescimento da *Pseudotsuga menziesii* são a precipitação, a profundidade do solo e a altitude (Fontes et al., 2003).

Esta espécie tem sido introduzida em ambientes diferentes, como investimento para a produção de madeira (Curt et al., 2001). É normalmente usada para serração, armações, revestimentos, pavimentos (Fockedey, 2012), construção naval, construção pesada, painéis e móveis (Greenpeace, 2004). É usada frequentemente em

reflorestações de áreas de maior altitude, em alguns países europeus, como França, com ajuda de incentivos nacionais (Curt et al., 2001). É uma espécie com potencial para reflorestação em Portugal, para produção de madeira (Correia & Oliveira, 2003).

2.2. Os anéis de crescimento anual das árvores

As árvores têm um ritmo de crescimento anual que, em muitos casos, pode ser observado através dos seus anéis de crescimento. Quando os anéis são nítidos é possível determinar a idade das árvores através da contagem dos anéis (Grissino-Mayer, 2017).

A cada ano é acrescentado um anel ao tronco, formando camadas concêntricas de tecido resultante da actividade sazonal do câmbio (Oliveira, 2011). A região lenhosa formada com o início da actividade cambial, designada zona de primavera ou lenho de início de estação, é constituída por células de maior diâmetro e paredes mais delgadas do que as células formadas mais tarde, antes do período de repouso cambial, designada zona de outono ou lenho de fim de estação constituída por células menores e com paredes mais espessas, adquirindo um tom mais escuro (Oliveira, 2011; Barnett & Jeronimids, 2003). O conjunto destas duas zonas (lenho de início de estação e o lenho de fim de estação) constitui um anel de crescimento (Encinas et al., 2005; Desch & Dinwoodie, 1996).

Nem todas as espécies apresentam anéis de crescimento nítidos. Nas zonas de clima tropical, onde as variações dos elementos meteorológicos são pouco pronunciadas, as plantas não apresentam anéis de crescimento pois desenvolvem-se ao longo de todo o ano (Cherubini et al., 2003).

Quando os anéis são nítidos é possível determinar a idade das árvores através da contagem dos anéis (Grissino-Mayer, 2017).

A formação de anéis de crescimento é regulada pelos factores internos e externos que regulam a actividade cambial. Segundo Savva et al. (2002), existem três factores que influenciam o crescimento e a estrutura da madeira: o ambiente, a idade e a hereditariedade. Um dos factores ambientais com maior impacto na formação dos anéis de crescimento é o clima (precipitação e temperatura) uma vez que irá contribuir para o maior ou menor crescimento das camadas de primavera e outono, podendo alterar a estrutura do anel (Gindl et al., 2000). Outros factores ambientais externos como o fotoperíodo, teores de CO₂, O₂ e nutrientes no solo, assim como factores

internos como translocação de nutrientes, reguladores de crescimento, e enzimas desempenham também um papel importante na formação dos anéis de crescimento (Callado et al., 2001; Wimmer et al., 2000; Fritts, 1976).

A largura dos anéis de crescimento varia, também, com a idade cambial e da árvore, com tendência a diminuir à medida que a árvore envelhece (Schweingruber, 1988). Esta tendência está também associada com a produção do mesmo volume de madeira todos os anos, numa rodela de raio crescente, ou seja, a mesma quantidade de madeira distribuída por um diâmetro pequeno cria um anel maior do que distribuída num diâmetro maior (Strumia, 1999).

2.3. Dendrocronologia

Do grego *dendron* (árvore), *kronos* (tempo) e *logos* (estudo), a dendrocronologia é baseada nas propriedades biológicas de crescimento das árvores e nos seus anéis de crescimento anual como fonte de informação acerca do clima. É portanto a ciência que data os anéis de crescimento anual das árvores (Fritts, 1976). A dendrocronologia é o conjunto de métodos que identificam os anéis de crescimento das árvores, e os fazem corresponder a um ano concreto do calendário gregoriano, tendo como ponto de referência o último ano (ano mais recente), pois corresponde ao ano de recolha da amostra quando se trata de amostras recolhidas em árvores vivas (Fritts, 1976).

O princípio fundamental da dendrocronologia diz que os anéis das árvores, formados sob condições semelhantes, devem apresentar características semelhantes, quer estas sejam o local (Stokes & Smiley, 1968), as condições climáticas ou outras condições, formando uma sincronia nos anéis das diferentes árvores.

Com a dendrocronologia é possível por exemplo datar artefactos arqueológicos de madeira, com poucos erros (Gonçalves, 2007), assim como investigar a variabilidade climática em períodos anteriores ao ano de medição (Strumia, 1999).

As primeiras descrições sobre anéis de crescimento das árvores foram feitas na Grécia antiga (370 a.C.) por Theophrastus, discípulo de Aristóteles, que descreve os anéis dos troncos das árvores (Turney et al., 2005). As bases teóricas da dendrocronologia remontam ao século XVI com Leonardo da Vinci, que reconheceu a relação entre os anéis de crescimento e o clima (Fritts, 1976) e pensou usar os anéis das árvores para reconstruir o passado “os anéis de crescimento permitem estimar o número de anos e, em função da sua espessura, indicar os anos mais ou menos

secos” (Corona, 1986). É no início do século XX, que se iniciam os primeiros estudos científicos de dendrocronologia pelo astrónomo americano Andrew Ellicott Douglass fundador do laboratório Tree-Ring Research, na University of Arizona. Andrew Douglass interessou-se pela influência do ciclo solar no clima terrestre e estudou os anéis das árvores para perceber essa influência. Ao estudar as florestas do Arizona e de New England, Douglass observou que o crescimento das árvores era influenciado por diversos factores, nomeadamente pela disponibilidade de água, deixando a competição e o ensombramento como factores secundários. Douglass construiu uma cronologia de cerca de 500 anos (Bannister & Robinson, 1975). Douglass inaugurou em Tucson o primeiro laboratório exclusivo para o estudo dos anéis de crescimento. (Schweingruber, 1996; Fritts, 1976). A dendrocronologia continuou o seu desenvolvimento até aos dias de hoje, através do contributo de outros cientistas, tais como Hal Fritts (Tucson) que demonstrou a importância da datação dos anéis para diversas áreas, pela introdução de programas de computador e desenvolvimento de modelos de simulação de crescimento de árvores (Fritts, 1963; Fritts et al., 1969).

Fritz H. Schweingruber (Suíça) introduziu uma visão ecológica na dendrocronologia, conseguindo identificar ambientes poluídos através dos anéis de crescimento das árvores. Schweingruber publicou inúmeros artigos e livros de referência (Schweingruber 1995, Kaennel & Schweingruber, 1996).

Os princípios da dendrocronologia desenvolvidos por Fritts (1976) foram resumidos e actualizados por Grissino-Mayer (2017). Estes princípios orientam os estudos dendrocronológicos segundo sete regras e conceitos transversais a qualquer estudo deste ramo:

- Princípio da uniformidade

As condições de crescimento, tais como os processos físicos e biológicos que, interferem hoje nos padrões de crescimento das árvores (do ponto de vista da formação dos anéis), também interferiram da mesma forma nos padrões de crescimento no passado. Ou seja, resumidamente, “o presente é a chave do passado”.

- Princípio dos factores limitantes

Os anéis de crescimento das árvores têm o seu crescimento limitado pela variável ambiental mais limitante. Não é possível extrair informação ou fazer a datação cruzada em árvores que não foram afetadas por fatores de crescimento limitantes, visto que são os anéis mais estreitos que fornecem informação mais precisas das condições

climáticas limitantes que anéis mais largos. Caso não haja factores limitantes, a largura dos anéis será maior.

- Princípio do crescimento agregado da árvore

Qualquer variação encontrada numa série individual de anéis de crescimento de uma árvore pode ser justificada por um conjunto de factores ambientais, humanos e naturais, que interferiram no padrão de crescimento da árvore ao longo do tempo.

- Princípio da amplitude ecológica

A amplitude ecológica representa a variedade de ambientes em que a espécie em questão consegue crescer e reproduzir-se. As espécies são mais sensíveis a alterações climáticas nos limites de latitude e altitude da sua área de habitat.

- Princípio da selecção do local

Este princípio estabelece que a selecção do local de amostragem deve ter em conta os factores que produzem séries de anéis de crescimento sensíveis à variável ambiental em estudo.

- Princípio da datação cruzada (crossdating)

Este princípio, fundamental para a dendrocronologia, diz que a largura do anel deve ser cruzada entre os raios de um mesmo disco e entre diferentes árvores, fazendo corresponder os seus padrões (tanto de largura do anel, como padrões de densidade, entre outros), pois só assim é possível determinar com exactidão o ano em que cada anel da árvore foi formado. Podem também ocorrer falsos anéis, ou ausência de anéis, e caso tal aconteça com frequência, a datação será pouco certa.

- Princípio da replicação

O sinal do factor climático deve ser maximizado, e deve ser minimizada a quantidade de "ruído" (factores ambientais que não estão a ser estudados), com uma amostragem alargada, com mais de um raio de tronco por árvore, e mais de uma árvore por local.

2.4. Alterações climáticas

A constituição da atmosfera terrestre e o clima têm vindo a sofrer alterações. É certo que o clima, em eras mais remotas, sofreu oscilações, o que possibilitou o desenvolvimento da vida na Terra, assim como grandes catástrofes, como as

glaciações (Neto & Nery, 2005). Os acontecimentos ocorridos no período Quaternário (período que se iniciou há 1.8 milhões de anos e que se prolonga até aos dias de hoje) confirmam a acentuada instabilidade climática de carácter cíclico, passando por climas glaciais e climas quentes, com amplitudes variadas (Costa, 2008).

O estudo da história geológica da Terra mostra que a evolução das condições climáticas da superfície da Terra não se processou uniformemente. Segundo McGregor & Nieuwolt (1998), podem classificar-se as mudanças climáticas em duas escalas temporais:

- Mudanças de longa duração, que são superiores a 20.000 anos;
- Mudanças de curta duração que podem ocorrer entre 100 e 20.000 anos.

Pode atribuir-se várias origens às alterações climáticas (Mendonça, 2003):

- Causas externas (mudanças na órbita do planeta – variação na radiação),
- Causas internas (mudanças na circulação oceânica, na composição de gases da atmosfera, ou nas condições da superfície terrestre),
- Actividades humanas (queima de combustíveis fósseis, lançamento de gases de estufa na atmosfera, desflorestação)

A actividade humana tem uma importância grande, principalmente nos tempos mais recentes. A evolução da indústria levou a que fossem necessárias grandes quantidades de energia, produzida inicialmente a partir da combustão de carvão mineral e mais tarde de petróleo. O principal produto das reações de combustão é o dióxido de carbono, que por sua vez é um gás de efeito de estufa. As emissões de dióxido de carbono, que se juntam ao naturalmente existente na atmosfera, interferem com as trocas de energia da Terra com o espaço exterior que determinam o clima no planeta, aumentando o efeito de estufa (Borrego et al., 2009).

Perante isto, a ocorrência de eventos climáticos extremos tem aumentado, e com eles todos os prejuízos adjacentes (por exemplo, cheias, furacões, ondas de frio ou de calor). São evidentes as manifestações de eventos climáticos extremos com mais frequência na última fase do período Quaternário em que nos encontramos. Neste contexto climático com a ocorrência de eventos extremos, é notória uma preocupação maior com os riscos climáticos e os seus impactos possíveis na sociedade e no meio ambiente (Miranda et al., 2002).

A localização geográfica do território de Portugal Continental é favorável à ocorrência de secas (Santos et al., 2001), normalmente ligadas à ocorrência de bloqueios em que

o anticiclone subtropical do Atlântico Norte fica numa posição que impede que as perturbações da frente polar cheguem à Península Ibérica (Pires et al., 2010). Este fenómeno reflecte-se num período de retorno de secas extremas de 10 a 15 anos com duração de 1 a 3 anos (Comissão Europeia, 2007). Estes episódios têm consequências muito graves na agricultura e na pecuária, nos recursos hídricos e no bem-estar das populações, nomeadamente nas regiões a Sul do Tejo (Pires et al., 2010).

A Agência Portuguesa do Ambiente (2017) sugere um cenário climático para Portugal Continental até ao fim do sec. XXI caracterizado por um aumento da temperatura média em todas as regiões, nomeadamente da temperatura máxima no verão entre 3°C e 7°C, juntamente com o aumento da quantidade e intensidade de ondas de calor, e conseqüentemente um aumento do risco de incêndio. Estas alterações têm impactos na capacidade de uso do solo, na sua ocupação, assim como nos recursos hídricos. Estão previstas reduções da precipitação durante a Primavera, Verão e Outono, que podem significar entre 20% a 40% da precipitação anual, embora esteja previsto um aumento do número de dias com precipitação forte (superior a 10 mm por dia) durante o Inverno (APAmbiente, 2017).

3. Material e métodos

3.1. Material

As árvores provêm de dois povoamentos de *Pseudotsuga menziesii* instalados em Portugal em zonas com diferentes condições ecológicas: um local na região Norte, no Perímetro Florestal da Serra da Cabreira, Cabeceiras de Basto, e outro local na região Centro-Norte no perímetro Florestal da Serra da Estrela, da unidade baldia da localidade do Sarzedo, Covilhã (Figura 3).



Figura 3 Localização dos dois locais de amostragem das árvores de *Pseudotsuga menziesii*. Informação de base. Carta Administrativa Oficial de Portugal - Versão 2016 (CAOP 2016), (DGTerritório, 2016).

Foram seleccionadas aleatoriamente 10 árvores em cada local. O Quadro 1 apresenta os dados biométricos (diâmetro à altura do peito e altura total) e a idade para as árvores seleccionadas. As árvores dos dois locais pertenciam a uma classe média de idade de 45-50 anos (46 anos na Serra da Cabreira e 49 anos na Serra da Estrela) e possuíam um diâmetro adequado para a sua utilização em serração (em média 61 cm em ambos os locais). As árvores foram abatidas em Janeiro de 2015 na Serra da Cabreira e em Setembro de 2015 na Serra da Estrela.

Quadro 1 Dados biométricos das árvores de *Pseudotsuga menziesii* amostradas nos dois locais.

Serra da Cabreira				Serra da Estrela			
Árvore	Idade	DAP (cm)	Altura total (m)	Árvore	Idade	DAP (cm)	Altura total (m)
1	46	61,5	30,2	1	49	55,7	32,9
2	46	73,6	35,7	2	48	60,5	35,6
3	45	57,3	27,9	3	48	54,5	34,0
4	43	58,6	23,7	4	39	73,9	33,1
5	46	57,3	29,5	5	49	65,3	30,5
6	44	57,3	25,7	6	46	65,0	46,1
7	50	63,7	29,4	7	46	56,7	35,4
8	45	54,1	29,5	8	64	53,8	35,5
9	44	57,3	27,7	9	53	64,3	35,6
10	48	66,9	31,9	10	59	58,9	30,4
Média	46	60,8	29,5	Média	49	60,9	34,9
Desvio Padrão	2	5,9	3,3	3,0	7	6,3	4,4

Em cada árvore abatida foram cortadas rodelas, com aproximadamente 10 cm de espessura (Figura 4), em diferentes níveis da altura total. Neste trabalho estudaram-se as rodelas provenientes da base e a 5 m, 10 m e 15 m da altura total. O número de anéis e respectivos anos de crescimento para cada nível de altura estão sumarizados no Quadro 2.

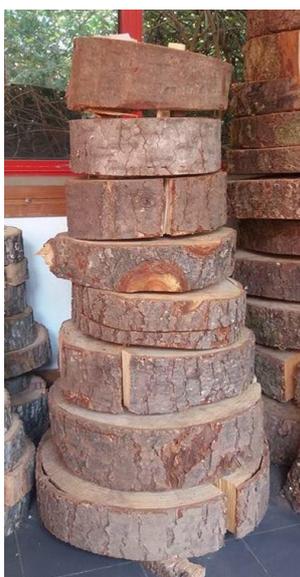


Figura 4 Rodelas cortadas a vários níveis de altura das árvores de *Pseudotsuga menziesii*.

Quadro 2 Caracterização da amostragem na árvore por nível de altura e respectivas datações nos dois locais (Serra da Cabreira e Serra da Estrela).

	Serra da Cabreira	Serra da Estrela
Nº árvores amostradas	10	10
Nº de rodela por árvore	4	4
Nº de anéis da árvore mais velha (base)	50	64
Nº de anéis da árvore mais velha (5 m)	38	52
Nº de anéis da árvore mais velha (10 m)	31	50
Nº de anéis da árvore mais velha (15 m)	26	45
Data de início (base)	1964	1952
Data de início (5 m)	1977	1964
Data de início (10 m)	1984	1966
Data de início (15 m)	1989	1971
Data de fim	2015	2015

3.1.1. Caracterização edafoclimática dos dois locais

3.1.1.1. Serra da Cabreira

O local de amostragem na Serra da Cabreira (41°35'18,0"N 8°01'00,6"W) pertence ao município de Cabeceiras de Basto, distrito de Braga, e à NUT III Ave. O ponto mais alto desta serra fica a 1261 m de altitude, e o local de amostragem a 850 m. Na serra da Cabreira nasce o rio Ave.

Esta região apresenta paisagens contrastadas, condicionadas pelas condições edafoclimáticas particulares e pela acção antrópica (Bento-Gonçalves, 2004).

Do ponto de vista estrutural, esta serra é parte integrante do Maciço Hispérico, onde predomina relevo granítico e arredondado, e xistoso (Bento-Gonçalves et al., 2011) com declives suaves e extensões planálticas, apresentando um coberto predominantemente herbáceo de pastagens com plantações de pinheiros e eucaliptos. Em áreas mais elevadas predominam os matos xerófitos, e nas áreas mais baixas ocorre a ocupação humana devido aos solos férteis e abundância de água (Rodrigues et al., 2006).

A situação geográfica da Serra da Cabreira caracteriza-se pela elevada precipitação, provocada pela passagem de superfícies frontais em conjunto com os efeitos do relevo montanhoso (barreira de condensação) (Bento-Gonçalves et al., 2011). Trata-se de uma região Csa segundo as classes definidas por Koppen (IPMA, 2017), que significa um clima temperado húmido com Verão seco e quente (clima mediterrâneo) com estações de inverno e verão bem definidas.

Para caracterizar a área usaram-se dados climáticos da Estação Meteorológica de Molares (252 m de altitude) por ser a estação mais próxima com dados completos de temperatura e precipitação (Figura 5). Esta região apresenta uma precipitação média de 1664,9 mm, concentrando cerca de 50% da precipitação total anual nos meses de inverno. No inverno, o número médio de dias de chuva por mês é de 14, e como em todo o Portugal, os meses mais chuvosos são os que apresentam menores temperaturas. A distribuição da temperatura média ao longo do ano deixa o mês de janeiro como o mais frio (5,9 °C) e o mês de julho como o mais quente (23 °C) (Figura 5).

Os solos desta região, de acordo com a Carta de Solos do Atlas do Ambiente, classificam-se como Cambissolos Húmicos, referentes a camadas decorrentes da alteração do material originário (Coba, 1991).

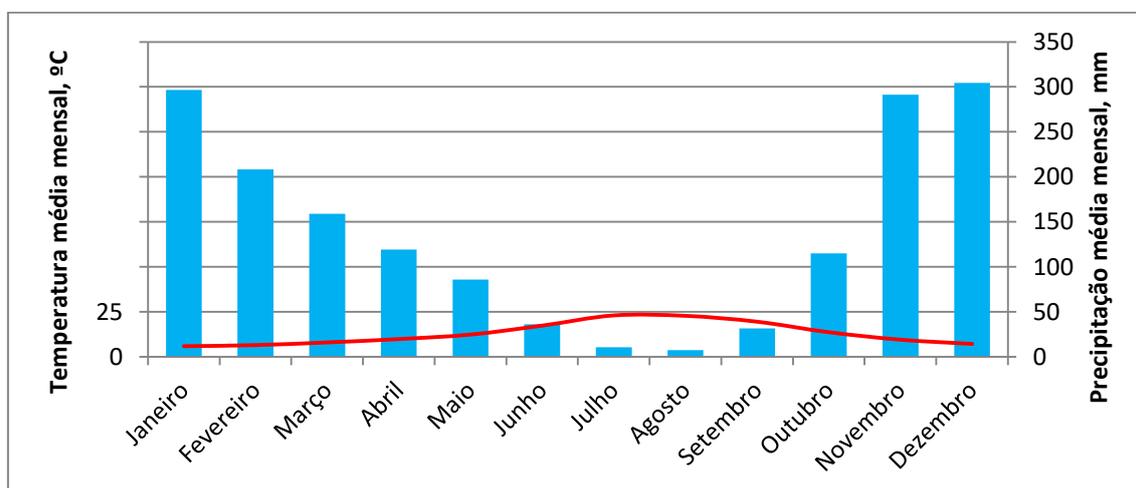


Figura 5 Gráfico termopluviométrico da Serra da Cabreira para uma série de 36 anos (1979 a 2015), a partir dos dados da estação meteorológica de Molares.

