

# **Implementação de um modelo de crescimento para castanheiro no simulador da floresta StandsSIM.md**

**Ana Filipa Lúcio Filipe**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Florestal e dos Recursos Florestais**

Orientadores: Professora Doutora Maria Margarida Branco de Brito Tavares Tomé

Professora Doutora Susana Miguel Barreiro

**Júri:**

Presidente: Doutora Maria da Conceição Brálio de Brito Caldeira, Professora auxiliar,  
Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa

Vogal: Doutora Susana Miguel Barreiro, Professora auxiliar, Instituto Superior de Agronomia  
da Universidade de Lisboa

Vogal: Doutora Maria do Sameiro Ferreira Patrício, Professora adjunta, Escola Agrária de  
Bragança do Instituto Politécnico de Bragança

2019

## *Agradecimentos*

A presente dissertação concretizou-se devido à colaboração de várias pessoas que em momentos decisivos me ajudaram a atingir esta minha meta e da qual presto o meu sincero agradecimento. Em especial, uma palavra de reconhecimento:

À Professora Margarida Tomé, na qualidade de orientadora, pela sua disponibilidade no acompanhamento do trabalho, as suas sugestões metodológicas, a sua simpatia e boa disposição que sempre demonstrou.

À Professora Doutora Susana Barreiro, na qualidade de orientadora, pelo seu apoio no acompanhamento deste trabalho, pelos seus esclarecimentos fundamentais, pela sua paciência, preocupação e simpatia em todas as dúvidas.

À Professora Maria do Sameiro Patrícia do Instituto Politécnico de Bragança, pela sua amabilidade e hospitalidade com que nos recebeu em Bragança, pela sua simpatia e sobretudo, pelos seus conselhos e conhecimentos transmitidos sobre a espécie e a sua gestão. E, claro, pela partilha dos dados sem os quais esta tese não teria sido possível.

Aos meus pais, e também à minha irmã pelo seu encorajamento, por todo o apoio e compreensão que sempre demonstraram e tornaram possível esta meta.

Aos meus colegas e amigos Carlos e Rafael, pelo companheirismo, auxílio e conselhos ao longo destes anos académicos, especialmente nesta reta final.

## Resumo

Este trabalho consiste na implementação de um modelo de crescimento, ao nível da árvore individual, para o castanheiro no simulador da floresta, StandsSIM.md. Com a relevância económica crescente desta espécie em várias regiões de Portugal, e principalmente com a necessidade de criar paisagens mais resilientes, urge a necessidade de desenvolver ferramentas que ajudem à tomada de decisão na gestão florestal de espécies menos presentes na floresta portuguesa, mas que podem vir a ser uma opção interessante. Neste caso, abordámos os povoamentos de castanheiro em regime de alto fuste. Como tal, ao longo do trabalho, analisaram-se as equações de crescimento disponíveis para castanheiro, a estrutura interna do simulador e os seus requisitos. Também se analisaram opções para compatibilização das equações existentes e o ajustamento de equações novas bem como a definição dos modelos de silvicultura a aplicar para que se pudessem realizar algumas simulações teste. Por fim, procedeu-se à integração do modelo, a que se chamou CASTANEA, no simulador e à sua avaliação.

Complementarmente, ajustaram-se equações, a partir de dados provenientes de árvores abatidas: diâmetro sem casca em função da equação do diâmetro com casca, altura mercantil em função da altura total da árvore, volume sem casca em função do volume da árvore, volume do cepo em função do volume da árvore e da altura do cepo e o volume do cepo sem casca em função do volume do cepo.

Como produto, alcançou-se um modelo capaz de simular o crescimento e produção de povoamentos de castanheiro para diferentes alternativas de gestão, permitindo analisar as estimativas ao nível da árvore, ao nível do povoamento e realizar uma análise económica. Com a inclusão do modelo CASTANEA no StandsSIM.md o utilizador beneficia ainda das funcionalidades da plataforma SIMfLOR, nomeadamente a análise gráfica dos resultados.

**Palavras-chave:** StandsSIM.md; Gestão Florestal; Abordagens de gestão florestal; *Castanea sativa*.

## Abstract

This work deals with the implementation of an individual tree growth model, for sweet chestnut in the StandsSIM.md forest simulator. With the increasing economic relevance of this species in several regions in Portugal, and the urgent need to create landscapes that are more resilient, the need to further develop tools to assist decision making in forest management urges. As such, throughout this work, a set of growth and estimation equations for the prediction of variables at tree and stand level available for sweet chestnut was analysed. The internal structure of the simulator and its requirements were also analysed as well as the options for compatibility between the existing equations and the development of new equations. Before the model was integrated into the simulator and its performance could be evaluated a set of forest management approaches to be applied in order to carry out test simulations was defined.

In addition, the following equations were developed using data collected from harvested trees: diameter underbark as a function of diameter overbark, merchantable height as a function of tree total height, underbark tree volume as a function of overbark tree volume, stump volume as a function of the tree volume and stump height and stump volume underbark as a function of stump overbark volume.

As a final product, a model capable of simulating the growth and yield of sweet chestnut under different forest management approaches was made available. Simulation results allow to analyse estimates, at individual tree and stand level, and to perform economic analysis. The inclusion of the CASTANEA model into StandsSIM.md allows the user to benefit from all the functionalities of sIMfLOR platform, namely, the graphical analysis of results.

**Keywords:** StandsSIM.md; Forest Management; Forest management approaches; *Castanea sativa*.

# Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo .....	ii
Abstract.....	iii
Lista de tabelas .....	vi
Lista de figuras .....	vii
1. Introdução.....	1
1.1. O castanheiro ( <i>Castanea sativa</i> Mill.) .....	3
1.2. O simulador da floresta StandsSIM.md.....	5
2. Metodologia .....	6
2.1. Seleção de modelos disponíveis na literatura e delineamento do modelo CASTANEA.....	6
2.2. Ajustamento de modelos não disponíveis na literatura.....	8
2.3. Estrutura do StandsSIM.md .....	10
2.3.1. Equações de crescimento e para estimação de variáveis da árvore e do povoamento em castanheiro selecionadas da bibliografia para integrar o modelo CASTANEA .....	14
2.3.2. Seleção de modelos adicionais necessários ao CASTANEA .....	17
2.3.3. Estrutura do modelo CASTANEA.....	18
2.4. Implementação do modelo CASTANEA no StandsSIM.md.....	18
2.5. Modelos de silvicultura para o castanheiro .....	21
2.6. Verificação e validação.....	27
2.6.1. Seleção das parcelas teste .....	29
2.6.2. Aplicação do StandsSIM.md .....	29
2.6.3. Análise das simulações .....	36
3. Resultados e discussão.....	40
3.1. Equações desenvolvidas para compatibilização com o StandsSIM.md .....	40
3.2. Simulações, verificação e validação .....	44
3.2.1. Simulações .....	44
3.2.2. Verificação e validação dos resultados do simulador .....	46
3.3. Análise económica .....	49
4. Considerações finais .....	53
5. Referências bibliográficas .....	54
ANEXOS.....	57
ANEXO I – Subrotina de funções do modelo CASTANEA .....	58
ANEXO II – FMAs.....	63
ANEXO III – Ficheiros de entrada, <i>inputs</i> .....	67
ANEXO IV – Análise dos resíduos studentizados vs. valores estimados .....	69
ANEXO V– Gráficos de variáveis provenientes do output das simulações .....	74



## Lista de tabelas

Tabela 1: Tabela de preço de comercialização de material lenhoso.....	3
Tabela 2: Esquema do processo de construção e compatibilização do modelo CASTANEA com o StandsSIM.md.....	7
Tabela 3: Caracterização dendrométrica dos dados de ajustamento.....	8
Tabela 4: Resumo das características dos modelos de crescimento que integram o StandsSIM.md.....	13
Tabela 5: Equação de crescimento em altura dominante e equação para estimar o índice de qualidade da estação. ....	14
Tabela 6: Curva hipsométrica geral em regime de alto fuste. ....	14
Tabela 7: Equação de crescimento em diâmetro.....	15
Tabela 8: Equação de volume da árvore com casca e com cepo. ....	15
Tabela 9: Equação de perfil do tronco. ....	16
Tabela 10: Equações de predição de biomassa da árvore por componente.....	16
Tabela 11: Equação de predição da largura da copa. ....	17
Tabela 12: Linha de mortalidade natural. ....	17
Tabela 13: Modelo de silvicultura para uma plantação de castanheiro em regime de alto fuste em povoamento florestal com o 1º desbaste menos forte.....	23
Tabela 14: Modelo de silvicultura para uma plantação de castanheiro em regime de alto fuste em povoamento florestal com o 1º desbaste mais forte.....	25
Tabela 15: Critérios de desbaste em plantações de castanheiro definidos em função da altura dominante. ....	27
Tabela 16: Caracterização das parcelas de teste.....	29
Tabela 17: Representação dos momentos de realização das operações florestais, tendo em conta o índice de qualidade da estação (S) em causa.....	33
Tabela 18: Representação dos momentos de realização dos desbastes, tendo em conta o S da estação em causa. ....	34
Tabela 19: Modelo redução de densidade do povoamento aplicável para estações de produtividade inferior a 20 m. ....	34
Tabela 20: Representação das categorias de aproveitamento definidas para o castanheiro. ....	36
Tabela 21: Curva hipsométrica geral em regime de alto fuste utilizada nas tabelas de produção. ....	38
Tabela 22: Equação de predição do diâmetro quadrático médio. ....	39
Tabela 23: Sumário das equações desenvolvidas para o modelo CASTANEA. ....	40
Tabela 24: Resumo das medidas de capacidade preditiva que foram calculadas com os resíduos PRESS. ....	44

Tabela 25: Resumo da análise económica realizado para as parcelas teste. ....	51
---	----

## Lista de figuras

Figura 1: Distribuição das áreas totais por espécie/grupo de espécies.Fonte: ICNF, 2013....	1
Figura 2: Distribuição geográfica do castanheiro. Fonte: Capelo e Catry, 2007.....	4
Figura 3: Estrutura do StandsSIM.md. Fonte: adaptado de Barreiro e Tomé (2018). ....	5
Figura 4: Caracterização dos dados usados nos ajustamentos das equações de volume: a) Distribuição de diâmetros e b) Relação entre o volume com casca e o diâmetro da árvore com casca. Fonte: Patrício (2006).....	9
Figura 5: Esquema simplificado da estrutura do programa principal do simulador StandsSIM.md.....	13
Figura 6: Estrutura do modelo CASTANEA. ....	18
Figura 7: Esquema da relação entre as sub-rotinas e módulos que permitem a fácil integração de novos modelos de crescimento. ....	19
Figura 8: Esquema simplificado da estrutura do modelo de crescimento da árvore individual (Model_tree_AllSpecies.f90) integrado no simulador StandsSIM.md.....	20
Figura 9: Representação das alturas ao longo do fuste das podas de formação e das desramações. Fonte: Nunes et al. (2010).....	23
Figura 10: Curvas de classe de qualidade para o castanheiro em regime de alto fuste. Fonte: Patrício (2006).....	26
Figura 11: Estrutura do StandsSIM.md. Fonte: adaptado de Barreiro e Tomé (2018).....	30
Figura 12: Tabela de produção, exemplificativa de referência, para a parcela N26. Fonte: adaptado de Patrício (2006). ....	37
Figura 13: Tabela de produção, exemplificativa de referência, para a parcela NC23. Fonte: adaptado de Patrício (2006). ....	37
Figura 14: Tabela de produção, exemplificativa de referência, para a parcela RE20. Fonte: adaptado de Patrício (2006). ....	38
Figura 15: Relação entre variáveis medidas nas árvores abatidas de castanheiro disponíveis para o ajustamento: a) diâmetros com e sem casca e b) volumes com e sem casca. ....	41
Figura 16: Relação entre variáveis medidas nas árvores abatidas de castanheiro disponíveis para o ajustamento da altura mercantil.....	41
Figura 17: Dados das parcelas de castanheiro para ajustamento de equação de volume do cepo com casca, em m3 (Patrício, 2006).....	42
Figura 18: Dados das parcelas de castanheiro para o ajustamento da equação de volume do cepo sem casca, em m3. Fonte: Patrício (2006).....	42



Figura 19: Gráficos dos resíduos studentizados versus valores estimados e em papel de probabilidades normal para o diâmetro sem casca a qualquer altura $h_i$ e depois da ponderação e da aplicação do método de Huber (PH).....	43
Figura 20: Resultados das simulações obtidas com o StandsSIM.md para a parcela NC23: a) Altura dominante, b) volume total, c) área basal, d) Número de árvores por hectare, e) Volume por categorias de aproveitamento e f) Biomassa do povoamento por componentes. ....	45
Figura 21: Cálculos para a árvore 18 da parcela RE20. ....	46
Figura 22: Análise dos resultados das simulações para o volume do povoamento principal e os resultados das tabelas de produção de Patrício (2006). ....	47
Figura 23: Análise dos resultados das simulações para o diâmetro quadrático médio dos povoamentos pelo StandsSIM e os resultados das tabelas de produção de Patrício (2006). ....	48
Figura 24: Análise dos resultados das simulações para a altura média dos povoamentos pelo StandsSIM e os resultados das tabelas de produção de Patrício (2006). ....	49
Figura 25: Análise dos resultados das simulações para a altura dominante dos povoamentos pelo StandsSIM e os resultados das tabelas de produção de Patrício (2006). ....	50
Figura AIII 1: Representação do ficheiro de configuração da simulação.....	67
Figura AIII 2: Representação do ficheiro de dados das árvores.....	67
Figura AIII 3: Representação do ficheiro com os dados do povoamento. ....	68
Figura A III 4: Representação de um exemplo de ficheiro FMA definido para o eucalipto, mostrando a gestão em plantação, seguida de talhadia, para um horizonte de planeamento de 20 anos. ....	68
Figura AIV 1: Gráficos dos resíduos studentizados vs. valores estimados e em papel de probabilidades normal para o diâmetro sem casca a qualquer altura $h_i$ e depois da ponderação e da aplicação do método de Huber (PH).....	69
Figura AIV 2: Gráficos dos resíduos studentizados vs. valores estimados e em papel de probabilidades normal para o volume da árvore sem casca e depois da ponderação efetuada por aplicação do método de Huber (PH). ....	70
Figura AIV 3: Gráficos dos resíduos studentizados vs. valores estimados e em papel de probabilidades normal para o volume do cepo com casca e depois da ponderação efetuada por aplicação do método de Huber (PH). ....	71
Figura AIV 4: Gráficos dos resíduos studentizados vs. valores estimados e em papel de probabilidades normal para o volume do cepo sem casca e depois da ponderação efetuada por aplicação do método de Huber (PH). ....	72
Figura AIV 5: Gráficos dos resíduos studentizados vs. valores estimados e em papel de probabilidades normal para a altura mercantil da árvore depois da ponderação por aplicação do método de Huber (PH). ....	73

Figura AV 1: Gráficos com algumas das variáveis das simulações realizadas para o RE20.74  
 Figura AV 2: Gráficos com algumas das variáveis das simulações realizadas para o NC23B.  
 .....75  
 Figura AV 3: Gráficos com algumas das variáveis das simulações realizadas para o N26...76

## Abreviaturas e símbolos

Símbolo/Sigla	Descrição	Unidade
cw	Largura da copa da árvore	m
d	Diâmetro à altura do peito	cm
dg	Diâmetro quadrático médio	cm
d <sub>i</sub>	Diâmetro a uma altura i	cm
dui	Diâmetro sem casca a uma qualquer altura i	cm
G	Área basal por hectare	m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>
g	Área seccional individual a 1.30 m de altura	cm <sup>2</sup>
h	Altura da árvore	m
hdom	Altura dominante	m
hdom <sub>1</sub>	Altura dominante na idade t <sub>1</sub>	m
hm	Altura mercantil da árvore	m
hst	Altura do cepo	m
idm	Acréscimo médio anual em diâmetro	cm ano <sup>-1</sup>
invG	Inverso de G	m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>
invN	Inverso de N	
mapr	Média absoluta dos resíduos de predição	
mpr	Média dos resíduos de predição	
N	Número de árvores por hectare	árv ha <sup>-1</sup>
n	Número de observações	
N <sub>2</sub>	Número de árvores por hectare após desbaste	árv ha <sup>-1</sup>
P95; P5	Percentís, 95% e 5%, respetivamente	
R <sup>2</sup>	Coeficiente de determinação	
R <sup>2</sup> p	R <sup>2</sup> de predição	
Rd	Razão entre d e ddom	
Rdm	Razão entre d e dg	
Rs	Índice relativo de espaçamento	%
S	Índice de qualidade da estação	m
t	Idade	anos
t <sub>2</sub>	Idade no momento 2	anos
v	Volume da árvore com casca	m <sup>3</sup>

V	Volume do povoamento	$\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$
vst	Volume do cepo da árvore	$\text{m}^3$
vu	Volume da árvore sem casca	$\text{m}^3$
vust	Volume do cepo da árvore sem casca	$\text{m}^3$
W <sub>casc</sub>	Biomassa da casca	$\text{kg ha}^{-1}$
W <sub>ftot</sub>	Biomassa das folhas e flores	$\text{kg ha}^{-1}$
W <sub>lenho</sub>	Biomassa do lenho	$\text{kg ha}^{-1}$
W <sub>Rviv</sub>	Biomassa dos ramos vivos	$\text{kg ha}^{-1}$
W <sub>tot</sub>	Biomassa aérea da árvore	$\text{kg ha}^{-1}$

## 1. Introdução

A floresta portuguesa é composta, na sua maioria por 5 espécies – pinheiro bravo, eucalipto, sobreiro, azinheira e pinheiro manso – as quais correspondem a 89 % da área florestal do país (ICNF, 2013). Contudo, as espécies que constituem os restantes 11 % são de extrema importância para a diversificação e compartimentação da paisagem. Algumas delas têm muita relevância económica a nível regional como é o caso do castanheiro no Norte interior (1% da área florestal do país) e a alfarrobeira na região do Algarve (Figura 1).

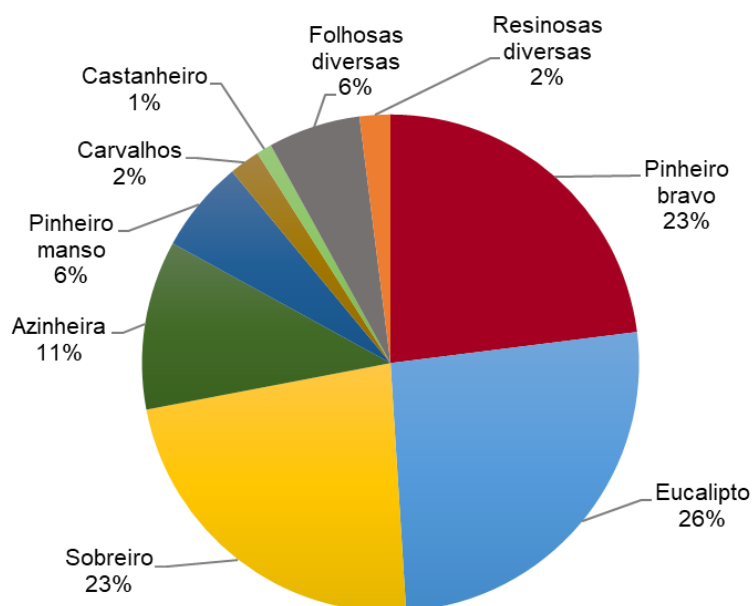


Figura 1: Distribuição das áreas totais por espécie/grupo de espécies. Fonte: ICNF, 2013.

A gestão florestal permite melhorar a rentabilidade dos recursos florestais sendo de extrema importância ambiental, social e económica. Uma gestão florestal sustentável permite produzir ecossistemas saudáveis e mais resilientes a perturbações. Contudo, conseguir uma gestão florestal sustentável não é tarefa fácil. Os simuladores da floresta, permitindo prever a evolução da floresta face a diferentes cenários de gestão florestal (assim como ambientais e sócio-económicos), são ferramentas essenciais para alcançar a pretendida sustentabilidade da gestão.

O desenvolvimento de ferramentas de apoio à gestão florestal pelo grupo FORCHANGE, nomeadamente os simuladores da floresta, tem incidido principalmente em espécies mais representativas em termos de área, sendo necessário que nos debrucemos agora sobre as espécies menos abundantes. Estas podem vir a ter muita relevância no futuro, quer do ponto

de vista económico quer em termos de silvicultura preventiva contra os diversos riscos (fogo, pragas, tempestades, seca, entre outros) que ameaçam atualmente a floresta.

Segundo os dados preliminares do 6º Inventário Florestal Nacional (ICNF, 2013), a área de castanheiro (*Castanea sativa* Mill.) aumentou de 38 334 ha para 41 410 ha, no período de 2005 a 2010, mostrando uma evolução crescente entre 1995-2005 de 21.2 % e continuamente entre 2005-2010 de 7.4 % na área total. Relativamente, à área arborizada (povoamentos) temos uma presença crescente para o período de 1995-2005 de 32.7 % e para o período seguinte de 8.8 %.

Esta espécie, segundo os respetivos Planos Regionais de Ordenamento Florestal de 2006, destaca-se nas regiões: nordeste transmontano, com 10 % (13 806.90 ha) de representatividade e uma maior incidência nos concelhos de Bragança e Vinhais (DGRFa, 2006); Barroso Padrela, com 14 % (2 028 ha) dos espaços florestais de Valpaços (DGRFb, 2006); Baixo Minho, com uma área pequena de 292 ha na região (DGRFc, 2006); Beira Interior Norte, com 2 % (2 935 ha) de representatividade na região (DGRFd, 2006); Centro Litoral, com 273 ha na região (DGRFe, 2006); Douro, com 4 079 ha na região (DGRFf, 2006). A produção de castanha associada a esta espécie, contribui fortemente para um maior desenvolvimento económico destas regiões, verificando-se uma maior concentração nos concelhos de Vinhais, Bragança, Vila Pouca de Aguiar, Valpaços e Trancoso.

Relativamente à produção de madeira, em termos de rendimento económico, como se observa na Tabela 1, a maior receita por m<sup>3</sup> provém das classes de maiores diâmetros. Comparativamente com as outras espécies tradicionalmente exploradas para madeira, o castanheiro, apresenta preços por m<sup>3</sup> mais elevados. A espécie, na idade de corte, poderá efetivamente ter um rendimento em termos de volume menor quando comparada com outras espécies, mas compensatório por um maior retorno por m<sup>3</sup>. Quando inserida numa gestão florestal bem planeada, o gestor poderá ainda acrescer ao valor de retorno no momento do corte final, o rendimento da venda da madeira proveniente dos desbastes, visto que, apresenta para as classes de diâmetro inferiores, preços mais elevados por m<sup>3</sup> do que o de outras espécies (Tabela 1).

Segundo Monteiro e Patrício (2007), embora o período de produção seja longo a sua exploração é considerada rentável desde que o povoamento possua qualidade, isto é, árvores com troncos direitos e cilíndricos, sem defeitos e com dimensão adequada para os usos mais bem pagos pela indústria.

Tabela 1: Tabela de preço de comercialização de material lenhoso.

<b>Espécie</b>	<b>Classes de diâmetro (por m<sup>3</sup>)</b>	<b>Preço m<sup>-3</sup> (sem IVA)</b>
<b>Castanheiro (<i>Castanea sativa</i>)</b>	10	30.80 €
	15	61.40 €
	20;25	92.10 €
	≥ 30	127.70 €
<b>Pinheiros (<i>Pinus spp.</i>) e Eucaliptos (<i>Eucalyptus spp.</i>)</b>	Até 30 m <sup>3</sup> :	
	10;15	15.40 €
	20;25	20.60 €
	≥ 30	25.70 €
	Mais de 30 m <sup>3</sup> até 300 m <sup>3</sup> :	
	10;15	15.40 €
	20;25	20.60 €
	30	25.70 €
	> 30	30.80 €

Fonte: ICNF, 2018

As etapas para a implementação do modelo de crescimento no simulador da floresta, StandsSIM.md, foram as seguintes:

- Pesquisa bibliográfica sobre as equações de crescimento para o castanheiro em Portugal e na Europa;
- Análise detalhada do simulador, da sua estrutura, dos *inputs* e *outputs*;
- Nova pesquisa bibliográfica para colmatar as lacunas detetadas para a correta implementação do modelo do castanheiro no simulador;
- Desenvolvimento de equações de compatibilização entre as equações/modelos existentes e as variáveis de *output* do simulador;
- Integração do modelo no simulador;
- Avaliação do modelo: preparação dos *inputs*, simulação e análise dos resultados.

### 1.1. O castanheiro (*Castanea sativa* Mill.)

O castanheiro é uma árvore com duplo potencial de exploração podendo ser gerida como um sistema agroflorestal, visando a produção de fruto (soutos ou pomares) ou tendo como objetivo a produção exclusiva de madeira (castinçais) (Monteiro e Patrício, 2007). Este trabalho vai focar-se nos castinçais onde, desde a fase de instalação, todas as operações são

direcionadas para o objetivo final – produção de madeira de qualidade, ou mesmo de excelência – em regime de alto fuste.

Segundo Alves et al. (2018), o regime de alto fuste ocorre quando a perpetuação dos povoamentos se faz, direta ou indiretamente, por via seminal, isto é, por sementeira direta ou através de plantação (com prévia sementeira em viveiro).

De acordo com o modelo de gestão adaptado de Bourgeois (1992) por Monteiro e Patrício (1997), o período de revolução dos castanheiros geridos em regime de alto fuste é de 45 a 50 anos. A escolha do local apropriado às necessidades ecológicas da planta, tendo em conta o solo, o clima e a exposição, é essencial para que a rentabilidade do investimento não seja inviabilizada. Segundo Monteiro e Patrício (2007) a estação deverá ser, preferivelmente, em solos profundos, frescos, permeáveis, pouco pesados e bem equilibrados, resultantes da decomposição de xisto ou granito, moderadamente férteis. O pH é um dos fatores mais importantes da estação devendo ser ligeiramente ácido. Os solos pesados, compactos, pouco arejados, sem oxigénio, devem ser evitados. Apesar de ser sensível à geada, o castanheiro

pode ser encontrado até 1 100 m de altitude.

A distribuição geográfica (Figura 2) desta espécie corresponde ao habitat dos carvalhais caducifólios (mais raramente sobreirais) de carvalho-negral (*Quercus pyrenaica* Wild.) menos continentais e ao habitat de carvalho-alvarinho (*Quercus robur* L.). Assim, as zonas onde se verificam áreas mais extensas de castanheiro são nas serras do Centro, como nas serras da Lousã, Açor, e Estrela e nos núcleos mais chuvosos da Beira Baixa e Alta e ainda no Minho e áreas de média altitude em Trás-os-Montes (Capelo e Catry, 2007).

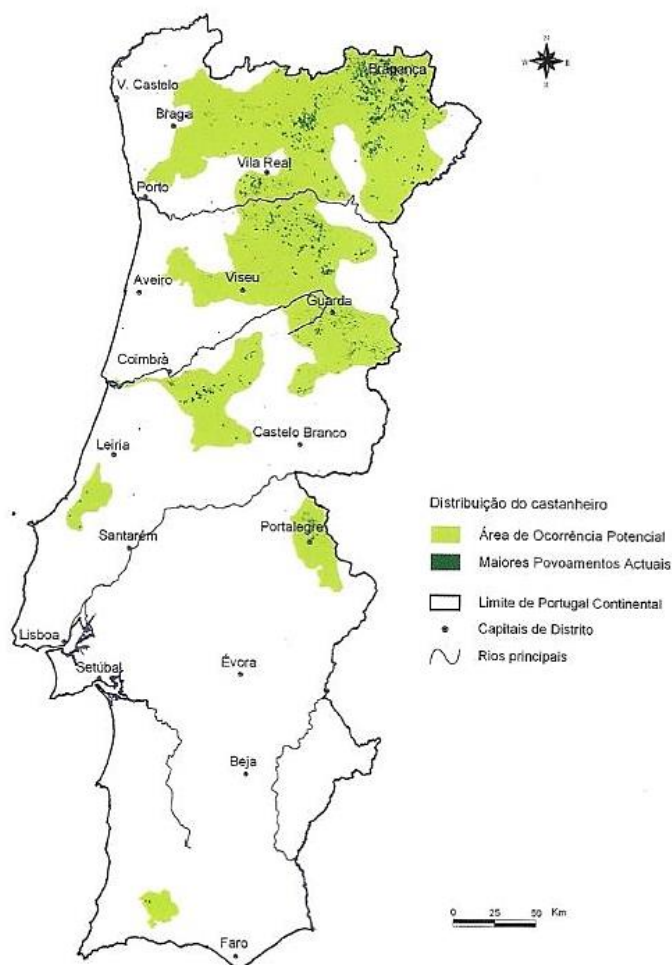


Figura 2: Distribuição geográfica do castanheiro. Fonte: Capelo e Catry, 2007.