3.1.1.2. Serra da Estrela

O local de amostragem da serra da Estrela (40°21'28,5"N 7°27'07,2"W), pertence ao município da Covilhã, distrito de Castelo Branco, e à NUT III Cova da Beira. O ponto mais alto desta serra fica a 1993 m de altitude (ponto mais alto de Portugal Continental), e o local de amostragem a 930 m. Na serra da Estrela nascem o rio Mondego e o rio Zêzere.

Estruturalmente, a serra da Estrela situa-se na Cordilheira Central Ibérica, e é constituída por planaltos alongados e altos vales encaixados de feições glaciárias. Geologicamente é caracterizada por granitos com moscovite e biotite de grão grosseiro porfiróide (Vieira, 2004).

As condições edafoclimáticas da serra da Estrela condicionam a distribuição da vegetação, sendo possível definir uma zonação com três andares: o basal (até 800-900 m), o intermédio (900 a 1600 m) e o superior (acima dos 1600 m) (Martins & Silveira, 2008). O local de amostragem enquadra-se no andar intermédio, caracterizado por ocorrência de carvalhais e castinçais, formações artificiais de pinhal e floresta mista implantada pelos Serviços Florestais, e formações arbustivas de urzais, giestais e piornais (Martins & Silveira, 2008).

O clima desta serra tem influência mediterrânea e atlântica (Daveau et al., 1997), e segundo a classificação de Koppen, é do tipo Csa (IPMA), que significa um clima temperado húmido com Verão seco e quente (clima mediterrâneo) com estações de inverno e verão bem definidas.

Para caracterizar a área de estudo usaram-se dados climáticos da Estação Meteorológica de Oledo (286 m de altitude) por ser a estação mais próxima com dados completos de temperatura e precipitação (Figura 6). Esta região apresenta uma precipitação média de 714,9 mm, concentrando cerca de 42% da precipitação total anual nos meses de inverno. No inverno, o número médio de dias de chuva por mês é 10, e como em todo o Portugal, os meses mais chuvosos são os que apresentam menores temperaturas. A distribuição da temperatura média ao longo do ano deixa o mês de janeiro como o mais frio (8,0 °C) e o mês de julho como o mais quente (27,9 °C) (Figura 5).

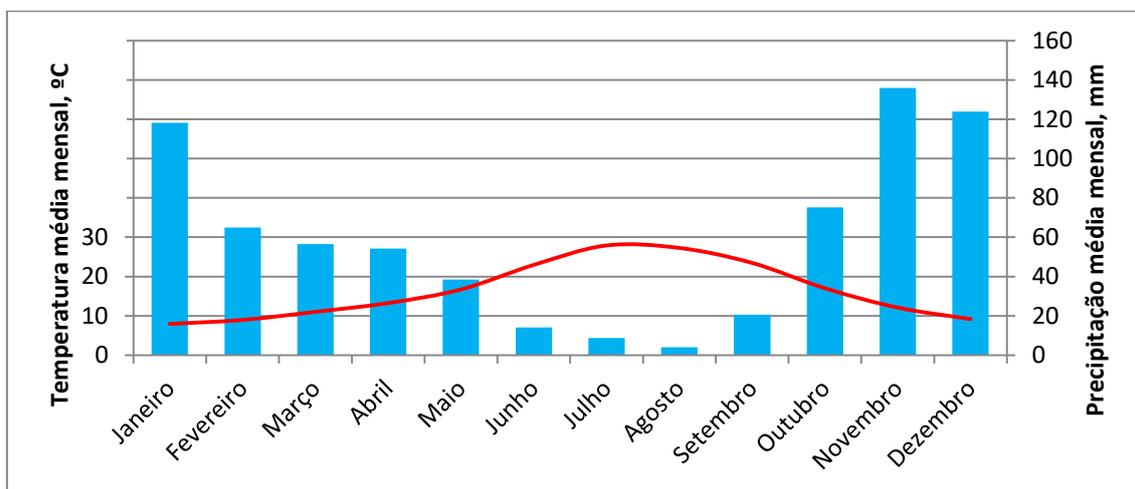


Figura 6 Gráfico termopluviométrico da Serra da Estrela para uma série de 36 anos (1979 a 2015) a partir dos dados da estação meteorológica de Oledo.

3.2. Métodos

3.2.1. Preparação das amostras

As amostras foram secas ao ar e após o período de secagem, foi serrado um provete na zona central de cada rodela na direcção radial e contendo a medula (Figura 7).

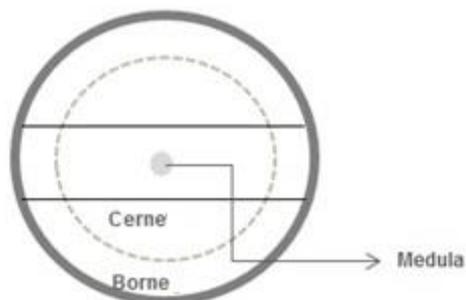


Figura 7 Esquema de amostragem dos provetes

A superfície transversal de cada provete foi lixada e polida numa lixadeira de bancada (FAI modelo LCU), com uma lixa de granulometria mais grosseira P80, e polida com uma lixa de granulometria mais fina P120, até se obter uma superfície plana e lisa e com os anéis de crescimento bem perceptíveis.

3.2.2. Medição dos anéis de crescimento anual

A medição dos anéis de crescimento foi feita na superfície transversal, com base nas diferenças de cor natural das células de início (mais clara) e de fim de estação (mais escura). O lenho de início de estação formado no início da actividade cambial é constituído por células de maior diâmetro e paredes mais delgadas, o que lhes confere um tom mais claro. O lenho de fim de estação é formado mais tarde e é constituído por células mais pequenas e com paredes mais espessas, com um tom mais escuro (Palma, 1996). O conjunto destes dois lenhos constitui um anel de crescimento que se estende ao longo de toda a secção transversal, formando um anel.

Para a medição dos anéis, as amostras foram observadas num microscópio de baixa ampliação (Stereo Microscope LEICA M80) e a medição efectuada com o Software TSAP-Win Scientific (Figura 8). A espessura de cada anel de crescimento foi obtida através da soma da espessura dos lenhos de início e de fim de estação.

Em cada amostra, a espessura do anel de crescimento foi obtida pela média das espessuras do anel nos raios opostos. As medições foram feitas no sentido do câmbio para a medula, sendo o anel a seguir à medula numerado como anel 1. Não foi considerada a medição da espessura do anel exterior (referente ao ano 2015) pois não se encontrava completo. Os valores da largura dos anéis de crescimento foram exportados para o Software Excel para uma datação cruzada posterior.



Figura 8 Mesa de medição de deslocamentos (LINTAB Linear table 560 mm / 2,5 mm); Stereo Microscope LEICA M80

3.2.3. Sincronização e datação das séries de anéis de crescimento

A datação consiste na atribuição de datas específicas a cada anel e na identificação de padrões de crescimento, que podem ser sincronizados com amostras da mesma árvore e entre árvores. É um procedimento moroso, mas que deve ser feito cuidadosamente devido à sua importância. Neste estudo, foi feita uma primeira sobreposição visual dos anéis de modo a despistar a eventual presença de falsos anéis ou a falta de anéis, e a garantir que cada valor médio medido corresponde ao ano em que foi formado o anel de crescimento.

3.2.4. Principais indicadores estatísticos das séries de anéis de crescimento

Todos os procedimentos estatísticos foram feitos em R (R Core Team, 2016) utilizando os módulos dplR (Bunn et al., 2016) e treeclim (Zang & Biondi, 2015).

Para testar a normalidade dos dados usou-se o teste de Shapiro-Wilk que é utilizado para amostras com pequena dimensão ($n < 30$). Após a confirmação da normalidade dos dados, foi usado o teste t de Student para avaliar a diferença entre as cronologias dos dois locais. Este teste é o método mais utilizado para avaliar as diferenças entre as médias de dois grupos, podendo ser usado mesmo que as amostras sejam pequenas, desde que seja admitido que as populações têm uma distribuição normal e variabilidades não significativamente diferentes.

3.2.4.1. *Sensibilidade média*

A sensibilidade média mostra a resposta da árvore a factores ambientais (Cherubini et al., 2003). A espessura dos anéis de crescimento varia entre os anos, criando um padrão gerado a partir das variações do factor ambiental mais condicionante ou seja, os anéis são sensitivos; caso contrário, quando a árvore não se encontra numa situação de stress, os anéis são complacentes, ou seja, têm uma menor variabilidade (Fritts, 1976).

Usou-se este indicador para comparar a largura do anel de determinado ano com a largura do anel do ano seguinte (Leal et al., 2008; Schweingruber, 1988), representando assim a variabilidade inter-anual. É preferível uma série com uma maior sensibilidade média (séries sensitivas) do que uma série com uma menor sensibilidade média (séries complacentes) (Strumia, 1999).

Os valores individuais do grau de sensibilidade variam entre zero (quando não há diferença entre a dimensão de anéis consecutivos) e dois (quando um valor nulo surge perto de um valor não nulo) (Leal et al., 2008). É dada pela equação (Schulman, 1956):

$$MS = \frac{n}{n-1} \frac{\sum_{t=2}^n |w_t - w_{t-1}|}{\sum_{t=1}^n w_t}$$

w = largura do anel

n = comprimento da série de anéis

$t = 1, 2, \dots, n$

3.2.4.2. *Gleichläufigkeit*

Usou-se este indicador para medir a similaridade entre duas curvas, através da análise da tendência crescente ou decrescente de dois pontos consecutivos no tempo medida através de um critério de pontuação. Estas pontuações são atribuídas consoante o

crescimento anual das árvores: nos casos em que a árvore cresce mais que no ano anterior a pontuação é $\frac{1}{2}$, quando a árvore cresce menos que no ano anterior a pontuação equivale a $-\frac{1}{2}$, se não houver diferenças no crescimento entre dois anos consecutivos, a pontuação é 0. O resultado é uma percentagem baseada na semelhança entre duas curvas de duas árvores ao longo dos anos. Obtém-se calculando para cada ano um somatório das pontuações de cada árvore, e dividido pelo número de anos. Se duas curvas de dois locais ou duas árvores forem paralelas, podemos assumir que os factores limitantes do crescimento são similares (Schweingruber, 1988).

É dado pela equação (Buras & Wilmking, 2015):

$$glk(x, y) = 1 - \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} |G_{ix} - G_{iy}|$$

$glk_{x,y}$ = *Gleichläufigkeit para duas séries completas*

G_{ix}, G_{iy} = *Gleichläufigkeit no momento i para as séries x e y*

n = *número de observações*

3.2.5. Construção das cronologias

3.2.5.1. Padronização das séries de anéis de crescimento

Após a sincronização e datação das séries de anéis de crescimento, foi necessário comparar as séries de anéis de crescimento de diferentes amostras, e construir a série de cada local. O cálculo da média das séries individuais acarreta alguns problemas (Strumia, 1999):

- As séries de anéis têm normalmente variâncias desiguais (Cook & Kairiukstis, 1990),
- As árvores com uma taxa de crescimento elevada influenciam a média, mais do que as árvores com uma taxa de crescimento baixa (Fritts, 1976),
- A tendência relacionada com a idade pode induzir uma falsa variabilidade na série cronológica (Struma, 1999).

Para a remoção destes problemas, foi feita uma padronização dos crescimentos através do cálculo de um índice de crescimento, ou seja fazendo a transformação de cada série cronológica numa curva padrão. A padronização consiste em transformar as séries de anéis de crescimento não estacionárias, em novas séries estacionárias

(Cook, 1987). Foi feita através do cálculo de um índice adimensional (I_t) com uma variância constante e cuja média é igual a um. Para o cálculo deste índice foi necessário ajustar uma função não-linear (A_t) (exponencial, polinomial ou spline), e dividir o valor real de cada medição presente na série (R_t), pelo valor esperado, estimado pela função A_t (Cook, 1987). O método de padronização depende da função que melhor se ajusta aos dados das séries de anéis e independentemente do método, há sempre perda de variabilidade que pode estar relacionada com o clima (Strumia, 1999).

$$I_t = \frac{R_t}{A_t}$$

I_t = índice de crescimento standarizado para o ano t

A_t = função não linear

R_t = valor real de cada medição

Há vários tipos de curvas que se podem ajustar aos dados, como por exemplo a regressão linear, a curva exponencial negativa ou as curvas polinomiais (Lauw, 2011).

- Regressão linear

$$A_t = b_0 + b_1 x_t$$

A_t = amplitude do anel projetada no tempo t

b_0 = ponto de interseção com o eixo das coordenadas

b_1 = inclinação da linha reta

x_t = tempo, em anos, a variar de 1 a n

- Curva exponencial negativa

$$A_t = ae^{-bt} + k$$

A_t = amplitude do anel projetada no tempo t

a, b, k = coeficientes de regressão estimados

- Curvas polinomiais

$$A_t = b_0 + b_1t + b_2t^2 + \dots + b_pt^p$$

Neste trabalho para o cálculo do índice foi escolhida uma curva exponencial negativa, após a observação pormenorizada das curvas dos dois locais, por ser a que melhor se adaptou aos dados obtidos. Este é um processo muito importante, tratado em muita bibliografia (Fritts, 1976; Cook, 1990; Strumia, 1999; Lauw, 2011)

3.2.5.2. *Indicadores estatísticos das cronologias*

Depois da produção das cronologias dos locais, foi importante quantificar a intensidade do sinal, através de um procedimento estatístico que analisa a variabilidade comum presente em árvores do mesmo local. A variância de qualquer série apresenta uma componente de sinal e uma componente de ruído, mas por definição o ruído não está correlacionado entre árvores e vai reduzindo conforme o número de amostras vai aumentando (Strumia, 1999).

3.2.5.3. *Técnicas das médias das correlações interséries*

- Sinal efectivo da cronologia

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

rbar.eff = sinal efectivo da cronologia

rbar.wt = Média dos coeficientes de correlação calculados

entre as séries indexadas da mesma árvore para todas as árvores

rbar.bt = Média dos coeficientes de correlação calculados para todos os possíveis pares de séries obtidas das diferentes árvores do mesmo local

c.eff = Número efectivo de séries por árvore

O sinal efectivo da cronologia tem em conta a variabilidade dentro da árvore e entre árvores (Lauw, 2011), pelo que é aplicado com sucesso quando há um número equilibrado de séries por rodela de árvore. Neste trabalho foi efectuada a média dos raios opostos medidos em cada rodela (como referido em 2.2.2.), pelo que o sinal efectivo da cronologia é igual à média dos coeficientes de correlação calculados para

todos os possíveis pares de séries obtidas das diferentes árvores do mesmo local, ou seja:

$$rbar.eff = rbar.bt$$

Valores acima de 0,5 indicam um sinal comum entre as árvores (Brice et al., 2013).

- Correlação individual de cada série com a cronologia mestre

As correlações são calculadas entre cada série de anéis de uma árvore individual e uma cronologia mestre, construída a partir da média todas as outras séries individuais de árvores do mesmo local. Esta função difere das estatísticas *rbar.eff* (sinal efectivo da população), pois *rbar.eff* é a correlação média entre pares de séries, e esta é a correlação entre uma série e uma cronologia mestre.

3.2.5.4. Sinal expesso da população

O sinal expesso da população quantifica quão bem uma cronologia criada a partir de um número finito de árvores representa a cronologia relevante para a reconstrução climática. De acordo com Strumia (1999), não é garantido que este valor seja relevante do ponto de vista climático, visto que pode reflectir outro tipo de eventos como poluição, gestão florestal ou ataques de insectos. Assim, são considerados razoáveis valores acima de 0,85 (Wigley et al., 1984; Briffa & Jones, 1990)

O sinal expesso da população é dado pela equação:

$$eps = n * \frac{rbar.eff}{(n - 1) * rbar.eff + 1}$$

eps = Sinal expesso da população

rbar.eff = sinal efectivo da cronologia

n = o número médio de árvores

3.2.6. Identificação do sinal climático das cronologias dos anéis de crescimento

Para avaliar a influência dos factores climáticos no crescimento das árvores de *Pseudotsuga mensiezii* nos dois locais, foi feita a correlação dos crescimentos padronizados da espessura total do anel (RW), do lenho de início de estação (EW) e fim de estação (LW) com a precipitação total mensal e temperatura (média, máxima e

mínima) referentes à Estação Meteorológica de Oledo (para as árvores da Serra da Estrela) e Mondim de Basto (para as árvores da serra da Cabreira).

Para tal foi usado o módulo treeclim (Zang and Biondi, 2015) que na sua configuração padrão executa uma análise da função resposta bootstrapped (Guiot 1991), usando variáveis climáticas mensais de junho anterior a setembro do ano em análise. A principal diferença em relação a outros softwares (por exemplo, Dendroclim2002) é que o treeclim utiliza por defeito um bootstrapping estacionário (Politis e Romano, 1994), para considerar a possibilidade de dados potencialmente autocorrelacionados.

3.2.7. Identificação dos anos indicadores

Os anos indicadores (pointer years), definidos por Huber (1951) e Huber & Giertz-Siebenlist (1969), são anos com crescimentos extremos, correspondendo a um ano em que pelo menos 80% das árvores apresenta um ano com este evento. A sua primeira identificação é visual, sendo fácil detectar a sua dimensão ou intensidade. Analisando a tendência do crescimento do conjunto de árvores do mesmo local, é possível detectar anos em que a variação do crescimento foi igual nas séries de todas as árvores, sendo então possível assumir que um factor específico influenciou o crescimento das árvores naqueles anos.

Para determinar um ano indicador foi utilizado o algoritmo de Becker (Becker et al., 1994), que se baseia em duas premissas: no cálculo da variação relativa do crescimento radial, a partir da comparação da largura do anel do ano t com a do ano t-1 para cada série; na comparação inter-séries de sinal e magnitude dessas variações. São considerados anos indicadores, anos em que pelo menos 75% das árvores apresentam um valor de variação de crescimento radial maior que 10% (Mérián & Lebourgeois, 2011). É dado pela equação:

$$RGV_n = \frac{(RW_n - RW_{n-1})}{RW_{n-1}}$$

RW_n = largura do anel no ano n

RW_{n-1} = largura do anel no ano anterior

4. Resultados e discussão

4.1. Análise e caracterização das séries de anéis de crescimento

O Quadro 3 apresenta a média e o desvio padrão do anel de crescimento completo, do lenho de início de estação e de fim de estação e a percentagem da espessura do lenho de fim de estação no anel total para cada nível de altura e local como média de todos os anéis em cada rodela e de dez árvores por local. Verificou-se que a espessura média dos anéis de crescimento foi 6,9 mm na Serra da Cabreira e 5,7 mm na Serra da Estrela. A espessura média do lenho de início de estação foi 4,8 mm na Serra da Cabreira e 4,1 mm na Serra da Estrela e a espessura média do lenho de fim de estação foi 2,1 mm e 1,6 mm respectivamente. Os resultados mostram que os anéis de crescimento das árvores da Serra da Cabreira são maiores que os anéis das árvores da Serra da Estrela, assim como os respetivos lenhos de princípio e de fim de estação. A proporção do lenho de fim de estação no anel total representou 30,9% e 27,6% respectivamente na Serra da Cabreira e na Serra da Estrela, com uma diferença pequena entre os locais.

Quadro 3 Espessura do anel de crescimento completo (RW, mm), espessura do lenho de início de estação (EW, mm) e espessura do lenho de fim de estação (LW, mm) e percentagem da espessura do anel de fim de estação no anel total (% LW) e desvio padrão de árvores de *Pseudotsuga menziesii* em dois locais (Serra da Cabreira e Serra da Estrela). Média e desvio padrão para cada nível de altura e local de todos os anéis em cada rodela e de dez árvores por local.

Local	Nível de altura	RW	EW	LW	% LW
Serra da Cabreira	Base	7,7±2,6	5,4±2,2	2,33±1,2	30,3±4,7
	5 m	6,5±2,1	4,6±2,0	1,93±0,6	30,6±8,6
	10 m	6,7±1,7	4,7±1,7	2,00±0,7	30,5±7,8
	15 m	6,6±1,6	4,7±1,6	1,92±0,7	29,5±5,9
Serra da Estrela	Base	5,8±2,9	4,1±2,6	1,69±0,6	32,1±8,7
	5 m	5,7±2,7	4,1±2,5	1,62±0,5	29,3±9,9
	10 m	5,4±2,2	3,9±2,0	1,38±0,5	26,5±8,0
	15 m	5,8±2,0	4,2±1,8	1,61±0,7	26,7±4,4

A variação na árvore com o nível de altura mostrou que na Serra da Cabreira os anéis eram maiores ao nível da base, mas que na Serra da Estrela tal não se verificou. A diferença de crescimentos entre as árvores dos dois locais verificou-se ao longo da árvore para os quatro níveis de altura amostrados, ou seja, os anéis eram mais largos em todos os níveis de altura para as árvores da Serra da Cabreira. A estrutura do anel medida através da proporção de lenho de fim de estação, das árvores da Serra da Cabreira manteve-se aproximadamente constante em todos os níveis de altura das

árvores, ao contrário das árvores da Serra da Estrela, onde a proporção de lenho de fim de estação vai diminuindo.

Na Figura 9 estão representadas as percentagens médias de lenho de início e de fim de estação medidas radialmente para o nível de altura de 5 m. Verifica-se que há uma variação com a idade cambial que é semelhante nas árvores dos dois locais. Na Serra da Cabreira, até aos 14 anos de idade cambial, a percentagem de lenho de fim de estação é de aproximadamente 20%, aumentando a partir daí e variando entre 30% e 40%; a partir daí até ao último ano das árvores, a percentagem de lenho de fim de estação tende a ultrapassar os 40%. Na Serra da Estrela, a percentagem de lenho de fim de estação no anel total é também de aproximadamente 20% até aos 16 anos de idade cambial e daí até aos 28 anos aumenta até próximo de 40%, ultrapassando esse valor a partir dos 46 anos. A proporção do lenho de fim de estação no anel está, portanto, relacionada com a idade cambial. Segundo Smith et al. (1966) a espessura de ambos os lenhos está intimamente relacionada com a distância à medula (ou seja, com a idade do câmbio), mais do que com diferenças climáticas, e cada lenho é influenciado por factores diferentes.

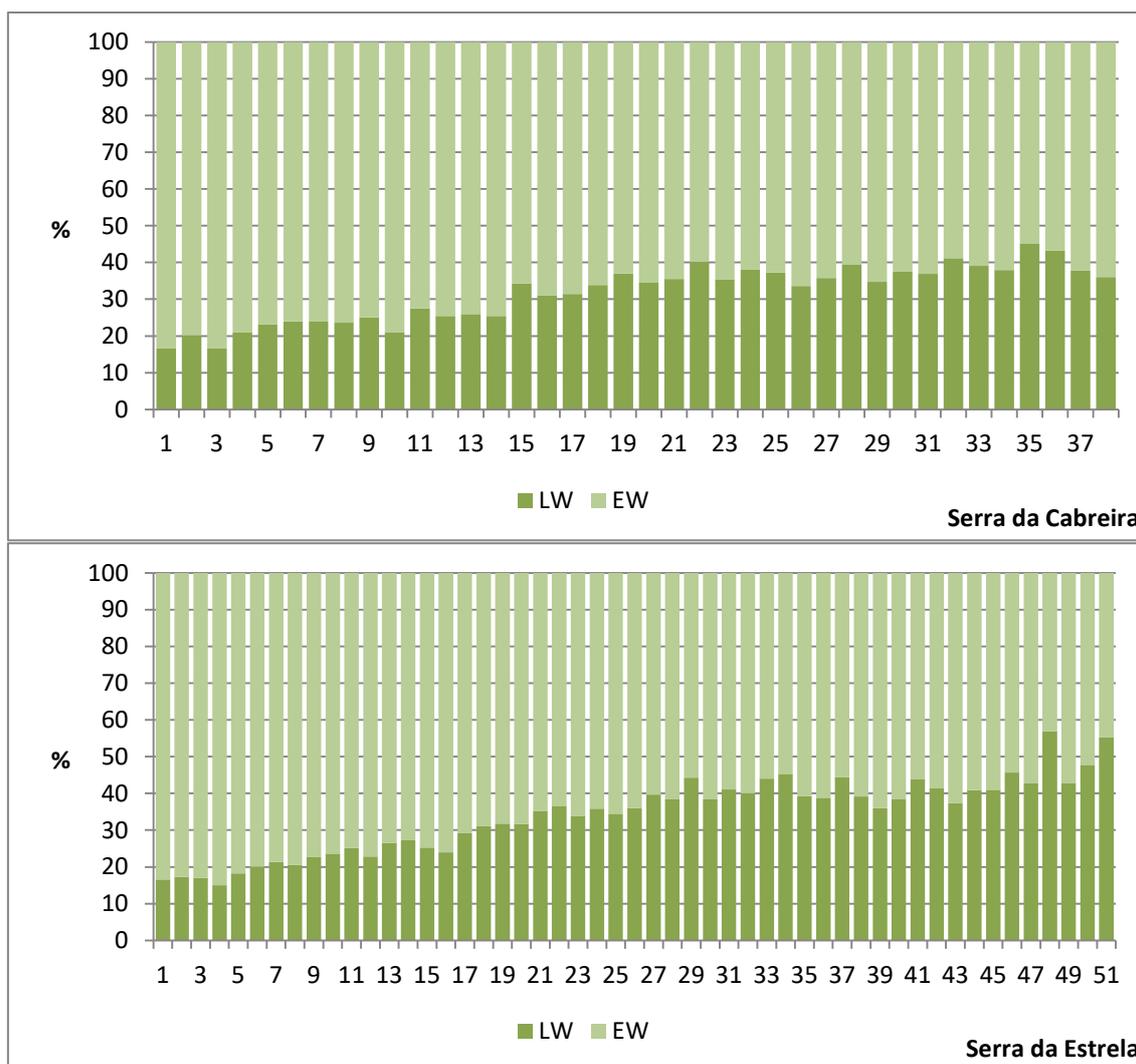


Figura 9 Variação radial com a idade do câmbio da percentagem média do lenho de fim de estação (LW) e de início de estação (EW) das 10 árvores de cada local para o nível de altura de 5 m.

As Figuras 10 e 11 apresentam as séries radiais de anéis de crescimento (RW - espessura total do anel, EW - lenhos de início de estação e LW – lenhos de fim de estação) para o segundo nível de amostragem (5 m de altura) de cada uma das dez árvores, de cada local amostrado. Verifica-se que os anéis são maiores para os primeiros anos, decrescendo gradualmente até uma idade cambial de aproximadamente 20 anos após o que se dá uma estabilização do crescimento. A espessura do lenho de início de estação apresentou um comportamento idêntico, decrescendo na fase mais jovem do câmbio e ficando aproximadamente constante a partir daí. Quanto à espessura do lenho de fim de estação verifica-se um aumento inicial até aproximadamente uma idade cambial de 7 anos e um valor constante a partir daí; na Serra da Estrela, a partir do 35º anel verificou-se uma tendência de diminuição.

A Figura 12 mostra esta tendência de variação do crescimento radial com a idade cambial através da representação das curvas médias para cada local. Segundo Dickison (2000), as árvores crescem rapidamente em diâmetro nos primeiros anos de idade e, quando atingem a idade adulta, diminuem o crescimento até estabilizarem.

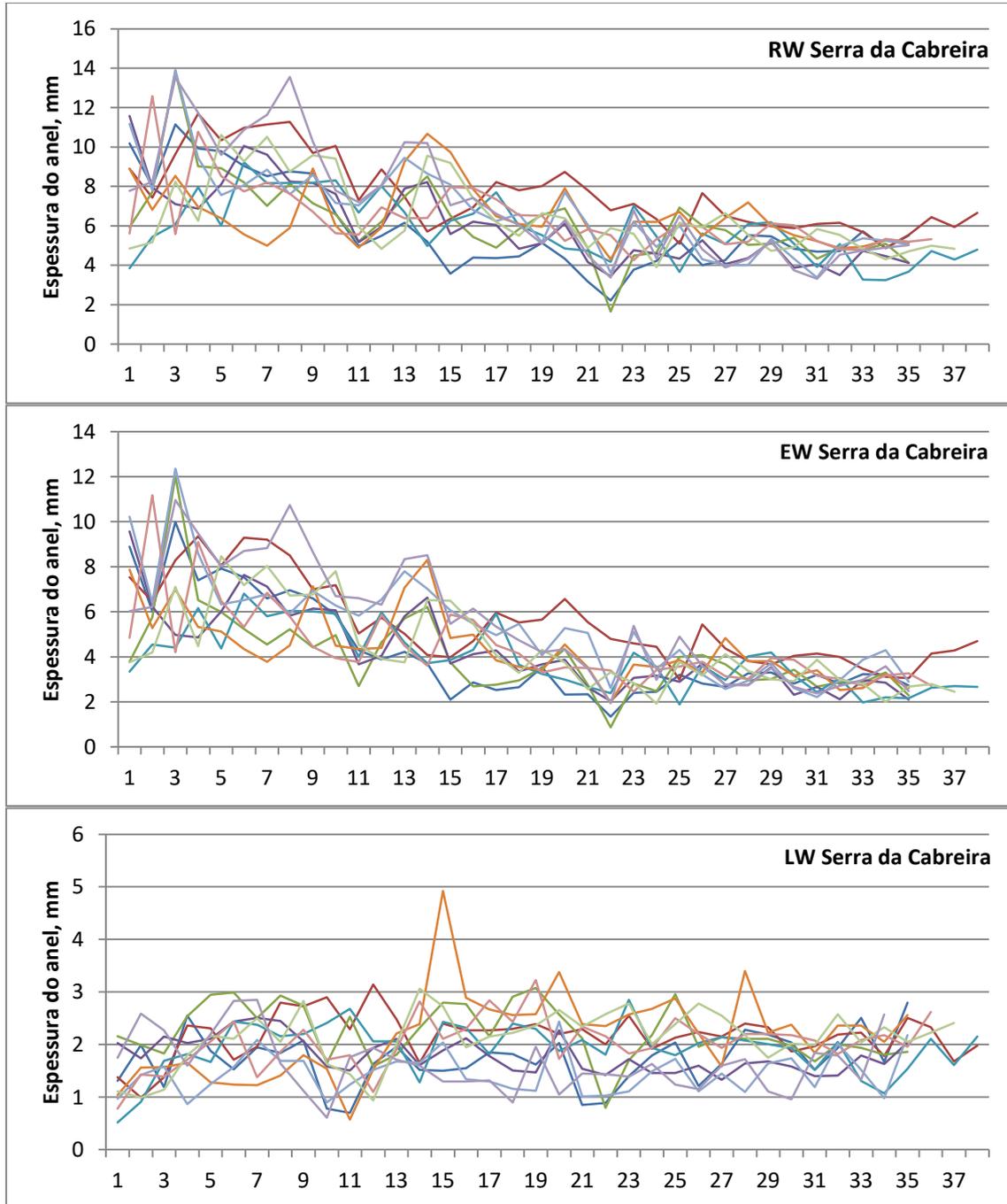


Figura 10 Séries de crescimento radial das árvores da Serra da Cabreira para o segundo nível de altura (5 m) de todas as árvores (cada linha corresponde a uma árvore) por idade cambial (RW - anel de crescimento completo; EW - lenho de início de estação; LW - lenho de fim de estação).

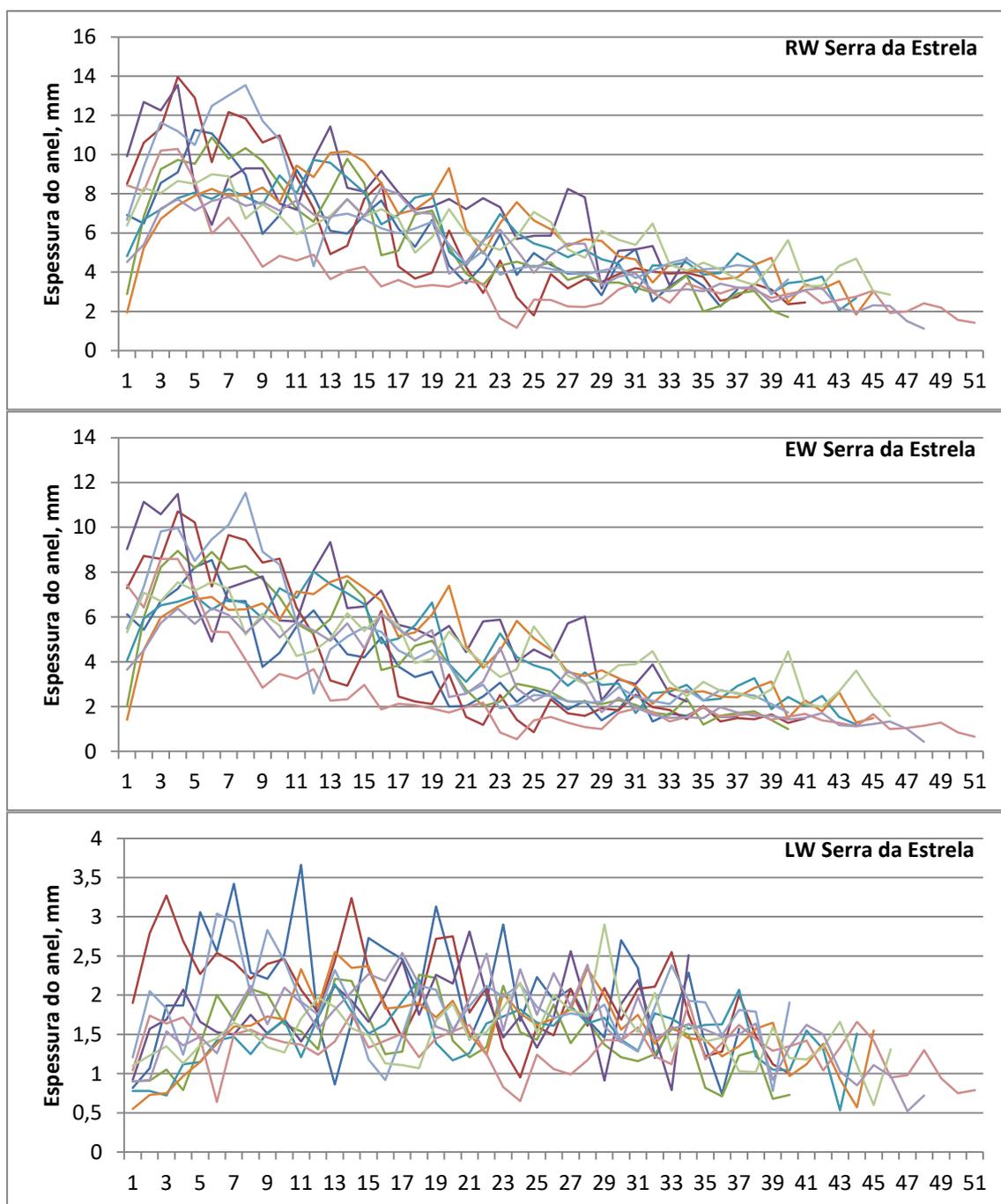


Figura 11 Séries de crescimento radial das árvores da Serra da Estrela para o segundo nível de altura (5 m) de todas as árvores (cada linha corresponde a uma árvore) por idade cambial (RW - anel de crescimento completo; EW - lenho de início de estação; LW - lenho de fim de estação)

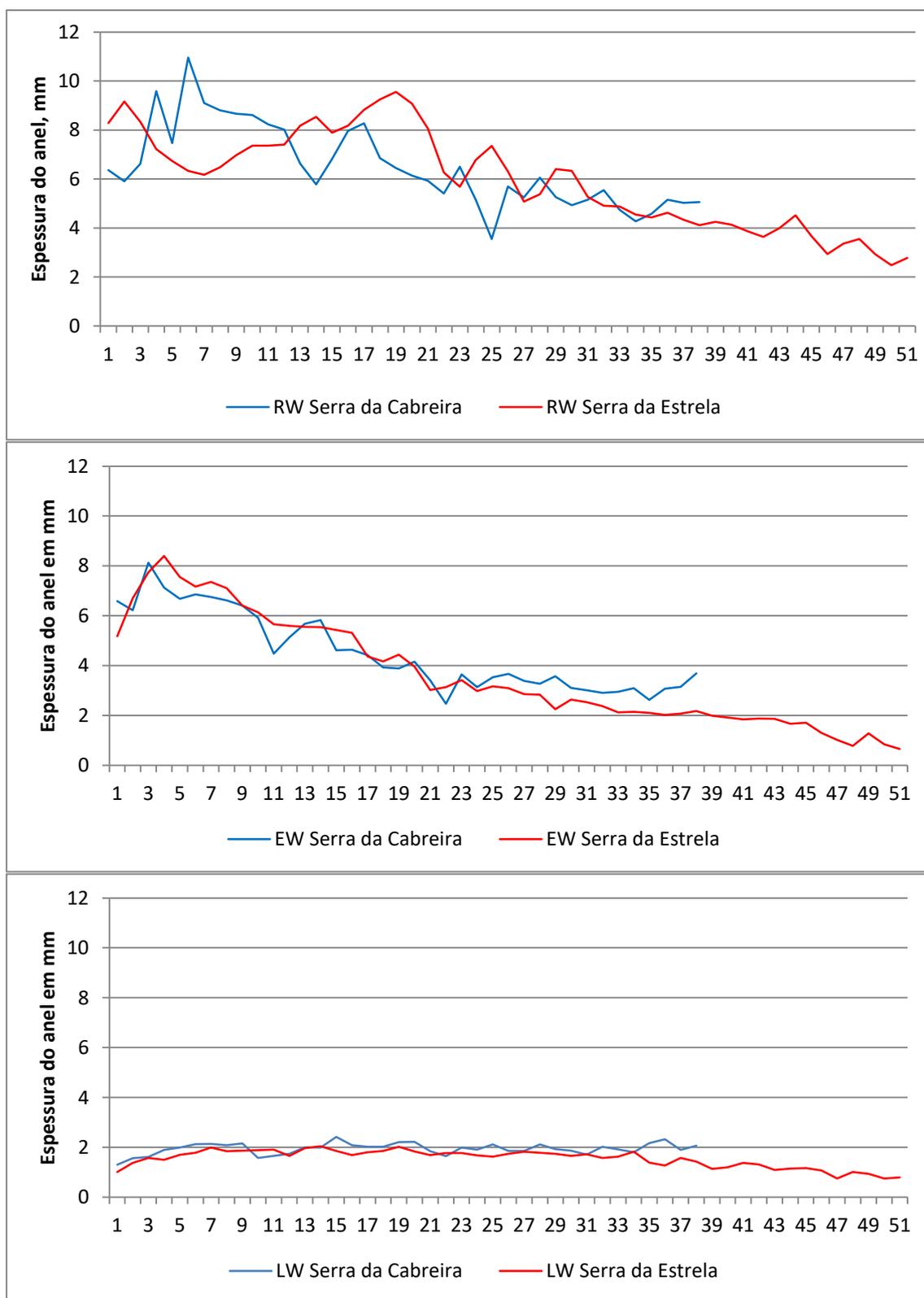


Figura 12 Séries de crescimento médio das árvores da Serra da Cabreira e Serra da Estrela para o segundo nível de altura (5 m) de todas as árvores (RW - anel de crescimento completo; EW - lenho de início de estação; LW - lenho de fim de estação).

4.2. Cronologias das séries de anéis de crescimento

A Figura 13 representa a espessura média dos anéis de crescimento em cada um dos níveis de altura amostrados organizados cronologicamente por ano civil. Comparando as cronologias dos quatro níveis amostrados, foi possível verificar que existe um padrão de crescimento comum a todas as alturas identificando-se picos de crescimento e decréscimos de crescimento para os mesmos anos.