## 1.2. O simulador da floresta StandsSIM.md

A plataforma sIMfLOR (Faías et al., 2012) é uma plataforma, disponível na [web](http://www.isa.ulisboa.pt/cef/forchange/fctools/pt/PlataformasIMfLOR)<sup>1</sup>, que integra um conjunto de simuladores e ferramentas para a floresta portuguesa. A plataforma tem como objetivo tornar os resultados da investigação científica facilmente acessíveis para os utilizadores. É nesta plataforma que se encontra o simulador StandsSIM.md. Movido pela gestão florestal – management driven – o StandsSIM.md pretende estender-se às principais espécies de produção portuguesas. Este simulador tira partido das funcionalidades da plataforma sIMfLOR (em particular dos geradores de alternativas de gestão e de dados económicos), engloba diferentes tipos de modelos de crescimento e possui uma interface que permite prever, até à data, o crescimento de povoamentos de eucalipto, pinheiro-bravo e pinheiro manso.

A presente versão do StandsSIM.md (Figura 3) integra modelos de crescimento que cobrem cerca de 55 % da área de floresta em Portugal: eucalipto (26 %), pinheiro-bravo (23 %) e pinheiro-manso (6 %) (ICNF, 2013). O objetivo desta tese é alargar a cobertura desta ferramenta a uma nova espécie, o castanheiro.

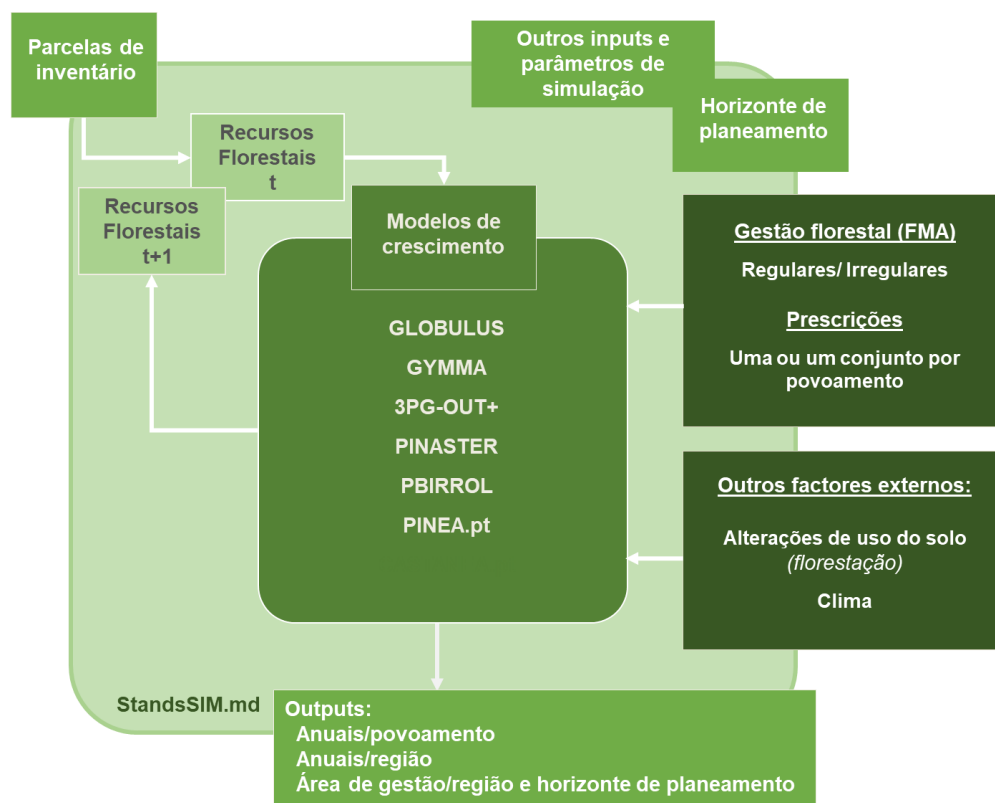


Figura 3: Estrutura do StandsSIM.md. Fonte: adaptado de Barreiro e Tomé (2018).

<sup>1</sup> <http://www.isa.ulisboa.pt/cef/forchange/fctools/pt/PlataformasIMfLOR>



## 2. Metodologia

### 2.1. Seleção de modelos disponíveis na literatura e delineamento do modelo CASTANEA

Para a implementação de um modelo de crescimento para castanheiro no StandsSIM.md, foi realizada uma revisão bibliográfica que procurou encontrar as equações necessárias à constituição do mesmo. O modelo de crescimento para o castanheiro de Patrício (2006), foi considerado como essencial para esta implementação. Este modelo foi desenvolvido com dados provenientes dos concelhos de Bragança e Vila Flor, onde se localizavam povoamentos jovens, das serras de Bornes (Concelho de Macedo de Cavaleiros), Padrela (Concelho de Vila Pouca de Aguiar) e Marão (Concelho de Amarante), onde se localizam povoamentos adultos.

A Tabela 2 apresenta em forma de esquema as equações/modelos que foram encontradas na pesquisa bibliográfica realizada dos passos necessários à construção de um modelo de crescimento para castanheiro compatível com o simulador e sua integração no mesmo. Na coluna à esquerda encontram-se listadas as variáveis que se conseguem obter com as equações de Patrício (2006), enquanto que à direita apresentam-se algumas das variáveis de *output* do StandsSIM.md. Por sua vez, na coluna do meio, descrevem-se as variáveis para as quais foi necessária alguma compatibilização, tanto através de equações desenvolvidas, no âmbito desta tese, para compatibilização entre as equações existentes e as componentes do simulador como equações adicionais que foram integradas no simulador pela sua relevância para o estudo (ver ponto 2.3.2). O modelo de crescimento resultante da combinação das equações de Patrício (2006) com o conjunto de equações de compatibilização para algumas variáveis (ver Tabela 2) designou-se por CASTANEA.

Tabela 2: Esquema do processo de construção e compatibilização do modelo CASTANEA com o StandsSIM.md.

Variáveis obtidas com as equações apresentadas em Patrício (2006)	Variáveis necessárias para a compatibilização das equações de Patrício (2006) com o StandsSIM.md	Variáveis de <i>output</i> do StandsSIM.md
Índice de qualidade da estação		Índice de qualidade da estação
Altura dominante		Altura dominante
Diâmetro com casca		Diâmetro com casca
Altura da árvore		Altura da árvore
Volume do povoamento		Volume do povoamento
Diâmetro quadrático médio		Diâmetro quadrático médio
Volume da árvore com casca		Volume da árvore com casca
	Volume da árvore sem casca*	Volume da árvore sem casca
	Volume do cepo sem casca*	Volume do cepo sem casca
	Volume do cepo com casca*	Volume do cepo com casca
	Altura mercantil*	
	Diâmetro sem casca*	
		Volume da casca
Volume percentual com casca em função da altura de despona di		Volume com casca desde o topo do cepo até uma altura $h_i$
Volume percentual sem casca em função da altura de despona di		Volume sem casca desde o topo do cepo até uma altura $h_i$
		Volume da árvore sem casca e sem cepo
		Volume da árvore com casca e sem cepo
	Largura da copa**	
	Função de auto-desbaste	
Biomassa de folhas		Biomassa de folhas
Biomassa de ramos		Biomassa de ramos
Biomassa de casca		Biomassa de casca
Biomassa de lenho		Biomassa de lenho

\* Equações desenvolvidas para compatibilização com o StandsSIM.md no âmbito da tese

\*\* Equações desenvolvidas por outros autores

## 2.2. Ajustamento de modelos não disponíveis na literatura

Para tornar a implementação do modelo CASTANEA possível foi necessário desenvolver algumas equações de predição de volume de modo a que as variáveis resultantes das simulações fossem compatíveis com a estrutura dos *outputs* produzidos para as outras espécies. Assim sendo, desenvolveram-se equações de diâmetro sem casca ( $du$ , m), volume da árvore sem casca ( $vu$ ,  $m^3$ ), volume do cepo com casca ( $vst$ ,  $m^3$ ), volume do cepo sem casca ( $vust$ ,  $m^3$ ) e altura mercantil ( $hm$ , m).

Na Tabela 3, encontra-se uma descrição do conjunto de dados utilizado, proveniente de árvores abatidas para análise de tronco efetuada nos povoamentos de Bornes (Concelho de Macedo de Cavaleiros), Marão (Concelho de Amarante) e Vila Pouca de Aguiar.

Tabela 3: Caracterização dendrométrica dos dados de ajustamento.

	d (cm)	dui (cm)	h (m)	v ( $m^3$ )	vu ( $m^3$ )	vst ( $m^3$ )	vust ( $m^3$ )
<b>Média</b>	34.815	33.067	22.283	1.199	1.074	0.017	0.015
<b>Erro-padrão</b>	2.179	2.112	0.722	0.145	0.132	0.003	0.003
<b>Desvio-padrão</b>	13.608	13.187	4.509	0.907	0.825	0.019	0.017
<b>Variância da amostra</b>	185.167	173.901	20.330	0.823	0.681	0.000	0.000
<b>Mínimo</b>	10.250	9.500	11.550	0.051	0.044	0.001	0.001
<b>Máximo</b>	64.200	61.250	30.400	3.381	3.060	0.089	0.081
<b>Dimensão da amostra</b>	380 <sup>2</sup>	39					

Fonte: Patrício (2006).

As 39 árvores da amostra, têm idades de: 35 e 45 (Bornes), 55 e 63 (Marão), 15, 45, 49, 55, 59 e 65 (Vila Pouca de Aguiar).

A distribuição apresentada na Figura 4, demonstra uma certa heterogeneidade na distribuição dos dados pelas classes de diâmetros, mas cobrindo uma gama razoável de valores de diâmetro. Os ajustamentos de equações, estarão influenciados pela falta de dados de diâmetros abaixo dos 10.25 cm, sendo de esperar uma menor precisão aquando do cálculo de volumes para árvores jovens.

---

<sup>2</sup> Trata-se do mesmo número de árvores (39) mas, neste caso, diâmetros a diferentes alturas da árvore que perfaz uma amostra de 380 diâmetros.

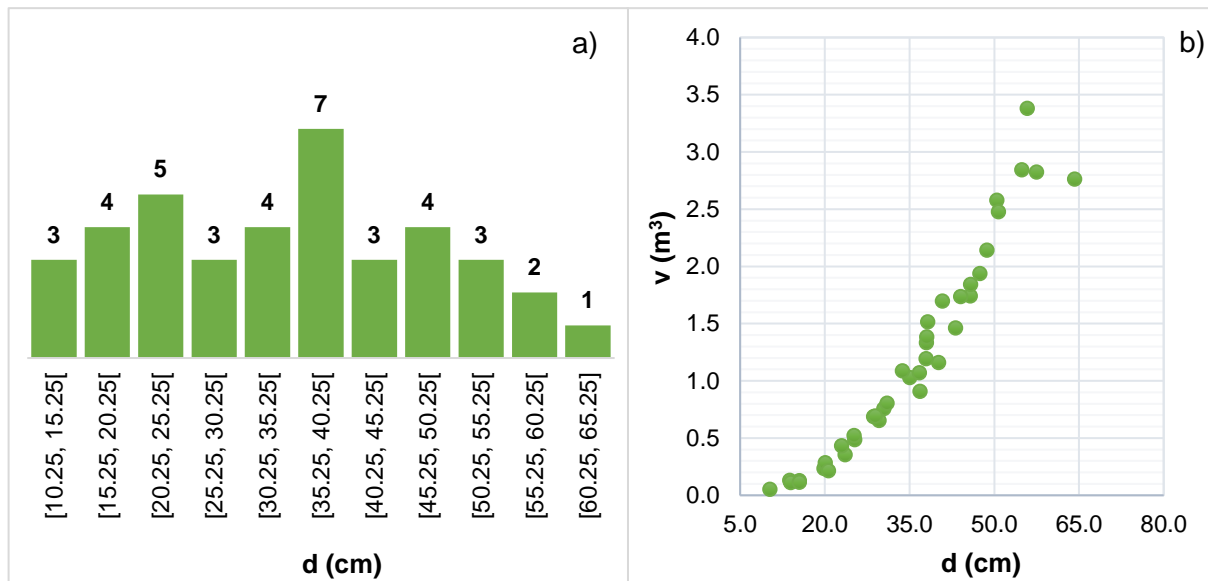


Figura 4: Caracterização dos dados usados nos ajustamentos das equações de volume: a) Distribuição de diâmetros e b) Relação entre o volume com casca e o diâmetro da árvore com casca. Fonte: Patrício (2006).

As equações foram desenvolvidas, com o *software* SAS 9.4 (SAS Institute, Cary NC), a partir do ajustamento de uma relação entre dados da variável pretendida e dados de outras variáveis disponíveis no conjunto de dados. Durante o processo de ajustamento, utilizaram-se os gráficos dos resíduos studentizados para avaliar a homogeneidade da variância dos erros. Para contornar possíveis problemas de heterogeneidade, aplicou-se uma ponderação dos resíduos utilizando a metodologia proposta por Parresol (1999). Por sua vez, para detetar possíveis violações da normalidade da distribuição dos resíduos analisaram-se os gráficos QQ-plot e aplicou-se o método de Huber (1973) para dar menos peso aos pontos correspondentes às “caudas” da distribuição dos resíduos que apresentavam algum desvio em relação à distribuição normal.

Por fim, não tendo acesso a um conjunto de dados independente para avaliar a capacidade preditiva dos modelos desenvolvidos recorreu-se a algumas estatísticas baseadas nos resíduos *PRESS* calculados através do SAS: a média dos resíduos de *PRESS* (*mpr*, Equação 1) que permite avaliar o enviesamento dos modelos; a média do valor absoluto dos resíduos de *PRESS* (*mapr*, Equação 2) que indica a precisão dos modelos, o percentil 95 % (*P95*) e o percentil 5 % (*P5*). Os percentis dão ideia dos valores extremos que podem ocorrer; a percentagem de variação explicada por um modelo (*R*<sup>2</sup><sub>p</sub>, Equação 3), em que valores perto de 1 evidenciam elevada eficiência de modelação.

$$mpr = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i^*)}{n}$$

Equação 1

$$mapr = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i^*|}{n} \quad \text{Equação 2}$$

$$R^2p = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Equação 3}$$

Onde  $\hat{y}_i^*$  é o valor predito calculado com o modelo ajustado com a observação  $i$  apagada do conjunto de dados de ajustamento;  $y_i$  é o valor observado e  $\bar{y}$  é a média dos valores observados.

### 2.3. Estrutura do StandsSIM.md

O StandsSIM.md (Barreiro et al., 2016), está organizado em vários módulos. O **módulo** principal é o de **crescimento**, e o **módulo de gestão** desempenha também um papel muito importante. O primeiro é responsável por simular o crescimento das espécies florestais enquanto que o segundo garante que esta simulação tenha em conta o(s) cenário(s) de gestão florestal que o utilizador queira considerar. O simulador inclui ainda o módulo de configuração, o módulo de leitura de *inputs*, o módulo de inicialização, o módulo de estimação e cálculo e o módulo de escrita de *outputs*. Os ficheiros de entrada requerem informação necessária à caracterização da floresta e à caracterização da abordagem ou abordagens de gestão florestal/modelo de silvicultura (FMAs) definidas pelo utilizador e respetivas sequências de gestão durante o período de simulação (prescrições). Por sua vez, o **módulo de output**, cria o conjunto de ficheiros de saída contendo os resultados das simulações. Os ficheiros de *input* e de *output* são ficheiros (.csv). O **módulo de configuração**, fornece a localização dos diferentes ficheiros de entrada necessários bem como de alguns parâmetros de simulação (como por exemplo, o horizonte de planeamento, i.e., o número de anos de simulação).

A estrutura modular do StandsSIM.md torna a programação mais simples uma vez que o código se encontra dividido em unidades lógicas com funcionalidades separadas. Estas permitem a alteração ou desenvolvimento de novas sub-unidades (módulos) separadamente e facilitam nomeadamente a integração de um novo modelo de crescimento no simulador.

Uma vez selecionado o modelo e estudadas as suas equações, e após o desenvolvimento das equações responsáveis por assegurar a compatibilização do modelo CASTANEA com o simulador, estas foram implementadas no StandsSIM.md em linguagem FORTRAN, nos respetivos módulos.

O **módulo de inicialização**, encarrega-se de completar os dados de inventário ou estimar dados de um novo povoamento, utilizando os dados de entrada para inicializar as variáveis principais. Quando se simula o crescimento de um novo povoamento, há que inicializar os dados de  $d$  e  $h$  de todas as árvores. Por exemplo, para o pinheiro bravo, quando o povoamento

atinge uma altura dominante de 5 m, este módulo aplica uma distribuição de diâmetros atribuindo, com recurso a simulação, um diâmetro a cada árvore de forma a reproduzir a distribuição de diâmetros pretendida.

O **módulo de crescimento**, utiliza as funções de crescimento que possibilitam estimar os valores das variáveis principais – do povoamento ou da árvore - ao longo de um período. O módulo de crescimento do CASTANEA inclui as curvas de classe de qualidade; a predição da mortalidade das árvores (com base na predição da probabilidade de uma árvore morrer combinada com a linha de autodesbaste); a projeção do crescimento em diâmetro.

O **módulo de estimação e cálculo**, estima o valor das variáveis a partir dos valores de outras variáveis, principais ou derivadas para o mesmo instante no tempo. Este módulo permite estimar a altura da árvore, a altura mercantil, o diâmetro sem casca, os volumes da árvore (incluindo os volumes obtidos com as novas equações ajustadas), a biomassa total e a biomassa por componentes, a largura da copa. Com base nestes valores, faz o cálculo de todas as variáveis do povoamento.

Em termos de programação, o simulador possui uma estrutura modular sendo constituído por um conjunto de módulos e sub-rotinas, algumas delas integradas em módulos de forma a organizar e compartimentar o código e que se interligam entre si, quer através do comando de utilização de módulos (comando *USE*) quer através do comando de chamada de sub-rotinas (comando *CALL*) ou pela utilização de funções.

Em programação as variáveis correspondem a unidades de armazenamento de informação que podem ser manipuladas no código. Há diferentes tipos de variáveis (ex. numéricas, alfanuméricas, texto) e todas as variáveis de entrada e saída devem ser declaradas e inicializadas. A declaração das variáveis consiste na atribuição do tipo, dimensão e formato da variável e no StandsSIM.md é feita em módulos de declaração organizados por temática havendo módulos específicos para declarar as variáveis por tema para facilitar a sua localização e respetiva utilização nas sub-rotinas e módulos (ex. modulo de declaração de variáveis: de gestão - *dec\_forest\_management.f90*, de povoamento - *dec\_standvar.f90*, da árvore - *dec\_treevar.f90*, socioeconómicas - *dec\_socioeconomic\_var.f90*).

A inicialização das variáveis pode ser feita no momento da declaração, ao longo do programa, em sub-rotinas de inicialização de variáveis (ex. *sub\_ini\_standvar.f90*, onde as variáveis do povoamento são recolocadas iguais a zero no início de um novo ano) ou através da leitura de um ficheiro. No StandsSIM.md a leitura dos ficheiros de *input* está principalmente localizada na sub-rotina denominada *sub\_readinputs.f90*. Esta sub-rotina permite a leitura do ficheiro de *input* que caracteriza a simulação (*ini\_standsSIM.csv* onde se indicam quais os ficheiros de *input* e a suas respetivas localizações para cada simulação) bem como a leitura dos ficheiros

que caracterizam o clima, as categorias de aproveitamento e respetivo preço da madeira, os custos das operações e consumíveis, os modelos de silvicultura (FMAs) e as prescrições. Esta sub-rotina é a primeira a ser chamada no programa principal (comando *CALL*). O passo seguinte consiste em chamar a sub-rotina *sub\_OpenOutputs.f90*, onde se abrem e definem as estruturas dos ficheiros de *output* que são gerados em cada simulação (Figura 5). A leitura dos ficheiros de *input* com a caracterização das árvores e dos povoamentos é feita diretamente no programa principal e requer que seja atribuída a cada espécie florestal um código pelo qual a espécie passará a ser reconhecida dentro do programa (*sub\_DecodeSpecies.f90*). O processo de inicialização de variáveis só fica completo após serem chamadas as sub-rotinas *sub\_reinicia.f90* e *sub\_iniciclo.f90* às quais cabem as funções de reinicializar os valores de algumas variáveis no início de uma nova prescrição e no início de cada novo ciclo, respetivamente. A sub-rotina *sub\_indicators.f90* é responsável por contabilizar os custos das operações listadas no ficheiro que descreve o modelo de silvicultura (FMA) tendo em conta os custos considerados no ficheiro de dados económicos e os custos dos produtos consumidos no processo de realização dessas operações.

O módulo principal do simulador é o módulo de crescimento e integra um conjunto de modelos de crescimento que variam consoante a espécie e a estrutura do povoamento. Os modelos da árvore individual foram integrados num modelo único que se designou por *Model\_tree\_AllSpecies.f90* e o modelo CASTANEA passou a ser um deles (Tabela 4).

## StandsSIM.md.f90

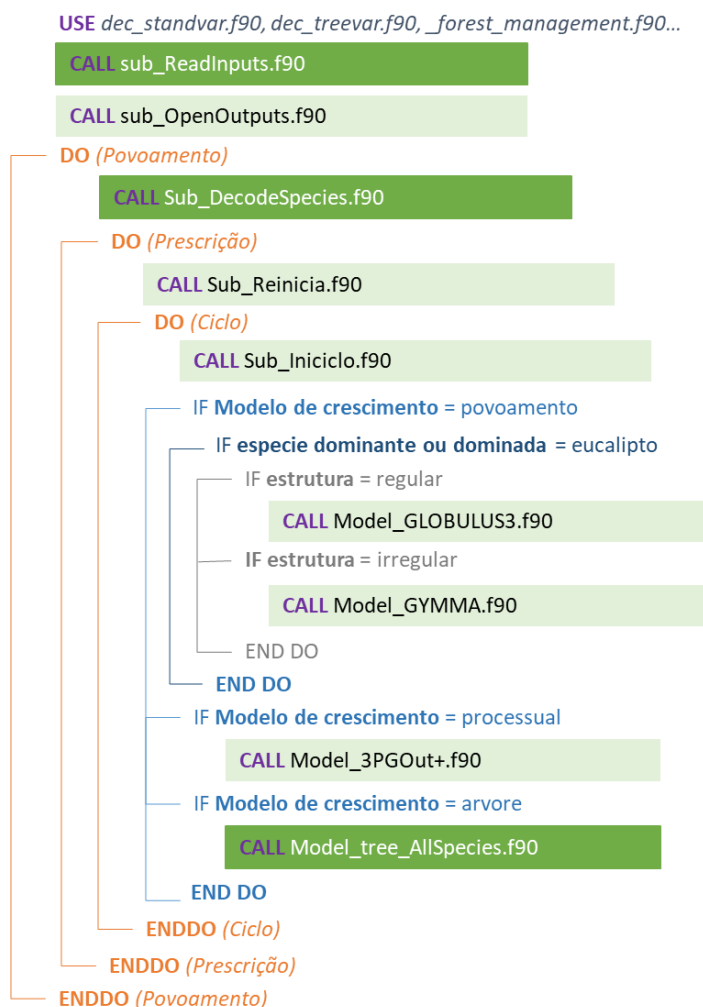


Figura 5: Esquema simplificado da estrutura do programa principal do simulador StandsSIM.md.

Tabela 4: Resumo das características dos modelos de crescimento que integram o StandsSIM.md.

Povoamento			Modelos de crescimento e produção			
<u>Composição</u> (Puro)	<u>Estrutura</u>	<u>Regime</u>	<u>Nome do modelo</u>	<u>Nome do módulo</u>	<u>Tipo</u>	<u>Crescimento</u>
Eucalipto	Regular	Alto fuste e talhadia	Glob3PG	3PGOut+	Processual (híbrido)	Povoamento
			3PG		Processual	Povoamento
	Irregular		Globulus3.0	Globulus 3.0	Empírico	Povoamento
	Irregular		GYMMA	GYMMA	Empírico	Povoamento
Castanheiro	Regular	Alto fuste	CASTANEA	Model_tree_AllSpecies	Empírico	Árvore
Pinheiro bravo	Regular		PINASTER		Empírico	Árvore
	Irregular		PBIROL		Empírico	Árvore
Pinheiro manso	Regular				PINEA.pt	



2.3.1. Equações de crescimento e para estimação de variáveis da árvore e do povoamento em castanheiro selecionadas da bibliografia para integrar o modelo CASTANEA

Segundo Patrício (2006) no caso da **modelação da altura dominante e índice de qualidade da estação** o índice de qualidade de estação, este foi estabelecido à idade padrão de 45 anos. O modelo de crescimento em altura dominante (Tabela 5) apresenta um erro maior para intervalos superiores a 30 anos. No que respeita às estimativas de altura dominante, o desvio médio mais elevado observado foi de 1.2 m para um intervalo de projeção de 57 anos e um mínimo de  $\pm 0.002$  m para idades compreendidas entre os 3 e os 15 anos. No índice de qualidade da estação obtém-se um desvio máximo de 1.2 m para um intervalo de projeção de 60 anos, para intervalos mais curtos os valores são bastante inferiores.

Tabela 5: Equação de crescimento em altura dominante e equação para estimar o índice de qualidade da estação.

$(1) S = \frac{A}{1 - \left(1 - \frac{A}{hdom}\right) \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^n}$			$(2) hdom_2 = \frac{A}{1 - \left(1 - \frac{A}{hdom_1}\right) \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^n}$		
Modelo		A	n		
(1) e (2)		34.85593	1.61604		

onde  $S$  é o índice de qualidade da estação (m, à idade padrão de 45 anos  $S_{45}$ ),  $hdom_2$  corresponde à altura dominante (m) na idade  $t_2$  (anos);  $hdom_1$ , à altura dominante na idade  $t_1$  (anos);  $t_1$  e  $t_2$  representam idade nos momentos 1 e 2 no tempo.

Fonte: Patrício (2006)

Em Patrício (2006) apresentam-se 3 **curvas hipsométricas** possíveis para a estimação da altura total. Destas selecionámos, para implementar no simulador, a que necessita do cálculo do diâmetro dominante (Tabela 6) uma vez que em estimações de volume das árvores e dos respetivos povoamentos a autora recomenda esta por implicar uma menor propagação de erros. As três equações sugeridas pela autora sofrem uma ligeira diminuição de precisão com o aumento da idade, justificada pelos dados usados no seu ajustamento.

Tabela 6: Curva hipsométrica geral em regime de alto fuste.

$(1) h = hdom \left(1 + \beta_0 hdom \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{ddom}\right)\right)^{-1}$		
Modelo		$\beta_0$
(1)		0.5167

onde  $h$ , altura da árvore (m);  $d$ , diâmetro à altura do peito (cm);  $hdom$ , altura dominante (m);  $ddom$ , diâmetro dominante (cm)

Fonte: Patrício (2006)

O modelo de **crescimento em diâmetro da árvore individual** é do tipo função potencial x função modificadora (Tabela 7) e produz valores estimados bastante precisos, exceto para árvores mais velhas (acima de 55 anos) onde se perde um pouco essa precisão (Patrício, 2006).

Tabela 7: Equação de crescimento em diâmetro.

$$(1) \quad d_{t_2} = d_{t_1} \left\{ A^{\frac{1 - \frac{\ln(1 - e^{-k(t_2 - t_0)})}{\ln(1 - e^{-k(t_1 - t_0)})}}{\frac{\ln(1 - e^{-k(t_2 - t_0)})}{\ln(1 - e^{-k(t_1 - t_0)})}}} ddom_{t_1} - ddom_{t_1} \right\} \times \frac{1}{(1 + e\beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 idm + \beta_3 Rd + \beta_4 invG + \beta_5 hdom + \beta_6 N/1000)}$$

$$A = a_0 \times S; \quad k = k_0 S; \quad t_0 = \alpha_0 + \alpha_1/S$$

Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$\beta_6$
(1)	3.9954	-0.3451	5.7114	-4.2316	0.0054	0.1266	0.7170
	$a_0$	$k_0$	$\alpha_0$	$\alpha_1$			
	3.0325	-	-	-			
	-	$0.9140 \times 10^{-3}$	-	-			
	-	-	- 5.4956	199.7000			

onde  $d_{t_1}$ , diâmetro à altura do peito no momento  $t_1$  (cm);  $d_{t_2}$ , diâmetro à altura do peito no momento  $t_2$  (cm);  $t_2$  idade da árvore no instante 2 (anos). As variáveis de instante 1,  $t_1$  (anos);  $d_{dom_{t_1}}$ , diâmetro dominante (cm);  $t_0$ , tempo que uma árvore leva a atingir a altura de 1.30 m (anos);  $idm$ , acréscimo médio anual em diâmetro (cm ano<sup>-1</sup>);  $Rd$ , razão entre d e ddom (cm);  $N$ , número de árvores por hectare (árv ha<sup>-1</sup>);  $S$ , índice de qualidade da estação, ou seja, altura do povoamento em metros para uma idade padrão de 45 anos ( $S_{45}$ );  $hdom$ , altura dominante;  $invG$ , inverso da área basal do povoamento (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>)

Fonte: Patrício (2006)

No caso da equação do volume total da árvore, embora Patrício (2006) apresente várias alternativas, foi escolhida a que, segundo a autora, permite minimizar a acumulação de possíveis erros (Tabela 8).

Tabela 8: Equação de volume da árvore com casca e com cepo.

$$(1) \quad v = \beta_0 (d^2 h)^{\beta_1}$$

Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$
(1)	0.000052	0.95710

onde  $v$ , volume da árvore com casca (m<sup>3</sup>);  $d$ , diâmetro à altura do peito (m);  $h$ , altura da árvore (m).

Fonte: Patrício (2006)

**A equação de perfil do tronco com casca** (Tabela 9), produz estimativas precisas sendo geralmente utilizada para estimar diâmetros (alturas superiores à altura do peito), contudo quando utilizada para estimar diâmetros ao nível do cepo, podem obter-se erros médios por excesso de 7.4 cm, com valores extremos elevadíssimos, chegando a resultados de diâmetro da base de 88 cm (Patrício, 2006). A sua utilização no StandsSIM.md não é, contudo, problemática visto que só é utilizada para alturas superiores a 1.30 m (cálculo dos diâmetros de topo dos toros).

Tabela 9: Equação de perfil do tronco.

$$(1) \quad di = \left[ \left( \frac{v}{kh} \right) (2z + \beta_1 (3z^2 - 2z) - \beta_2 (z - u_1)^2 I_1 + \beta_3 (z - u_2)^2 I_2) \right]^{0.5}$$

$$I_1 = 1, z \geq 0.5236 \quad z = \frac{(h - hi)}{h}$$

$$I_1 = 0, z < 0.5236 \quad k = \frac{\pi}{4 (100)^2}$$

$$I_2 = 1, z \geq 0.9387 \quad v = a_1 (d^2 h)^{a_2}$$

$$I_2 = 0, z < 0.9387$$

Modelo	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$u_1$	$u_2$	$a_1$	$a_2$
(1)	1.0140	2.0587	407.6000	0.5236	0.9387	-	-
						0.000052	0.95710

onde **di**, diâmetro sobre a casca a uma altura **hi** (cm); **hi**, altura de despona (m); **h**, altura total da árvore (m); **v**, volume total da árvore com casca (m<sup>3</sup>).

Fonte: Patrício (2006)

A Tabela 10 apresenta as equações de biomassa total aérea da árvore e para as seguintes componentes: biomassa das folhas e flores ( $w_{Ftot}$ ), biomassa dos ramos vivos ( $w_{Rviv}$ ), biomassa da casca ( $w_{Casc}$ ), biomassa do tronco principal sob a casca ( $w_{Lenho}$ ).

Tabela 10: Equações de predição de biomassa da árvore por componente.

$$w_i = \beta_1 d^{\beta_2} h^{\beta_3}$$

$$w_a = w_{Ftot} + w_{Rviv} + w_{Casc} + w_{Lenho}$$

Modelo	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
$w_{Ftot}$	0.000333	2	1
$w_{Rviv}$	0.00440	2	1
$w_{Casc}$	0.06574	1.84096	0
$w_{Lenho}$	0.02044	1.76603	1.16402

onde i corresponde aos diferentes componentes: **Ftot**, folhas e flores, **Rviv**, ramos vivos, **Casc**, casca e **Lenho** tronco principal sob a casca; **w<sub>i</sub>**, biomassa do componente (kg); **w<sub>a</sub>**, biomassa aérea da árvore (kg); **d**, o diâmetro com casca à altura do peito (cm); **h**, a altura da árvore total (m).

Fonte: Patrício (2006).

### 2.3.2. Seleção de modelos adicionais necessários ao CASTANEA

Para a integração do modelo no simulador foi necessário ainda a seleção de uma equação que permitisse estimar a largura da copa, tendo sido encontrada uma equação na literatura (Condés e Sterba, 2005) que pode ver-se na Tabela 11.

A implementação do modelo beneficiou ainda de inclusão da linha de mortalidade natural (auto-desbaste) obtida a partir da relação entre o logaritmo do número de árvores por hectare e o logaritmo do diâmetro médio, que em povoamentos “bem lotados” é geralmente linear (Reineke, 1933). Patrício (2006) verificou que em povoamentos de castanheiro em auto-desbaste esta reta tem um declive próximo de -2.17687 (Tabela 12). Nos modelos de silvicultura utilizados, baseados na bibliografia encontrada, assume-se que, se até à altura dominante de 9 m ocorrer um pequeno decréscimo do número de árvores por hectare, este é atribuído à mortalidade natural.

Tabela 11: Equação de predição da largura da copa.

(1) $\ln cw = f_0 + f_1 \ln d + f_2 \ln h + f_3 h$				
Modelo	$f_0$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
(1)	-0.497	0.812	-0.0199	-0.237

onde  $cw$ , largura de copa (cm);  $d$ , diâmetro da árvore (cm);  $h$ , altura total da árvore (m).

Fonte: Condés e Sterba (2005).

Tabela 12: Linha de mortalidade natural.

(1) $\ln (N) = \beta_0 + \beta_1 \ln (dg)$		
Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$
(1)	14.07526	-2.17687

onde  $N$ , número de árvores por hectare ( $ha^{-1}$ );  $dg$ , diâmetro quadrático médio (cm).

Fonte: Patrício (2006).

### 2.3.3. Estrutura do modelo CASTANEA

No caso do modelo CASTANEA, as variáveis principais, ou seja, aquelas que fazem parte do módulo de crescimento, são o diâmetro à altura do peito e a altura dominante. As variáveis derivadas são, ao nível da árvore: a altura total da árvore, os volumes da árvore, a largura da copa e a biomassa da árvore (total e por componente); e ao nível do povoamento: a área basal por hectare, o número de árvores por hectare, os volumes por hectare, as biomassas por hectare, o diâmetro quadrático médio e o diâmetro dominante (para só mencionar as mais importantes). A Figura 6 ilustra a estrutura do modelo.

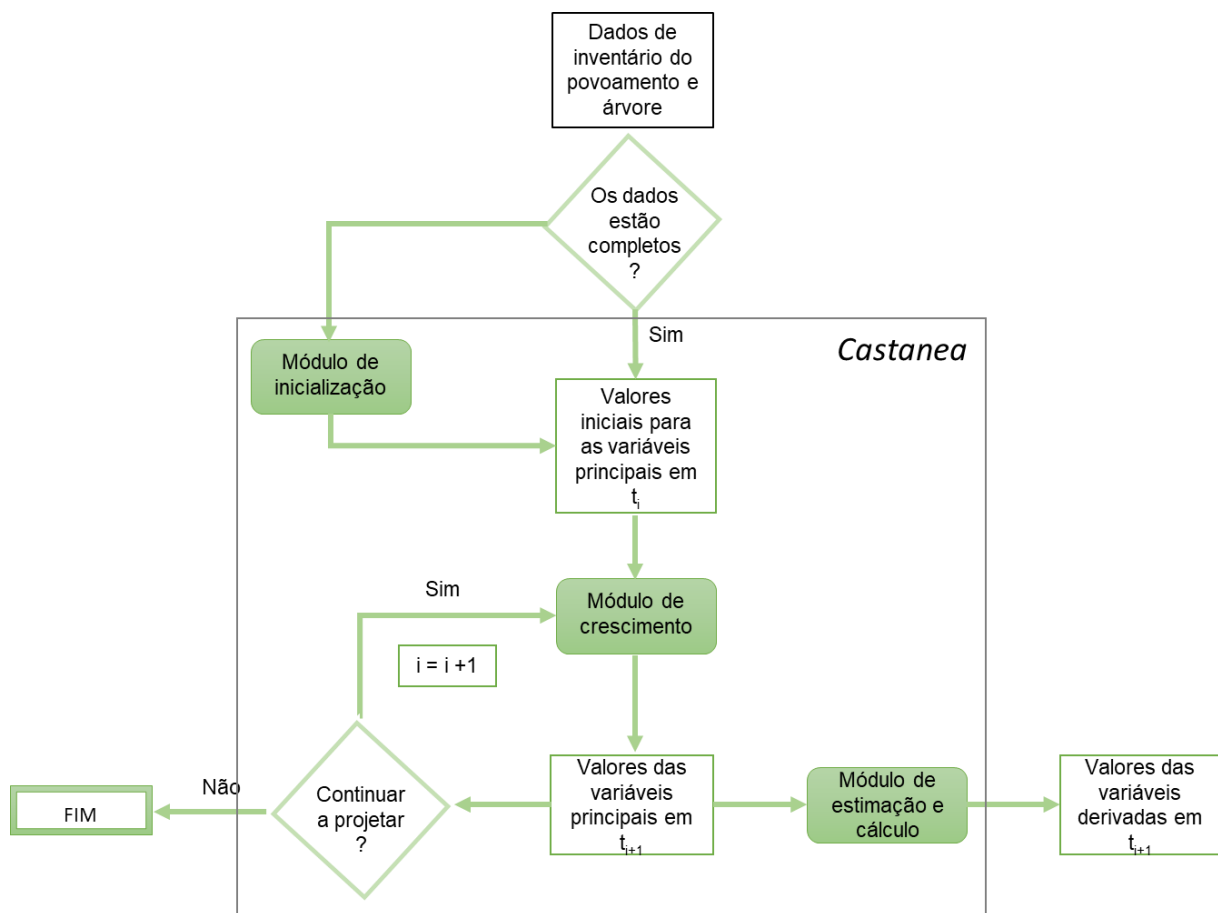


Figura 6: Estrutura do modelo CASTANEA.

### 2.4. Implementação do modelo CASTANEA no StandsSIM.md

Para integrar o modelo CASTANEA no simulador foi necessário criar algumas sub-rotinas novas, assim como atualizar e complementar algumas sub-rotinas existentes. Dada a estrutura modular do programa a integração de um novo modelo de crescimento encontra-se facilitada requerendo apenas intervir num número reduzido de sub-rotinas e módulos. As sub-rotinas e módulos intervencionados encontram-se assinalados a verde mais escuro na Figura 7 e na Figura 8.

Assim, à semelhança do que tinha sido feito para as outras espécies, a implementação do modelo começou pela fase de escrita das equações em linguagem FORTRAN90, a linguagem do programa do simulador. A sub-rotina *fun\_castanea.f90* (ANEXO I – Subrotina de funções do modelo CASTANEA) é constituída pelas equações de crescimento e estimação das variáveis da árvore e do povoamento para a espécie castanheiro. A fase seguinte consistiu na sua integração no módulo, já existente, *fun\_AllSpecies.f90*. Este módulo representa o modelo da árvore para todas as espécies uma vez que integra as funções de crescimento e predição definidas nas sub-rotinas de cada espécie em funções únicas (Figura 7). Para além do módulo *fun\_AllSpecies.f90* foi modificada uma sub-rotina específica para o cálculo dos volumes das árvores *sub\_calc\_varv.f90* e uma outra para o cálculo das variáveis do povoamento, *sub\_calc\_pov.f90*.

Uma vez que o simulador é movido pela gestão florestal, integra ainda uma sub-rotina responsável por aplicar o desbaste (*sub-thinning.f90*) que por sua vez chama uma sub-rotina auxiliar que permite selecionar as árvores a sair em cada desbaste (*sub\_thin\_trees.f90*) e algumas sub-rotinas que ordenam as árvores segundo diferentes critérios para auxiliar a seleção das árvores a desbastar (*sub\_sort\_d.f90*, *sub-sort\_d.i.f90* e *sub\_sort\_idarv.f90*). A integração do modelo CASTANEA no simulador não exigiu quaisquer alterações nestas sub-rotinas.

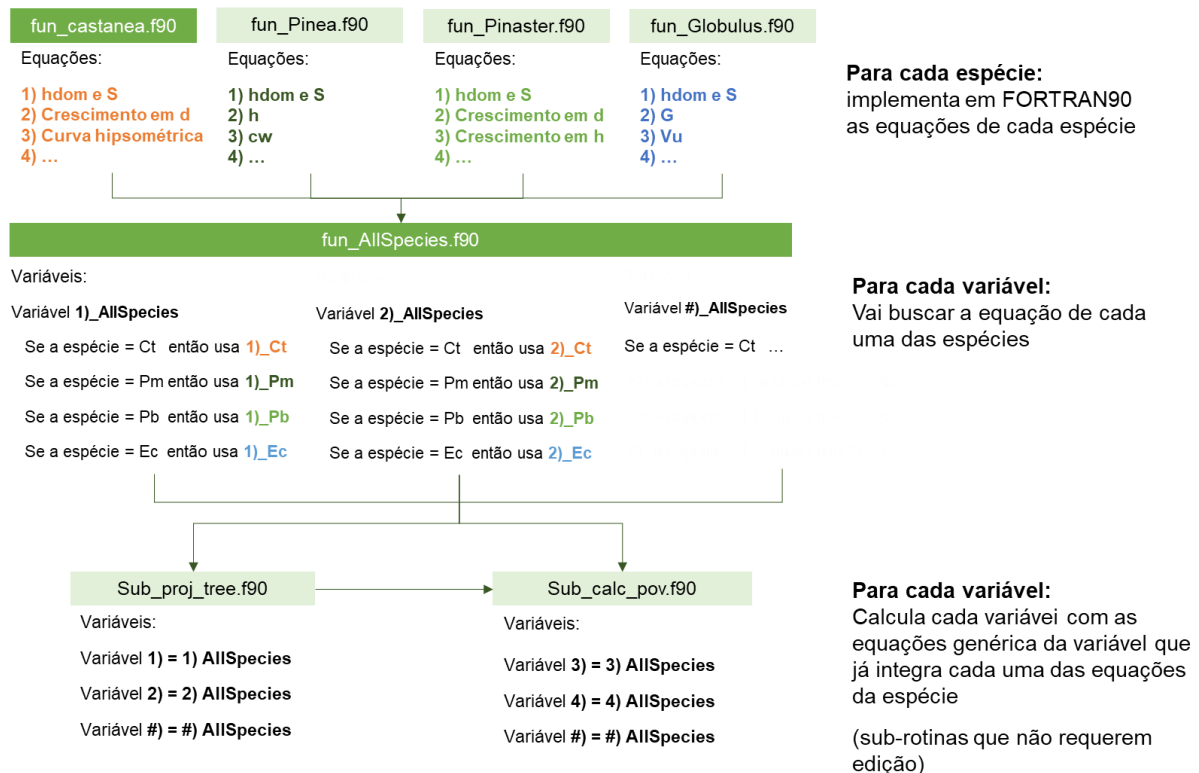


Figura 7: Esquema da relação entre as sub-rotinas e módulos que permitem a fácil integração de novos modelos de crescimento.

## Model\_tree\_AllSpecies.f90

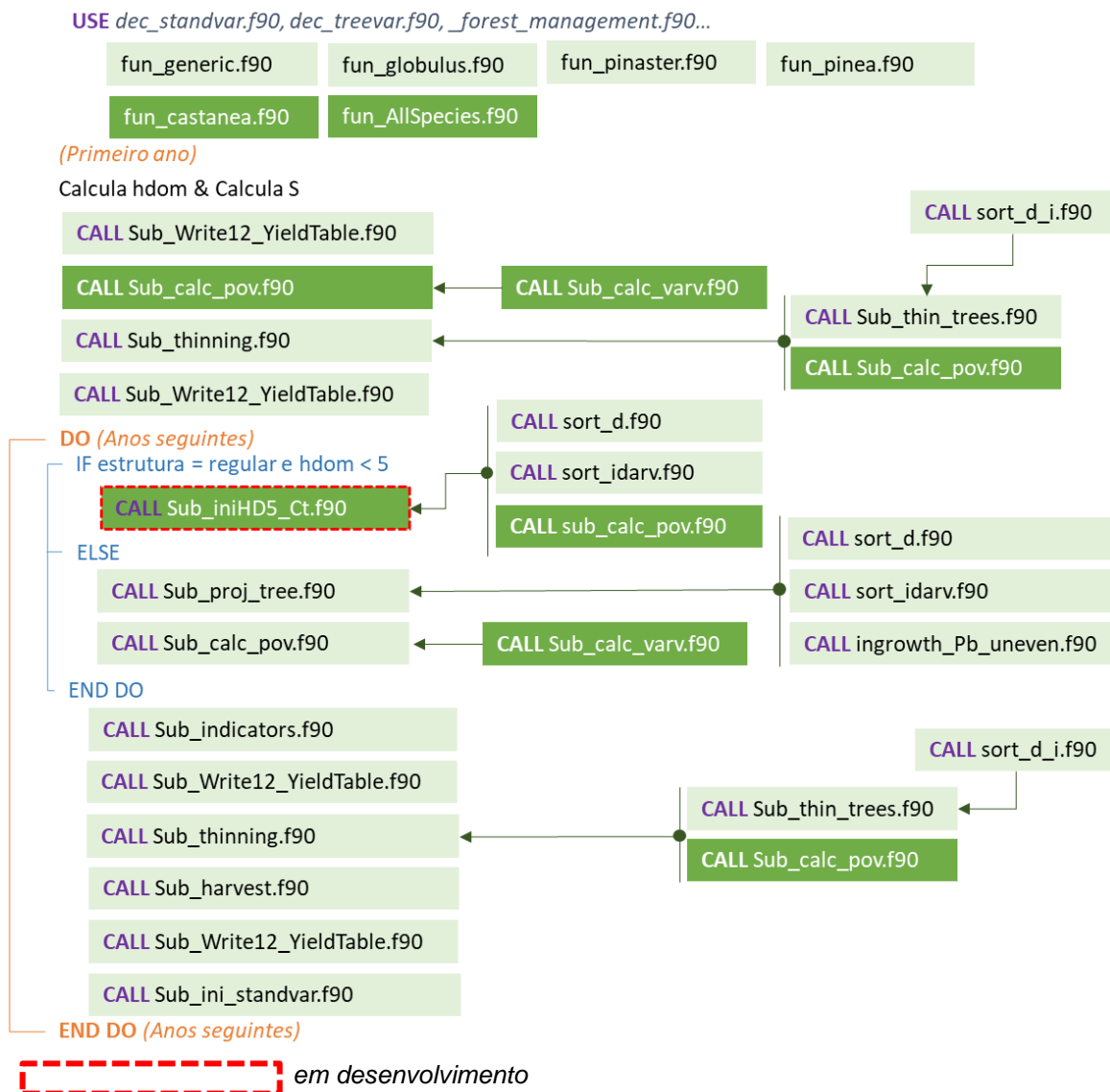


Figura 8: Esquema simplificado da estrutura do modelo de crescimento da árvore individual (Model\_tree\_AllSpecies.f90) integrado no simulador StandsSIM.md.

Cada simulação pode produzir (além dos gráficos) 4 *outputs* em ficheiros (formato .csv facilmente aberto em Excel). O ficheiro de *output* mais importante é o ficheiro gerado pela sub-rotina *sub\_write12\_YieldTable.F90* que contém a tabela de produção que mostra a evolução anual das variáveis do povoamento. Para além deste ficheiro, o utilizador pode ainda escolher gerar um ficheiro contendo a evolução das estimativas de cada árvore de cada parcela ao longo do tempo. Adicionalmente, são gerados ficheiros que apresentam a) o total dos volumes saídos em desbaste e corte final para cada ano de simulação, bem como a evolução da área por classe de idade dos povoamentos gerado pela sub-rotina *sub\_TotalAnnual.F90*; b) alguns indicadores económicos referentes ao horizonte de

planeamento para cada FMA/prescrição (ex. valor atual líquido para a taxa definida pelo utilizador (NPV) e valores de renda anual equivalente (EAA) calculados para várias taxas).

## 2.5. Modelos de silvicultura para o castanheiro

Neste trabalho, para além da implementação do modelo de crescimento CASTANEA no simulador da floresta, descrevem-se alguns modelos de silvicultura para os povoamentos de castanheiro, de modo a providenciar algumas alternativas que serão utilizadas no ponto 2.6.2 da tese para ilustrar a aplicação da versão do simulador que integra esta espécie.

Para o castanheiro em regime de alto fuste, existe pouca bibliografia relativamente aos modelos de silvicultura de castanheiro em Portugal. Contudo, em França, Bourgeois et al. (2004) apresentam no seu trabalho algumas opções de modelos de silvicultura de castanheiro, que apontam para diferentes rentabilidades e produtos destes povoamentos fazendo variar as características de desbaste para uma densidade inicial de árvores por hectare de 1250. Os mesmos autores sugerem que no caso de serem adotados outros métodos de gestão/modelos de silvicultura, devem atingir-se, entre os 35 a 50 anos, os seguintes valores de referência para o diâmetro à altura do peito:

- No mínimo, 35 – 40 cm, em 35 a 45 anos e uma densidade final de 250 a 200 árvores por hectare;
- No máximo, 45 – 50 cm, em 45 a 50 anos e uma densidade final de 120 a 175 árvores por hectare.



A descrição dos modelos de silvicultura que se segue, é baseada em Monteiro e Patrício (2007). Segundo estas autoras, na fase de instalação, aquando da preparação da estação, a intenção deve ser a de favorecer o crescimento inicial rápido das plantas. Na mobilização do solo recomenda-se uma ripagem, e em solos que apresentem alguma compactação a subsolagem, seguida de lavoura (Bourgeois et al., 2004). As plantas no estágio jovem, sendo vulneráveis à competição, devem ser protegidas da vegetação arbustiva e herbácea até aos 10 anos de idade e, caso exista na zona (mesmo que em pequena quantidade) caça grossa, devem ser protegidas contra a caça. Na fase juvenil, prevêem-se ações que favoreçam a formação do fuste em detrimento do crescimento em diâmetro, como os cortes ou podas de formação<sup>3</sup> (A, Figura 9).

As podas de formação, têm dois enquadramentos:

- Para densidades baixas, de menos de 800 árvores por hectare, e árvores com alturas entre 1 m a 3.5 m, devem executar-se em todas as árvores;
- Para densidades elevadas, superiores a 800 árvores por hectare, e árvores com alturas, entre 1 m a 3.5 m, devem executar-se apenas nas árvores mais vigorosas.

Independentemente da densidade, consoante o índice de qualidade da estação (S), haverá uma maior ou menor necessidade de realizar esta operação. Quando a altura das plantas atinge valores entre 3.5 e 6 m de altura, as podas de formação deverão ser realizadas apenas nas árvores pré-selecionadas (250 – 300 árvores), dentre as quais se selecionarão as árvores de futuro definitivas, quando as árvores atinjam uma altura de 12 m. A primeira desramação, coincide com a segunda e última poda de formação (em estações com um  $S \geq 22$ ) sendo realizada somente nas árvores de futuro. As desramações poderão ser realizadas até 3 vezes. A primeira desramação deve ser realizada quando o povoamento atinge a altura dominante de 6 m, devendo as árvores ser desramadas até uma altura de 2 m. A desramação seguinte, deverá realizar-se quando o povoamento atinge os 8 m de altura dominante, devendo as árvores ser desramadas até uma altura de 4 m. A última desramação, seguindo a lógica das anteriores, deverá ter lugar quando o povoamento atinge a altura dominante de 10 m, sendo efetuada até aos 6 m. Alternativamente, poderão realizar-se apenas duas desramações que

---

<sup>3</sup>Cortes ou podas de formação são intervenções culturais, somente realizadas em folhosas, produtoras de madeira de qualidade ou cortiça, com o objetivo de constituir árvores com fuste direito, de forma cilíndrica e sem defeitos para valorização dos indivíduos (Alves et al., 2018).

devem respeitar os critérios descritos anteriormente para a primeira e terceira desramações (Patrício, 2019; comunicação pessoal). As desramações devem garantir que o tronco livre de ramos não ultrapasse 1/3 da altura total (B, Figura 9) uma vez que é essencial que se mantenha sempre 50 % da copa viva, após cada operação de desramação (Monteiro e Patrício, 2007).

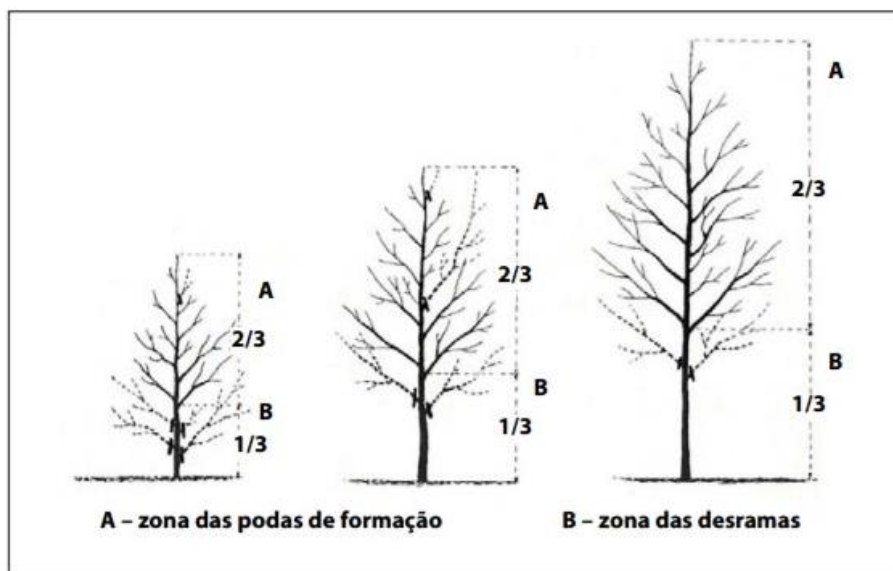


Figura 9: Representação das alturas ao longo do fuste das podas de formação e das desramações. Fonte: Nunes et al. (2010).

A terceira e última fase de desenvolvimento da árvore, corresponde à fase de engrossamento do tronco, sendo o desbaste a operação silvícola, que pode possibilitar uma melhor qualidade de madeira. Apesar de geralmente não se obter rendimento proveniente do primeiro desbaste, especialmente em povoamentos com elevada densidade, este considera-se indispensável uma vez que condiciona o futuro do povoamento. Existem algumas alternativas, como a aplicação de um primeiro desbaste tardio ou a aplicação de uma limpeza antes do primeiro desbaste, consoante a altura dominante, de modo a que se possa evitar o rendimento nulo nesta operação. Tendo em conta a altura dominante, o primeiro desbaste não deverá realizar-se antes do povoamento atingir os 8 m, nem após atingir os 12 m.

Nas restantes aplicações de desbaste, Patrício (2006) apresenta duas opções de silvicultura para plantações de castanheiro, adaptadas de Bourgeois et al. (2004), que diferem no momento em que se realizam os desbastes (Tabela 13 e Tabela 14).