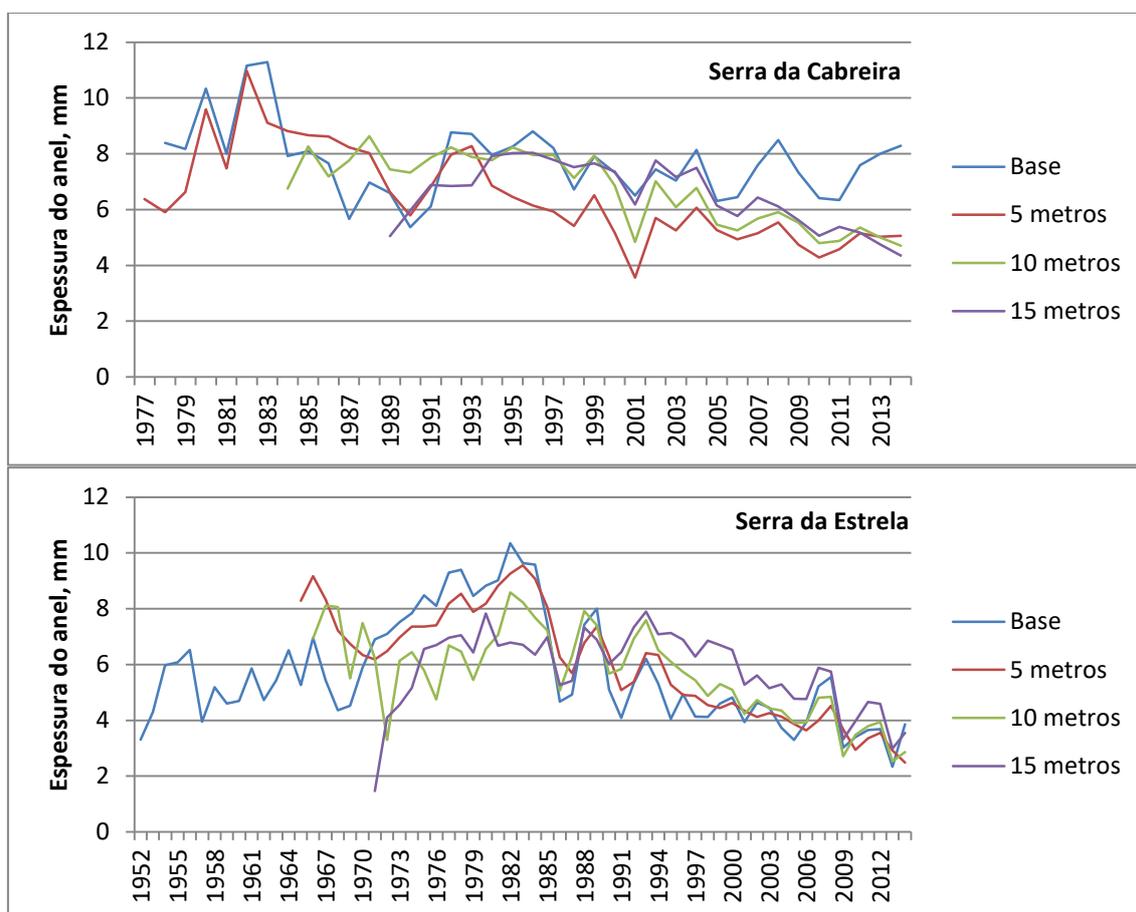


Figura 13 Séries de crescimento médias das árvores da Serra da Cabreira e da Serra da Estrela aos quatro níveis amostrados (RW - anel de crescimento completo).

A partir de uma inspeção visual da série por local com a ajuda do diagrama de extremos e quartis, é possível verificar que na Serra da Estrela há duas árvores consideradas outliers (Figura 14). No entanto, estas árvores não são consideradas outliers pela análise estatística do indicador Gleichläufigkeit (Figura 15), pelo que as amostras não foram excluídas para o tratamento estatístico seguinte.

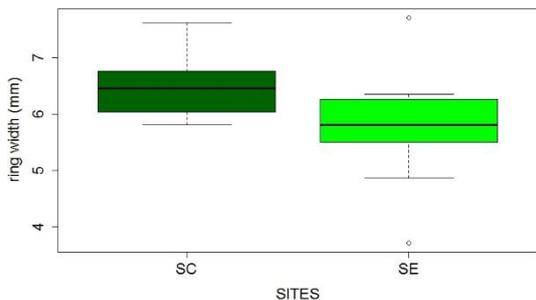


Figura 14 Diagrama de extremos e quartis para os crescimentos da Serra da Cabreira (SE) e da Serra da Estrela (SE) para o segundo nível de amostragem (5 m de altura).

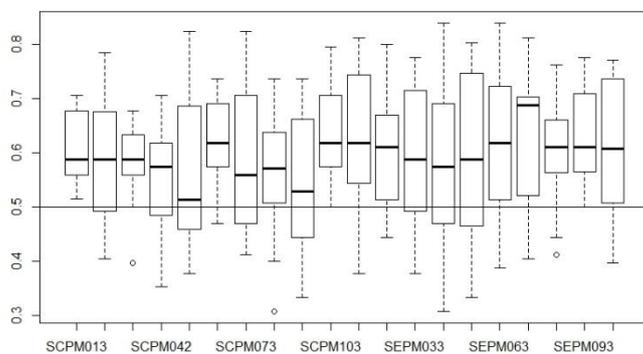


Figura 15 Diagrama de extremos e quartis para o indicador *Gleichläufigkeit* para as séries cronológicas da Serra da Cabreira (SE) e da Serra da Estrela (SE) para o segundo nível de amostragem (5 m de altura).

Ajustou-se o modelo exponencial negativo ou linha recta a cada curva, que pareceu ser o mais adequado à série de dados, como se pode verificar nas Figura 16 e 17.

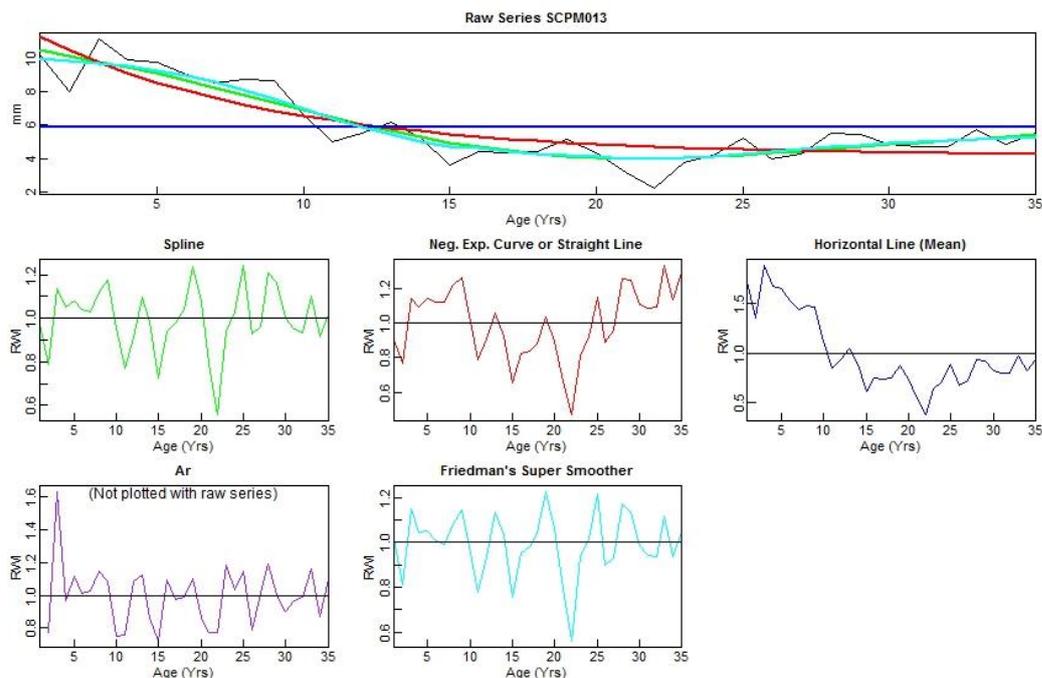


Figura 16 Representação da espessura dos anéis de crescimento em função da idade da árvore (como exemplo a árvore de código número 1, da Serra da Cabreira). A linha preta corresponde aos dados observados, a linha verde à curva Spline, a linha vermelha à curva Exponencial negativa ou Straight Line, a linha azul escura à Linha média, a linha roxa à curva Ar e a linha azul clara à curva Friedman's super soother.

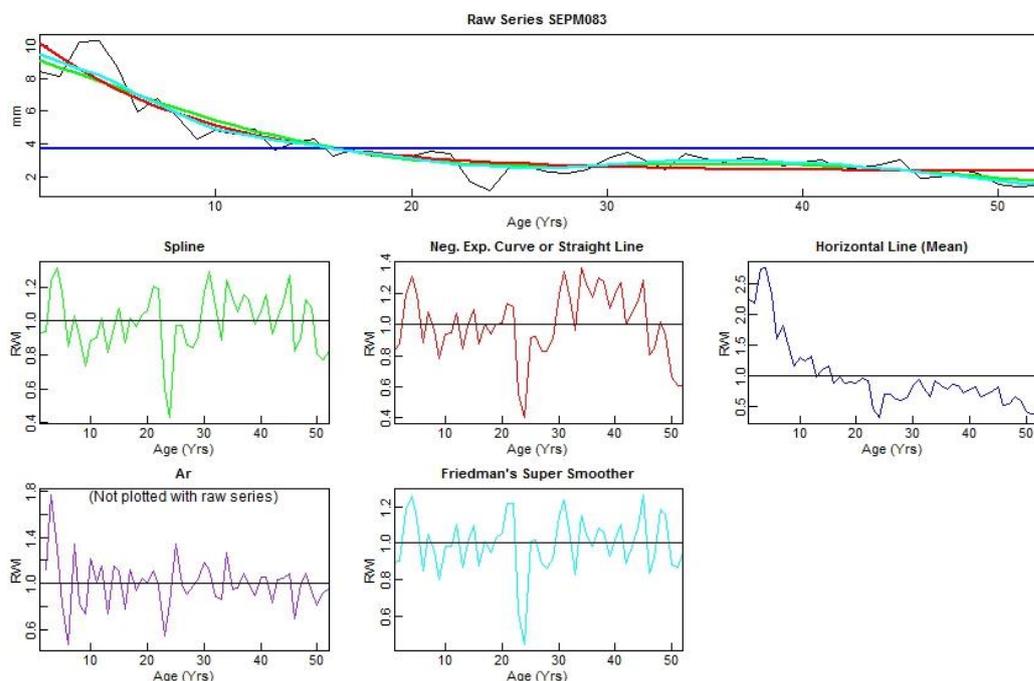


Figura 17 Representação da espessura dos anéis de crescimento em função da idade da árvore (como exemplo a árvore de código número 8, da Serra da Estrela). A linha preta corresponde aos dados observados, a linha verde à curva Spline, a linha vermelha à curva Exponencial negativa ou Straight Line, a linha azul escura à Linha média, a linha roxa à curva Ar e a linha azul clara à curva Friedman's super soother.

Depois de ajustada a curva a cada série individual dos anéis de crescimento, a curva dos índices é obtida pela divisão do valor real de cada medição presente na série, pelo valor esperado, estimado pela função (Cook et al., 1987). A cronologia final para cada local é resultado da média das cronologias indexadas de cada árvore do local amostrado (Lauw, 2011; Fritts, 1976).

A Figura 18 apresenta as cronologias finais indexadas para os dois locais de amostragem, juntamente com o número de amostras usado para cada ano da cronologia (área cinzenta). É possível identificar quedas acentuadas no crescimento das árvores nos dois locais, nomeadamente na Serra da Cabreira nos anos 1981, 1990 e 2001, e na Serra da Estrela nos anos 1986, 1990-1991, 2001, 2009 e 2013.

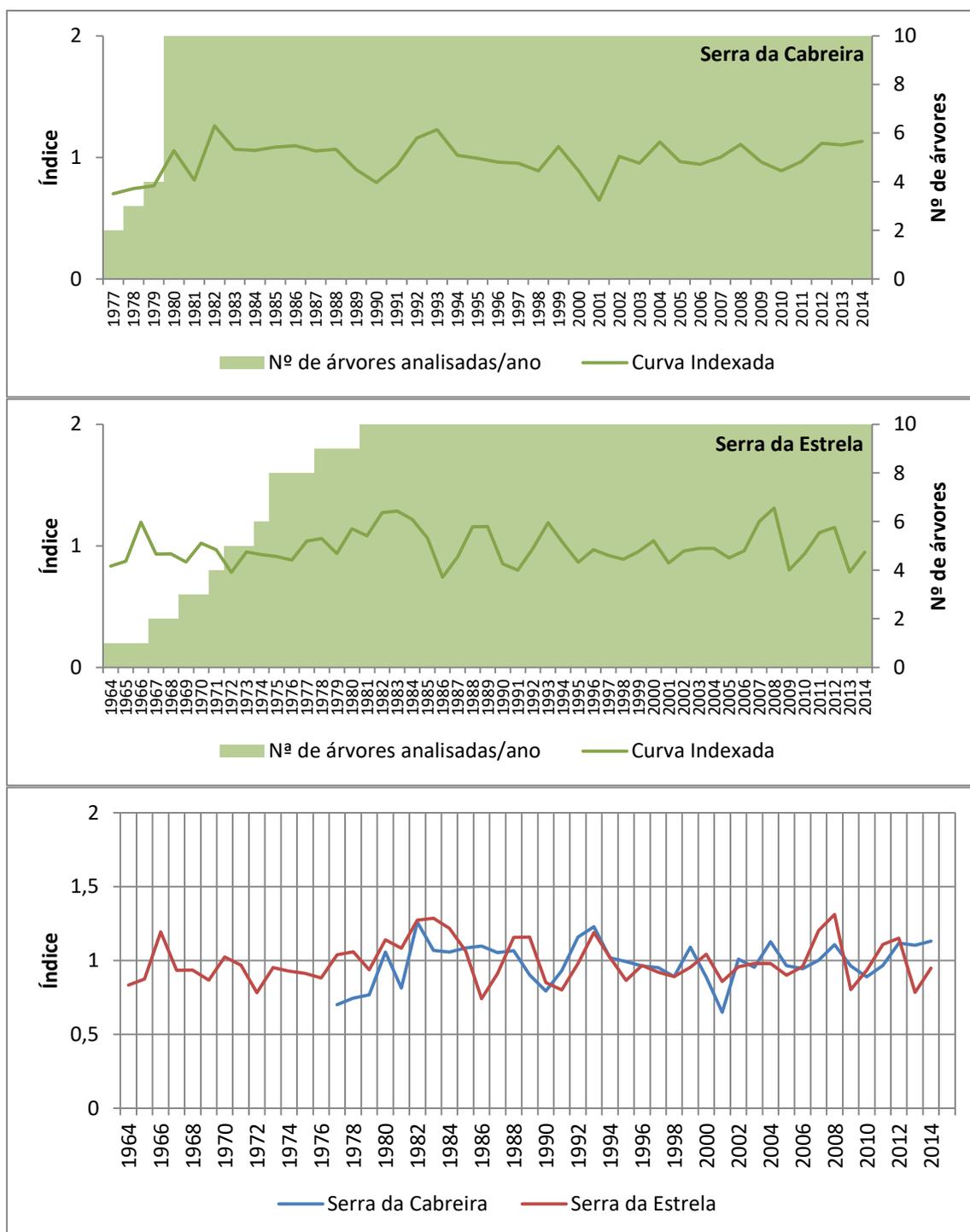


Figura 18 Cronologias finais indexadas para os dois locais de amostragem, juntamente com o número de amostras usado para cada ano da cronologia (área sombreada).

Depois de construída a cronologia para cada local deu-se início aos tratamentos estatísticos, nomeadamente a sensibilidade média e o desvio padrão (Quadro 4). A sensibilidade aos factores ambientais das amostras da Serra da Estrela é menor em relação à Serra da Cabreira, e menor no lenho de início de estação, relativamente ao

lenho de fim de estação, conforme os valores mais altos apresentados de sensibilidade média e de desvio padrão. Segundo Oberhuber et al. (1998), os valores de desvio padrão elevados são indicadores de uma maior sensibilidade a variáveis ambientais.

Quadro 4 Intensidade do sinal das cronologias e estatística das cronologias, por local (RW=anel de crescimento completo; EW=lenho de início de estação; LW=lenho de fim de estação) ($rbar.eff$ - sinal efectivo da cronologia; eps - sinal expresso da população).

		Serra da Cabreira	Serra da Estrela
RW	$rbar.eff$	0,35	0,44
	eps	0,79	0,87
	sensibilidade média	0,18	0,17
	desvio padrão	2,00	2,48
EW	$rbar.eff$	0,32	0,39
	eps	0,76	0,84
	sensibilidade média	0,22	0,19
	desvio padrão	1,91	2,31
LW	$rbar.eff$	0,29	0,37
	eps	0,74	0,83
	sensibilidade média	0,22	0,23
	desvio padrão	0,50	0,46

Para quantificar a intensidade do sinal foi feita uma análise estatística que tem em conta a variabilidade comum entre todas as árvores de cada amostragem (Lauw, 2011).

O sinal expresso da população (eps), que mede a confiança na cronologia e joga com a variabilidade intra e inter árvores (por ter como base o sinal efectivo da cronologia), fornece informação sobre a variabilidade existente. Os valores obtidos variam entre 0,79 e 0,87 para o anel de crescimento completo, para a Serra da Cabreira e Serra da Estrela respectivamente. Segundo Wigley et al. (1984) e Briffa & Jones (1990), valores de eps superiores a 0,85 sugerem um forte sinal climático da cronologia. Tal só se verifica para o caso da Serra da Estrela. Os valores de eps mais elevados para o lenho de início de estação do que para o lenho de fim de estação, concordam com os valores da sensibilidade média e do desvio padrão.

Foi também calculada a correlação individual de cada série com a cronologia mestre. O valor médio das correlações da Serra da Cabreira é 0,523 e 0,602 para a Serra da Estrela, o que mostra alguma variabilidade.

4.3. Relação entre o clima e o crescimento das árvores

4.3.1. Identificação dos sinais climáticos nas cronologias

As árvores respondem a alterações no ambiente que as rodeia, e muitas delas ficam gravadas nas suas características, nomeadamente nos anéis de crescimento. Procurou-se correlacionar o crescimento anual das árvores com parâmetros climáticos que ocorreram em cada local no período abrangido pela respetiva cronologia. Foram feitas correlações entre a precipitação (acumulada e número de dias), a temperatura (média, máxima e mínima), radiação solar, humidade relativa e os anéis de crescimento (RW) e as suas componentes (lenho de princípio e de fim de estação, EW, LW) medidos a 5 m de altura em todas as árvores, por local, e analisada a sua significância estatística.

Os mesmos fatores climáticos foram também avaliados com correlações parciais entre dois conjuntos de variáveis primárias e secundárias: evapotranspiração contra precipitação, temperatura mínima contra precipitação. Usou-se a correlação sazonal SEASCORR desenvolvida por Meko et al. (2011) para meses individuais e valores sazonais de 3 e 6 meses.

Verificou-se que a maioria das correlações foi estatisticamente não significativa. Apresentam-se aqui apenas os casos dos parâmetros climáticos e do respetivo período para os quais foi encontrada alguma correlação significativa, como compilado no Quadro 5. As correlações obtidas para estes parâmetros climáticos para todos os meses estão representadas nos Anexos 1 a 6.

Quadro 5 Compilação dos parâmetros climáticos que mostraram correlações com significado estatístico com o anel total (RW), o lenho de início de estação (EW) e de fim de estação (LW) para as árvores da Serra da Cabreira e da Serra da Estrela.

Local	Anel	Parâmetro climático	r
Serra da Cabreira	RW	Temperatura mínima de setembro	0,371
		Radiação solar de agosto	-0,327
		Dias com chuva superior a 1 mm de agosto do ano anterior	0,317
	EW	Temperatura mínima de setembro	0,32
		Dias com chuva superior a 1 mm de agosto	0,341
		Radiação solar de agosto	-0,357
	LW	Temperatura mínima de setembro	0,338
		Humidade relativa de abril	-0,345
		Precipitação acumulada de julho	0,222
Serra da Estrela	EW	Dias com chuva superior a 1 mm de outubro do ano anterior	0,235
	LW	Dias com chuva superior a 1 mm de janeiro	0,262

- Serra da Cabreira

Para a Serra da Cabreira verificou-se que havia correlação estatisticamente significativa do anel com a temperatura mínima de setembro, a radiação solar de agosto e o número de dias com precipitação superior a 1 mm de agosto do ano anterior. Para os lenhos de início e de fim de estação foram também significativas as correlações com a temperatura mínima de setembro.

O lenho de início de estação mostrou correlacionar-se significativamente, com um efeito negativo, com a radiação solar de agosto e, com um efeito positivo, com o número de dias de chuva superior a 1 mm em agosto. A humidade relativa de abril teve um efeito negativo no crescimento do lenho de fim de estação.