*Tabela 13: Modelo de silvicultura para uma plantação de castanheiro em regime de alto fuste em povoamento florestal com o 1º desbaste menos forte.*

<b>Altura (m)</b>	<b>Idade (anos)</b>	<b>d das árv. designadas (cm)</b>	<b>Intervenções</b>	<b>Densidade após desbaste</b>
0.40	1 + 0		Preparação do terreno Plantação	1250
0.60 – 5			Lavoura Cortes de formação	
7 – 9			Último corte de formação Limpeza 1ª desramação até 2 m (300 árvores)	1000 a 1100
11 – 12	13 – 16	15	Designar 150 a 250 árvores 1º desbaste Desramação até 4 m nas árvores selecionadas	≈ 700
14 – 16	18 – 21	20	2º desbaste Desramação até 6 m nas árvores selecionadas	≈ 370
18 – 20	27 – 30	30	3º desbaste	250
20 – 24	35 – 40	35 – 40	Corte raso ou 4º desbaste	0 ou 150 – 180
24 – 26	40 – 45	≥ 45	Corte raso	0

Fonte: Patrício (2006) adaptado de Bourgeois et al. (2004).

Na Tabela 14, a *nuance* a realçar é o primeiro desbaste aplicado que deverá ser mais forte reduzindo o número de árvores por hectare de 1250 para 600. A aplicação de um desbaste mais tardio, trará a vantagem de as árvores apresentarem um diâmetro mais favorável à venda e por sua vez um rendimento secundário que ajudará nas despesas de gestão envolvidas (Patrício, 2006).

*Tabela 14: Modelo de silvicultura para uma plantação de castanheiro em regime de alto fuste em povoamento florestal com o 1º desbaste mais forte.*

<b>Altura (m)</b>	<b>Idade (anos)</b>	<b>Intervenções</b>	<b>Densidade após desbaste</b>
0.40	1 + 0		1250
7 – 9	8 – 12	Último corte de formação Redução de densidade 1ª desramação até 2 m (300 árvores)	600
11 – 12		Desramação até 4 m em 300	
13 – 14	18 – 20	Designar 140 a 250 árvores 1º desbaste Desramação até 6 m das árvores selecionadas	370
16 – 18	23 - 25	2º desbaste	250
20 – 24	35 – 40	Corte raso ou 3º desbaste	0 a 180
24 – 26	40 – 45	Corte raso	0

Fonte: Patrício (2006) adaptado de Bourgeois et al. (2004)

Com o intuito de ajudar os gestores florestais na tomada de decisão no que toca ao agendamento dos desbastes, Patrício e Nunes (2017), realizaram um estudo para otimizar a precisão dos limites inferior e superior do índice relativo de espaçamento ( $R_s$ ; Clutter et al. 1983, Gadow e Hui, 1999). A técnica utilizada para realizar a análise e providenciar uma solução melhor, consiste no uso de diagramas de gestão de densidade dos povoamentos, onde se inclui o índice relativo de espaçamento (Equação 4).

$$R_s (\%) = \frac{100}{\sqrt{N} h_{dom}} 100 \quad \text{Equação 4}$$

Este índice é correspondente ao fator de Wilson (Wilson, 1946), multiplicado por 100, sendo assim considerado como a percentagem da distância média entre árvores em relação à altura dominante.

Em primeiro lugar, a aplicação do índice relativo de espaçamento para os modelos de silvicultura de Bourgeois et al. (2004), mostrou que os valores, para os desbastes aconselhados, estão entre os 32 % (limite inferior) e os 24 % (limite superior). Como resultado do trabalho de Patrício e Nunes (2017), o valor do limite superior encontrado foi de 26 %. Na Tabela 15, podemos observar o modelo de silvicultura, resultante da aplicação deste valor, que, fundamentalmente, surge com uma pequena alteração ao modelo de silvicultura delineado por Bourgeois et al. (2004). Enquanto que o limite inferior recomendado, segundo

as tabelas de produção de Patrício (2006), é o valor de 32 % pelo que abaixo deste valor não é aconselhável desbastar para evitar perdas de rentabilidade.

É importante referir que será necessário ter em conta o índice de qualidade da estação para adaptar o agendamento dos desbastes. Deste modo, a equação da altura dominante para um determinado índice de qualidade da estação, tal como se pode ver nas classes de qualidade de Patrício (2006) para o castanheiro (Figura 10), permite a identificação e, por conseguinte, o ajustamento das operações consoante a evolução do povoamento. O que não invalidará o bom acompanhamento das árvores de futuro para uma melhor correção da aplicação dos desbastes e desramações, de modo a beneficiar aquelas que possuem um maior potencial e prevenir gastos em operações desnecessárias.

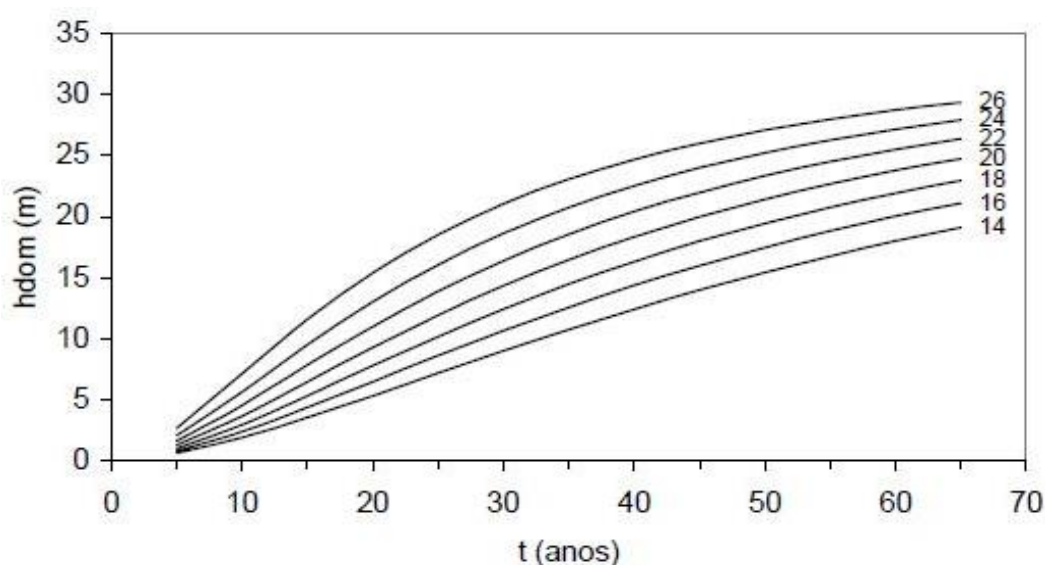


Figura 10: Curvas de classe de qualidade para o castanheiro em regime de alto fuste. Fonte: Patrício (2006).

Uma vez que os desbaste são definidos, nos modelos de silvicultura propostos, em função da altura dominante, enquanto que no StandsSIM.md são definidos em função da idade, foi necessário definir um modelo de silvicultura para cada índice de qualidade da estação testado (ver ponto 2.6.2).

Tabela 15: Critérios de desbaste em plantações de castanheiro definidos em função da altura dominante.

hdom (m)	Densidade após desbaste	Intervenções	Idade (anos)
	1250	-	
12	700	1º desbaste	≈ 16 a 22
14.6	460	2º desbaste	≈ 19 a 26
17.9	305	3º desbaste	≈ 24 a 33
21.9	205	4º desbaste	≈ 32 a 45

Fonte: Patrício e Nunes (2017)

## 2.6. Verificação e validação

Antes de um modelo/simulador ser utilizado, há um conjunto de procedimentos que devem ser realizados para garantir a exatidão dos resultados e a coerência entre diferentes componentes do modelo e por conseguinte a validade das simulações que poderão ser feitas com o modelo. Estes procedimentos costumam ser realizados em duas etapas uma de verificação e outra de validação.

A primeira etapa, a verificação, implica garantir que os resultados fornecidos pelo modelo/simulador estão corretos, ou seja, que não há erros na implementação das diversas equações selecionadas para fazer parte do modelo, neste caso do modelo CASTANEA. Por sua vez, a segunda etapa, a validação, consiste na comparação dos resultados do modelo com dados reais diferentes dos utilizados para desenvolver o modelo ou na comparação com outros modelos existentes e geralmente aceites pelos utilizadores.

A verificação dos resultados foi realizada em três passos. O primeiro consistiu na implementação do modelo CASTANEA em *Excel*, cujos resultados serviram de termo de comparação com os obtidos com a versão do modelo implementada no StandsSIM.md. Para tal, foram introduzidos os dados da parcela teste RE20 (ver ponto 2.6.1) num ficheiro *Excel* em que se realizou a simulação de variáveis como o diâmetro à altura do peito, a altura total, a área basal, o volume da árvore e a largura da copa, ao nível da árvore, para as idades de 14 a 20 e, posteriormente de 5 em 5 anos até aos 50 anos, a idade do corte final. Ao nível do povoamento procedeu-se ao cálculo das variáveis como a altura dominante, o diâmetro dominante, o volume do povoamento, o volume do povoamento principal, a área basal do povoamento, o diâmetro quadrático médio, a altura média, o acréscimo médio anual e o acréscimo anual. Estes valores foram comparados com os obtidos com o simulador no ficheiro *output\_YieldTable.csv*. Relativamente aos resultados do simulador ao nível da árvore, no ficheiro de saída que nos permite analisar o crescimento das árvores anualmente, foram

selecionadas 4 árvores e observou-se a sua evolução ao longo do tempo, cruzando a informação de ambas as fontes para perceber se estariam corretas.

O segundo passo consistiu na verificação detalhada do cálculo dos volumes por categorias de aproveitamento ao nível da árvore. Para tal, procedeu-se ao cálculo em *Excel* dos volumes por categorias de aproveitamento para uma árvore, sendo os valores obtidos comparados com os resultados obtidos no simulador. As equações utilizadas para os cálculos, foram a de perfil de tronco e a equação de volume percentual com casca em função da altura de despona  $h_i$  (Equação 5), que foram utilizadas para calcular os valores de volume por categorias de aproveitamento para uma árvore. Os dados iniciais, para introduzir no ficheiro *Excel*, à idade de corte 45 anos, foram o diâmetro e altura da árvore escolhida (árvore 18) que foram extraídos do ficheiro de *output* do simulador. A figura com os resultados dos cálculos poderá ser encontrada no ponto 3.2.2.

$$R = 1 - (h - h_i/h)^{2.9340} \quad \text{Equação 5}$$

onde  $R$ , corresponde ao volume percentual com casca ( $m^3$ );  $h$ , altura total da árvore (m);  $h_i$ , altura de despona (m). Patrício (2006)

Por fim, num terceiro passo, procedeu-se à verificação dos cálculos referentes à análise económica. Tal como nas etapas anteriores, os cálculos dos custos foram reproduzidos no *Excel* para cada FMA e foram calculados os custos das operações que caracterizam a gestão praticada em cada uma das parcelas simuladas, bem como as receitas obtidas em cada categoria de aproveitamento para os volumes saídos nos desbastes e no corte final. O último passo consistiu no cálculo do valor atual líquido (Equação 6).

$$K_{0,0} = -c_0 + \frac{r_1 - c_1}{(1+i)^1} + \frac{r_2 - c_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{r_t - c_t}{(1+i)^t} \quad \text{Equação 6}$$

onde  $c_0$  é o custo da instalação à plantação,  $r_t$  receitas verificadas depois do momento 0,  $c_t$  despesas verificadas depois do momento 0,  $i$  taxa de capitalização (Alves, 1966).

Além do valor atual líquido, que o simulador calcula, foi utilizado para poder comparar os valores para diferentes horizontes de planeamento, o valor potencial de solo (VPS). A equação (Equação 7) deste indicador, é a seguinte:

$$VPS = \frac{VAL (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad \text{Equação 7}$$

Onde VAL, corresponde ao valor atual líquido,  $n$  à revolução ou período de tempo a que corresponde o VAL e  $i$  à taxa de capitalização (Alves, 1966).

A validação das diversas equações que foram selecionadas para constituir o modelo CASTANEA já tinha sido realizada pelos investigadores que as desenvolveram (Patrício, 2006, Condés e Sterba, 2005), pelo que no presente trabalho nos concentrámos na avaliação do modelo como um todo. Esta consistiu numa comparação dos resultados do StandsSIM.md com as tabelas de produção de Patrício (2006), bem como numa avaliação das simulações do modelo por especialistas (Maria do Sameiro Patrício). Assim a validação dos resultados exigiu a seleção de um conjunto de parcelas teste e a criação dos ficheiros de *input* para correr o StandsSIM.md.

#### 2.6.1. Seleção das parcelas teste

As parcelas selecionadas para avaliar o modelo CASTANEA (modelo desenvolvido para povoamentos regulares em alto fuste) deveriam representar 3 índices de qualidade da estação distintos, uma vez que estes se refletem no crescimento dos povoamentos em altura dominante, variável que condiciona/determina a realização de determinadas operações silvícolas sendo por isso traduzido em modelos de silvicultura distintos. Assim sendo, selecionou-se 3 parcelas teste, todas elas em alto fuste e apresentando estrutura regular (Tabela 16). Os dados destas parcelas correspondem a uma medição fornecida por Patrício, comunicação pessoal.

*Tabela 16: Caracterização das parcelas de teste.*

Identificador da parcela	Localização	Densidade (árv. ha <sup>-1</sup> )	Índice de qualidade da estação (S) (metros)	Idade (anos)	Fonte
NC23	Montesinho, Bragança	820	22.9	11	Parcela permanente (Patrício, 2006)
N26	Montesinho, Bragança	1473	26.5	11	Parcela permanente (Patrício, 2006)
RE20	Moredo, Bragança	1517	20.4	14	Parcela permanente (Patrício, 2006)

#### 2.6.2. Aplicação do StandsSIM.md

O StandsSIM.md foi utilizado para simular o crescimento das parcelas N26, NC23 para um horizonte de planeamento de 45 anos e a RE20 para um horizonte de planeamento de 50



anos. A preparação dos inputs foi feita tendo em conta a simulação das parcelas teste. Como estas se caracterizam por índice de qualidade da estação (S) distintos e são as alturas dominantes que condicionam os momentos no tempo em que as operações silvícolas se realizam, criou-se uma FMA (modelo de silvicultura) para cada parcela (índice de qualidade da estação) sendo que para a que apresenta um S de 23 m se optou por um desdobramento em que se testaram duas intensidades de desbaste diferentes.

Para avaliar os resultados das simulações de crescimento realizadas com o modelo CASTANEA implementado no StandsSIM.md (Figura 11) foi necessário preparar os ficheiros de entrada, os *inputs*:

- Ficheiro .csv com os dados que caracterizam a simulação (ini\_StandsSIM.csv);
- Ficheiro .csv com os dados individuais das árvores da parcela (input\_pov.csv);
- Ficheiro .csv com os dados do povoamento (input\_arv.csv);
- Ficheiros .csv que definem os modelos de silvicultura a aplicar (FMA) (input\_FMA4#.csv);
- Ficheiro .csv que caracterizam a prescrição (input\_presc.csv);
- Ficheiro .csv com a descrição das categorias de aproveitamento e preços para a madeira (input\_assortments\_ct.csv);
- Ficheiro .csv com os custos das operações florestais (input\_operac.csv);
- Ficheiro .csv com os custos dos consumíveis (input\_consum.csv)
- Ficheiro .csv com dados de clima (input\_clima.csv)

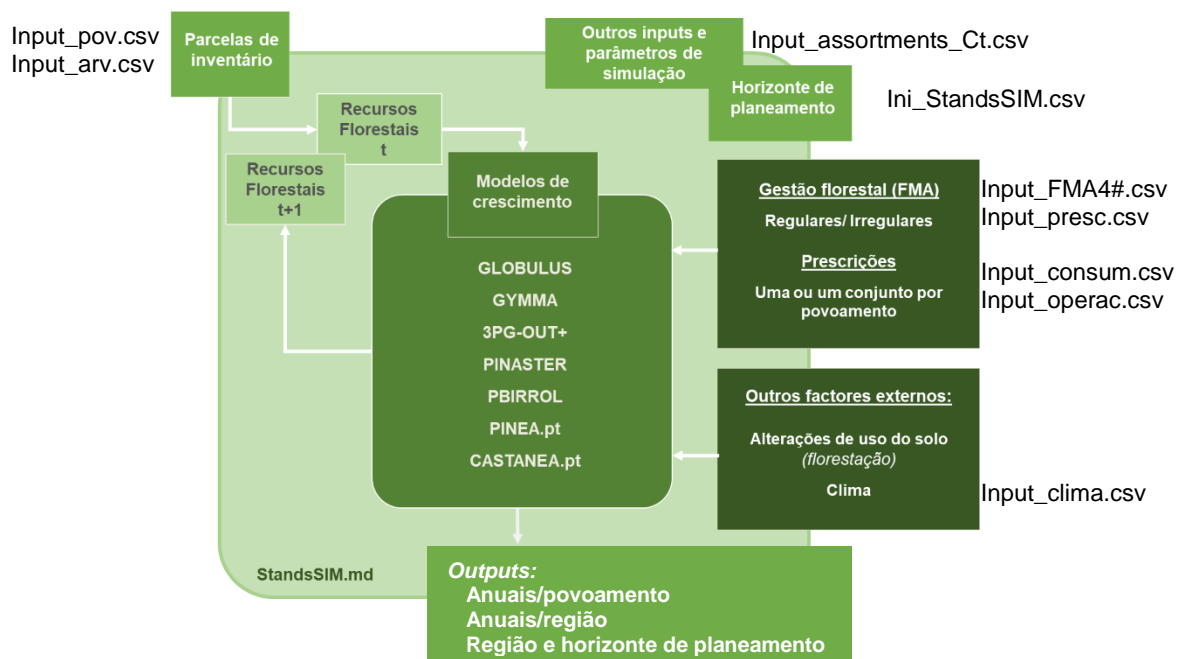


Figura 11: Estrutura do StandsSIM.md. Fonte: adaptado de Barreiro e Tomé (2018).

## **Ficheiro de configuração**

O ficheiro de configuração integra as informações necessárias para que o simulador dê início ao processo de simulação. Este ficheiro indica a localização de todos os ficheiros a utilizar. Na maioria dos casos os ficheiros são únicos (ex. o dos dados individuais das árvores da parcela, o dos dados do povoamento, o da prescrição, o dos custos das operações, o dos custos dos consumíveis e o das categorias de aproveitamento). Contudo, no caso dos ficheiros que descrevem os modelos de silvicultura (FMAs), o utilizador tem de listar o número de ficheiros referentes aos modelos de silvicultura para povoamentos regulares que quer utilizar antes de indicar a sua localização. O mesmo aplica-se aos ficheiros referentes aos modelos de silvicultura para povoamentos irregulares. Adicionalmente, possui alguns parâmetros da simulação, como modo de funcionamento (0 para seguir a FMA e 1 para seguir a prescrição), o horizonte de planeamento, o tipo de modelo (árvore, povoamento ou de base fisiológica, este último no presente só para o eucalipto), e o conjunto de ficheiros de *output* que o utilizador pretende criar (ex. se pretende gerar ou não o ficheiro com a evolução das variáveis ao nível de cada árvore).

## **Ficheiros .csv com os dados individuais das árvores e do povoamento**

A preparação dos ficheiros de *input* da árvore e do povoamento têm de obedecer a uma determinada estrutura. O ficheiro que caracteriza as árvores da parcela deve apresentar os identificadores da parcela/povoamento e da árvore preenchidos, seguidos das coordenadas (x, y) de cada árvore da parcela e respetivo código da espécie (Ct, Castanheiro). Todas as árvores vivas (*cod\_estado=0*) devem apresentar um valor de diâmetro preenchido. Este pode ser igual a zero para povoamentos muito jovens, contudo todas as árvores assinaladas como dominantes (*arv\_dom=1*) devem apresentar obrigatoriamente alturas maiores que zero, enquanto que as outras árvores (*arv\_dom=0*) podem ou não apresentar alturas maiores que zero. O ficheiro contendo a informação ao nível do povoamento deve conter o identificador da parcela/povoamento, a área da unidade de gestão caracterizada pelo povoamento, o identificador da prescrição (*id\_presc*), o número de anos que o utilizador pretende que o simulador espere até iniciar o modelo de silvicultura selecionado, e as coordenadas (x, y) do povoamento. Seguidamente, devem apresentar-se obrigatoriamente um identificador da estação meteorológica, apesar deste não influenciar diretamente os resultados no caso do castanheiro, assim como a altitude a que o povoamento se encontra. Nas colunas seguintes, devem preencher-se: o ano e mês de inventário, a composição do povoamento, o tipo de parcela (povoamento, clareira ou bosquete), a primeira espécie dominante, a segunda espécie dominante, a estrutura do povoamento, o índice de qualidade da estação e a rotação em que se encontra o povoamento. Para finalizar o ficheiro, devem preencher-se ainda a idade do

povoamento, o número de anos desde o último desbaste, o número de anos desde o último descortiçamento (caso se desconheça o número de anos desde uma determinada operação, as colunas devem ser preenchidas com um valor que não influencie os resultados (Figura AIII 1). O ficheiro deve terminar com a área da parcela inventariada (em m<sup>2</sup>) e o número de árvores da parcela.

### **Ficheiro dos modelos de silvicultura (FMAs)**

No ficheiro do modelo de silvicultura, começa-se por identificar nas 3 primeiras linhas: 1) o código da abordagem de silvicultura: FMA=4 para povoamentos regulares e FMA=3 para povoamentos irregulares; 2) o número de rotações: em que 1 representa povoamentos conduzidos em alto fuste e 2 representa povoamentos conduzidos em talhadia, para os quais são indicadas as operações a realizar durante a 1ª rotação e durante a talhadia; 3) o número máximo de anos para o qual as operações de gestão serão definidas. Na quarta e quinta linhas do ficheiro, em cada coluna encontram-se o identificador numérico de cada operação florestal (no total 68 operações) e um identificador que agrupa as operações florestais por tipo. A lista das 68 operações florestais foi compilada pela Comissão de Acompanhamento das Operações Florestais (CAOF; CAOF, 2016a,b). As colunas referentes às operações florestais representam uma matriz de (0,1) em que o valor 1 para um determinado ano e operação indicam a sua realização. Após a descrição das operações, o ficheiro possui ainda um conjunto adicional de colunas em que se descrevem os detalhes de algumas delas (ex. o número de árvores à plantação; as percentagens de poda e desramações; o tipo, o critério e o peso de cada desbaste). No caso de um povoamento ser conduzido em alto fuste seguido de talhadia as operações devem ser definidas para o número máximo de anos definido em 3) para o alto fuste, seguindo-se a descrição das operações para a talhadia para o mesmo número máximo de anos (Figura A III 4).

Para as simulações teste foram definidos 4 modelos de silvicultura (resultando em 4 ficheiros de FMAs) com base na revisão bibliográfica (ponto 2.5). Por conseguinte, as referências às operações que necessitam de um detalhe adicional (ver Tabela 17) apresentam-se em abaixo:

- **Podas de formação:**
  - 1ª poda aplicada a 90 % das árvores;
  - 2ª poda aplicada em 24 % das árvores;
- **Desramação:** (nos 3 momentos aplicada em 24 % das árvores)
  - 1ª até aos 2 m de altura;
  - 2ª até aos 4 m de altura;
  - 3ª até aos 6 m de altura;

- **Seleção de árvores de futuro** – designadas 250 a 300 árvores da densidade total inicial, em que 300 árvores correspondem a 24 %;
- **Desbastes** (ver Tabela 18).

Na versão atual do StandsSIM.md, as operações silvícolas são definidas com base na idade dos povoamentos. Contudo, no caso do castanheiro algumas delas devem realizar-se em função da altura dominante do povoamento em vez da idade. Assim, foi necessário encontrar as idades a que se atingem as referidas alturas dominantes. Esta tarefa foi realizada no Excel com o auxílio da ferramenta Análise de Hipóteses, dada a relação desta variável com o crescimento (qualidade da estação), os valores de altura dominante de referência e respetivas idades às quais se devem realizar as operações variam com a qualidade da estação. No caso dos desbastes, para índices de qualidade da estação menores ou iguais a 20 m, os desbastes são realizados segundo um critério diferente (Tabela 19). Para testar o comportamento do modelo CASTANEA para diferentes valores de índice de qualidade da estação (S) foi necessário criar várias FMAs para valores de S de 20 m, 23 m e 26 m. A Tabela 17 e a Tabela 18 fazem a correspondência entre as alturas dominantes de referência e as respetivas idades para as diferentes classes de qualidade para as operações de poda de formação, desramação, seleção de varas e desbaste. No ANEXO II – FMAs, apresenta-se os quatro FMAs usados para as simulações, descrevendo que operações são realizadas, quando e com que detalhes.

*Tabela 17: Representação dos momentos de realização das operações florestais, tendo em conta o índice de qualidade da estação (S) em causa.*

			Índice de qualidade da estação (S)		
Operação		hdom (m)	20	23	26
			Idade (anos)		
Podas de formação	1ª	3	9	6	5
	2ª	6	14	10	9
Desramação	1ª	6	14	10	9
	2ª	8	18	12	11
	3ª	10	21	14	13
Pré-seleção de árvores futuro	-	6	14	10	9

Fonte: adaptado de Monteiro e Patrício (2007).

Tabela 18: Representação dos momentos de realização dos desbastes, tendo em conta o S da estação em causa.

Operação		hdom (m)	Densidade após desbaste	Índice de qualidade da estação (S)	
				24	26
				Idade (anos)	
Desbastes	1º	12	700	18	16
	2º	14.6	460	22	19
	3º	17.9	305	28	24
	4º	21.9	205	38	32

Fonte: adaptado de Nunes e Patrício (2017).

A FMA para um valor de índice de qualidade da estação de 20 m, será um caso particular, pois segue um regime de desbastes diferente. Apesar do número de desbastes ser semelhante, apresenta uma periodicidade de 5 anos, uma densidade final superior e uma idade de corte de 50 anos. Esta alteração prende-se com o facto de que para estações com menor produtividade, se dever assegurar maiores números de árvores por hectare sendo que a redução de densidade a cada desbaste é determinada com um modelo de redução de densidade apresentado por Patrício (2006) (Tabela 19) que se baseia numa lógica de desbastes de menor intensidade, embora com uma periodicidade fixa. No uso deste modelo de redução de densidade, são definidos o número de árvores inicial e a idade do primeiro e último desbaste. A intenção da simulação para uma estação com um S mais baixo, é a de demonstrar a produtividade para estações que estão localizadas fora das condições edafo-climáticas recomendadas.

Tabela 19: Modelo redução de densidade do povoamento aplicável para estações de produtividade inferior a 20 m.

$$(1) \ N_2 = N_1 e^{(\beta_1 S (t_2 - t_1) - \beta_2 S \ln(\frac{t_2}{t_1}))}$$

Modelo	$\beta_1$	$\beta_2$
(1)	0.00155	0.1316

onde  $N_1$ , número de árvores inicial;  $S$ , índice de qualidade da estação;  $t_1$ , idade do primeiro desbaste (anos);  $t_2$ , altura total da árvore (m).

Fonte: Patrício (2006).

Para a parcela com um índice de qualidade da estação (S) de 23 m foram criadas 2 alternativas de gestão. Para além do modelo de silvicultura comum, foi criado um modelo que apenas difere do anterior no que respeita ao número de árvores após o primeiro desbaste que passou a ser 600 árvores por hectare (em vez de 700 árvores por hectare).

Os modelos de silvicultura apresentados são meramente indicativos, pelo que cada caso, deverá ser analisado tendo em conta a qualidade da estação em causa e os objetivos de gestão. O modelo de silvicultura ideal será, geralmente, aquele que acompanha o desenvolvimento do povoamento, árvore a árvore e ajusta as operações de acordo com o crescimento das árvores.

### **Ficheiro da prescrição**

O ficheiro da prescrição contém informação das FMAs/modelos de silvicultura a seguir. No ficheiro, deve ser preenchido: o identificador da prescrição (*IdPrescr*); o identificador do número de ciclos, que vai de 1 aos necessários até que prevejam todos os anos durante o horizonte de planeamento (*NrCiclos*); os três identificadores das espécie de árvore dominante, dominada e de uma terceira espécie (*sp1*, *sp2* e *sp3*, *respetivamente*) que assumem códigos distintos consoante as espécies contempladas no simulador; o identificador da FMA, a preencher com o número 4 para povoamentos regulares e com o número 3 para povoamentos irregulares (*FMA*); o identificador da opção de FMA, que pode variar de 1 a 10, o número máximo de opções de gestão sob a mesma FMAs (*Opt*); o número de anos que se pretende que seja gerido o povoamento de acordo com a combinação de (*FMA* e *Opt*) definido para o ciclo corrente (*NyFMA*) e o número de anos de espera antes que a referida prescrição seja implementada (*tlag*); As restantes variáveis devem ser apenas preenchidas quando o simulador é corrido no modo de prescrição, o que não é o caso. Entre elas estão o número de árvores à plantação por hectare (*Npl*); a rotação (*rot*), em que o número 1 corresponde à plantação, o 2 à primeira talhadia, o 3 à segunda talhadia e assim, sucessivamente; a idade de corte (*tcut*); o número de varas por touças, apenas disponível para o tipo de modelo 1 (*nsprouts*); a idade do povoamento em que a seleção de varas é realizada, apenas disponível para o tipo de modo 1 (*t\_nsprouts*); o tipo de desbaste, o número 1 para o factor de Wilson e o número 2 para área basal residual (*thin\_type*); o critério de desbaste, o número 1 para desbaste pelo baixo e o número 2 para desbaste pelo alto (*thin\_crit*); o peso do desbaste (*thin\_weight*); a idade do primeiro desbaste (*t\_1st\_thin*); a periodicidade do desbaste (*thin\_gap*); a idade do último desbaste (*t\_last\_thin*).

Assim sendo, criou-se um ficheiro de prescrição para cada FMA/modelo de silvicultura definido.

### Ficheiro das categorias de aproveitamento

Tal como o nome indica, o ficheiro com as categorias de aproveitamento permite definir o número de categorias de aproveitamento a considerar (*Nr\_Assortments*), o nome de cada uma (tantas linhas com os nomes das categorias de aproveitamento, quantas as categorias que forem definidas), o diâmetro superior do toro em cm (*diameter*), o comprimento do toro em m (*length*) e um indicador referente à casca que assume o valor 1 se o valor é para volume com casca, em contrário, o número 0 (*bark*); o preço da categoria, em € por m<sup>3</sup> (*value*); e um conjunto de variáveis indicadoras que permitem ao utilizador selecionar as partes da árvore que serão contabilizados como resíduos de exploração. A Tabela 20 apresenta as categorias de aproveitamento consideradas para castanheiro neste trabalho.

Tabela 20: Representação das categorias de aproveitamento definidas para o castanheiro.

Categorias de aproveitamento			
Nome da categoria de aproveitamento	Diâmetro de topo de toro (cm)	Comprimento do toro (m)	Valor (€ m <sup>3</sup> )
madeira	30	2.1	127.7
madeira	25	2.1	127.7
madeira	20	2.1	92.1
madeira	15	2.1	30

Fonte: ICNF (2018).

### Ficheiros de dados económicos

Os ficheiros de dados económicos são dois, um referente aos custos dos consumíveis envolvidos nas operações florestais (ex. custo das plantas, custo dos fertilizantes, custo dos protetores das plantas) e o outro referente ao custo das operações em si. Este último contém a listagem das operações florestais compilada pela Comissão de Acompanhamento das Operações Florestais (CAOF) e os respetivos custos médios de cada operação apurados para os anos de referência 2015/2016 (CAOF, 2016a,b).

#### 2.6.3. Análise das simulações

Como base para a análise das simulações usou-se como auxiliar as conclusões apresentadas por Patrício (2006) relativamente aos valores de acréscimo médio em diâmetro das árvores dominantes dos povoamentos que foram estudados, em média, de 0.70 cm ano<sup>-1</sup> aos 45 anos, tendo-se observado acréscimos médios de 0.64 cm ano<sup>-1</sup> em Bornes, 0.69 cm ano<sup>-1</sup> no Marão e 0.73 cm ano<sup>-1</sup> na Padrela. Observou-se também um acréscimo médio em altura das árvores

dominantes de  $0.46 \text{ m ano}^{-1}$ , em média, igualmente aos 45 anos, tendo-se apurado acréscimos médios de  $0.53 \text{ m ano}^{-1}$  em Bornes,  $0.45 \text{ m ano}^{-1}$  no Marão e  $0.44 \text{ m ano}^{-1}$  na Padrela.

As tabelas de produção de Patrício (2006), também foram tidas em consideração para a avaliação das simulações obtidas, que para uma possível comparação, as tabelas foram inicializadas com os inputs preparados no âmbito desta tese que caracterizavam as parcelas teste, tendo em conta, o mesmo índice de qualidade da estação, o mesmo número de árvores por hectare e os mesmos anos de desbaste (Figura 12, Figura 13 e Figura 14).

J30

<

Figura 12: Tabela de produção, exemplificativa de referência, para a parcela N26. Fonte: adaptado de Patrício (2006).

U4

A

B

C

D

E

F

G

H

I

J

K

L

M

N

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

TABELA DE PRODUÇÃO DEFINIDAS PELO UTILIZADOR

SI22.9

Idade do 1º desbaste20

Idade do último desbaste31

Periodicidade de desbaste5

Tabela de produção para o castanheiro em regime de alto fuste com uma silvicultura baseada no modelo de condução proposto por Bourgeois et al. (2004)

t (anos)

hdom

N

dg

hmed

G

Vp

Ns

Vs

Vs-acum

Vtot

ama

ac

(m)

(árv ha-1)

(cm)

(m)

(m2 ha -1)

(m3 ha -1)

(árv ha-1)

(m3 ha -1)

(m3 ha -1)

(m3 ha -1)

(m3 ha -1 ano -1)

(m3 ha -1 ano -1)

11

20

25

31

36

41

46

51

56

61

66

71

5.7

11.9

14.8

17.8

19.9

21.7

23.2

24.4

25.5

26.4

27.2

27.9

820

730

440

303

303

303

303

303

303

303

303

303

303

7.11

15.58

21.89

28.06

30.78

33.07

35.00

36.64

38.03

39.22

40.24

41.13

5.99

11.03

14.16

17.22

19.12

20.72

22.07

23.21

24.18

25.00

25.71

26.32

13.92

16.56

18.74

22.54

26.02

29.15

31.94

34.41

36.60

38.54

40.25

64.50

98.48

135.52

181.08

226.53

270.27

311.38

349.44

384.34

416.15

445.05

90

290

137

0

0

0

0

0

0

0

0

0

15.07

26.46

46.69

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

0

15.07

41.52

88.22

88.22

88.22

88.22

88.22

88.22

88.22

88.22

88.22

88.22

79.57

140.00

223.73

269.30

314.75

358.49

399.60

437.66

472.56

504.37

533.26

3.98

5.60

7.22

7.48

7.68

7.79

7.84

7.82

7.75

7.64

7.51

12.09

13.96

9.11

9.09

8.75

8.22

7.61

6.98

6.36

5.78

Figura 13: Tabela de produção, exemplificativa de referência, para a parcela NC23. Fonte: adaptado de Patrício (2006).



TABELA DE PRODUÇÃO PARA UMA SILVICULTURA DE PRODUÇÃO INGLESA											
SI	20.4										
Idade do 1º desbaste		25									
Idade do último desbaste		45									
Periodicidade de desbaste:		5									

Tabela de produção para o castanheiro em regime de alto fuste com uma silvicultura baseada no modelo de condução proposto por Bourgeois et al.

t (anos)	POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE)						DESBASTES			Vtot (m3 ha -1)	Acréscimos	
	hdom (m)	N (árv ha -1)	dg (cm)	hmed (m)	G (m2 ha -1)	Vp (m3 ha -1)	Ns (árv ha -1)	Vs (m3 ha -1)	Vs -acum (m3 ha -1)		ama (m3 ha -1 ano -1)	ac (m3 ha -1 ano -1)
14	6.1	1517	5.51	5.02		7.63		0	0	87.18	3.49	10.12
25	12.3	900	15.30	11.25	16.55	78.21	617	8.96	8.96	137.80	4.59	11.37
30	14.7	677	19.64	13.71	20.51	118.16	223	10.68	19.64	194.65	5.56	11.94
35	16.9	517	23.72	15.90	22.84	152.50	160	22.51	42.15	254.35	6.36	11.99
40	18.8	453	26.85	17.72	25.65	190.88	64	21.31	63.46	314.28	6.98	8.83
45	20.4	383	29.92	19.34	26.93	218.83	70	31.99	95.45	358.42	7.17	8.57
50	21.8	383	31.77	20.63	30.35	262.97	0	0.00	95.45	401.25	7.30	8.17
55	23.0	383	33.37	21.74	33.49	305.80	0	0.00	95.45	442.11	7.37	7.71
60	24.1	383	34.76	22.71	36.35	346.65	0	0.00	95.45	480.63	7.39	7.21
65	25.1	383	35.98	23.55	38.94	385.18	0	0.00	95.45	516.66	7.38	6.70
70	25.9	383	37.05	24.29	41.28	421.21	0	0.00	95.45	550.17	7.34	
75	26.6	383	37.99	24.94	43.41	454.72	0	0.00	95.45			

Figura 14: Tabela de produção, exemplificativa de referência, para a parcela RE20. Fonte: adaptado de Patrício (2006).

Chama-se a atenção para o facto destas tabelas de produção, que serão utilizadas como termo de comparação para a avaliação dos resultados do StandsSIM.md, utilizarem equações diferentes das seleccionadas para integrar o modelo CASTANEA para certas variáveis e todas ajustadas ao nível do povoamento e bastante simples, como é característico das tabelas de produção. Nas tabelas de produção, a curva hipsométrica utilizada para estimar a altura, não necessita da variável diâmetro dominante (Tabela 21, ver Tabela 6 para comparar com a equação utilizada no modelo CASTANEA) e o diâmetro quadrático médio é calculado pela equação ajustada para a espécie na Tabela 22. Não é de estranhar, portanto que as simulações mostrem algumas diferenças, mas será útil fazer a comparação.

Tabela 21: Curva hipsométrica geral em regime de alto fuste utilizada nas tabelas de produção.

$(1) h = hdom \left( 1 + \beta_0 e^{\beta_1 hdom} \right) \left( 1 - e^{\beta_2 \frac{d}{hdom}} \right)$			
Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$
(1)	0.0607	-0.0228	-1.6676

onde **h**, altura da árvore (m); **d**, diâmetro à altura do peito (cm); **hdom**, altura dominante (m).  
Fonte: Patrício (2006).

Tabela 22: Equação de predição do diâmetro quadrático médio.

(1) $dg = \beta_0 + \beta_1 hdom + \beta_2 \frac{1}{\sqrt{N}}$			
Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$
(1)	- 8.3952	1.3007	230.6098

onde ***dg***, corresponde a um valor do diâmetro quadrático médio (cm); ***hdom***, a altura dominante (m); ***N***, número de árvores por hectare.

Fonte: Patrício (2006).

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1. Equações desenvolvidas para compatibilização com o StandsSIM.md

Para garantir a implementação do modelo CASTANEA no simulador desenvolveram-se equações para as seguintes variáveis (Tabela 23):

- **diâmetro da árvore sem casca (dui)**, em cm, em função da variável diâmetro da árvore com casca (di);
- **volume da árvore sem casca (vu)**, em m<sup>3</sup>, em função da variável volume da árvore com casca (v);
- **volume de cepo com casca (vst)**, em m<sup>3</sup>, em função das variáveis volume da árvore com casca (v) e altura do cepo (hst);
- **volume do cepo sem casca (vust)**, em m<sup>3</sup>, em função da variável volume do cepo com casca (vst);
- **altura mercantil (hm)**, em m, em função da variável altura total (h).

Tabela 23: Sumário das equações desenvolvidas para o modelo CASTANEA.

Equação	Parâmetros	Estimativa	Erro-padrão
$dui = k di^a$	k	0.8794	0.00525
	a	1.0207	0.00165
$vu = k v^a$	k	0.8883	0.00294
	a	1.0159	0.00459
$vst = k v^a hst^b$	k	0.1526	0.0205
	a	0.912	0.0436
	b	1.0144	0.057
$vust = k vst^a$	k	0.9189	0.018
	a	1.0044	0.00723
$hm = k h^a$	k	0.2448	0.0333
	a	1.3833	0.0426

#### Equação de diâmetro sem casca, volume sem casca e altura mercantil

A análise gráfica dos dados permitiu observar as relações entre algumas variáveis como sejam os diâmetros com e sem casca e volumes com e sem casca (Figura 15) e a altura mercantil e altura total (Figura 16). Esta análise evidenciou relações tendencialmente de potência entre as referidas variáveis. Na Figura 15, em ambas, existe um maior número de pontos em a) de diâmetros inferiores a 40 cm e em b) de volumes inferiores a 2 m<sup>3</sup>. Embora, em a) se verifique um ligeiro afastamento de alguns pontos, em ambos os casos nenhum ponto apresenta um afastamento relevante.

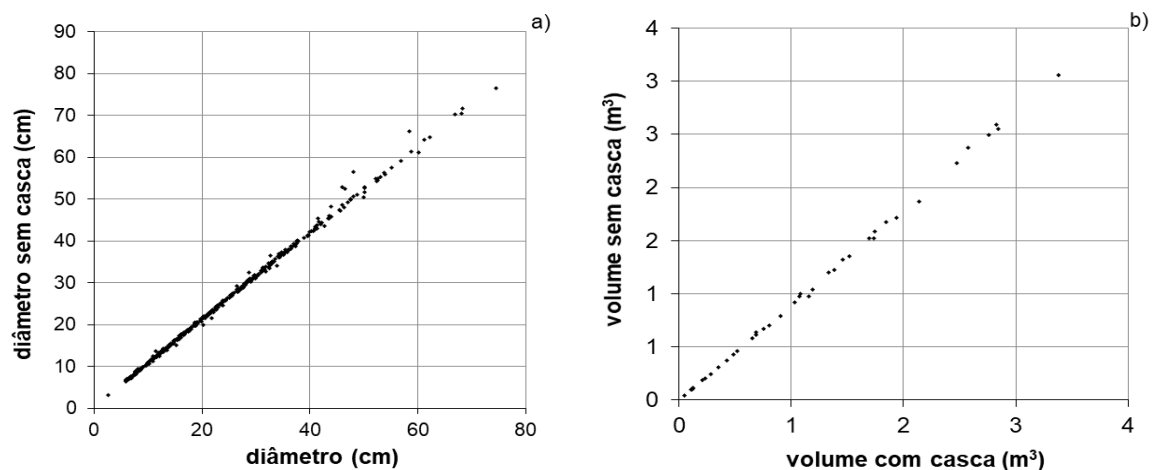


Figura 15: Relação entre variáveis medidas nas árvores abatidas de castanheiro disponíveis para o ajustamento: a) diâmetros com e sem casca e b) volumes com e sem casca.

A Figura 16 ilustra a relação entre a altura mercantil e a altura total.

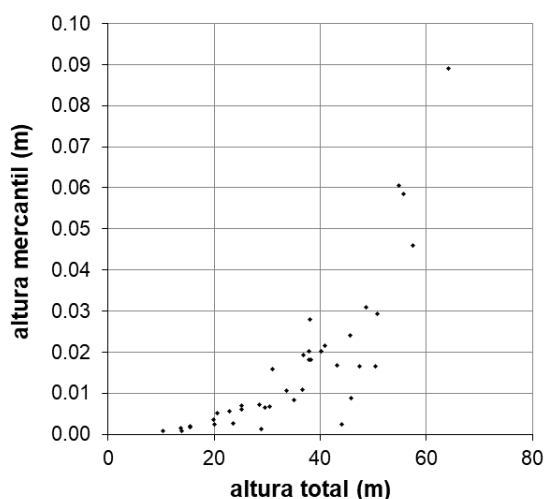


Figura 16: Relação entre variáveis medidas nas árvores abatidas de castanheiro disponíveis para o ajustamento da altura mercantil.

### Equação de volume do cepo com casca

A Figura 17 mostra os dados disponíveis para o ajustamento do modelo para estimar o volume do cepo com casca e parecem indicar uma relação de potência entre os volumes da árvore com casca e os volumes do cepo da árvore com casca. A dispersão observada corresponde, na maior parte dos casos, a diferentes alturas do cepo, variável que foi portanto incluída no modelo.

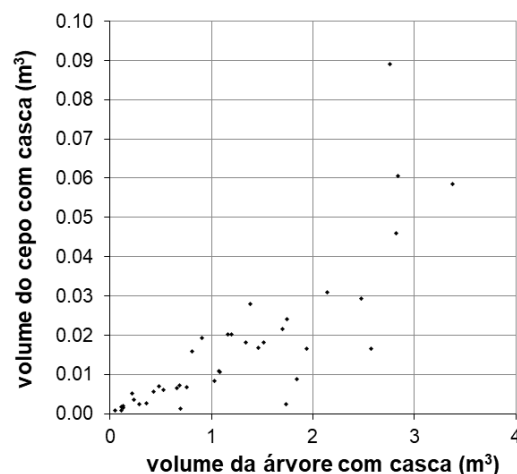


Figura 17: Dados das parcelas de castanheiro para ajustamento de equação de volume do cepo com casca, em m<sup>3</sup> (Patrício, 2006).

### Equação de volume do cepo sem casca

A Figura 18 mostra os dados disponíveis para o ajustamento do modelo para o volume do cepo sem casca.

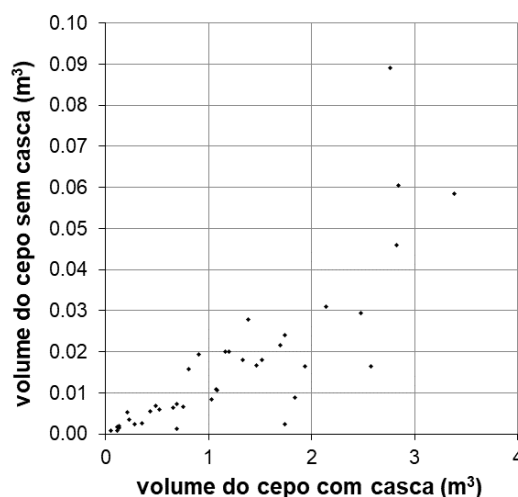


Figura 18: Dados das parcelas de castanheiro para o ajustamento da equação de volume do cepo sem casca, em m<sup>3</sup>. Fonte: Patrício (2006).

Durante o processo de ajustamento das equações fizeram-se os gráficos dos resíduos studentizados e os valores estimados obtidos após ponderação dos resíduos utilizando a metodologia proposta por Parresol (1999) e ainda os gráficos QQ-plot após aplicação do método de *Huber* para dar menos peso aos pontos correspondentes às “caudas” da distribuição dos resíduos que apresentavam algum desvio em relação à distribuição normal. Como um exemplo, a Figura 19 apresenta estes gráficos para o modelo do **diâmetro da árvore sem casca**, os mesmos gráficos para os restantes modelos podem encontrar-se no ANEXO IV – Análise dos resíduos studentizados vs. valores estimados.

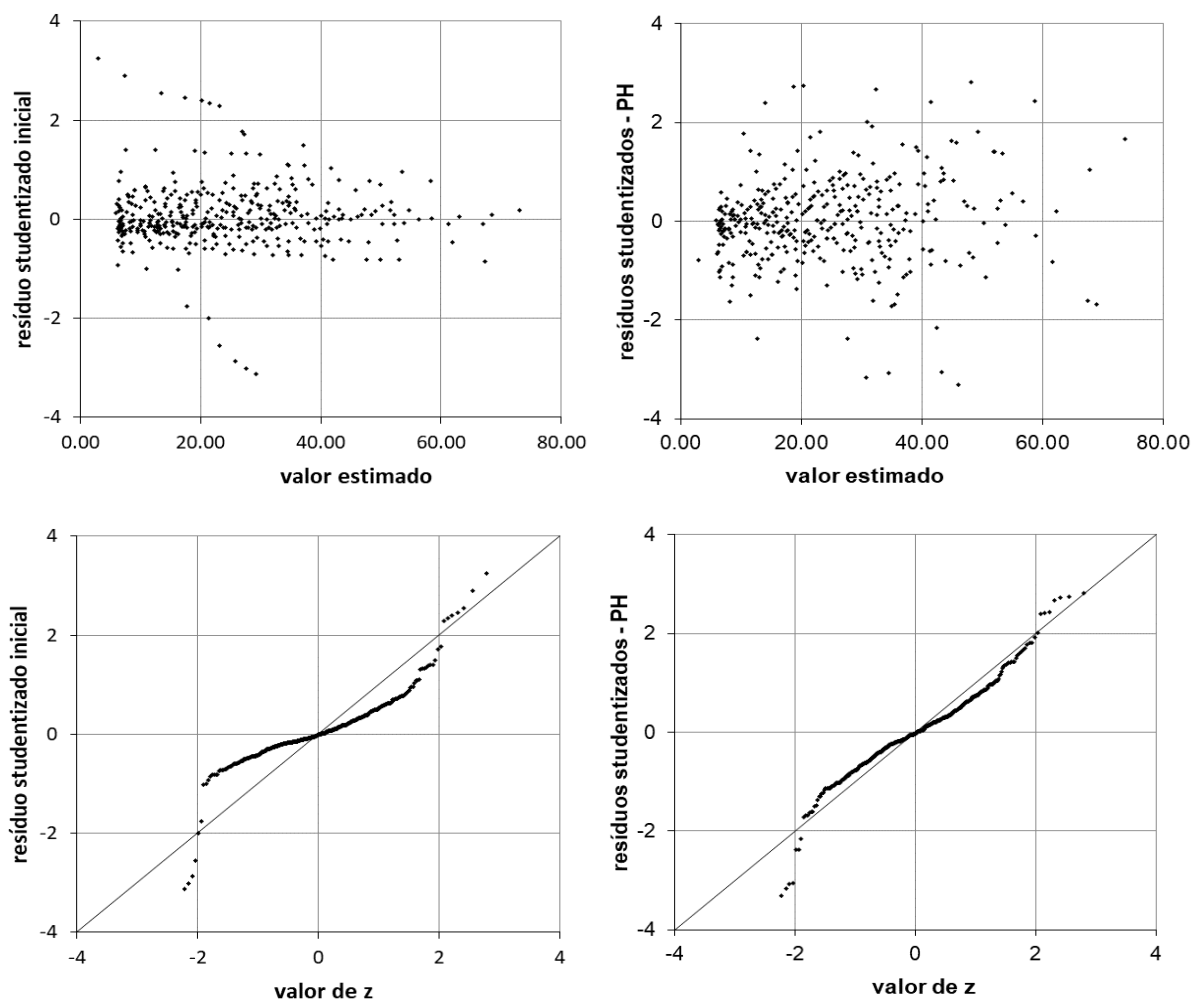


Figura 19: Gráficos dos resíduos studentizados versus valores estimados e em papel de probabilidades normal para o diâmetro sem casca a qualquer altura  $h_i$  e depois da ponderação e da aplicação do método de Huber (PH).

A Tabela 24 apresenta um resumo das medidas de capacidade preditiva que foram calculadas com os resíduos *PRESS* para cada um dos modelos ajustados. No geral, todos os modelos apresentam boa capacidade preditiva.

Tabela 24: Resumo das medidas de capacidade preditiva que foram calculadas com os resíduos PRESS.

Modelo	n	mpr	mapr	P95	P5	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> p
$dui = k di^a$	380 <sup>4</sup>	-0.04287	0.29953	0.58017	-0.51638	0.9979	0.99788
$vu = k v^a$	39	-0.00026	0.014967	0.044102	-0.05771	0.9993	0.99923
$vst = k v^a hst^b$	39	0.000211	0.002249	0.0073256	-0.007161	0.97369	0.96457
$vust = k vst^a$	39	-0.00017	0.000663	0.0018134	-0.003728	0.99548	0.99506
$hm = k h^a$	39	-0.050828	0.65324	1.28196	-1.80755	0.97192	0.96939

### 3.2. Simulações, verificação e validação

#### 3.2.1. Simulações

A Figura 20 e as Figuras Figura AV 2 e Figura AV 3 do ANEXO V– Gráficos de variáveis provenientes do output das simulações mostram as simulações obtidas com o modelo StandsSIM.md para as parcelas teste N26, NC23, RE20.

Em particular, os resultados da parcela NC23, presentes na Figura 20 podemos analisar as variáveis: altura dominante, volume total do povoamento área basal, número de árvores por hectare, biomassa e o volume por categorias de aproveitamento. Estas são algumas das variáveis disponíveis para avaliar, mas que foram selecionadas por serem das mais importantes para os utilizadores.

---

<sup>4</sup> Trata-se do mesmo número de árvores (39) mas, neste caso, diâmetros a diferentes alturas da árvore que perfaz uma amostra de 380 diâmetros.

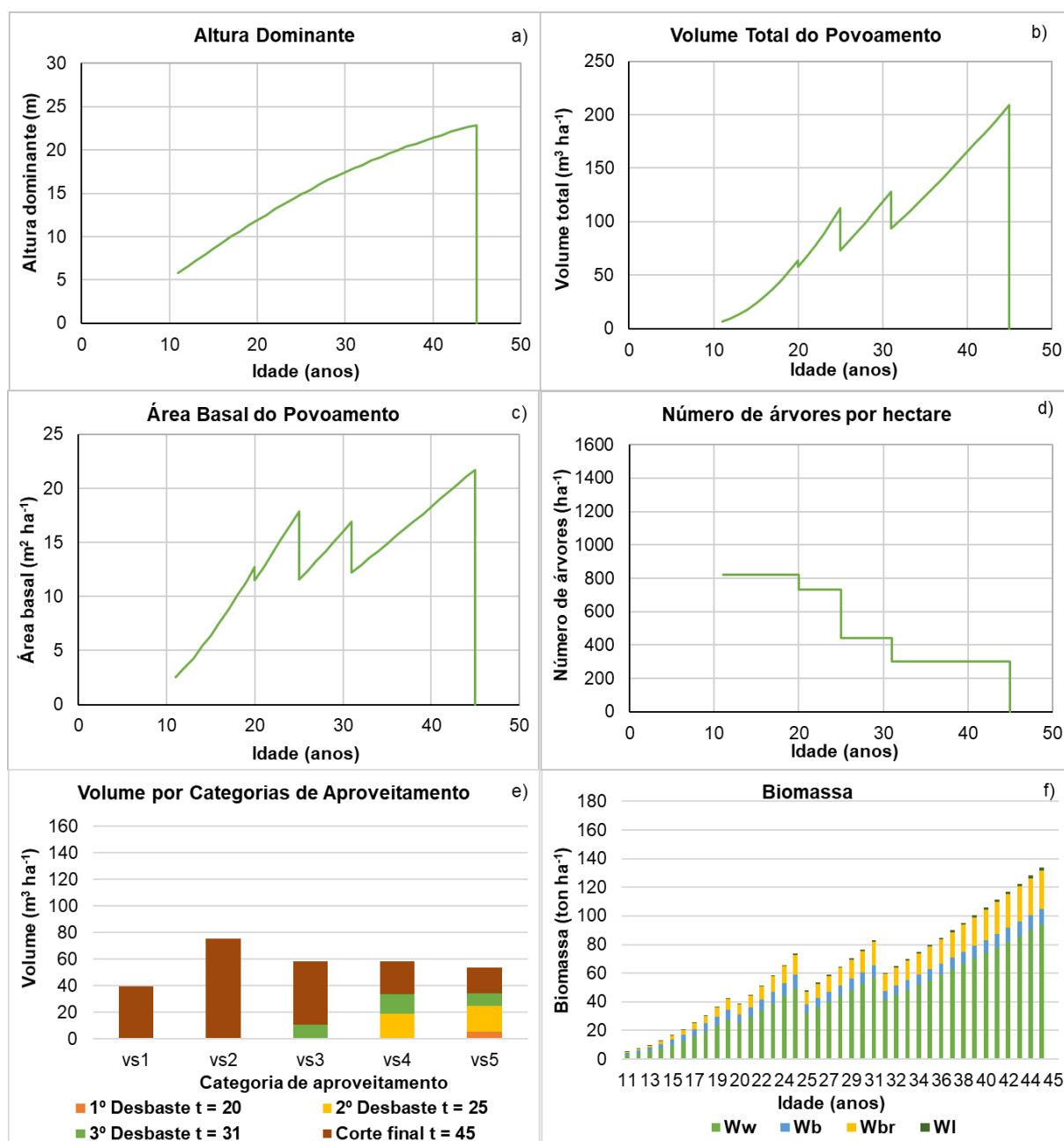


Figura 20: Resultados das simulações obtidas com o StandsSIM.md para a parcela NC23: a) Altura dominante, b) volume total, c) área basal, d) Número de árvores por hectare, e) Volume por categorias de aproveitamento e f) Biomassa do povoamento por componentes<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Correspondência da terminologia do output do StandsSIM para os termos das componentes de biomassa designadas na Tabela 10: Equações de predição de biomassa da árvore por componente. onde indica as equações de biomassa do CASTANEA. Em f) na Figura 20: Ww – biomassa do tronco; Wb – biomassa da casca; Wbr – biomassa dos ramos; WI – biomassa das folhas e flores.