Na Serra da Cabreira, tirando o efeito da evapotranspiração, o efeito da precipitação de agosto foi significativamente positivo, tal como a precipitação de outubro do ano anterior (Figura 19). A Figura 20 mostra uma correlação significativa entre a temperatura mínima de março e setembro, e que, retirado esse efeito, existe uma influência positiva no crescimento da precipitação de agosto a outubro do ano anterior.

As diferenças nas correlações entre o lenho de fim e de início de estação e o clima permitem apontar que o lenho de fim de estação é menos susceptível às variações climáticas, ao contrário do encontrado por Lauw (2011).

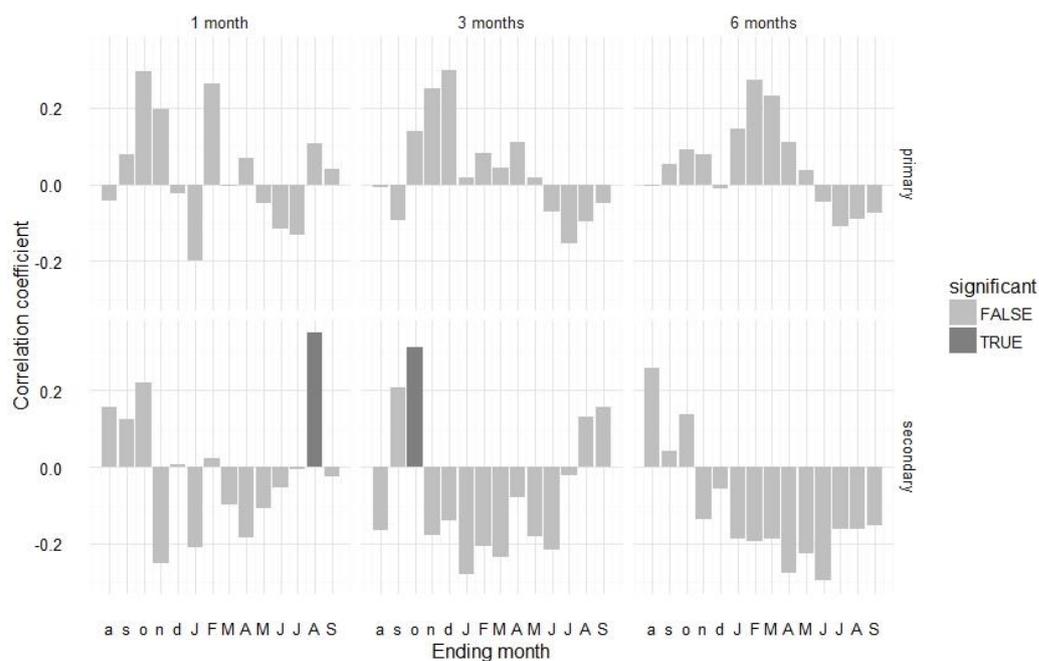


Figura 19 Resumo da análise SEASCORR do sinal climático nos dados residuais da cronologia. As variáveis climáticas são a evapotranspiração e a precipitação. Na primeira linha a correlação entre o anel total aos 5 metros de altura das árvores da Serra da Cabreira com a evapotranspiração mensal, soma de 3 meses e soma de 6 meses, com o ano hidrológico desde agosto do ano anterior a setembro do ano corrente. Na segunda linha correlações parciais entre o mesmo anel e a precipitação mensal.

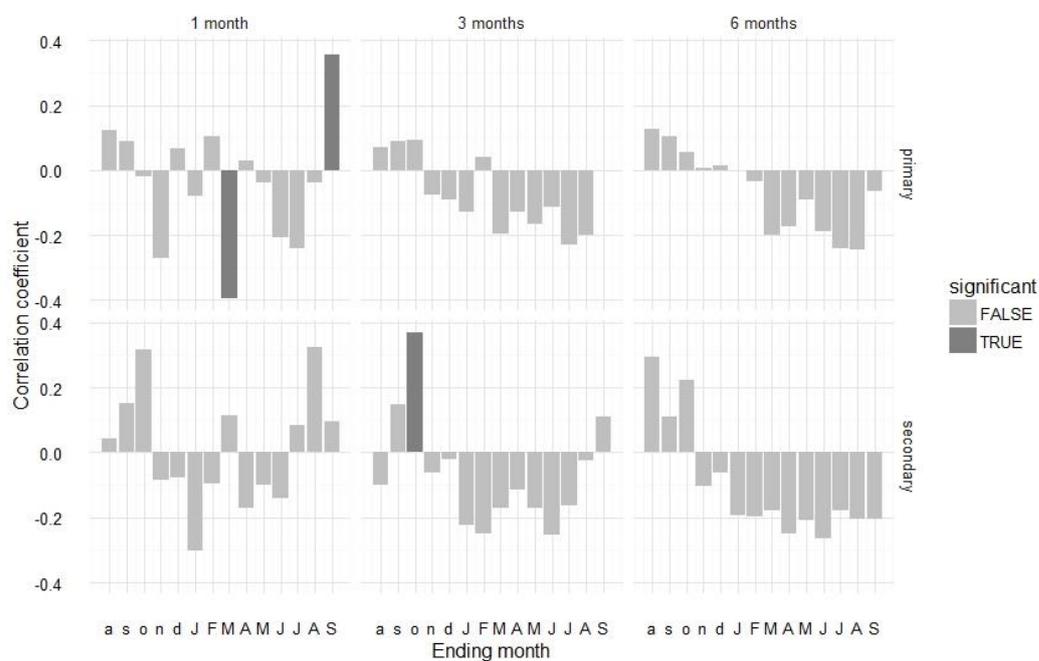


Figura 20 Resumo da análise SEASCORR do sinal climático nos dados residuais da cronologia. As variáveis climáticas são a temperatura mínima e a precipitação. Na primeira linha a correlação entre o anel total aos 5 metros de altura das árvores da Serra da Cabreira com a temperatura mínima, soma de 3 meses e soma de 6 meses, com o ano hidrológico desde agosto do ano anterior a setembro do ano corrente. Na segunda linha correlações parciais entre o mesmo anel e a precipitação mensal.

- Serra da Estrela

Para a Serra da Estrela, encontraram-se coeficientes de correlação estatisticamente significativos entre os lenhos de início de estação com a precipitação de julho e os dias com chuva superior a 1 mm do mês de outubro do ano anterior. O lenho de fim de estação foi influenciado pelos dias com chuva superior a 1 mm em janeiro.

Verificou-se uma correlação positiva da evapotranspiração de dezembro e de outubro-dezembro e novembro-janeiro com o crescimento (Figura 21).

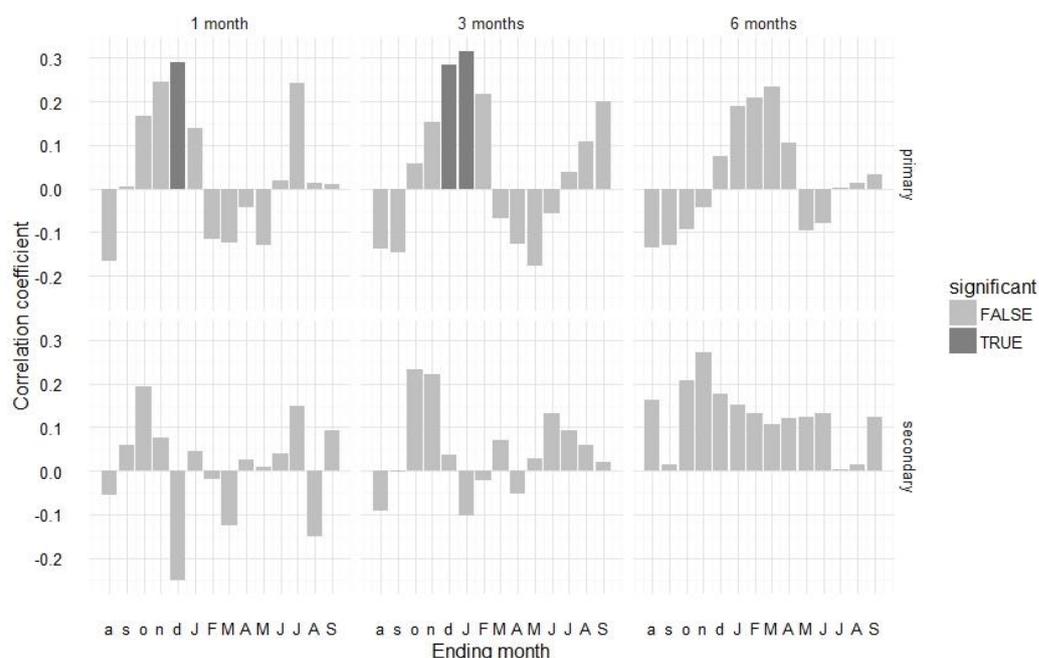


Figura 21 Resumo da análise SEASCORR do sinal climático nos dados residuais da cronologia. As variáveis climáticas são a evapotranspiração e a precipitação. Na primeira linha a correlação entre o anel total aos 5 metros de altura das árvores da Serra da Estrela com a evapotranspiração, soma de 3 meses e soma de 6 meses, com o ano hidrológico desde agosto do ano anterior a setembro do ano corrente. Na segunda linha correlações parciais entre o mesmo anel e a precipitação mensal.

Em termos gerais verificou-se que o efeito climático no crescimento não foi muito forte, nomeadamente o efeito da precipitação. Tal resulta do facto de a precipitação ser elevada nos dois locais, não constituindo esta variável um factor limitante e portanto determinante para o crescimento como acontece em outras regiões, por exemplo, do sul de Portugal (Santos et al., 2001). Lauw (2011) para as espécies *Q. pyrenaica*, *P. sylvestris* e *A. alba*, e por Lebourgeois et al. (2004) e Fonti et al. (2008) com árvores de *Quercus* spp. referem também dificuldades em identificar um sinal climático em regiões moderadamente húmidas.

Apesar disso encontraram-se correlações significativas com a precipitação de agosto e de outubro do ano anterior (Serra da Cabreira) e com a precipitação de julho e com a evapotranspiração de dezembro e dos períodos outubro-dezembro e novembro-janeiro (Serra da Estrela).

Segundo Schweingruber (1988), em regiões de clima mediterrâneo, onde a humidade é adequada durante a maior parte do ano, as taxas de crescimento são determinadas pelas temperaturas de junho e maio. Os resultados deste estudo mostraram de facto uma influência da temperatura no crescimento: o crescimento do anel total e das suas componentes está positivamente relacionado com a temperatura mínima de setembro, período em que se inicia o lenho de fim de estação (Anexo 2). Já o anel de início de estação é influenciado negativamente pela radiação que ocorre durante o período mais quente, em agosto (Anexo 3).

As condições climáticas de um ano afectam o crescimento das árvores no ano seguinte, provavelmente porque influenciam a fixação de carbono e a produção de rebentos (Restaino, 2016). Neste contexto, as chuvas tardias de verão poderiam estimular a acumulação de hidratos de carbono com o intuito de serem utilizados no início da estação seguinte para desenvolver o aparelho fotossintético (Yang & Midmore, 2005). Tal pode justificar as correlações positivas entre os crescimentos das árvores da Serra da Cabreira e as precipitações de outubro do ano anterior, assim como da evapotranspiração de dezembro do ano anterior e de outubro a janeiro no crescimento dos anéis das árvores da Serra da Estrela.

Alguns estudos mostraram que o sinal climático é maior em árvores mais velhas (Carrer & Urbinati, 2004; Rossi et al., 2008; Yu et al., 2008), o que pode também contribuir para as correlações fracas obtidas entre o clima e o crescimento dos anéis neste estudo, pois as amostras são provenientes de árvores consideradas ainda jovens (≈ 48 anos).

Não obstante a sensibilidade observada entre o clima e a espessura dos anéis em determinados períodos, as razões que justificam os resultados encontrados da espessura dos anéis de crescimento podem ser variadas, visto que há vários factores, internos e externos que regulam a actividade do câmbio e que, para além do ambiente, incluem também a idade e a hereditariedade das árvores (Savva et al., 2002). Dado que as componentes principais do factor ambiente (precipitação e temperatura), não mostraram correlações suficientes para justificar os resultados obtidos para o crescimento, é provável a influência de outros factores externos ou internos (Callado et al., 2001; Wimmer et al., 2000; Fritts, 1976). É ainda de referir que

os dados climáticos foram recolhidos das estações mais próximas com dados completos, pelo que poderá haver efeitos climáticos localizados que não foram considerados nesta análise.

4.4. Eventos extremos

A diminuição do crescimento das árvores pode ter várias causas, sendo uma delas os eventos climáticos extremos, nomeadamente secas severas e recorrentes que podem levar à morte das árvores (Hernández-Santana et al., 2009). O Mediterrâneo parece ser a região mais susceptível de todas as regiões europeias a este tipo de eventos (Schröter et al., 2005)

Seca refere-se a um período seco de longa duração e está associada a níveis baixos de água disponível ou até insuficientes para satisfazer as necessidades dos seus dependentes. Conforme a área de estudo o conceito de seca varia, sendo comum fazer a distinção entre secas climáticas, hidrológicas, agrícolas e urbanas (Rodrigues et al., 1993).

Neste estudo, a abordagem à seca é feita do ponto de vista meteorológico, ou seja, quando a precipitação é inferior ao valor normal, caracterizada pela falta de água provocada pela desarmonia entre o input e o output de água (que depende de outros elementos para além da precipitação tais como velocidade do vento, temperatura e humidade do ar, insolação) (IPMA, 2017). Para a análise das secas pode utilizar-se o índice PDSI (Palmer Drought Severity Index), criado por Palmer, (1965) e calibrado para Portugal Continental (Pires, 2003). Palmer (1965) baseou-se nos valores da precipitação, temperatura do ar e capacidade de água disponível no solo para classificar os períodos de seca em fraca, moderada, severa ou extrema (IPMA, 2017). Em Portugal são recorrentes as situações de seca, nomeadamente nas regiões a sul do Tejo, e nos últimos 65 anos, os episódios de seca mais severos ocorreram em 1943/46, 1956, 1976, 1980/81, 1991/92, 1994/95, 1998/99 e 2004/06 (IPMA, 2017).

4.4.1. Análise das séries de anéis de crescimento

A partir da Figura 22 é possível fazer uma análise visual dos anéis de crescimento das árvores dos dois locais. Vê-se que há anos de pequenos crescimentos, que ocorrem em todas as árvores do mesmo local, com maior ou menor intensidade. Alguns desses anos com menores crescimentos estão em sincronia nos dois locais, como por

exemplo os anos 2001 e 1981. Verifica-se que, apesar de todos os factores condicionantes do crescimento e da variabilidade natural entre árvores, a *Pseudotsuga menziesii* reage a eventos de seca, não só os documentados pelo IPMA para o país mas também a eventos mais localizados.

As árvores da Serra da Cabreira parecem reagir intensamente a uma boa parte dos eventos climáticos, registando uma redução da espessura do anel total, tal como dos seus dois lenhos integrantes. As árvores da Serra da Estrela parecem reagir com menos intensidade aos eventos, apesar de uma maior sensibilidade, apresentando mais quedas no crescimento dos seus anéis, mas pouco intensas.

Em média, para o conjunto de árvores analisado para a Serra da Cabreira, verificaram-se as seguintes variações de crescimento:

- na seca de 1980-1981, a espessura do anel diminuiu de 9,60 mm para 7,47 mm de 1980 para 1981, e aumentou para 10,67 mm para 1982; quer isto dizer que houve um decréscimo no crescimento de 22% em 1981 e uma recuperação em 1982 de 47%.
- em 1990, observou-se uma espessura do anel 5,79 mm, em comparação com 6,63 mm em 1989 o que representa um decréscimo de 13%: seguiu-se um crescimento em 1991 de 6,82 mm que representa uma recuperação de 18%.
- na seca de 1998-1999, constatou-se um decréscimo do crescimento de 1997 para 1998 de 5,93 mm para 5,41 mm, correspondente a um decréscimo de crescimento de 9% seguidos de um acréscimo para 6,51 mm em 1999 correspondendo a um acréscimo de 20%.
- em 2001 verificou-se um ano mais chuvoso que a média, havendo um decréscimo dos crescimentos médios de 5,16 mm para 3,55 mm de 2000 para 2001, e uma recuperação de 5,70 mm correspondente a 60%.

Em média, para o conjunto de árvores analisado para a Serra da Estrela, verificaram-se as seguintes variações de crescimento:

- na seca de 1980-1981, registou-se um crescimento de 8,91 mm em 1980 e de 8,75 mm em 1981, o que representa apenas um pequeno decréscimo de 2%, seguidos de um crescimento de 9,76 mm que representa 12% de crescimento;
- na seca de 1986 (Figura 30), observou-se um crescimento de 7,32 mm em 1985, seguido de um menor crescimento de 5,22 mm em 1986 (decréscimo de 29%), com uma recuperação de 6,16 mm em 1987 (recuperação de 18%);

- na seca de 1991-1992 observou-se um crescimento em 1990 de 5,31 mm, em 1991 de 4,85 mm e em 1992 de 5,9 mm, correspondentes a uma diminuição no crescimento de 9%, e um aumento do crescimento de 21%;

- na seca de 1994-1995 observou-se um crescimento em 1994 de 5,76 mm, em 1995 de 4,78 mm e em 1996 de 5 mm, correspondentes a uma diminuição no crescimento de 17%, e um aumento do crescimento de 5%;

- de 2000 para 2001 observou-se uma diferença nos crescimentos de 4,74 mm para 3,93 mm, o que corresponde a uma queda no crescimento de 17%, e em 2002 um crescimento de 4,3 mm que corresponde a uma recuperação do crescimento de 9%;

- na seca de 2009, observou-se um crescimento em 2008 de 4,64 mm, em 2009 de 2,71 mm e em 2010 de 3,17 mm, correspondentes a uma diminuição no crescimento de 42%, e um aumento do crescimento de 17% respectivamente;

- de 2012 para 2013 observou-se uma diferença nos crescimentos de 3,56 mm para 2,29 mm, o que corresponde a uma queda no crescimento de 36%, e em 2014 um crescimento de 2,88 mm que corresponde a uma recuperação do crescimento de 17%.

Estes fenómenos de sensibilidade da *Pseudotsuga menziesii* a factores ambientais foram registados por Sergent et al. (2014), que mostrou que a espécie tem um crescimento radial vulnerável a eventos de seca, a diferentes escalas dependendo da região, e por Gadgil (1971) que mostrou que esta é uma árvore também vulnerável ao encharcamento dos solos, pois quando ocorre grande precipitação, os ambientes tornam-se anaeróbios e prejudiciais à vida das árvores.

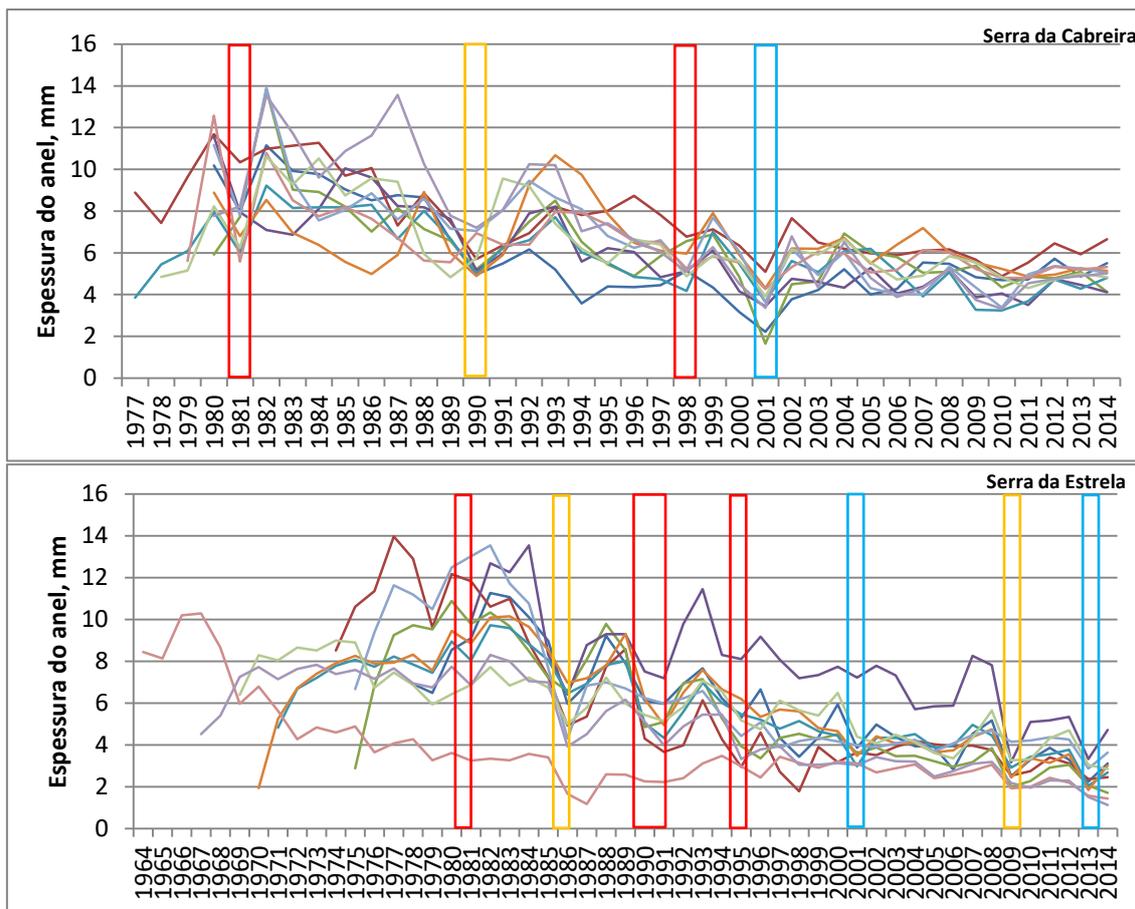


Figura 22 Identificação das principais secas nas séries de crescimento dos anéis das 10 árvores dos dois locais, no nível de altura de 5 metros. A vermelho estão assinalados os anos com diminuição do crescimento visível e com secas documentadas pelo IPMA, a laranja os anos com diminuição do crescimento devido a anos de seca localizada e a azul os anos com diminuição dos crescimentos devido a precipitações abundantes e localizadas.