A comparação dos resultados das simulações obtidas com o StandsSIM.md e com as tabelas de produção de Patrício (2006) (ver ponto 2.6.3) podem ser vistas, para a evolução do volume total, na Figura 22. Como se pode ver, as simulações fornecem resultados semelhantes.

### 3.2.2. Verificação e validação dos resultados do simulador

Como já mencionado, a verificação dos resultados do simulador focou o crescimento das árvores, os volumes por categorias de aproveitamento e os cálculos económicos.

A verificação do crescimento das árvores consistiu na comparação dos resultados das simulações do modelo CASTANEA implementado no StandsSIM.md com a versão do modelo implementada no *Excel* tendo em conta a informação contida nos ficheiros de *input* descritos no ponto 2.6.2 e ilustrados no ANEXO III – Ficheiros de entrada, *inputs*.

As verificações dos valores de volumes por categorias de aproveitamento foram feitas no ficheiro *Excel* para a árvore 18 e podem ser vistos na Figura 21 onde foram comparados com os volumes das diferentes categorias de aproveitamento simulados com o StandsSIM.md.

M36												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Parcela RE20, Arvore 18 na idade=45											
2							Nr_Assortmen	4				
3	hlog	2.1		hm	16.84065	label	diameter	length	bark	value'		
4	d	31.36		vst	0.010813	serracao1	30	2.1	1	127.7		
5	h	21.3		vust	0.00974	serracao2	25	2.1	1	127.7		
6	v	0.710818				serracao3	20	2.1	1	92.1		
7	vu	0.628002		k	7.85E-05	serracao4	15	2.1	1	30		
8												
9	hi	z	I1	I2	A	B	C	di	vi	vui		
10	0.1	0.995305	1	1	2.985635	-0.45807261	1.306009	40.3595				
11	2.2	0.896714	1	0	2.42095	-0.28659939	0	30.1146	0.1946	0.1535	30	
12	4.3	0.798122	1	0	1.915403	-0.1551485	0	27.3484			25	
13	6.4	0.699531	1	0	1.468994	-0.06371995	0	24.4357	0.6495	0.3577		
14	8.5	0.600939	1	0	1.081724	-0.01231373	0	21.3165				
15	10.6	0.502347	0	0	0.753592	0	0	17.8942	0.8673	0.5005	20	
16	12.7	0.403756	0	0	0.484598	0	0	14.3495	0.9301	0.5540	15	
17	14.8	0.305164	0	0	0.274742	0	0	10.8046				
18	16.9	0.206573	0	0	0.124025	0	0	7.2594				
19	19	0.107981	0	0	0.032446	0	0	3.7130				
20	21.1	0.00939	0	0	5.29E-06	0	0	0.0474				
21	23.2	-0.0892	0	0	0.026703	0	0	3.3684				
22	21.300	0	0	0	0	0	0	0.0000				
23	Perfil do tronco com casca											
24	$di = \left[ \left( \frac{v}{kh} \right) (2z + 1.0140 (3z^2 - 2z) - 2.0587 (z - 0.5236)^2 I_1 + 407.6000 (z - 0.9387)^2 I_2) \right]^{0.5}$											
25	com $I_1 = 1, z \geq 0.5236$ e $I_1 = 0, z < 0.5236$ ;											
26	$I_2 = 1, z \geq 0.9387$ e $I_2 = 0, z < 0.9387, z = \frac{(h-h_i)}{h}$ e $k = \frac{\pi}{4(100)^2}$											
27	$v = 0.000052 (d^2 h)^{0.95710}$											
28	Volume percentual com casca em função da altura de despona hi											
29	$R = 1 - (h - h_i/h)^{2.9340}$											
30												
31												
32												
33												
34												

Figura 21: Cálculos para a árvore 18 da parcela RE20.

Os cálculos feitos no *Excel* foram comparados com os valores obtidos anualmente para cada parcela/FMA exportados do ficheiro de *output* do simulador.

A validação baseou-se na análise gráfica (Figura 22) da evolução do povoamento principal que permitiu comparar as simulações obtidas com o StandsSIM.md e com a evolução do povoamento principal segundo as tabelas de produção de Patrício (2006), aplicando em ambos os casos um regime de desbastes semelhante. No entanto, é importante referir que as tabelas de produção são também simulações, obtidas com um método mais simplificado baseado em equações do povoamento. Não é, portanto, de esperar que haja coincidência total entre os resultados obtidos por ambos os métodos. Convém também mencionar que estas tabelas utilizam uma equação diferente para a curva hipsométrica e para o diâmetro quadrático médio.

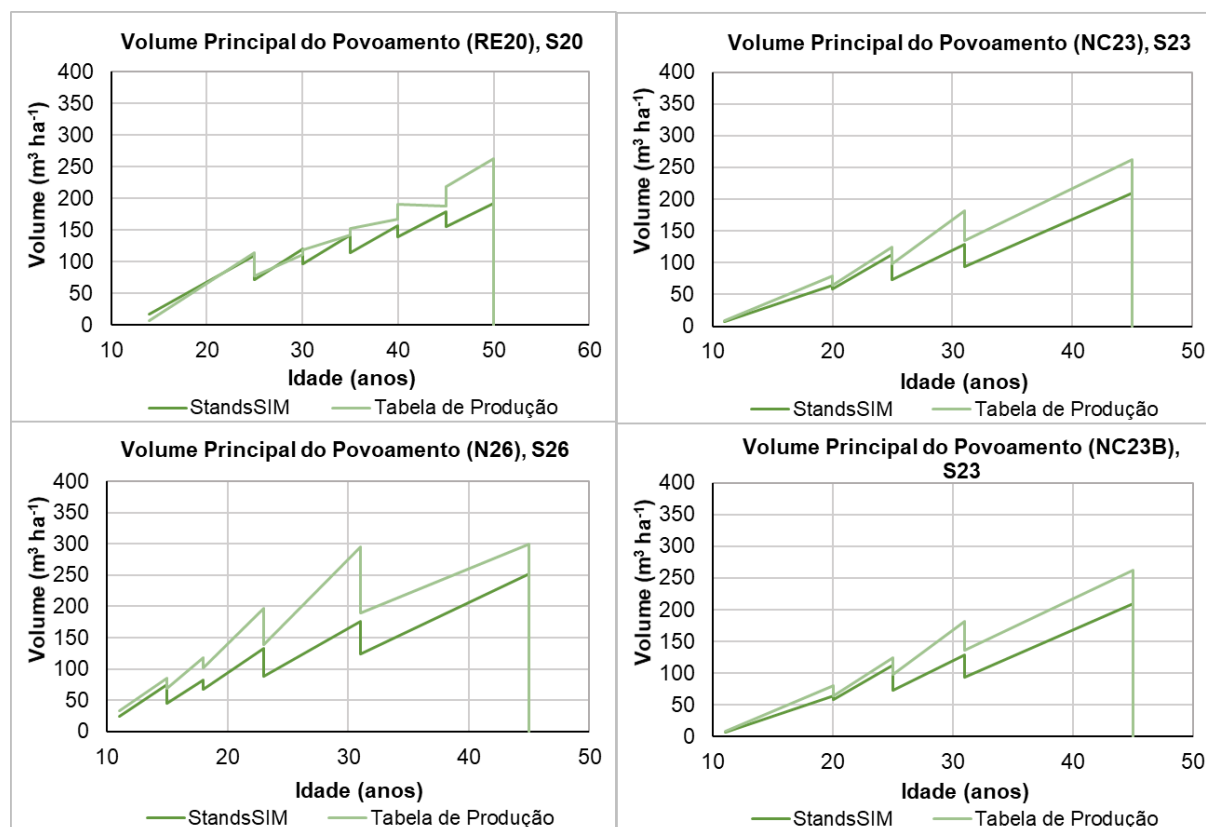


Figura 22: Análise dos resultados das simulações para o volume do povoamento principal e os resultados das tabelas de produção de Patrício (2006).

Assim, observa-se naturalmente diferenças entre os dois métodos de estimação do crescimento, em volume principal do povoamento, pelo que, no caso da parcela RE20 se repara numa diferença superior aquando da idade de corte. Na parcela N26, no 4º desbaste existe uma diferença um pouco maior tanto a nível do crescimento em volume do povoamento como em número de árvores em desbaste, transmitida na tabela de produção. Em geral, é

comum nas várias parcelas, nas primeiras idades notar-se uma clara proximidade, seguindo-se um afastamento por volta dos 25 anos, o que pode indicar uma imprecisão da tabela de produção para idades superiores. Exceto, na parcela N26 em que se nota uma distância desde os 15 anos.

No âmbito de entender melhor as diferenças observadas na Figura 22 entre as simulações do StandsSIM e a tabela de produção, foram feitos gráficos das respetivas variáveis que entram na equação de volume principal usada na tabela de produção, tais como o diâmetro quadrático médio e a altura média do povoamento.

Na Figura 23, encontra-se os gráficos comparativos dos resultados das simulações para a variável diâmetro quadrático médio. Neste cálculo, o simulador StandsSIM calcula esta variável de forma estática, com base nos diâmetros obtidos através da equação ajustada à espécie (Tabela 7), traduzindo-se na Equação 8 e no caso da tabela de produção usa uma equação ajustada à espécie apresentada na Tabela 22.

$$dg = 100 \sqrt{\frac{4 G}{\pi N}} \quad \text{Equação 8}$$

onde  $G$ , corresponde à área basal ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ) e  $N$  ao número de árvores por hectare.

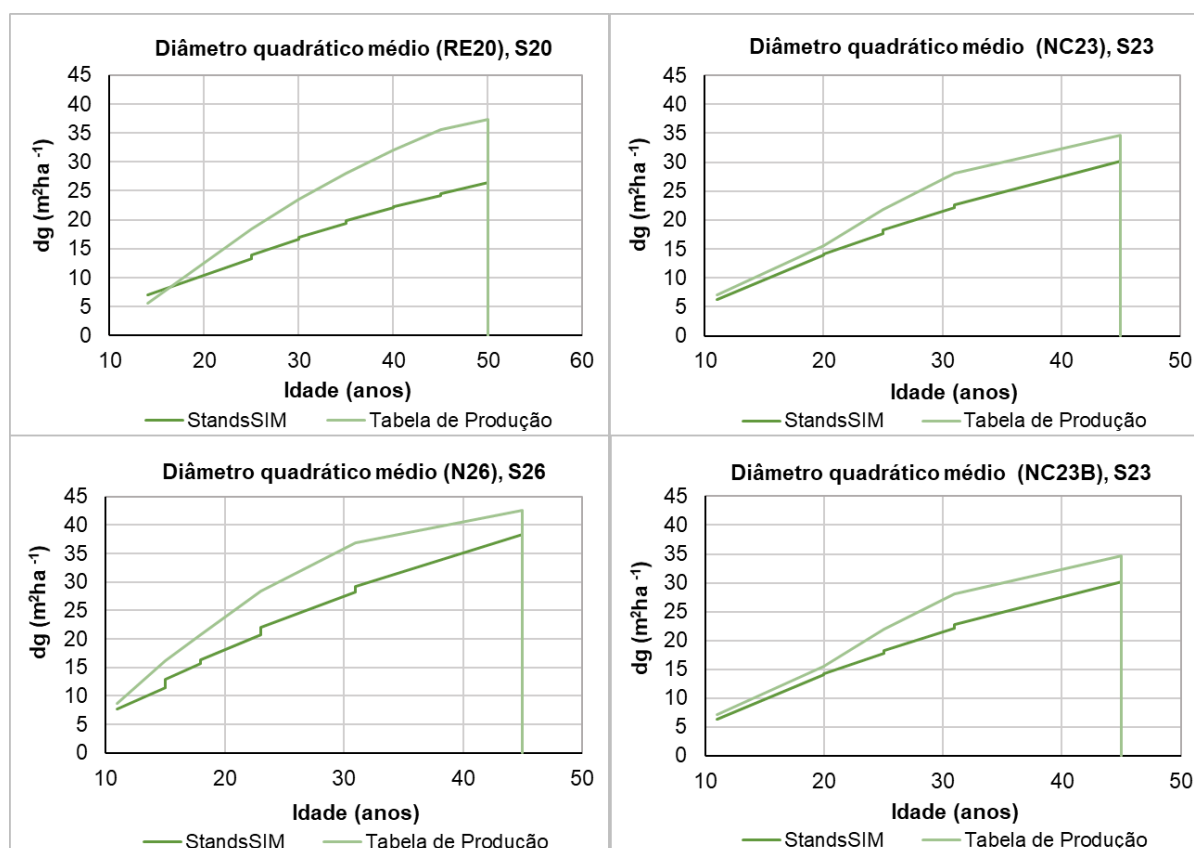


Figura 23: Análise dos resultados das simulações para o diâmetro quadrático médio dos povoamentos pelo StandsSIM e os resultados das tabelas de produção de Patrício (2006).

Deste modo, relativamente às simulações da tabela de produção, no período entre os 40 e 50 anos da parcela RE20 (Figura 22), onde se nota um crescimento mais acentuado, este é coerente com o aumento no volume principal no período correspondente. No caso da parcela N26, também se verifica facilmente a mesma concordância de um crescimento superior, nos anos 30, em que no volume principal este mesmo crescimento é verificado antes do desbaste.

A análise de resultados das simulações da altura média, mostra-se na Figura 24, que embora o cálculo desta variável utilize a altura dominante, demonstra que a variação nestes gráficos será menos influente que o diâmetro quadrático médio. Ainda assim, a desigualdade verificada nos vários momentos é coerente com a evolução do volume principal do povoamento, na Figura 23.

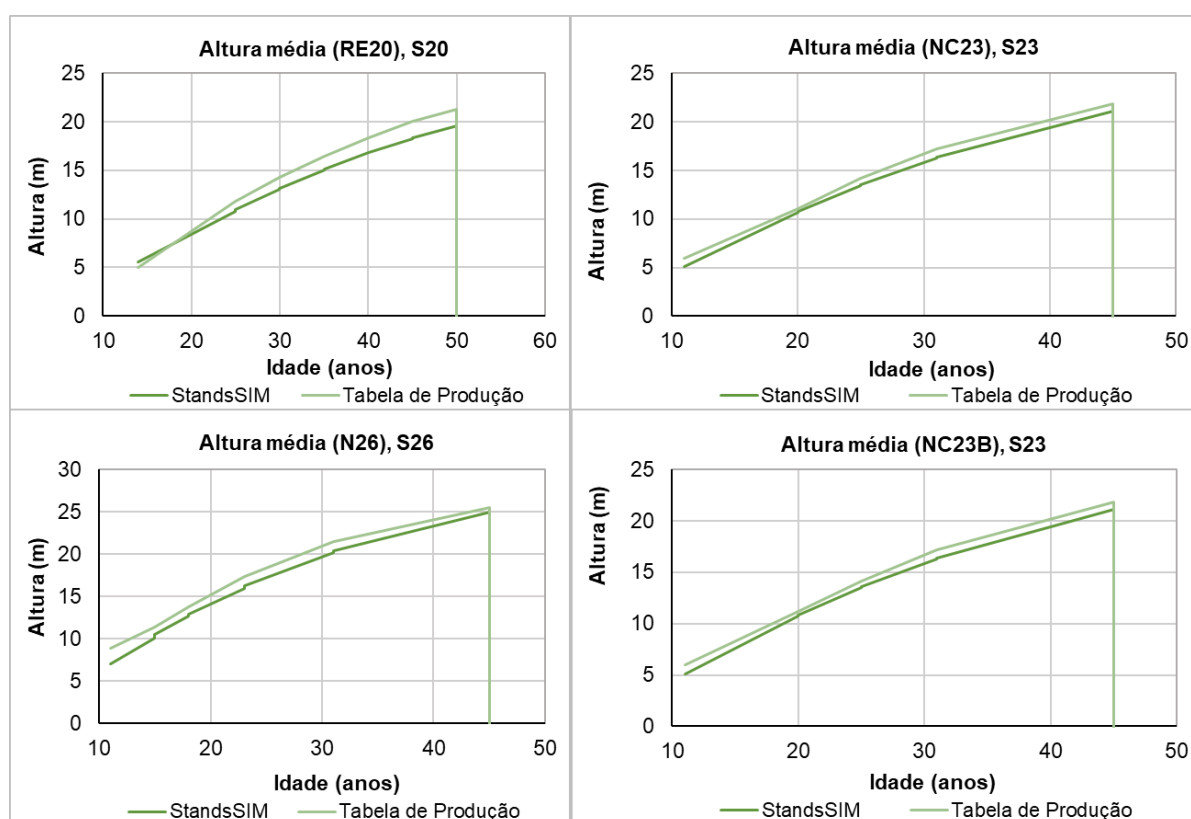


Figura 24: Análise dos resultados das simulações para a altura média dos povoamentos pelo StandsSIM.md e os resultados das tabelas de produção de Patrício (2006).

Na Figura 25, verifica-se os resultados da altura dominante que mostra a pouca influência que poderá ter para a diferença nos resultados das simulações no volume principal do povoamento, nos gráficos da Figura 22.

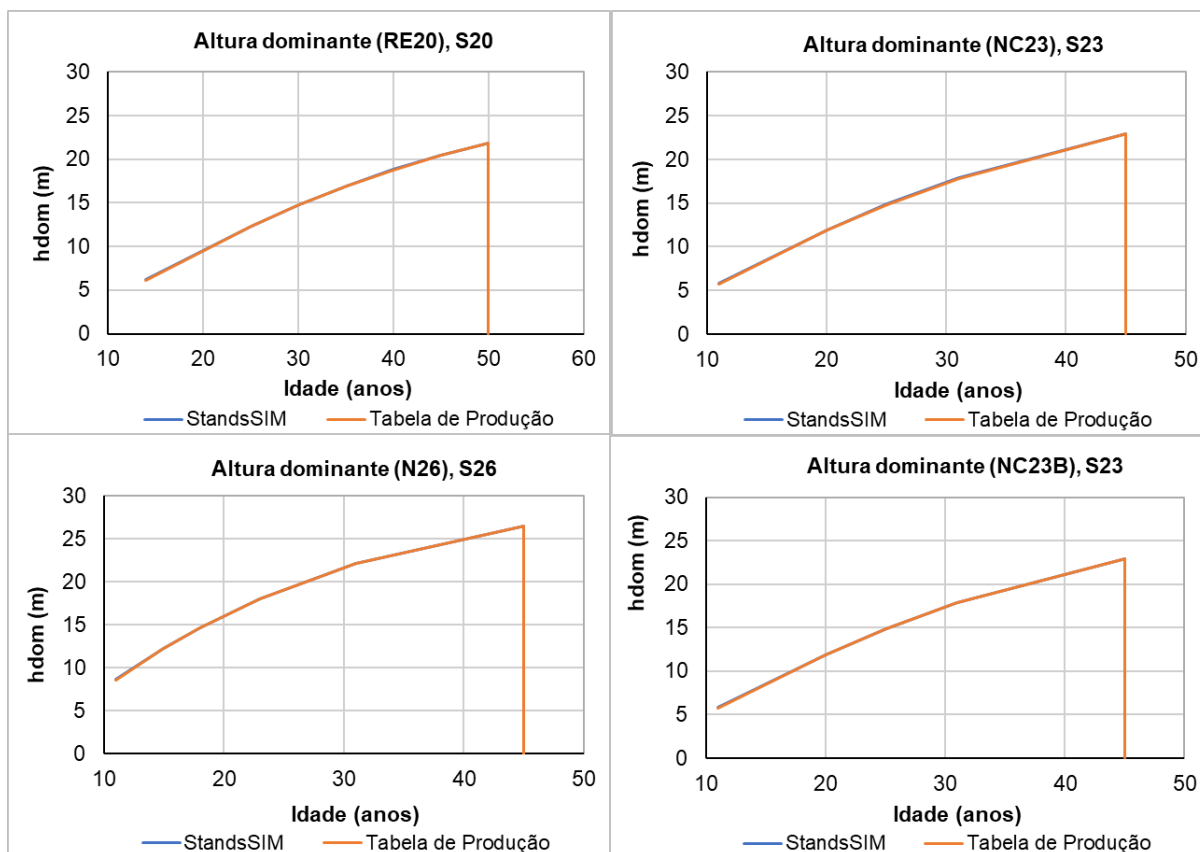


Figura 25: Análise dos resultados das simulações para a altura dominante dos povoamentos pelo StandSIM e os resultados das tabelas de produção de Patrício (2006).

Desta maneira, é possível afirmar que uma das razões para as diferenças mais acentuadas verificadas nas simulações devem-se ao uso de fórmulas de cálculo do diâmetro quadrático médio.

### 3.3. Análise económica

Para uma correta análise económica, procedeu-se à contabilização dos custos das operações que teriam sido realizadas se as parcelas teste tivessem sido simuladas desde a idade zero (idades das parcelas entre os 10 e os 15 anos, ver Tabela 16). Tal como foi possível verificar ao longo deste trabalho, as parcelas trabalhadas são de parcelas que foram instaladas anteriormente pelo que o simulador não contabiliza o custo das operações até à idade com que se iniciou a simulação. Deste modo, o simulador só produz resultados a partir da idade a que foram introduzidos os dados de inventário.

De acordo com o objetivo deste trabalho, apenas foram realizadas breves observações sobre os resultados económicos, não se tratando de uma análise económica extensiva. Desta maneira, executou-se uma verificação de que os resultados das simulações estariam de

acordo com o solicitado ao simulador, focando nos aspetos mais pertinentes a futuros utilizadores.

A Tabela 25 resume a análise económica das parcelas teste incluindo o custo de instalação. Ressalvando que além dos custos de instalação (ano 0), do ano 1 até aos 14 ou 11 anos (idades das parcelas) os valores correspondentes de consolidação e manutenção, onde são incluídas operações como retanchar, podas de formação, desramações e controlo da vegetação espontânea, entre outras, não sendo contidos no valor atual líquido no ano do corte final. É de notar que a idade do corte final varia da primeira parcela (RE20) em que a idade é de 50 e as restantes é de 45 anos.

*Tabela 25: Resumo da análise económica realizado para as parcelas teste.*

Parcelas	RE20	NC23	NC23B	N26
<b>S</b>	<b>20.4 m</b>	<b>22.9 m</b>	<b>22.9 m</b>	<b>26.5 m</b>
<b>N inicial (árv/ha)</b>	1517	820	820	1473
<b>Receitas e despesas atualizadas</b>				
<b>Custo de instalação<sup>6</sup></b>	<b>-2512.69 €</b>	<b>-2067.54 €</b>	<b>-2067.54 €</b>	<b>-2394.04 €</b>
<b>1º Desbaste</b>	37.60 €	10.20 €	19.90 €	20.30 €
<b>2º Desbaste</b>	143.30 €	330.80 €	215.20 €	86.60 € <sup>7</sup>
<b>3º Desbaste</b>	273.20 €	663.30 €	652.70 €	780.90 €
<b>4º Desbaste</b>	303.40 €	-	-	1675.50 €
<b>5º Desbaste</b>	401.90 €	-	-	-
<b>Corte final</b>	3301,70 €	4683.80 €	4746.40 €	7227.10 €
<b>VAL</b>	3894.40 €	4546.10 €	4492.20 €	8825.00 €
<b>N final (árv/ha)</b>	383	303	303	197
<b>Valor Potencial do Solo (VPS)</b>	<b>-2 393.92 €</b>	<b>-6 180.34 €</b>	<b>-6 180.34 €</b>	<b>-7 954.92 €</b>

Na Tabela 25, mostra a variação das parcelas quanto ao valor potencial do solo e como esperado os valores das parcelas com S superiores também o são quanto ao valor da variável y. Assim, os rendimentos das parcelas são proporcionais aos valores de S.

<sup>6</sup> Os custos de instalação para cada parcela, apenas como dado de referência de custo que seria necessário para a instalação das parcelas em questão. Sendo este um custo no ano 0, seria necessário ainda os custos do ano 1 e manutenção (a partir do ano 2) até à idade a que estas parcelas são caracterizadas na Tabela 16.

<sup>7</sup> Este desbaste, em particular nesta parcela, coincide com a operação de limpeza de vegetação, traduzindo-se num valor atual líquido inferior às parcelas anteriores.

Sumariamente, é de referir que nestas simulações, em termos monetários, não foram tidas em conta valores como, o custo de aquisição da propriedade e eventuais subsídios aos quais os gestores/proprietários poderão ter acesso. É de mencionar também que, dada a pequena dimensão de grande parte das áreas de castanheiro, os valores de subcontratação dos serviços florestais (preparação de terreno, desbastes, podas, entre outros) não conseguem ser competitivos a uma escala pequena dificultando a gestão destas áreas.

#### **4. Considerações finais**

O objetivo deste trabalho consistiu na implementação de um modelo de crescimento do castanheiro no simulador da floresta StandsSIM.md.

Ao longo do trabalho, foi possível fazer uma revisão bibliográfica dos modelos de silvicultura recomendados para a espécie, uma análise detalhada da estrutura interna do simulador e uma pesquisa de equações de crescimento existentes bem como o desenvolvimento de um conjunto de equações que, uma vez programadas em FORTRAN, deram origem ao modelo CASTANEA. Uma vez integrado no StandsSIM.md, o modelo foi avaliado, tendo os resultados obtidos mostrado coerência com resultados semelhantes apresentados na bibliografia consultada.

A inclusão do modelo CASTANEA no simulador não só valoriza o simulador como veio disponibilizar aos gestores florestais uma ferramenta que lhes permite simular o crescimento desta espécie tendo em conta a gestão praticada. Desta forma o StandsSIM.md poderá vir a auxiliar a realização de planos de gestão e/ou análises económicas para o castanheiro. Ainda assim, há melhorias a fazer no modelo de forma a melhorar a sua precisão e flexibilidade. Os próximos passos, já fora do âmbito desta tese, relativamente à melhoria do modelo CASTANEA passarão por:

- Reajustar as equações de volume como um sistema de equações para garantir a compatibilidade entre elas e melhorar a capacidade preditiva do modelo;
- Desenvolver o módulo de inicialização de modo a permitir a simulação de novas plantações, através do desenvolvimento de uma distribuição de alturas para árvores jovens às quais se atribuirá posteriormente um diâmetro;
- Melhorar o módulo de gestão permitindo ao utilizador escolher se pretende definir os modelos de silvicultura com base na altura dominante ou na idade do povoamento, evitando que sejam feitos cálculos adicionais no *Excel* para determinar a que idades se observam as alturas dominantes de referência que determinam a realização de algumas operações.

Por fim, e para facilitar e incentivar a utilização do simulador devem organizar-se workshops com os proprietários para lhes ensinar a utilizar a ferramenta e preparar um manual de utilização para o utilizador sem os detalhes científicos e técnicos presentes na tese.



## 5. Referências bibliográficas

Alves AM, 1966. Princípios fundamentais da teoria da explorabilidade financeira. Separata do Vol. XXIX dos Anais do ISA, Tapada da Ajuda, Lisboa: 71-75.

Barreiro S, Rua J, Tomé M, 2016. StandsSIM-MD: a Management Driven forest SIMulator. Forest Systems. 25(2), eRC07. URL: <https://www.repository.utl.pt/bitstream/10400.5/13746/1/REP-CEF-TomeM-8916-32776-1-PB.pdf>

Barreiro S, Tomé M, 2018. StandsSIM.md Simulator Handbook. Forest Models course. Lisboa, Portugal. 33p.

Bettinger P, Boston K, Siry J, Grebner D, 2009. Forest management and Planning. Ed. 1. Academic Press, Burlington. pp. 38.

Bourgeois, C, 1992. Le châtaignier un arbre, un bois. IDF, 1<sup>a</sup> ed., Paris, 331 p.

Bourgeois C, Sevrin E, Lemaire J, 2004. Le châtaignier un arbre, un bois [The sweet chestnut ; a tree, a wood]. IDF, 2nd edn, Paris, France, pp.347. [online] URL: <http://books.google.com/books?id=-KGxQ0ra-zUC>

Capelo J, Catry F, 2007. Árvores e Florestas de Portugal, Do Castanheiro ao Teixo, Cap III., Público Comunicação social SA, Lisboa, pp. 79-86.

Condés S, Sterba H, 2005. Derivation of compatible crown width equations for some important tree species of Spain. Forest Ecology and Management 217, 203-218. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112705004007>

Clutter JL, Fortson JC, Pienaar LV, Brister GH, Bailey RL, 1983. Timber management: a quantitative approach. Krieger Publishing Co., New York, USA, pp. 333. URL: <http://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19840691762>

CAOF, 2016a. Matriz de beneficiação. Comissão de Acompanhamento das Operações Florestais, Lisboa. URL: <http://www2.icnf.pt/portal/florestas/gf/prdflo/caof>

CAOF, 2016b. Matriz de (re) Arborização 2016. Comissão de Acompanhamento das Operações Florestais, Lisboa. URL: <http://www2.icnf.pt/portal/florestas/gf/prdflo/caof>

DGRF, 2006a. Plano Regional de Ordenamento Florestal do Nordeste Transmontano. Fase 1 – Bases de Ordenamento. Direção-Geral dos Recursos Florestais, Lisboa, Portugal. <http://www2.icnf.pt/portal/florestas/profs> (último acesso a 9 de janeiro de 2019)

DGRF, 2006b. Plano Regional de Ordenamento Florestal do Barroso e Padrela. Fase 1 – Bases de Ordenamento. Direção-Geral dos Recursos Florestais, Lisboa, Portugal. <http://www2.icnf.pt/portal/florestas/profs> (último acesso a 9 de janeiro de 2019)

DGRF, 2006c. Plano Regional de Ordenamento Florestal do Baixo Minho. Fase 1 – Bases de Ordenamento. Direção-Geral dos Recursos Florestais, Lisboa, Portugal. <http://www2.icnf.pt/portal/florestas/profs> (último acesso a 9 de janeiro de 2019)

DGRF, 2006d. Plano Regional de Ordenamento Florestal da Beira Interior Norte. Fase 1 – Bases de Ordenamento. Direção-Geral dos Recursos Florestais, Lisboa, Portugal. <http://www2.icnf.pt/portal/florestas/profs> (último acesso a 9 de janeiro de 2019)

DGRF, 2006e. Plano Regional de Ordenamento Florestal do Centro Litoral. Fase 1 – Bases de Ordenamento. Direção-Geral dos Recursos Florestais, Lisboa, Portugal. <http://www2.icnf.pt/portal/florestas/profs> (último acesso a 9 de janeiro de 2019)

DGRF, 2006f. Plano Regional de Ordenamento Florestal do Douro. Fase 1 – Bases de Ordenamento. Direção-Geral dos Recursos Florestais, Lisboa, Portugal. <http://www2.icnf.pt/portal/florestas/profs> (último acesso a 9 de janeiro de 2019)

Faixas SP, Palma JHN, Barreiro S, Paulo JA, Tomé M, 2012. sIMfLOR – Platform for the Portuguese forest simulators. Forest Systems. 21(3): 543-548. URL: <http://revistas.inia.es/index.php/fs/article/view/2951>

Gadow KV, Hui GY, 1999. Modelling forest development. Kluwer Academic Publisher, The Netherlands, pp. 222.

ICNF, 2013. IFN6 – Áreas dos usos do solo e das espécies florestais de Portugal continental. Resultados preliminares. [pdf]. 34 pp. Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas. Lisboa. Portugal. URL: <http://www.icnf.pt/portal/florestas/ifn/resource/ficheiros/ifn/ifn6-res-prelimv1-1>

ICNF, 2018. Tabela de taxas e preços de bens e serviços – atualizado ao dia 20/09/2018. Lisboa. Portugal. URL: <http://www2.icnf.pt/portal/icnf/serv/resource/doc/tax-serv/20180920-Tabela-precos.pdf>

Monteiro A, Almeida MH, Goes A, 2018. Plantações Florestais ISAPress, Lisboa.

Monteiro ML, Patrício MS, 2007. Árvores e Florestas de Portugal, Do Castanheiro ao Teixo, Cap IV., Público Comunicação social SA, Lisboa, pp. 51-78.

Monteiro, ML e Patrício, MS, 1997. O castanheiro modelos de gestão. Rev. Flor., IX, 4: 51-56.

Nunes L, Patrício MS, Cortez P, 2010. Manual de Boas Práticas em Espaços Verdes – 3.4 Manutenção de árvores. Câmara Municipal de Bragança, Bragança, pp. 115-117. URL: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/2929/1/ManualBoasPr%C3%A1ticasFINAL.pdf>

Parresol BR, 1999. Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. For. Sci. Vol. 45/4, p.573-593.

Patrício MS, 2006. Análise da Potencialidade Produtiva do Castanheiro em Portugal. Dissertação de doutoramento, ISA, Lisboa.

Patrício MS, Nunes L, 2017. Density management diagrams for sweet chestnut high Forest stands in Portugal. iForest 10: 865-870. – doi: 10.3832/for2411-010. URL: <https://iforest.sisef.org/pdf/?id=ifor2411-010>

Reineke LH, 1933. Perfecting a stand density index for even-aged forest. Journal of Agricultural Research 46: 627-638. URL: <https://naldc.nal.usda.gov/download/IND43968212/PDF>

Wilson FG, 1946. Numerical expression of stocking in terms of height. Journal of Forestry 44:758-761. URL: <https://academic.oup.com/jof/article-abstract/44/10/758/4707452?redirectedFrom=fulltext>

## **ANEXOS**



```

!Curva hipsométrica (Patricio 2006)
REAL FUNCTION h_Ct(d,hdom,ddom)
IMPLICIT NONE
REAL, PARAMETER :: b0=0.0607, b1=-0.0228, b2=-1.6676
REAL, INTENT (IN) :: d,hdom,ddom
!h_Ct=hdom*(1.+b0*exp(b1*hdom))*(1.-exp((b2*d)/hdom))
h_Ct=hdom/(1+0.5167*hdom*(1/d-1/ddom))
END FUNCTION h_Ct

!*****
!altura mercantil (Filipe 2019)
REAL FUNCTION hm_Ct(h,d)
IMPLICIT NONE
REAL, INTENT (IN) :: h,d
IF (d.LT.23.17) THEN
    hm_Ct=0.8225*h
ELSE
    hm_Ct=0.02044*h-1.76603
END IF
END FUNCTION

!*****
!***** EQUAÇÕES DE VOUME DA ÁRVORE
!*****
!volume total com casca e com cepo
REAL FUNCTION v_Ct(d,h)
IMPLICIT NONE
REAL, INTENT (IN) :: d,h
v_Ct=0.000052*(d**2.*h)**0.95710
end function v_Ct

!volume total sem casca e com cepo (Filipe 2019)
REAL FUNCTION vu_Ct(d,h)
IMPLICIT NONE
REAL, INTENT (IN) :: d,h
Real :: v
v=v_Ct(d,h)
vu_Ct=0.8883*v**1.0159
END FUNCTION vu_Ct

!volume do cepo com casca (Filipe 2019)
REAL FUNCTION vst_Ct(v,hst)
IMPLICIT NONE
REAL, INTENT (IN) :: v,hst
vst_Ct=0.1526*v**0.912*hst**1.0144
END FUNCTION vst_Ct

!volume do cepo sem casca (Filipe 2019)
REAL FUNCTION vust_Ct(v,hst)
IMPLICIT NONE
REAL, INTENT (IN) :: v,hst
real :: vst
vst=vst_Ct(v,hst)
vust_Ct=0.9189*vst**1.0044
END FUNCTION vust_Ct

!equação de volume percentual com casca em função do diâmetro de despona di
REAL FUNCTION vdi_Ct(v,di,d)
IMPLICIT NONE

```

```

REAL, INTENT (IN) :: di,d,v
vdi_Ct= v*exp(-1.4039*(di/d))**4.3716
END FUNCTION vdi_Ct

!equação de volume percentual sem casca em função do diâmetro de despona di
REAL FUNCTION vudi_Ct(vu,di,d)
IMPLICIT NONE
REAL, INTENT (IN) :: di,d,vu
vudi_Ct=vu*exp(-1.3858*(di/d))**5.5046)
END FUNCTION vudi_Ct

!equação de volume percentual com casca em função da altura de despona hi
REAL FUNCTION vhi_Ct(v,h,hi)
IMPLICIT NONE
REAL, INTENT (IN) :: hi,h,v
real :: hm, hi_
hm=0.2448*h**1.3833
if (hi.gt.hm) then
    hi_=hm
else
    hi_=hi
endif
vhi_Ct=v*(1-((h-hi_)/h)**2.9340)
END FUNCTION vhi_Ct

!equação de volume percentual sem casca em função da altura de despona hi
! e da altura mercantil
REAL FUNCTION vuhi_Ct(vu,h,hi)
IMPLICIT NONE
REAL, INTENT (IN) :: hi,h,vu
real :: hm,hi_
hm=0.2448*h**1.3833
if (hi.gt.hm) then
    hi_=hm
else
    hi_=hi
endif
vuhi_Ct=vu*(1-(1-exp(-0.8031*tan((1.5735*hm**-0.0644)*(hm-hi_)/hm)))*1.5762)
END FUNCTION vuhi_Ct

!equação de perfil do tronco com casca
REAL FUNCTION di_Ct(d,h,hi)
IMPLICIT NONE
REAL, PARAMETER :: di0=1.0140, di1=2.0587, di2=0.5236, di3=407.6000, di4=0.9387
REAL, PARAMETER :: vdi0=0.000052, vdi1=0.95710
REAL, INTENT (IN) :: d,h,hi
REAL :: k,vpt,z,I1,I2,Pi
Pi=4*atan(1.)
vpt=vdi0*((d**2)*h)**vdi1
z=(h-hi)/h
k=Pi/(4*(100)**2)
IF (z.LT.0.5236) THEN
    I1=0
ELSE
    I1=1
ENDIF
IF (z.LT.0.9387) THEN
    I2=0
ELSE

```

```

I2=1
END IF
di_Ct=((vpt/(k*h))*(2.*z+di0*(3.*z**2.-2.*z)-(di1*(z-di2)**2.)*I1+di3*((z-
di4)**2.)*I2))*0.5
END FUNCTION di_Ct

!diâmetro sem casca a qualquer altura hi
REAL FUNCTION dui_Ct(di)
IMPLICIT NONE
REAL, INTENT (IN) :: di
dui_Ct=0.8794*di**1.0207
END FUNCTION dui_Ct

! *****
! função de autodesbaste (Patrício 2006)

real function Nmax_Ct(dg)
implicit none
real, intent (in) :: dg

Nmax_Ct=exp(14.07526-2.17687*log(dg))

end function Nmax_Ct

!regime de desbaste
!REAL FUNCTION N2_Ct(N1,SI,t2,t1)
!IMPLICIT NONE
!REAL, PARAMETER :: nc0=-0.0155, nc1=0.1316
!REAL, INTENT (IN) :: N1,SI,t1,t2
!N2_Ct=N1*(exp(nc0*SI*(t2-t1)-nc1*SI*log(t2/t1)))
!END FUNCTION N2_Ct

!equação do volume total do povoamento
REAL FUNCTION Vt_Ct(hdom)
IMPLICIT NONE
REAL, PARAMETER :: vt0=-1.90227, vt1=2.53771
REAL, INTENT (IN) :: hdom
Vt_Ct=exp(vt0)*hdom**vt1
END FUNCTION Vt_Ct

! *****
! ***** Crown width (Condes & Sterba 2005 - equation 3) and crown ratio
REAL FUNCTION cw_Ct(d,h)
IMPLICIT NONE
REAL, PARAMETER :: f0=-0.497, f1=0.812, f2=-0.0199, f3=-0.237
REAL, INTENT (IN) :: d,h
cw_Ct=exp(f0+f1*log(d)+f2*log(h)+f3*h)
END FUNCTION cw_Ct

! *****
! ***** Equações de Biomassa
!Calcula Biomassa folhas + flores - w1
REAL FUNCTION wlarv_Ct(d,h)
IMPLICIT NONE
REAL, PARAMETER :: ft0=0.00033
REAL, INTENT (IN) :: d,h
wlarv_Ct=ft0*(d**2)*h
END FUNCTION wlarv_Ct

```



```

!Calcula Biomassa ramos vivos - wbrarv
REAL FUNCTION wbrarv_Ct(d,h)
IMPLICIT NONE
REAL, PARAMETER :: rv0=0.00440
REAL, INTENT (IN) :: d,h
wbrarv_Ct=rv0*(d**2)*h
END FUNCTION wbrarv_Ct

!Calcula Biomassa Casca - wbarv
REAL FUNCTION wbarv_Ct(d)
IMPLICIT NONE
REAL, PARAMETER :: ca0=0.06574, ca1=1.84096
REAL, INTENT (IN) :: d
wbarv_Ct=ca0*d**ca1
END FUNCTION wbarv_Ct

!Calcula Biomassa lenho - wwarv
REAL FUNCTION wwarv_Ct(d,h)
IMPLICIT NONE
REAL, PARAMETER :: l0=0.02044, l1=1.76603, l2=1.16402
REAL, INTENT (IN) :: d,h
wwarv_Ct=l0*(d**l1)*(h**l2)
END FUNCTION wwarv_Ct

END MODULE Fun_Castanea

```

## ANEXO II – FMAs

### FMA para uma estação cujo S é 20

Ano	Operação	Detalhe da operação
1	Sacha e amontoa	
	Plantação de resinosas e folhosas em contentor	plantas por ha: 1250
	Ripagem a 3 m com 3 dentes a $\geq 60$ cm	
	Subsolagem a 3 m com 3 dentes	
	Lavoura contínua	
2	Retanchar de resinosas e folhosas em contentor	% retanchar: 10.0
4	Limpeza de mato com corta matos	
8	Limpeza de mato com corta matos	
9	Podas de formação em árvores jovens	poda de formação em 90 % das árvores
12	Limpeza de mato com corta matos	
14	Podas de formação em árvores jovens	poda de formação em 20 % das árvores
	Desramação em árvores jovens	desramação em 20 % das árvores
	Seleção de árvores de futuro	
17	Desramação em árvores jovens	desramação em 20 % das árvores
19	Limpeza de mato com corta matos	
20	Desramação em árvores jovens	desramação em 20 % das árvores
25	Redução de densidade em povoamentos de folhosas, medianamente desenvolvidos (> 8 anos)	tipo de desbaste: desbaste seletivo
		critério de desbaste - fator de Wilson: 0.27
28	Limpeza de mato com corta matos	
30	Redução de densidade em povoamentos de folhosas, medianamente desenvolvidos (> 8 anos)	tipo de desbaste: desbaste seletivo
		critério de desbaste - fator de Wilson: 0.26
35	Redução de densidade em povoamentos de folhosas, medianamente desenvolvidos (> 8 anos)	tipo de desbaste: desbaste seletivo
37	Limpeza de mato com corta matos	
		critério de desbaste - fator de Wilson: 0.26
40	Redução de densidade em povoamentos de folhosas, medianamente desenvolvidos (> 8 anos)	tipo de desbaste: desbaste seletivo
		critério de desbaste - fator de Wilson: 0.25
45	Redução de densidade em povoamentos de folhosas, medianamente desenvolvidos (> 8 anos)	tipo de desbaste: desbaste seletivo
		critério de desbaste - fator de Wilson: 0.25
46	Limpeza de mato com corta matos	
50	Corte final	

FMA para uma estação cujo S é 23

Ano	Operação	Detalhe da operação
1	Sacha e amontoa	
	Plantação de resinosas e folhosas em contentor	plantas por ha: 1250
	Ripagem a 3 m com 3 dentes a $\geq 60$ cm	
	Subsolagem a 3 m com 3 dentes	
	Lavoura contínua	
2	Retanchar de resinosas e folhosas em contentor	% retanchar: 10.0
4	Limpeza de mato com corta matos	
7	Podas de formação em árvores jovens	poda de formação em 90 % das árvores
8	Limpeza de mato com corta matos	
11	Podas de formação em árvores jovens	poda de formação em 37 % das árvores
	Desramação em árvores jovens	desramação em 37 % das árvores
	Seleção de árvores de futuro	
12	Limpeza de mato com corta matos	
14	Desramação em árvores jovens	desramação em 37 % das árvores
17	Desramação em árvores jovens	desramação em 37 % das árvores
	Limpeza de mato com corta matos	
20	Redução de densidade em povoamentos de folhosas, medianamente desenvolvidos (> 8 anos)	tipo de desbaste: desbaste seletivo
		critério de desbaste - fator de Wilson: 0.31
21	Limpeza de mato com corta matos	
25	Redução de densidade em povoamentos de folhosas, medianamente desenvolvidos (> 8 anos)	
		critério de desbaste - fator de Wilson: 0.32
28	Limpeza de mato com corta matos	
31	Redução de densidade em povoamentos de folhosas, medianamente desenvolvidos (> 8 anos)	tipo de desbaste: desbaste seletivo
		critério de desbaste - fator de Wilson: 0.32
37	Limpeza de mato com corta matos	
41	Redução de densidade em povoamentos de folhosas, medianamente desenvolvidos (> 8 anos)	tipo de desbaste: desbaste seletivo
		critério de desbaste - fator de Wilson: 0.32
50	Corte final	

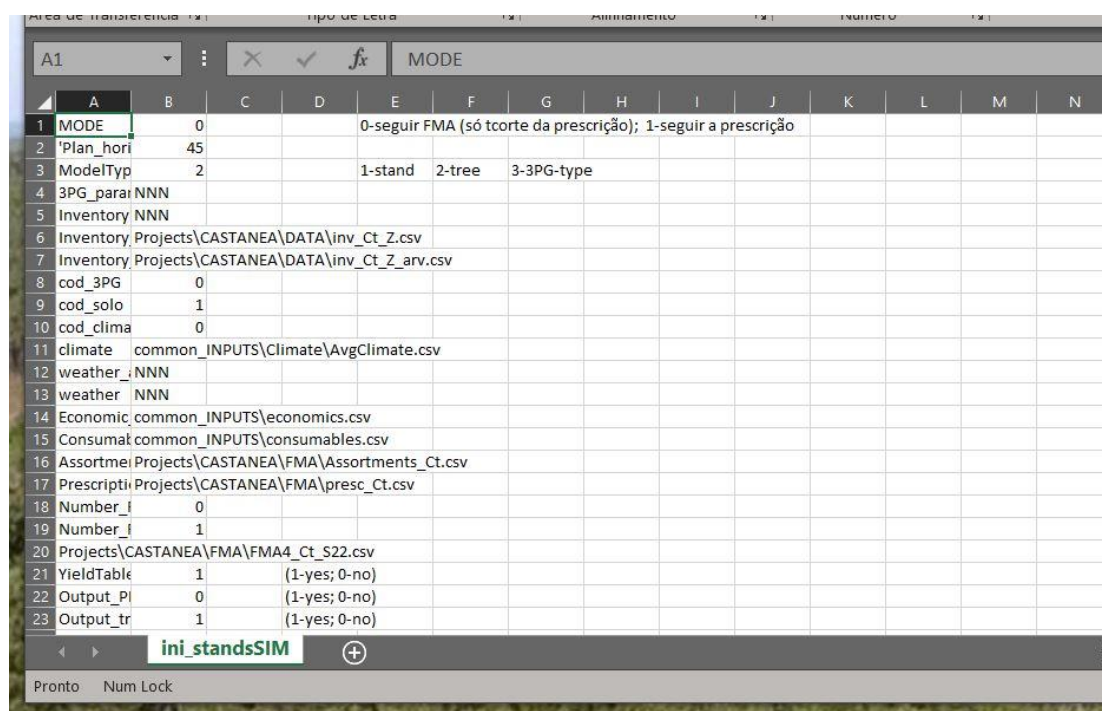
FMA para uma estação cujo S é 23 B

Ano	Operação	Detalhe da operação
1	Sacha e amontoa	
	Plantação de resinosas e folhosas em contentor	plantas por ha: 1250
	Ripagem a 3 m com 3 dentes a $\geq 60$ cm	
	Subsolagem a 3 m com 3 dentes	
	Lavoura contínua	
2	Retanchar de resinosas e folhosas em contentor	% retanchar: 10.0
4	Limpeza de mato com corta matos	
7	Podas de formação em árvores jovens	poda de formação em 90 % das árvores
8	Limpeza de mato com corta matos	
11	Podas de formação em árvores jovens	poda de formação em 37 % das árvores
	Desramação em árvores jovens	desramação em 37 % das árvores
	Seleção de árvores de futuro	
12	Limpeza de mato com corta matos	
14	Desramação em árvores jovens	desramação em 37 % das árvores
17	Desramação em árvores jovens	desramação em 37 % das árvores
	Limpeza de mato com corta matos	
20	Redução de densidade em povoamentos de folhosas, medianamente desenvolvidos (> 8 anos)	tipo de desbaste: desbaste seletivo
		critério de desbaste - fator de Wilson: 0.34
21	Limpeza de mato com corta matos	
25	Redução de densidade em povoamentos de folhosas, medianamente desenvolvidos (> 8 anos)	
		critério de desbaste - fator de Wilson: 0.32
28	Limpeza de mato com corta matos	
31	Redução de densidade em povoamentos de folhosas, medianamente desenvolvidos (> 8 anos)	tipo de desbaste: desbaste seletivo
		critério de desbaste - fator de Wilson: 0.32
37	Limpeza de mato com corta matos	
41	Redução de densidade em povoamentos de folhosas, medianamente desenvolvidos (> 8 anos)	tipo de desbaste: desbaste seletivo
		critério de desbaste - fator de Wilson: 0.32
50	Corte final	

FMA para uma estação cujo S é 26

Ano	Operação	Detalhe da operação
<b>1</b>	Sacha e amontoa	
	Plantação de resinosas e folhosas em contentor	plantas por ha: 1250
	Ripagem a 3 m com 3 dentes a $\geq 60$ cm	
	Subsolagem a 3 m com 3 dentes	
	Lavoura contínua	
<b>2</b>	Retanchar de resinosas e folhosas em contentor	% retanchar: 10.0
<b>4</b>	Limpeza de mato com corta matos	
<b>5</b>	Podas de formação em árvores jovens	poda de formação em 90 % das árvores
<b>8</b>	Limpeza de mato com corta matos	
	Podas de formação em árvores jovens	poda de formação em 20 % das árvores
	Desramação em árvores jovens	desramação em 20 % das árvores
	Seleção de árvores de futuro	
<b>10</b>	Desramação em árvores jovens	desramação em 20 % das árvores
<b>13</b>	Limpeza de mato com corta matos	
	Desramação em árvores jovens	desramação em 20 % das árvores
<b>15</b>	Redução de densidade em povoamentos de folhosas, medianamente desenvolvidos (> 8 anos)	tipo de desbaste: desbaste seletivo
		critério de desbaste - fator de Wilson: 0.31
<b>18</b>	Redução de densidade em povoamentos de folhosas, medianamente desenvolvidos (> 8 anos)	
		critério de desbaste - fator de Wilson: 0.32
	Limpeza de mato com corta matos	
<b>23</b>	Redução de densidade em povoamentos de folhosas, medianamente desenvolvidos (> 8 anos)	tipo de desbaste: desbaste seletivo
		critério de desbaste - fator de Wilson: 0.32
	Limpeza de mato com corta matos	
<b>31</b>	Redução de densidade em povoamentos de folhosas, medianamente desenvolvidos (> 8 anos)	tipo de desbaste: desbaste seletivo
		critério de desbaste - fator de Wilson: 0.32
<b>41</b>	Limpeza de mato com corta matos	
<b>50</b>	Corte final	

## ANEXO III – Ficheiros de entrada, *inputs*



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	MODE	0			0-seguir FMA (só toorte da prescrição); 1-seguir a prescrição									
2	Plan_hori	45												
3	ModelTyp	2			1-stand	2-tree	3-3PG-type							
4	3PG_para	NNN												
5	Inventory	NNN												
6	Inventory	Projects\CASTANEA\DATA\inv_Ct_Z.csv												
7	Inventory	Projects\CASTANEA\DATA\inv_Ct_Z_arv.csv												
8	cod_3PG	0												
9	cod_solo	1												
10	cod_clima	0												
11	climate	common_INPUTS\Climate\AvgClimate.csv												
12	weather	NNN												
13	weather	NNN												
14	Economic	common_INPUTS\economics.csv												
15	Consumat	common_INPUTS\consumables.csv												
16	Assortme	Projects\CASTANEA\FMA\Assortments_Ct.csv												
17	Prescripti	Projects\CASTANEA\FMA\presc_Ct.csv												
18	Number_f	0												
19	Number_f	1												
20	Projects\CASTANEA\FMA\FMA4_Ct_S22.csv													
21	YieldTable	1			(1=yes; 0=no)									
22	Output_Pl	0			(1=yes; 0=no)									
23	Output_tr	1			(1=yes; 0=no)									

Figura AIII 1: Representação do ficheiro de configuração da simulação.

A1

id\_stand

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	
1	id_stand	Area ug	id_presc	tflag	CoordX	CoordY	id_meteo	Altitude	year	month	Composit	Plot_Type	Sp1	Sp2	Structure	S	Rotation	t	tst	tsd	Aplot	Narvp	
2	Z	1	1	0	348249	523748	121	750	2006	2	1puro	Povoamer	Ct	Ct	R		22.4	1	11	9999	9999	500.34	51
3																							
4																							
5																							
6																							
7																							
8																							
9																							
10																							
11																							
12																							
13																							
14																							
15																							
16																							
17																							
18																							
19																							
20																							
21																							
22																							
23																							

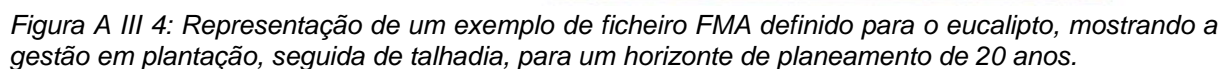
inv\_Ct\_Z

Pronto

Num Lock

Figura AIII 2: Representação do ficheiro de dados das árvores.