4.4.2. Anos indicadores

O cálculo dos anos indicadores vem enfatizar os fenómenos extremos com efeito no crescimento das árvores analisadas, já referidos anteriormente, a partir da análise dos anos em que a variação de crescimento radial maior que 10% em pelo menos 75% das árvores.

Nas Figuras 23 e 24 estão identificados os anos indicadores (pointer years) nas séries indexadas dos dois locais, nos quatro níveis de altura (base, 5 m, 10 m e 15 m).

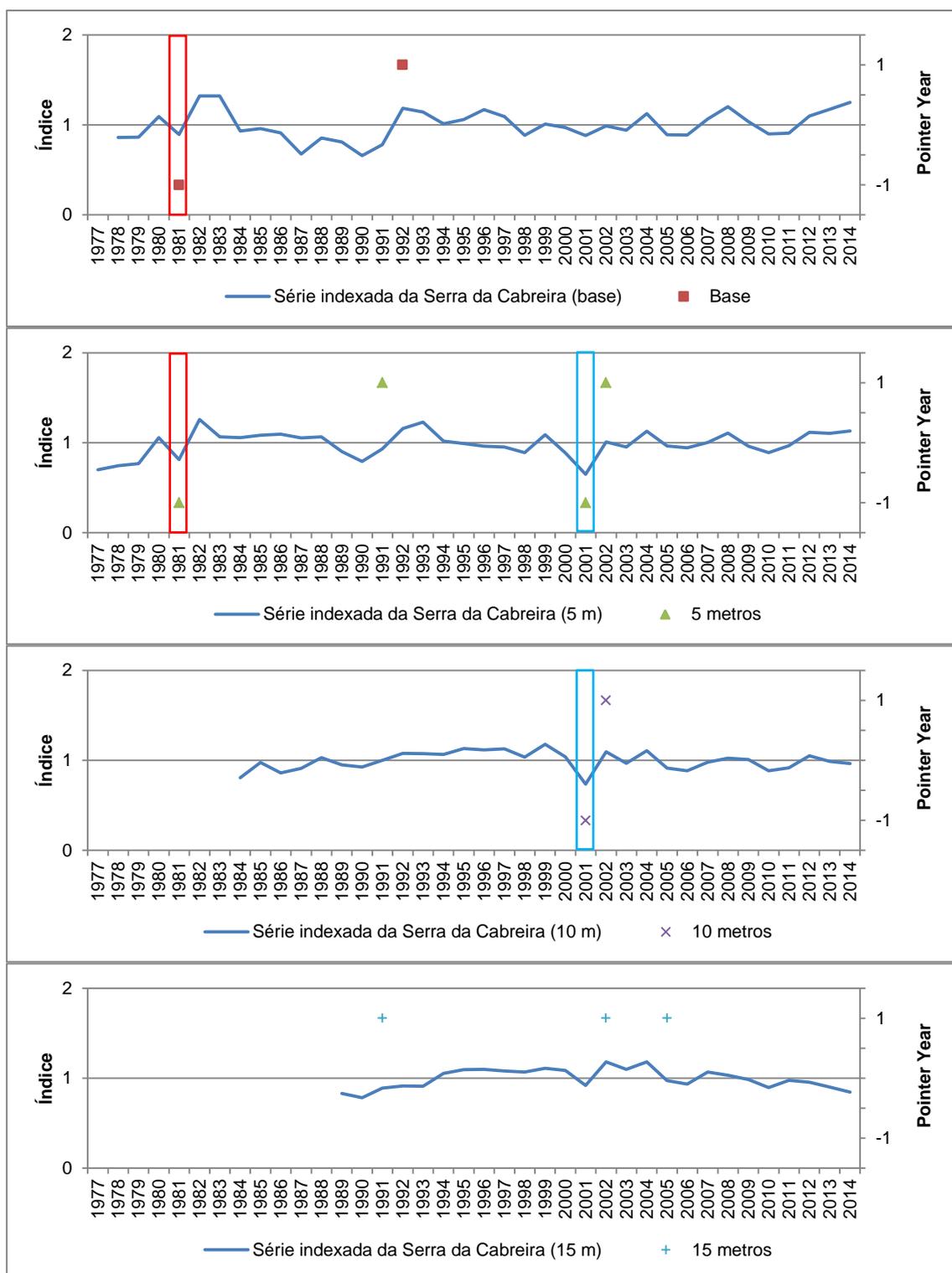


Figura 23 Identificação dos anos indicadores (pointer years) nas séries indexadas da Serra da Cabreira, nos quatro níveis de altura (base, 5 m, 10 m e 15 m). A vermelho estão assinalados os anos indicadores e com secas documentadas pelo IPMA, a laranja os anos indicadores com seca localizada e a azul os anos indicadores com precipitações abundantes e localizadas.

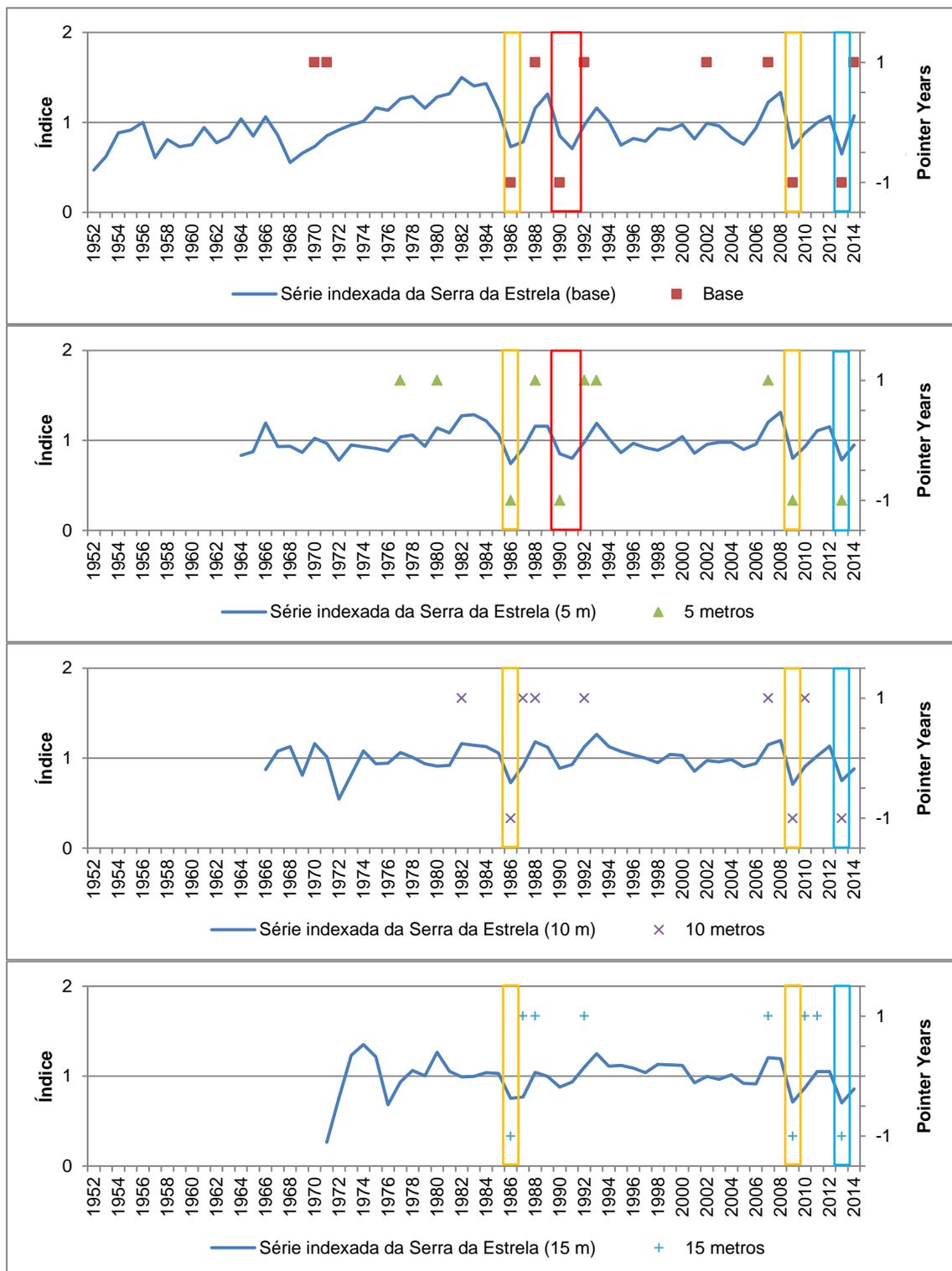


Figura 24 Identificação dos anos indicadores (pointer years) nas séries indexadas da Serra da Estrela, nos quatro níveis de altura (base, 5 m, 10 m e 15 m). A vermelho estão assinalados os anos indicadores e com secas documentadas pelo IPMA, a laranja os anos indicadores com seca localizada e a azul os anos indicadores com precipitações abundantes e localizadas.

Numa análise detalhada (Anexo 7) é possível notar que na Serra da Cabreira estão bem definidos dois anos indicadores negativos, 1981 e 2001, que correspondem a anos com diminuição dos crescimentos já referidos no capítulo anterior. No ano 1981, ao nível da base 75% das árvores mostram uma variação do crescimento radial negativa significativa e a 5 m 80% das árvores. Este ano, foi documentado pelo IPMA como um ano de seca.

No ano 2001, tal como no ano 1981, só é possível detectar dois níveis com anos indicadores marcados, neste caso 5 m com 100% das árvores a mostrar variação do crescimento radial negativa e 10 m com 90% das árvores. Este ano, foi um ano de chuvas intensas na Serra da Cabreira (Figura 25), onde a precipitação anual foi de 2235 mm, e a temperatura média anual foi de 12,5°C.

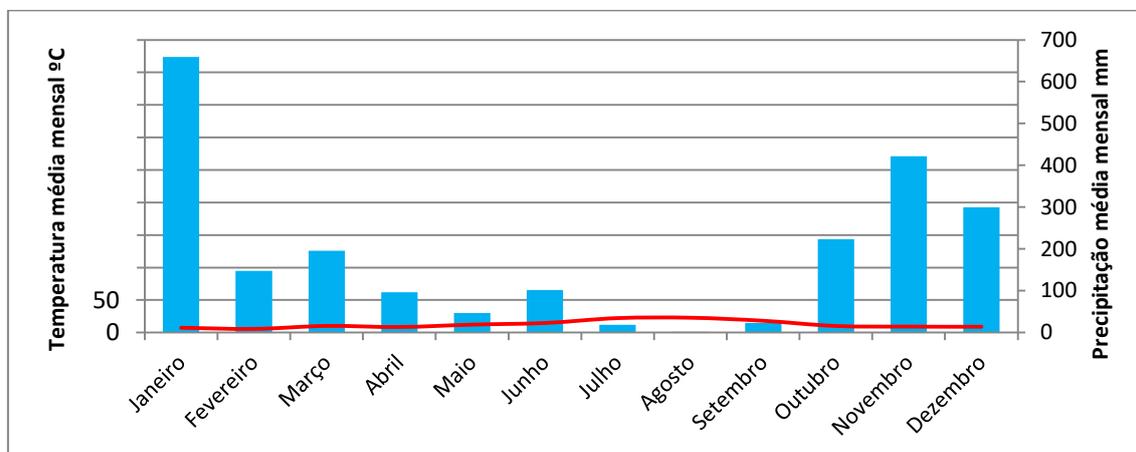


Figura 25 Gráfico termoplúviométrico da Serra da Cabreira para o ano 2001.

No caso da Serra da Estrela é possível detectar mais anos indicadores, em mais níveis e com maior percentagem. No ano 1986, todas as alturas mostram uma variação negativa, na base em 100% das árvores, a 5 m de 90% das árvores, a 10 m de 100% das árvores e a 15 m de 100% das árvores. Este ano foi caracterizado por pouca precipitação nesta região (445 mm) (Figura 26).

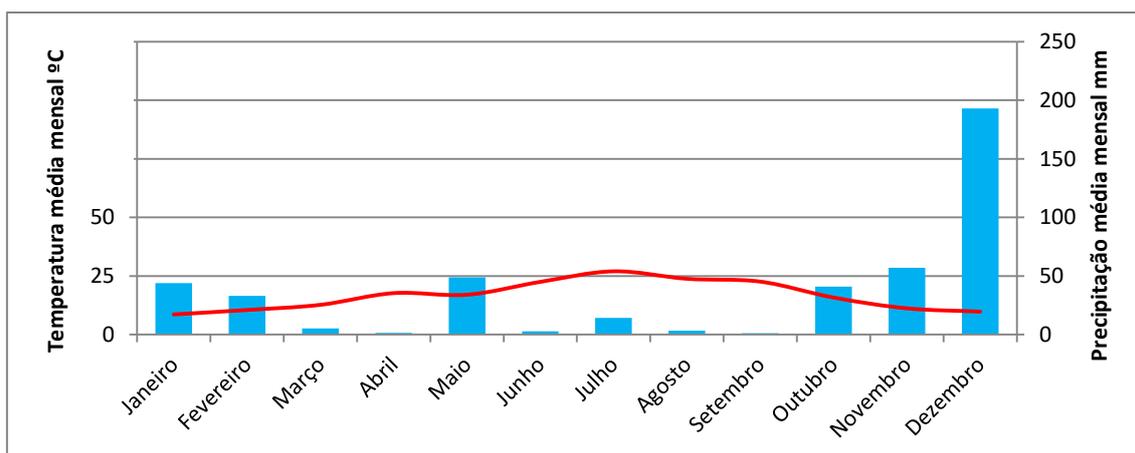


Figura 26 Gráfico termopluriométrico da Serra da Estrela para o ano 1986.

Nos anos 1990-91 houve uma variação negativa do crescimento radial das árvores a duas alturas da árvore, na base em 90% das árvores, e a 5 m em 80% das árvores. Como os anos indicadores são medidos de acordo com a variação relativa ao ano anterior, o ano 1991 não está marcado como tal, no entanto, é possível observar na Figura 22, que é claramente um ano indicador, em conjunto com o ano anterior. No ano 2009, ano em que a precipitação acumulada rondou os 315 mm (Figura 27), foi um ano seco na Serra da Estrela, o que se refletiu nos crescimentos a todas as alturas das árvores. Da base aos 5 m, 90% das árvores mostram uma variação negativa do crescimento radial e dos 10 aos 15 m, o mesmo acontece em todas as árvores.

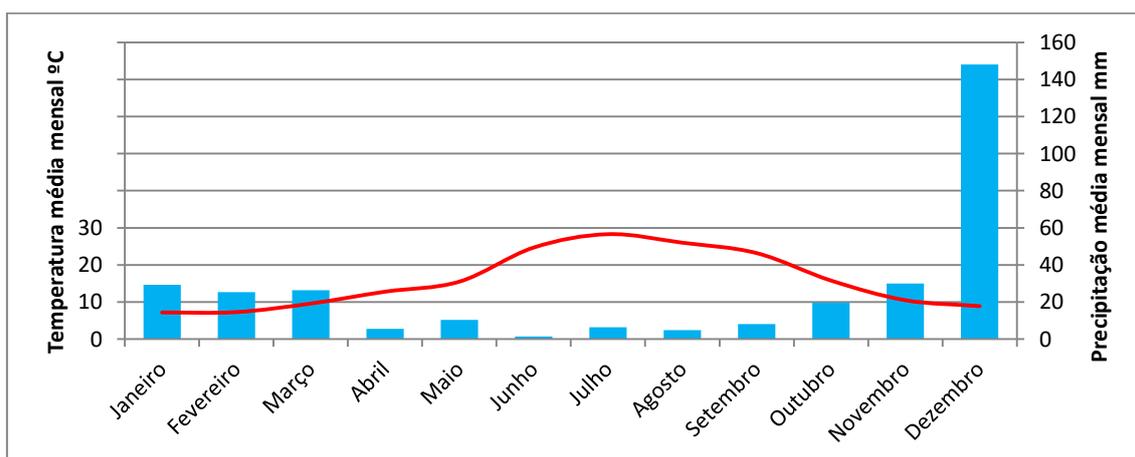


Figura 27 Gráfico termopluriométrico da Serra da Estrela para o ano 2009.

O ano 2013, apesar de não ter sido um ano extremamente seco na Serra da Estrela, teve uma precipitação acumulada de 605 mm (Figura 28); no entanto, foi um ano com

um grande impacto no crescimento, a todas as alturas das árvores: na base em 90% das árvores, e aos 5, 10 e 15 m em 100% das árvores.

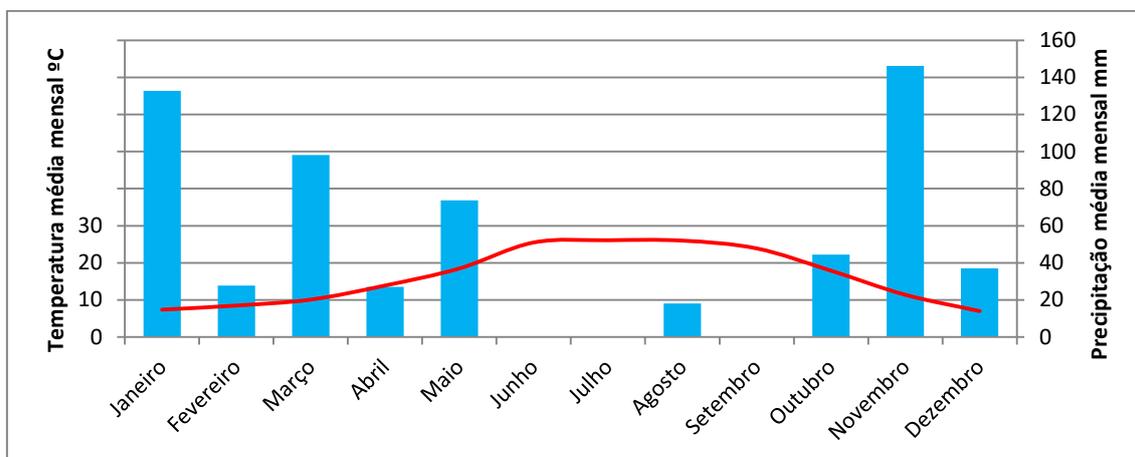


Figura 28 Gráfico Termopluiométrico da Serra da Estrela para o ano 2013.

É de notar que, em grande parte dos casos, após um ano indicador negativo, segue-se um ano indicador positivo, por exemplo o ano 2002 na Serra da Cabreira, mostra uma variação positiva significativa em relação ao ano 2001 onde ocorreu uma variação negativa, o ano 1987 e 1988 na Serra da Estrela mostram também uma variação positiva após a seca de 1986, tal como os anos 1992 e 1993, 2010 e 2011, e 2014. Estes anos indicadores mostram a recuperação das árvores após um evento extremo, retomando o seu crescimento.