*Figura All 3: Representação do ficheiro com os dados do povoamento.*



## ANEXO IV – Análise dos resíduos studentizados vs. valores estimados

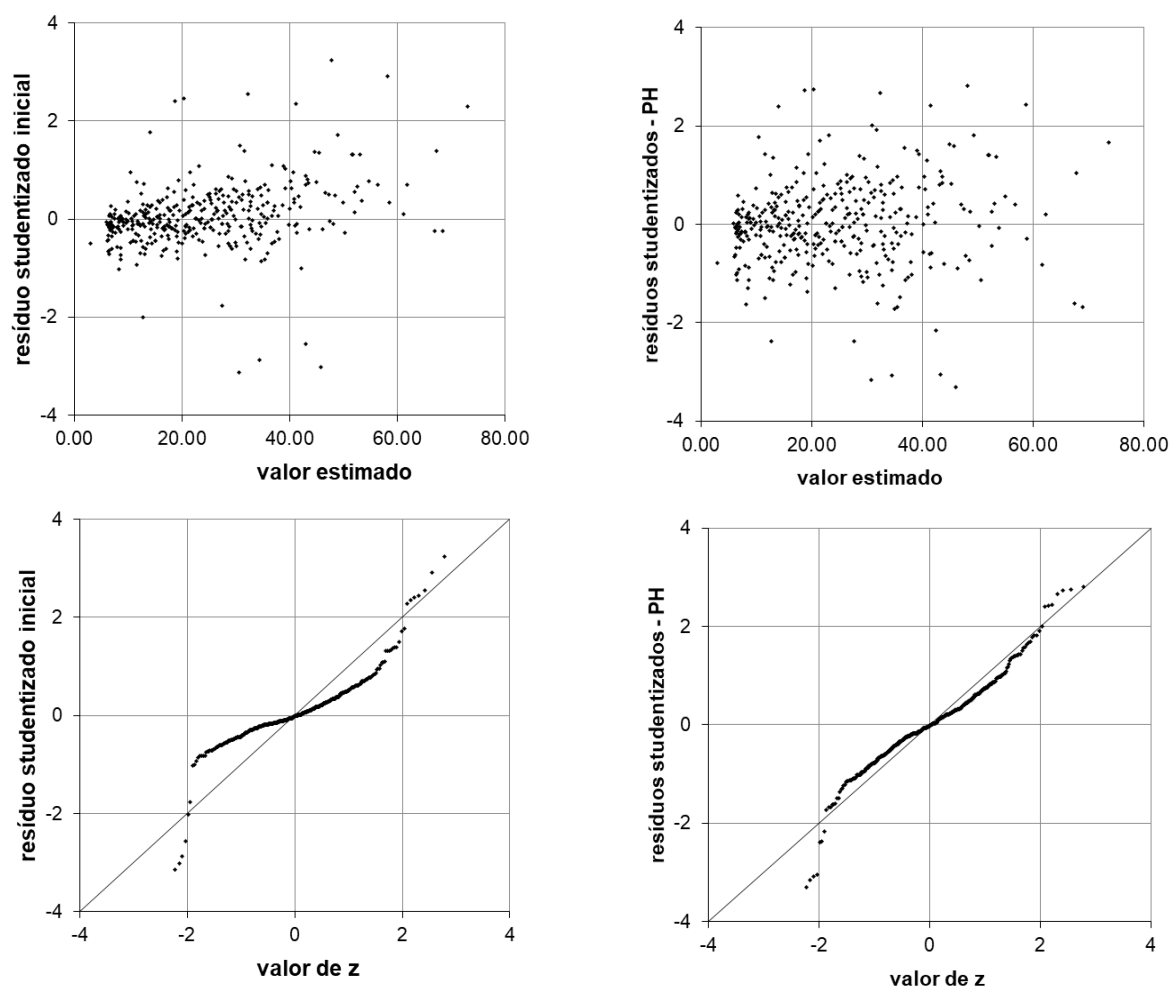


Figura AIV 1: Gráficos dos resíduos studentizados vs. valores estimados e em papel de probabilidades normal para o diâmetro sem casca a qualquer altura  $h_i$  e depois da ponderação e da aplicação do método de Huber (PH).



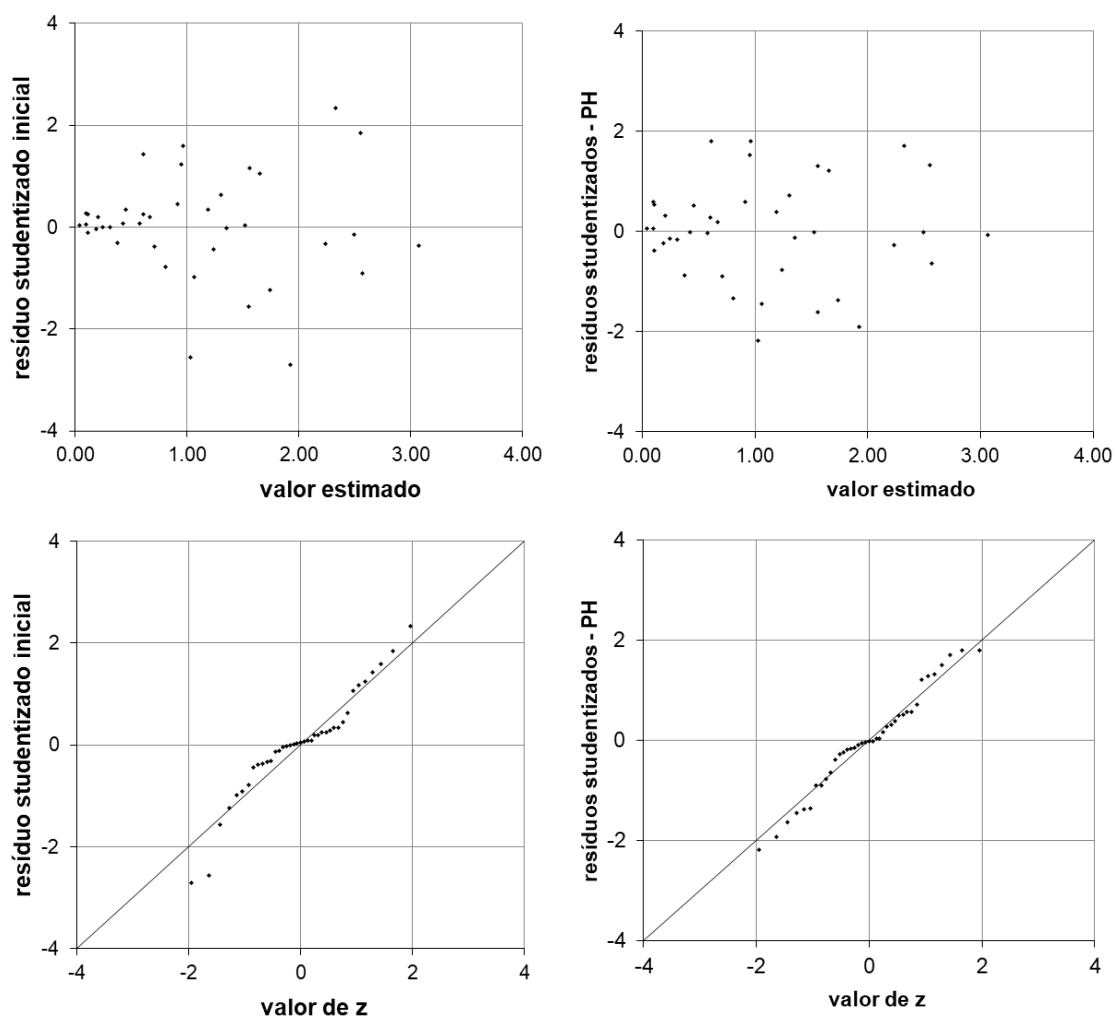


Figura AIV 2: Gráficos dos resíduos studentizados vs. valores estimados e em papel de probabilidades normal para o volume da árvore sem casca e depois da ponderação efetuada por aplicação do método de Huber (PH).

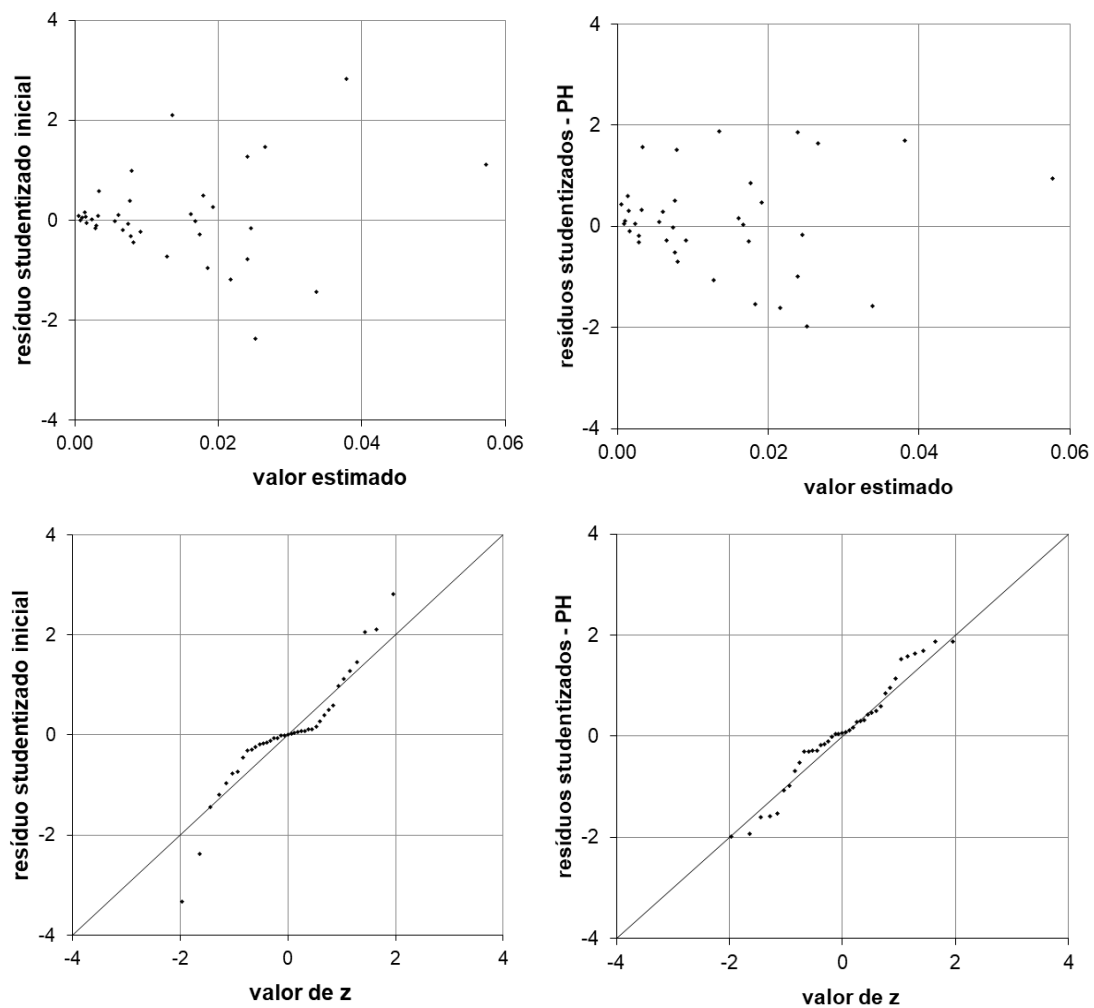


Figura AIV 3: Gráficos dos resíduos studentizados vs. valores estimados e em papel de probabilidades normal para o volume do cepo com casca e depois da ponderação efetuada por aplicação do método de Huber (PH).

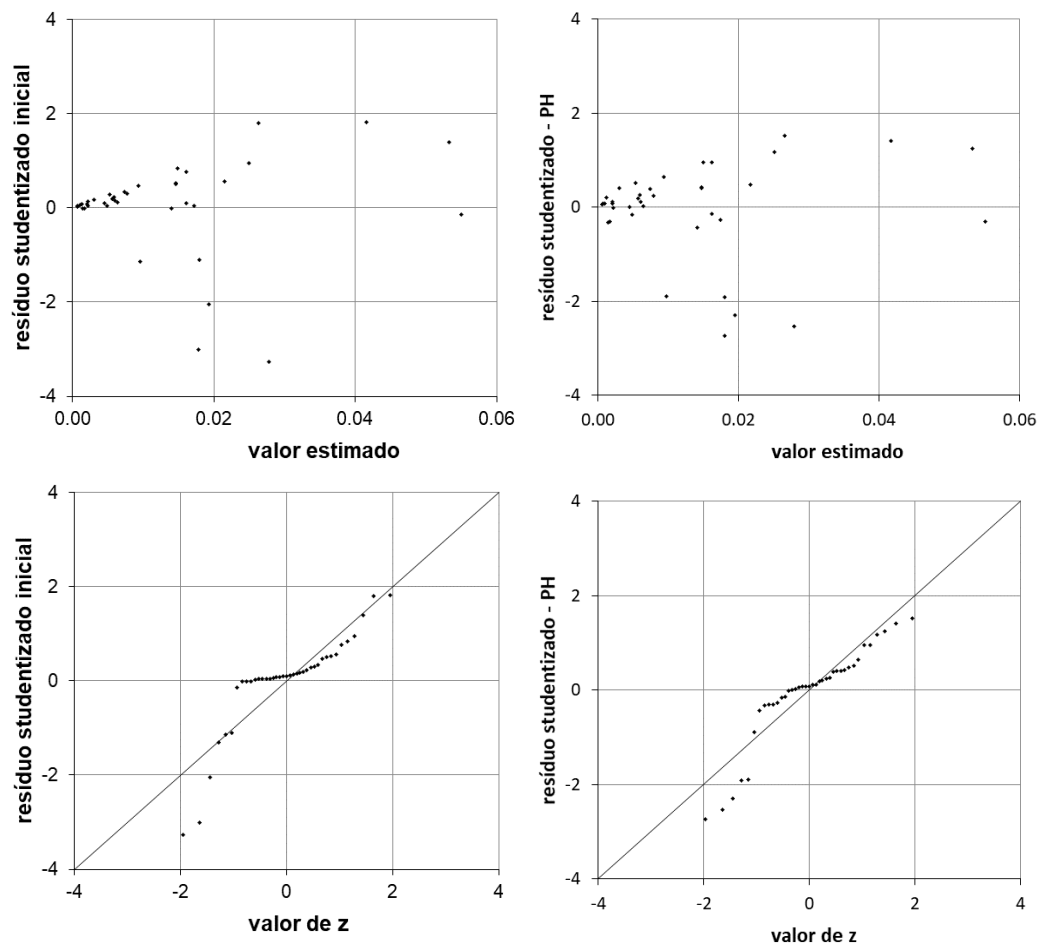


Figura AIV 4: Gráficos dos resíduos studentizados vs. valores estimados e em papel de probabilidades normal para o volume do cepo sem casca e depois da ponderação efetuada por aplicação do método de Huber (PH).

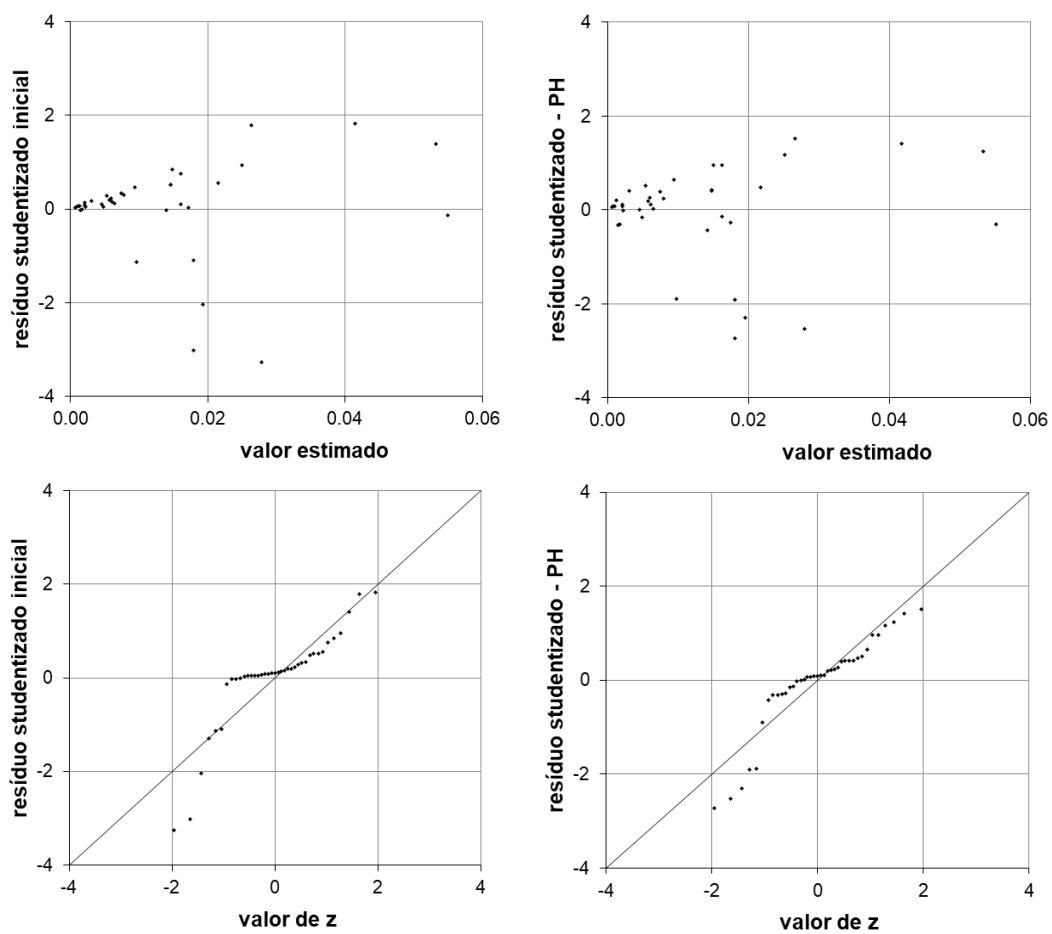


Figura AIV 5: Gráficos dos resíduos studentizados vs. valores estimados e em papel de probabilidades normal para a altura mercantil da árvore depois da ponderação por aplicação do método de Huber (PH).

## ANEXO V– Gráficos de variáveis provenientes do output das simulações

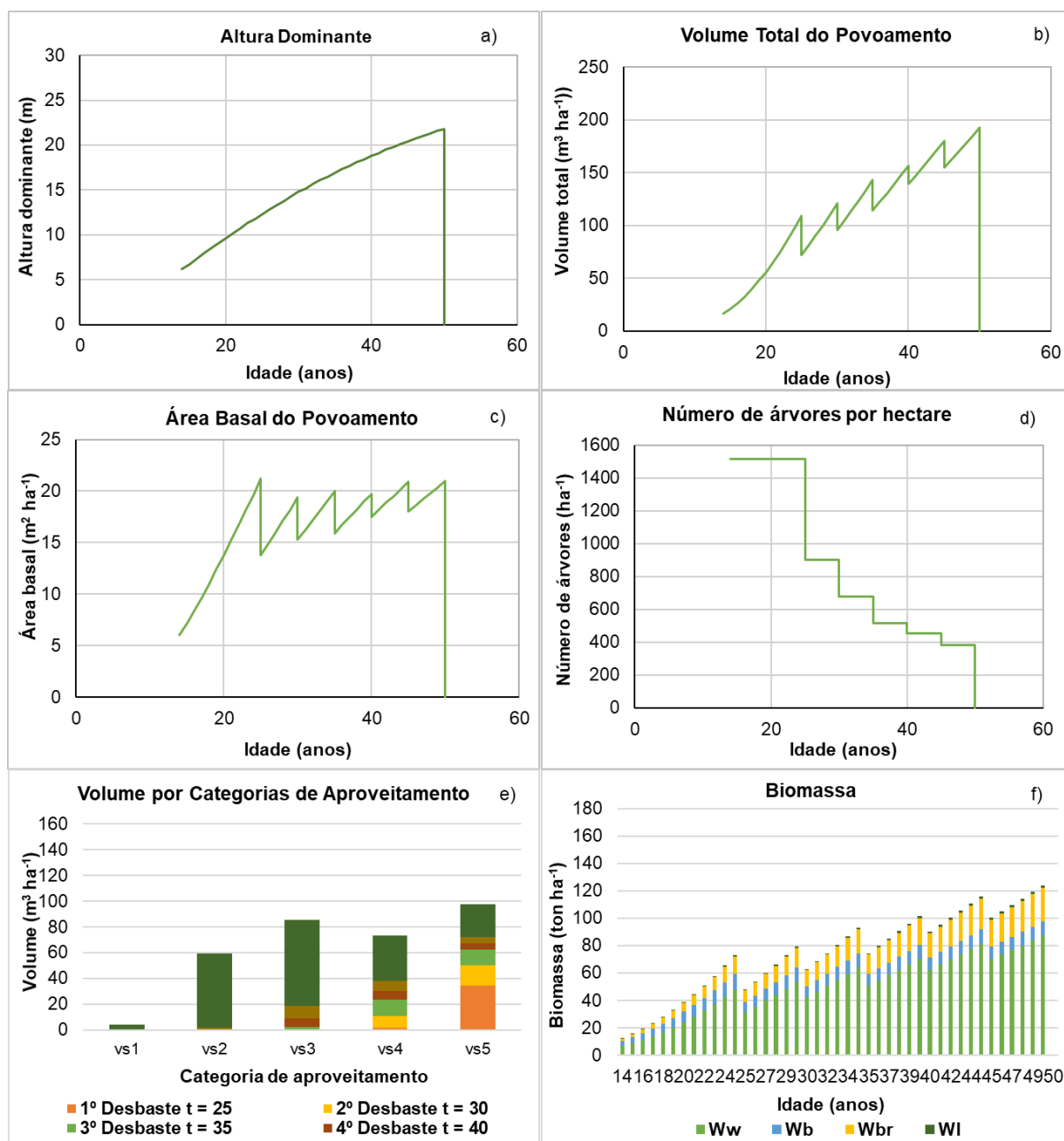


Figura AV 1: Gráficos com algumas das variáveis das simulações realizadas para o RE20.

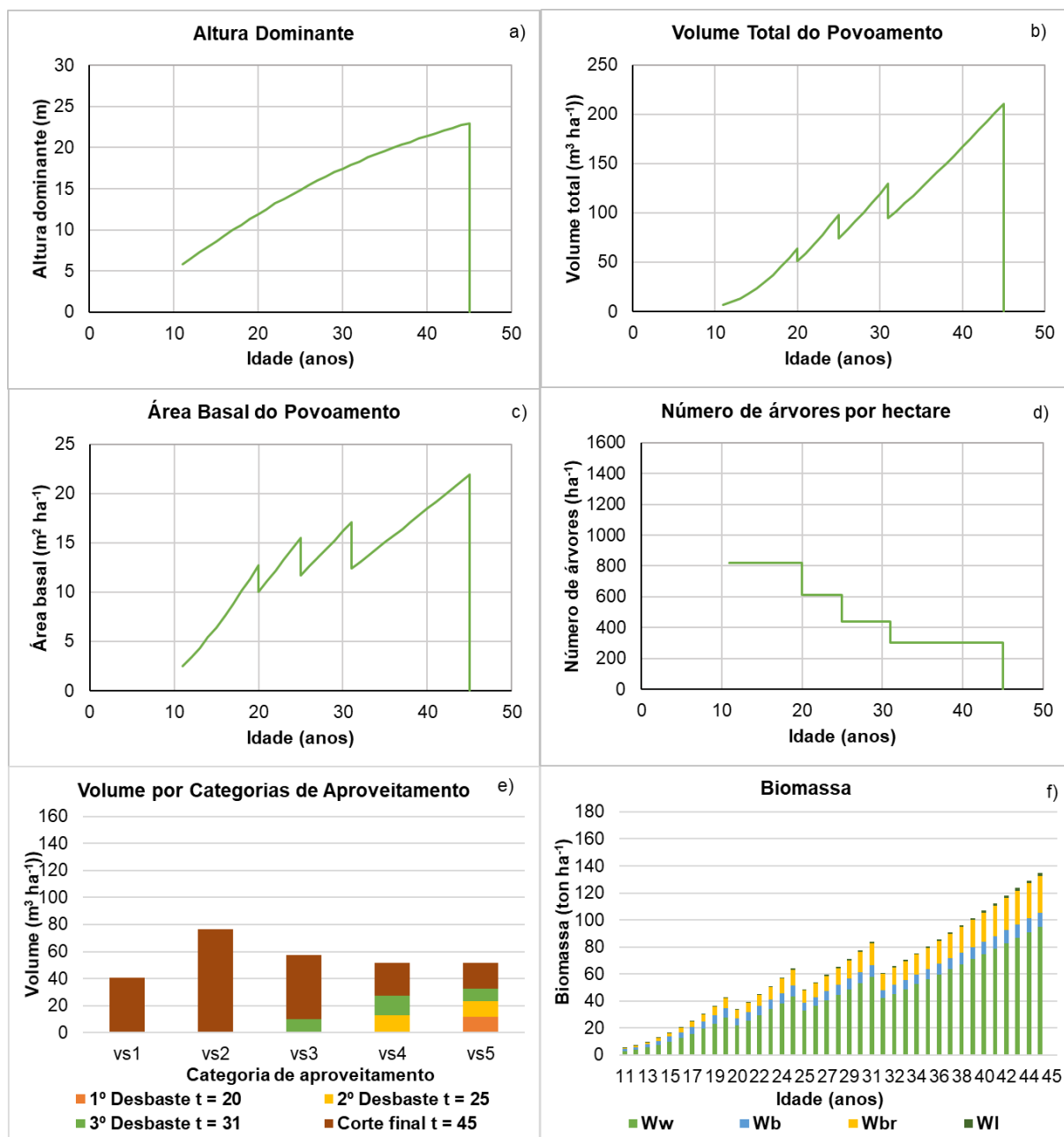


Figura AV 2: Gráficos com algumas das variáveis das simulações realizadas para o NC23B.

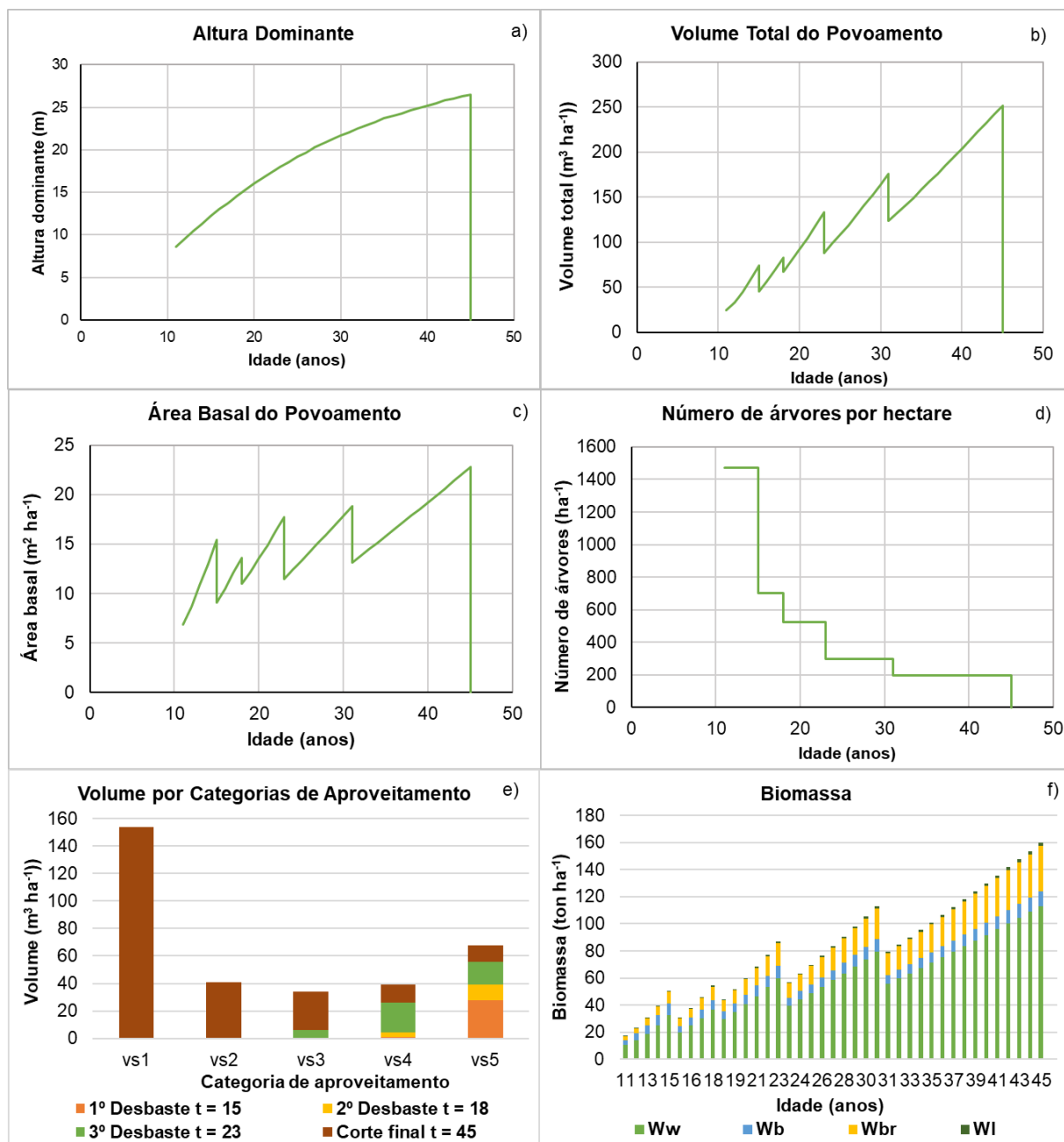


Figura AV 3: Gráficos com algumas das variáveis das simulações realizadas para o N26.