5. Conclusão

Este trabalho estudou o impacto de factores climáticos no crescimento de árvores de *Pseudotsuga menziesii*, a partir de amostras recolhidas em ambientes de montanha, na Serra da Cabreira e na Serra da Estrela e por análise dos seus anéis de crescimento utilizando técnicas dendrocronológicas.

Os resultados mostraram que as árvores apresentaram um crescimento radial médio elevado, que foi maior na Serra da Cabreira. A estrutura do anel foi semelhante entre as árvores dos dois locais, com uma proporção semelhante de lenho de fim de estação. A diferença de crescimento entre as árvores dos dois locais verificou-se ao longo da árvore para os quatro níveis de altura amostrados, enquanto que a proporção de lenho de fim de estação das árvores da Serra da Cabreira se manteve aproximadamente constante ao longo dos quatro níveis de altura, ao contrário das árvores da Serra da Estrela onde a percentagem de lenho de fim de estação foi diminuindo ligeiramente com a altura.

A variação radial dos anéis mostrou um padrão semelhante em todos os casos, com anéis maiores para os primeiros anos de idade cambial, decrescendo gradualmente até uma idade cambial de aproximadamente 20 anos, após o que se dá uma estabilização. O lenho de início de estação acompanha a tendência do anel de crescimento total, enquanto que o lenho de fim de estação se mantém relativamente constante, pelo que a sua proporção no anel aumenta nos anos mais exteriores.

Estabeleceram-se as cronologias para os quatro níveis amostrados, que mostraram um padrão semelhante. Identificaram-se picos de decréscimos de crescimento para os mesmos anos, nomeadamente na Serra da Cabreira nos anos 1981, 1990 e 2001, e na Serra da Estrela nos anos 1986, 1990-1991, 2001, 2009 e 2013.

Em termos gerais verificaram-se muito poucas correlações estatisticamente significativas com os factores climáticos. O efeito climático no crescimento não foi muito forte, nomeadamente o efeito da precipitação pois esta é elevada nos dois locais, não constituindo um factor limitante e determinante para o crescimento.

No entanto, fatores excepcionais de precipitação poderão afectar o crescimento. Por exemplo, nas árvores da Serra da Cabreira estão bem definidos dois anos indicadores negativos, 1981 e 2001, que correspondem a anos de seca e de chuvas intensas, respectivamente. As árvores da Serra da Estrela parecem reagir com menos intensidade aos eventos extremos, apesar de uma maior sensibilidade, sendo possível detectar anos indicadores para 1986, 1991-92, 2009 e 2013, maioritariamente

associados a eventos de seca. É de notar que, em grande parte dos casos, após um ano indicador negativo, segue-se uma recuperação do crescimento.

É possível concluir que a *Pseudotsuga menziesii* é uma espécie bem adaptada a climas temperados húmidos e que, nestas condições, o impacto das alterações climáticas nas árvores apesar de visível, não põe em causa a produtividade das árvores.

6. Bibliografia

APAmbiente (2017) Agencia portuguesa do ambiente. Consultado a 19 jan. 2017. Disponível em <https://www.apambiente.pt>

Bannister, B. & Robinson, W. (1975). Tree-Ring Dating in Archaeology. *World Archaeology* 7(2): 210-225.

Barnett, J. R., & Jeronimidis, G. (2003). *Wood quality and its biological basis*. Oxford: Blackwell. pp. 226.

Becker, M., Nieminen, T. & Gérémia, F. (1994). Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France. The role of climate and atmospheric CO₂. *Annales des sciences forestières, INRA/EDP Sciences*, 51 (5), 477-492.

Bento-Gonçalves, A. (2004). Incêndios florestais no concelho de Vieira do Minho (1963-1981). V Congresso da Geografia Portuguesa - Portugal: Territórios e Protagonistas, In Actas. Guimarães.

Bento-Gonçalves, A., Vieira, A. & Ferreira-Leite, F. (2011). Adaptaclima: Adaptação aos efeitos derivados das alterações climáticas. *A Floresta e as Mudanças Climáticas no Ave*. AMAVE, Guimarães. pp.63. ISBN: 978-989-95470-5-6

Borrego, C., Lopes, L., Ribeiro, I. & Carvalho, A. (2009). *As alterações climáticas: uma realidade transformada em desafio*. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro: 15-40.

Brice, B., Lorion, K., Griffin, D., Macalady, A., Guiterman, C., Speer, J., Benakoun, L., Cutter, A., Hart, M., Murray, M., Nash, S., Shepard, R., Stewart A. & Wang, H. (2013). Signal Strength In Sub-Annual Tree-Ring Chronologies from *Pinus ponderosa* In Northern New Mexico. *Tree-ring research*, 69(2): 81–86. <http://dx.doi.org/10.3959/1536-1098-69.2.81>

Briffa, K. & Jones, P. (1990). Basic chronology statistics and assessment. E.R. Cook, L.A. Kairiukstis (Eds.), *Methods of Dendrochronology*, Kluwer Academic Publishers: 137–152.

Bunn, A., Korpela, M., Biondi, F., Campelo, F., Mérian, P., Qeadan, F. & Zang C. (2016). dplR: Dendrochronology Program Library in R. R package version 1.6.4. pp.15. Disponível em: <http://R-Forge.R-project.org/projects/dplr/>

Buras, A. & Wilmking, M. (2015). Correcting the calculation of Gleichläufigkeit. *Dendrochronologia*, 34: 29-30.

Callado, C., Neto, S., Scarano, S. & Costa, C. (2001). Periodicity of growth rings in some flood-prone trees of the Atlantica Rain Forest in Rio de Janeiro. *Trees*. 15: 492-497.

CAOP, (2016). Carta administrativa. Direção Geral do Território. Consultado em 19 jan. 2017. Disponível em <http://www.dgterritorio.pt/>

Carrer, M. & Urbinati, C. (2004). Age-dependent tree-ring growth responses to climate in *Larix decidua* and *Pinus cembra*. *Ecology*. 85(3): 730-740. <http://dx.doi.org/10.1890/02-0478>

Cherubini, P., Gartner B., Tognetti R., Braker O., Schoch, W. & Innes, J. (2003). Identification, measurement and interpretation of tree rings in woody species from mediterranean climates. *Biological Reviews*. 78: 119-148.

Coba, A. (1991). Carta dos solos do Nordeste de Portugal. Vila Real: UTAD.

Comissão Europeia, (2007). Drought management plan report. Including Agricultural, drought indicators and climate change aspects. Water Scarcity and Droughts Expert Network. Luxembourg. Relatório técnico 2008-023. pp.132.

Cook, E. & Kairiukstis L. (1990). *Methods of dendrochronology: applications in environmental science*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. pp. 393. ISBN: 0-7923-0686-8

Cook, E., Johnson, A. & Blasing, T. (1987). Forest decline: modeling the effect of climate in tree rings. *Tree Physiology* 3: 27-40.

Corona, E. (1986). *Dendrochronologia: principi e applicazioni*. Verona: Istituti Italiano di Dendrochronologia, pp. 103.

Correia, A., Oliveira, A. (2003). Principais espécies florestais com interesse para Portugal. Zonas de influência atlântica. Estudos e Informação. 322: Direção Geral das Florestas. pp. 190. ISBN:972-8097-53-0

Costa, M. (1991). Ficha monográfica *Pseudotsuga*. Floresta e Ambiente. Revista de Divulgação Técnica.14. Julho/Setembro 1991.

Costa, M. (2008). Interações morfo-pedogenéticas nos sedimentos do Grupo Barreiras e nos leques aluviais pleistocênicos no Litoral Norte da Bahia – município de Conde. (Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Geologia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador. pp. 249.

Curt, T., Bouchaud, M., & Agrech, G. (2017). Predicting site index of Douglas-Fir plantations from ecological variables in the Massif Central area of France. *Forest Ecology and Management*. 149: 61-74. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00545-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00545-4)

Daveau, S., Ferreira, A., Ferreira, N. & Vieira, G. (1997). Novas observações sobre a glaciação da Serra da Estrela. *Estudos do Quaternário*, Lisboa, 1: 41-51.

Desch, H. & Dinwoodie, J. (1996). *Timber Structures, Properties, Conversion and Use* (7th ed.) CRC Press, London. pp. 306. ISBN:156022861X

Dickison, W. (2000). Integrative plant anatomy (1st ed.). San Diego: Harcourt/Academic Press. pp. 533. ISBN: 9780122151705

Domec, J. (2002). How do water transport and water storage differ in coniferous earlywood and latewood?. Journal Of Experimental Botany. 53(379): 2369-2379. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erf100>

Encinas, J., Silva, G. & Pinto, J. (2005). Idade e crescimento das árvores. Comunicações técnicas florestais. 7(1): 42. Universidade de Brasília.

Feliksik, E. & Wilczyński, W. (2003). Dendroecological characterization of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* franco) in the Wielkopolska region. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Forestry: 6(1).

Fockedey, F., (2012). Douglas fir, a natural choice for construction. Product range. France Douglas. pp. 28.

Fontes L., Tome, M., Thompson, F., Yeomans, A., Luis, J. & Savill P. (2003). Modelling the Douglas-fir (*Pseudotsuga Menziesii* (Mirb.) Franco) site index from site factors. Portugal Forestry, 76: 491–507. <https://doi.org/10.1093/forestry/76.5.491>

Fontes, L., Tomé, M., Luís, J. & Savill, P. (2005). Modelação da Produtividade da *Pseudotsuga* [*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco] em Função dos Factores de Estação. UTL-Instituto Superior de Agronomia, Lisboa. pp. 7.

Fonti, P., & García-González, I. (2008). Earlywood vessel size of oak as a potential proxy for spring precipitation in mesic sites. Journal of Biogeography. 35: 2249-2257.

Fritts, H. (1963). Computer programs for tree-ring research. Tree-Ring Bulletin 25 (3-4): 2-7.

Fritts, H. (1976). Tree rings and climate (1st ed.). London: Academic Press. pp. 582. ISBN:9780122684500

Fritts, H., Mosimann J. & Bortorff, C. (1969). A revised computer program for standardizing tree-ring series. Tree-Ring Bulletin 29 (1-2): 15-20.

Gadgil, P. (1971). Effect of waterlogging on mycorrhizas of Radiata pine and Douglas fir. Forest Research Institute. New Zealand Forest Service. Rotorua. 2: 222-226

Gonçalves, G. (2007). Dendrocronologia no Alto de S. Bento, em Évora: Curva de calibração para datações no âmbito da arqueologia. Boletim Cultural “A Cidade de Évora”(7) pp.19.

Greenpeace, (2014). Good wood quite. Consultado em 19 jan. 2017. Disponível em <http://www.greenpeace.org.uk/>

Grissino-Mayer. H. (2017). Principles of Dendrochronology. Consultado a 27 mai. 2016. Disponível em <http://web.utk.edu/~grissino/principles.htm>

Guiot, J. (1991). The bootstrapped response function. *Tree Ring Bulletin* 51:39–41.

Hernández-Santana, V., Martínez-Vilalta, J., Martínez-Fernández, J., & Williams, M. (2009). Evaluating the effect of drier and warmer conditions on water use by *Quercus pyrenaica*. *Forest Ecology and Management*, 258, pp. 1719–1730. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.038>

Huber B. (1951). Datierung von Holzproben aufgrund der Jahrringfolge. H. Freund, Handbuch der Mikroskopie VII, S. 172-L92, Frankfurt a.M., Umschau.

Huber B., Giertz-Siebenlist V., (1969). Unsere tausendjährige Eichen-Jahrringchronologie, durchschnittlich 57-(10-50-) fach belegt, Sitz.Ber.Osten. Akad. Wiss. Math.-nat. Kl, Abt. I. 178: 37-42.

IPMA, (2017). Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Consultado a 19 jan. 2017, <https://www.ipma.pt/pt/index.html>

Kovats, R., Valentini, R., Bouwer, L., Georgopoulou, E., Jacob, D., Martin, E., Rounsevell, M., & Soussana, J. (2014). Europe. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Relatório do IPCC. pp. 670. ISBN: 9781107683860

Lauw, A. M. (2011). Estudo de anéis anuais de crescimento de árvores como indicadores climáticos em Portugal. (Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais) UTL-Instituto Superior de Agronomia, Lisboa. pp. 84.

Lavender, D. & Hermann, R., (2014). Douglas-fir: The Genus *Pseudotsuga*. Oregon Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis. pp. 378. ISBN: 978-0-615-97995-3

Leal, S., Eamus, D., Grabner, M., Wimmer, R., & Cherubini, P. (2008). Tree rings of *Pinus nigra* from the Vienna basin region (Austria) show evidence of change in climatic sensitivity in the late 20th century. *Canadian Journal of Forest Research*. 38: 744-759.

Lebourgeois, F., Cousseau, G. & Ducos, Y., (2004). Climate-tree-growth relationships of *Quercus petraea* Mill. stand in the Forest of Bercé (“Futaie des Clos”, Sarthe, France). *Ann. For. Sci.* 61: 361–372.

Leitão, A. (1990). *Gazeta das aldeias*. Revista agrícola mensal. nº 2970 Maio de 1990.

Marques, H., Pinto, G., Pinto, P. & Teixeira, C. (2012). *Regiões de Proveniências - Portugal*. Ed. Autoridade Florestal Nacional. pp. 88.

Martins E. & Silveira P. (2008). As glaciações e a flora da Serra da Estrela. Departamento de Biologia da Universidade de Aveiro. pp. 22.

McGregor, G. & Nieuwolt, S. (1998). Tropical climatology. Nova York: Wiley. pp. 352. ISBN: 978-0-471-96611-1

Meko, D., Touchan, R. & Anchukaitis, K. (2011). Seascorr: A MATLAB program for identifying the seasonal climate signal in an annual tree-ring time series. Computers & Geosciences, (37): 1234-1241. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2011.01.013>

Mendonça, F. (2003). Aquecimento global e saúde: uma perspectiva geográfica – notas introdutórias. Revista Terra Livre, São Paulo 1(20): 205-221.

Mérian, P. & Lebourgeois, F. (2011). Size-mediated climate–growth relationships in temperate forests: A multi-species analysis Forest Ecology and Management 261(8): 1382-1391. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2011.01.019>

Metz, B., Davidson, O., Bosch, P., Dave, R. & Meyer L. (2007). Climate Change 2007. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. ISBN: 978 0521 88009-1

Miranda, P., Coelho, F., Tomé, A., Valente M., Carvalho, A., Pires, C., Pires, H., Pires, V., & Ramalho C. (2002). 20th century Portuguese Climate and Climate Scenarios. Santos, F.D., K. Forbes, and R. Moita (eds). Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts and Adaptation Measures (SIAM Project). 23-83. Gradiva. 454 pp.

Neto, J. & Nery, J. (2005). Variabilidade e mudanças climáticas no Brasil e seus impactos regionais. Quaternário do Brasil. C. R. G. Souza, K. Suguio, A. M. S. P. Oliveira, P. E. Oliveira (eds.). Holos Editora, Ribeirão Preto. 28-51.

Oberhuber, W., Stumböck, M., & Kofler, W. (1998). Climate-tree-growth relationships of scots pine stands (*Pinus sylvestris* L.) exposed to soil dryness. Trees. 13:19-27.

Oliveira, B. (2011). Dendrocronologia de árvores de teca na região de Cárceres, Mato Grosso. (Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências) Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica. pp. 80.

Oliveira, V., Lauw, A., & Pereira, H. (2016). Sensitivity of cork growth to drought events: insights from a 24-year chronology. Climatic Change. 137(1-2): 261-274. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-016-1680-7>

Palma, A., (1996). Influência da idade na forma do perfil do tronco em pinheiro bravo (*Pinus pinaster* Aiton) Dunas do litoral português. (Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Produção Vegetal), UTL - Instituto Superior de Agronomia, Lisboa. pp.115.

Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought. Washington, D.C.: U.S. Department of Commerce Weather Bureau. Research paper 45:65.

Pires, V. (2003). Frequência e intensidade de fenómenos meteorológicos extremos associados a precipitação. (Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia da Terra). UL – Faculdade de Ciências. pp. 98.

Pires, V., Silva, A. & Mendes, L. (2010). Riscos de secas em Portugal Continental. Territorium: Revista Portuguesa de riscos, prevenção e segurança. 17:27-34. ISBN: 0870-8941.

Politis, D. & Romano, J. (1994). The stationary bootstrap. Journal of the American Statistical Association 89:1303–1313. Pulkrab K., Sloup M. & Zeman M. (2014). Economic

Impact of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) production in the Czech Republic. J. For. Sci., 60 (2014): 297-306.

R Core Team, (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna. URL <http://www.R-project.org/>

Restaino, C., Peterson, D., & Littell, J. (2016). Increased water deficit decreases Douglas fir growth throughout western US forests. Proceedings Of The National Academy Of Sciences. 113(34): 9557-9562. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1602384113>

Rodrigues, O., Teixeira, A., Geraldês, A., Aguiar, C., Gonçalves, D., Fonseca, F., Castro, J., Castro, J., Fernandes, L., Cortêz, P. & Figueiredo, T. (2006). Plano regional de ordenamento do território de Trás-os-Montes e Alto Douro. (PROT-TMAD) Síntese de Diagnóstico, Sistema biofísico. Instituto politécnico de Bragança. pp. 288.

Rodrigues, R., Santos, M. & Correia, F. (1993). A seca na perspectiva da investigação hidrológica. Simpósio Catástrofes Naturais, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Rossi, S., Deslauriers, A., Anfodillo, T. & Carrer, M. (2008). Age-dependent xylogenesis in timberline conifers. New Phytol. 177: 199–208.

Santos, F., Forbes, K., & Moita, R. (2001). Mudança climática em Portugal: Cenários, impactes e medidas de adaptação - Projecto SIAM. Sumário executivo e conclusões. Gradiva. pp. 24.

Savva, Y., Schweingruber, F., Milyutin, L., & Vaganov, E. (2002). Genetic and environmental signals in tree rings from different provenances of *Pinus sylvestris* L. planted in the southern taiga, central Siberia. Trees. 16(4), 313-324. <http://dx.doi.org/10.1007/s00468-001-0136-4>

Schröter, D., Cramer, W., Leemans, R., Prentice, I., Araújo, M., Arnell, N., Bondeau, A., Bugmann, H., Carter, T., Gracia, C., Vega-Leinert, A., Erhard, M., Ewert, F., Glendining, M., House, J., Kankaanpää, S., Klein, R., Lavorel, S., Lindner, M., Metzger, M., Meyer, J., Mitchell, T., Reginster, I., Rounsevell, M., Sabaté, S., Sitch, S., Smith, B., Smith, J., Smith, P., Sykes, M.,

Thonicke, K., Thuiller, W., Tuck, G., Zaehle, S. & Zierl, B. (2005) Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science*. 310: 1333–1337.

Schulman, E. (1956). *Dendroclimatic changes in semiarid America*. University of Arizona Press, Tucson, AZ. pp. 142.

Schweingruber, F. (1988). *Tree Rings: basics and applications of dendrochronology*. Dordrecht, Netherland: D. Reidel Publishing Company. pp. 276. ISBN: 9027724458

Schweingruber, F. (1996). *Tree rings and environment dendroecology* (1st ed.). Berne: Paul Haupt. pp. 609. ISBN : 3258054584

Sergent, A., Rozenberg, P. & Bréda, N. (2014). Douglas-fir is vulnerable to exceptional and recurrent drought episodes and recovers less well on less fertile sites. *Annals of Forest Science*, Springer Verlag/EDP Sciences, 71(6): 697-708. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0220-5>

Smith, J., Walters, J., Wellwood, R. (1966). Variation in sapwood thickness of Douglas-fir in relation to tree and section characteristics. *For. Sci.* 1(12): 97–103.

Stokes, M. & Smiley, T. (1968). *An introduction to tree-ring dating*. The University of Chicago Press. Chicago. pp. 71. ISBN:0-8165-1680-4

Strumia, G. (1999). *Tree-ring based reconstruction of precipitation in Eastern Austria*. (Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor). University of Natural Resources and Life Sciences. Viena. pp. 111.

Turney, C., Branch, N., Canti, M. & Clark, P. (2005). *Environmental Archaeology: Theoretical and Practical Approaches*. (1 ed.). London: Hodder Arnold. pp. 232. ISBN: 978-0-340-80871-9

Vieira, G. (2004). *Geomorfologia dos planaltos e altos vales da Serra da Estrela ambientes frios do Plistocénico superior e dinâmica actual*. (Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Geografia Física). UL-Faculdade de Letras. Lisboa. pp. 741.

Weiskittel, A., Crookston, N., & Rehfeldt, G. (2012). Projected future suitable habitat and productivity of Douglas-fir in western North America. *Schweizerische Zeitschrift fur Forstwesen*. 163(3):70-78. <http://dx.doi.org/10.3188/szf.2012.0070>

Wigley, T., Briffa, K. & Jones, P. (1984). On the average value of correlated time series with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate & Applied Meteorology*. 23: 201–213.

Wimmer, R., Strumia, G. & Holawe, F. (2000). Use of false rings in Austrian pine to reconstruct early growing season precipitation. *Canadian Journal Forest Research*. Ottawa. 30: 1691-1697.

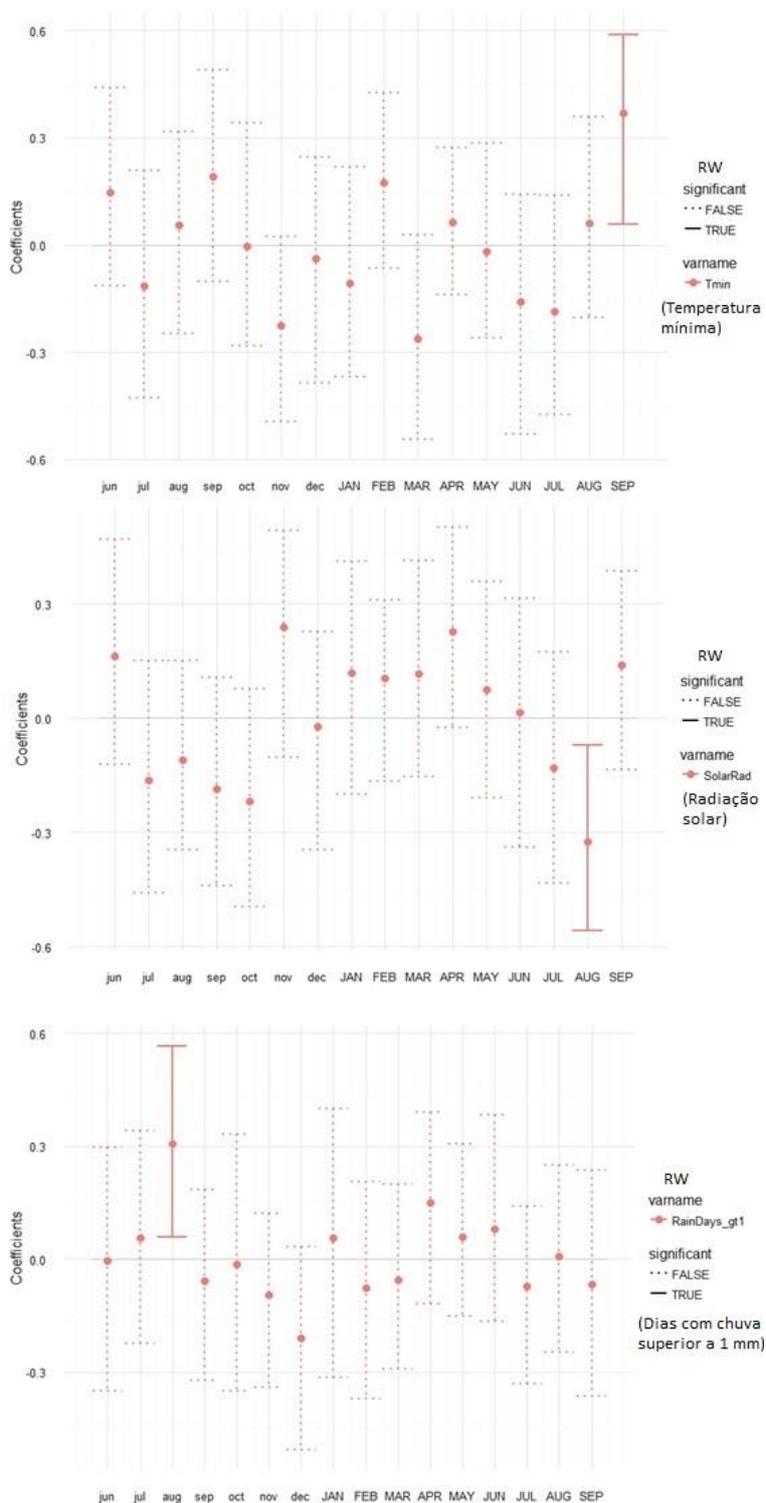
Yang, Z. & Midmore, D. (2005). Modelling plant resource allocation and growth partitioning in response to environmental heterogeneity. *Ecological Modelling*, 181: 59–77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.06.023>

Yu, G., Liu, Y., Wang, X., & Ma, K. (2008). Age-dependent tree-ring growth responses to climate in Qilian juniper (*Sabina przewalskii* Kom.). *Trees*. 22(2): 197-204. <http://dx.doi.org/10.1007/s00468-007-0170-y>

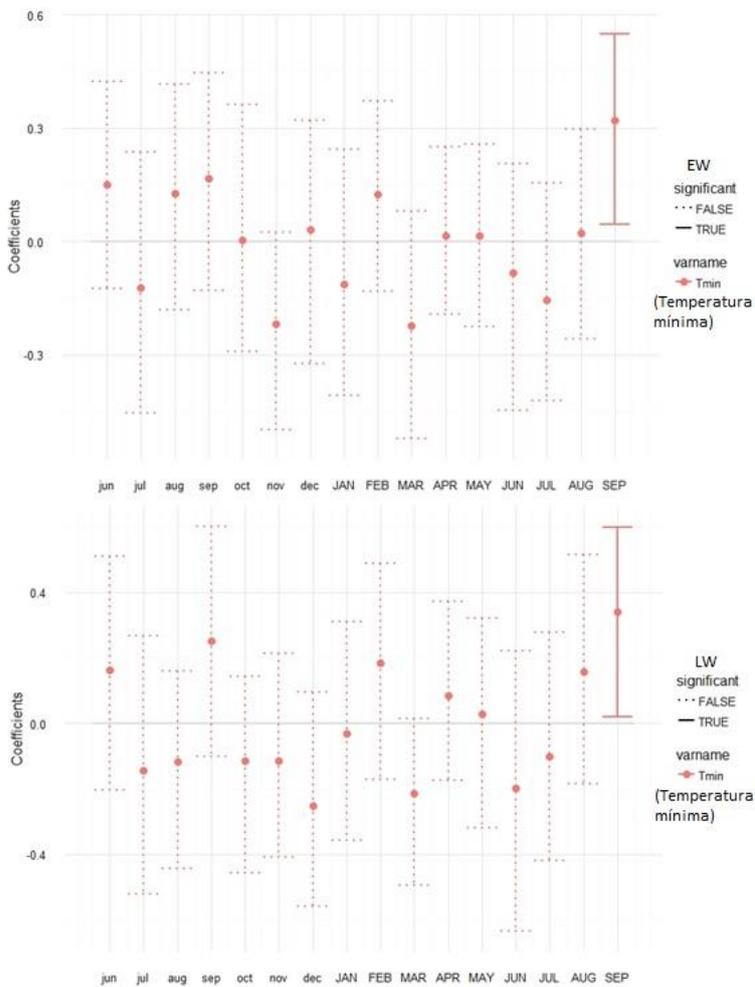
Zang, C. & Biondi, F. (2015). Treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships *Ecography*. 38(4): 431-436. <http://dx.doi.org/10.1111/ecog.01335>.

Anexos

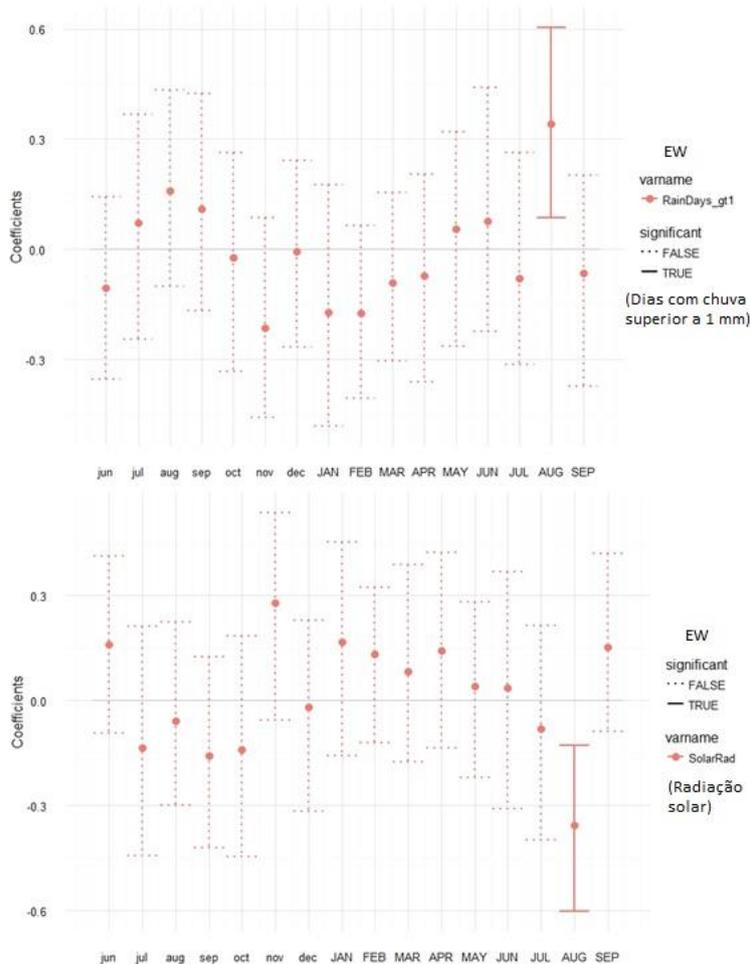
Anexo 1 Coeficientes de correlação entre a temperatura mínima, a radiação solar e número de dias com precipitação superior a 1mm com os anéis de crescimento completos (RW) das árvores da Serra da Cabreira, no segundo nível de altura (5 m).



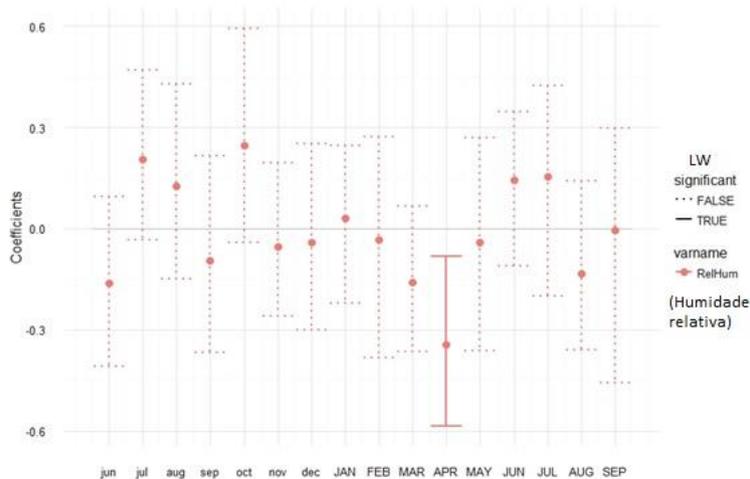
Anexo 2 Coeficientes de correlação entre a temperatura mínima com os lenhos de início (EW) e de fim (LW) de estação das árvores da Serra da Cabreira, no segundo nível de altura (5 m).



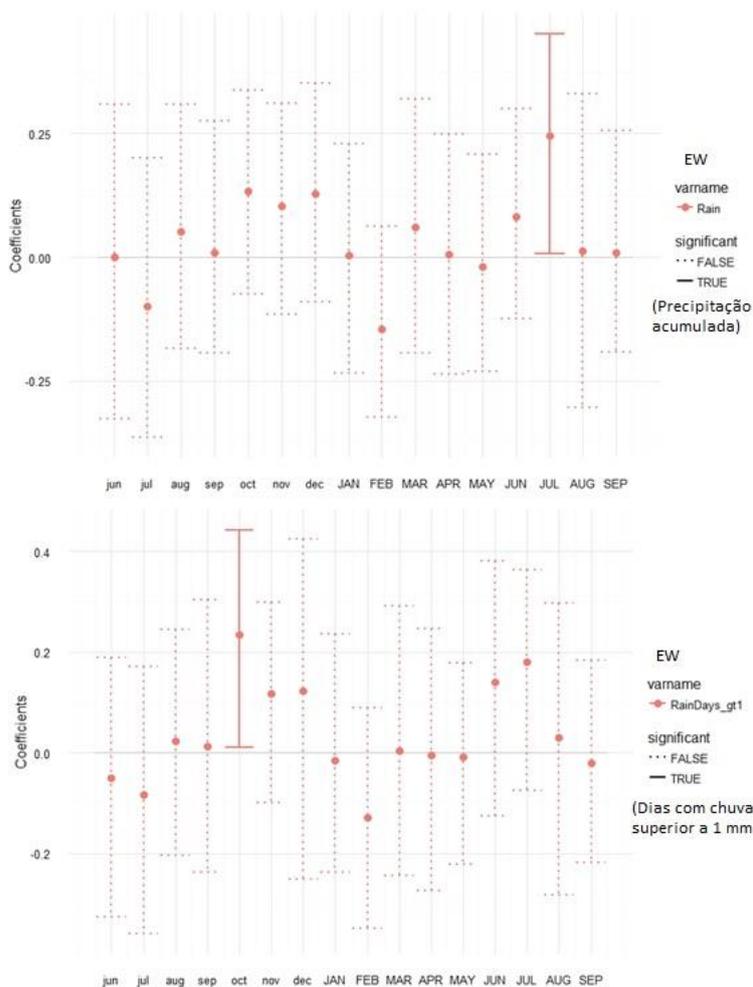
Anexo 3 Coeficientes de correlação entre o número de dias de chuva superior a 1 m e a radiação solar com os lenhos de início de estação das árvores da Serra da Cabreira, no segundo nível de altura (5 m).



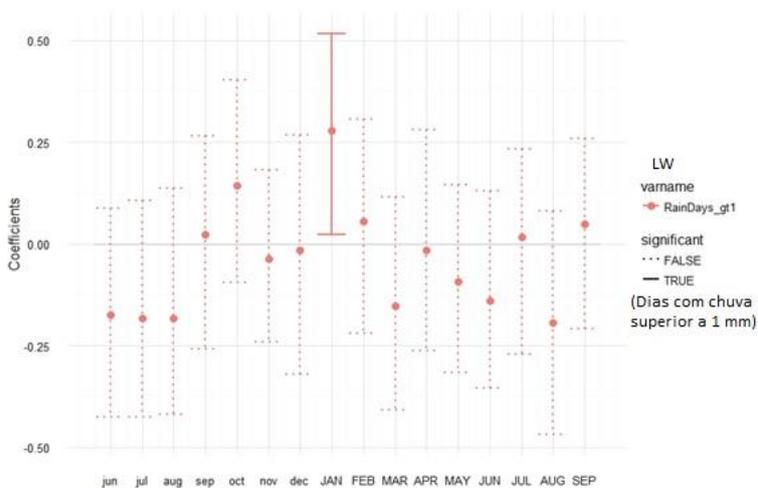
Anexo 4 Coeficientes de correlação entre a humidade relativa e os lenhos de fim de estação das árvores da Serra da Cabreira, no segundo nível de altura (5 m).



Anexo 5 Coeficientes de correlação entre a precipitação e os dias com chuva superior a 1 mm com os lenhos de início de estação das árvores da Serra da Estrela, no segundo nível de altura (5 m).



Anexo 6 Coeficientes de correlação entre os dias com chuva superior a 1 mm e os lenhos de fim de estação das árvores da Serra da Estrela, no segundo nível de altura (5 m).



Anexo 7 Quadro com os anos indicadores (pointer years), por local e nível de altura, e especificações (nº de séries, Percentagem de séries que mostram uma variação do crescimento radial positiva e negativa significativa, pointer year positivo (1) ou negativo (-1), Variações médias e desvio padrão de crescimento radial sobre as séries disponíveis). A cinzento anos indicadores que, por ter menos de 5 séries, não foram utilizados.

Local	Nível de altura	Ano	Nº de Séries	Percentagem de séries que mostram uma variação do crescimento radial		Pointer year positivo (1) ou negativo (-1)	Variações médias de crescimento radial sobre as séries disponíveis	Desvio padrão das variações de crescimento radial em relação à série disponível	
				positiva significativa	negativa significativa				
Serra da Cabreira	Base	1981	8	12,5	75	-1	-17,47	25,48	
		1982	9	77,78	0	1	47,09	37,66	
		1992	10	90	10	1	49,42	38,37	
			1980	4	100	0	1	61,64	48,18
	5 metros	1981	10	10	80	-1	-16,28	23,95	
		1982	10	80	0	1	53,88	34,99	
		1991	10	90	0	1	21,41	18,88	
		2001	10	0	100	-1	-29,77	14,25	
		2002	10	100	0	1	71,73	43,2	
				2001	10	0	90	-1	-28,05
	10 metros	2002	10	100	0	1	51,1	25,43	
				1991	5	80	0	1	36,16
	15 metros	1994	10	80	0	1	17,15	11,68	
		2002	10	90	0	1	31,1	22,01	
		2005	10	0	80	-1	-16,55	9,46	
				1953	1	100	0	1	32,05
	Serra da Estrela	Base	1954	1	100	0	1	42,04	#N/D
			1958	2	100	0	1	40,06	14,56
			1962	2	0	100	-1	-17,46	4,12
1965			3	0	100	-1	-17,86	2,56	
1966			3	100	0	1	35,66	20,44	
1970			7	85,71	0	1	38,71	39,23	
1971			9	77,78	0	1	38,95	52,33	
1986			10	0	100	-1	-38,71	16,25	
1988			10	100	0	1	63,27	50,36	
1990			10	0	90	-1	-32,15	18,34	
1992			10	100	0	1	36,5	12,57	
2002			10	80	0	1	21,81	22,23	
2007			10	90	0	1	38,62	28,47	
2009	10	0	90	-1	-40,17	17,62			
2013	10	0	90	-1	-36,17	16,24			

Impacto das alterações climáticas no crescimento de árvores de *Pseudotsuga menziesii* em dois locais em Portugal

	2014	10	100	0	1	66,35	45,63
5 metros	1966	1	100	0	1	36,6	#N/D
	1977	8	75	0	1	20,11	10,7
	1980	9	88,89	0	1	21,39	8,16
	1986	10	0	90	-1	-29,62	12,86
	1988	10	80	0	1	38,48	35,77
	1990	10	0	80	-1	-24,34	16,32
	1992	10	80	0	1	22,42	11,71
	1993	10	80	0	1	22,65	15,55
	2007	10	80	0	1	27,84	20,29
	2009	10	0	90	-1	-37,72	14,08
	2013	10	0	100	-1	-32,57	8,91
	10 metros	1967	1	100	0	1	23,49
1969		1	0	100	-1	-28,13	#N/D
1970		1	100	0	1	43,09	#N/D
1971		1	0	100	-1	-12,47	#N/D
1972		1	0	100	-1	-18,28	#N/D
1973		2	100	0	1	142,6	153,22
1977		4	75	0	1	15,78	7,67
1982		9	77,78	11,11	1	25,83	20,43
1986		9	0	100	-1	-29,02	9,43
1987		10	80	0	1	26,31	21,08
1988		10	90	0	1	32,1	15,08
1992		10	90	0	1	21,2	6,82
2007		10	80	0	1	25,54	22,05
2009		10	0	100	-1	-40,69	12,48
2010	10	80	0	1	30,07	23,33	
2013	10	0	100	-1	-33,66	8,52	
15 metros	1972	1	100	0	1	183,42	#N/D
	1973	1	100	0	1	63,11	#N/D
	1975	1	0	100	-1	-10,07	#N/D
	1976	1	0	100	-1	-10,93	#N/D
	1980	2	100	0	1	26,42	2,33
	1981	2	0	100	-1	-16,1	6,03
	1986	5	0	100	-1	-26,57	17,74
	1987	5	100	0	1	21,36	9,98
	1988	8	100	0	1	50,61	34,49
	1992	10	90	0	1	17,02	7,56
	2007	10	90	0	1	29,37	21,67
	2009	10	0	100	-1	-40,09	9,62
	2010	10	80	0	1	25,4	23,36
	2011	10	80	0	1	21,43	14,68
2013	10	0	100	-1	-33,4	6,62	